جلسه نهم

بارهای سیستم‌های قدرت

بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، مستلزم توانایی آنها در حفظ تعادل بین توانهای الکتریکی خروجی ژنراتورها و بارها الکتریکی سیستم است بنابراین مشخصه‌های بار تاثیر مهمی بر پایداری سیستم دارد.

مدلسازی بار

۱. مدلهای استاتیکی بار

مشخصه‌های بار را در هر زمان، بصورت توابعی جبری بر حسب دامنه و تغییرات ولتاژ و فرکانس بر آن لحظه بیان می‌کنند

نمایش وابستگی مشخصه‌های بار به ولتاژ:

$$P = P_0 (\bar{V})^a \qquad Q = Q_0 (\bar{V})^b$$

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

a: پارامتری که در بارهای ترکیبی بین ۰٫۵ تا ۱٫۸ است

b: " " " " " ۱٫۵ تا ۶ است

۲. مدلهای دینامیکی بار

مطالعات مربوط به پایداری و تغییرات پایداری بیشتر اغلب مستلزم مدلسازی دینامیکی است

بخش بزرگی از بارهای سیستم را موتورهای القایی تشکیل می‌دهند همین دلیل بررسی مشخصه‌هایشان در مدل دینامیکی اهمیت دارد.

جنبه‌های دیگر دینامیکی اجزای بار که لازم است در پایداری در نظر گرفته شود شامل موارد زیر است:

۱. خاموش شدن لامپهای تخلیه‌ای ۲. عملکرد رله‌های حفاظتی

۳. کنترل تبدیل‌کننده‌های بارهای ازمبیل توزیع و بریاش ۴. عکس‌العمل تنظیم‌کننده‌های توان زیرباز توزیع، تنظیم‌کننده‌های توان و مجموعه‌های خازنی با کنترل ولتاژ

مدلسازی موتور القایی

مدلسازی موتور القایی مانند ماشین سنکرون است به جز در موارد ذیل:

۱. روتور سلف متقارنی دارد ۲. سرعت روتور ثابت نیست و با بار تغییر می‌کند

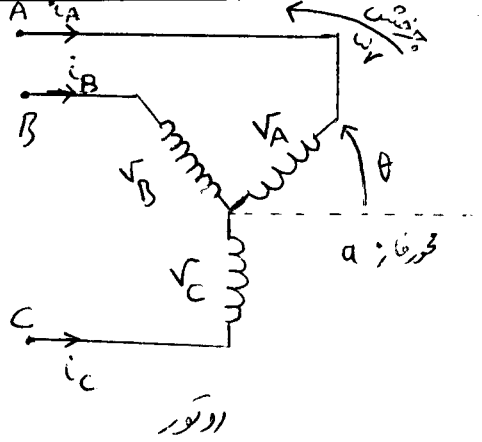
۳. هیچ منبع تحریکی به سیم‌پیچهای روتور متصل نیست

۴. سیم‌پیچهای روتور را می‌توان به صورت سیم‌پیچهای سه فاز مدل کرد

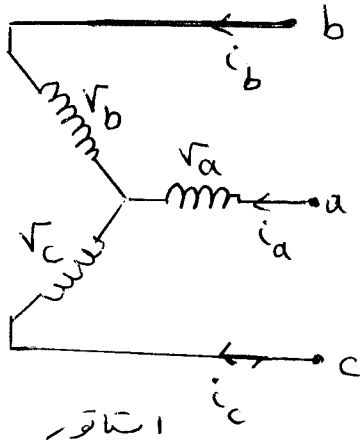
معادلات اساسی ماشین القایی

$\theta = \omega_r t$

$\theta = (1-S)\omega_s t$



روتور



استاتور

با چشم پوشی از اشباع، پسماند، جریان گردابی و با فرض هدیم خالص سیم‌پیچ معادلات زیر را داریم:

$v_A = p\psi_A + R_r i_A$ $\quad$ $v_a = p\psi_a + R_s i_a$

$v_B = p\psi_B + R_r i_B$ $\quad$ $v_b = p\psi_b + R_s i_b$ $\quad$ $p = \frac{d}{dt}$

$v_C = p\psi_C + R_r i_C$ $\quad$ $v_C = p\psi_C + R_c i_C$

در معادلات پایداری از تاثیر شکاف هوایی روتور چشم پوشی می‌کنیم. از این رو فقط اندوکتانس‌های متقابل تابع موقعیت روتور (θ) هستند

$$\psi_a = L_{aa} i_a + L_{ab}(i_b + i_c) + L_{aA}\left[i_A \cos\theta + i_B \cos(\theta + 120^\circ) + i_C \cos(\theta - 120^\circ)\right]$$

به طور مشابه برای b و c نیز می‌توان نوشت.

$$\psi_A = L_{AA} i_A + L_{AB}(i_B + i_C) + L_{aA}\left[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)\right]$$

به طور مشابه برای B و C نیز به همین ترتیب می‌توان نوشت.

به دلیل متعادل داریم:

$i_a + i_b + i_c = 0$

$i_A + i_B + i_C = 0$

با فرض:

$L_{ss} = L_{aa} - L_{ab}$ $\quad$ $L_{rr} = L_{AA} - L_{AB}$

$$\psi_a = L_{ss} i_a + L_{aA}\left[i_A \cos\theta + i_B \cos(\theta + 120^\circ) + i_C \cos(\theta - 120^\circ)\right]$$

$$\psi_A = L_{rr} i_a + L_{aA}\left[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)\right]$$

تبدیل dq

$$i_{ds} = 2/3\left[i_a \cos\omega_s t + i_b \cos(\omega_s t - 120^\circ) + i_c \cos(\omega_s t + 120^\circ)\right.$$

$$i_{qs} = -2/3\left[i_a \sin\omega_s t + i_b \sin(\omega_s t - 120^\circ) + i_c \sin(\omega_s t + 120^\circ)\right.$$

(۲)

$$i_{dr} = \tfrac{2}{3}\left[i_A \cos\theta_r + i_B \cos(\theta_r - 120^\circ) + i_C \cos(\theta_r + 120^\circ)\right]$$

$$i_{qr} = -\tfrac{2}{3}\left[i_A \sin\theta_r + i_B \sin(\theta_r - 120^\circ) + i_C \sin(\theta_r + 120^\circ)\right]$$

عکس تبدیل بالست زیرا اصفر است:

$$i_A = i_{dr}\cos\theta_r - i_{qr}\sin\theta_r$$

$$i_B = i_{dr}\cos(\theta_r - 120^\circ) - i_{qr}\sin(\theta_r - 120^\circ)$$

$$i_C = i_{dr}\cos(\theta_r + 120^\circ) - i_{qr}\sin(\theta_r + 120^\circ)$$

$$i_a = i_{ds}\cos\omega_s t - i_{qs}\sin\omega_s t$$

$$i_b = i_{ds}\cos(\omega_s t - 120^\circ) - i_{qs}\sin(\omega_s t - 120^\circ)$$

$$i_c = i_{ds}\cos(\omega_s t + 120^\circ) - i_{qs}\sin(\omega_s t + 120^\circ)$$

معادلات اساسی ماشین در چارچوب مبنای dq

$$\begin{cases} \theta = (1-s)\,\omega_s t \\ \dfrac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \Rightarrow \theta = \omega_s t - \theta_r$$

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \qquad v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + p\psi_{ds}$$

$$\psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} \qquad v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + p\psi_{qs} \qquad L_m = \tfrac{3}{2} L_{aA}$$

$$\psi_{dr} = L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds} \qquad v_{dr} = R_s i_{dr} - (p\theta_r)\psi_{qr} + p\psi_{dr}$$

$$\psi_{qr} = L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qs} \qquad v_{qr} = R_s i_{qr} - (p\theta_r)\psi_{dr} + p\psi_{qr}$$

$s\omega_s = p\theta_r$ این رابطه سرعت زاویه‌ای بین روتور و محورهای چارچوب مبنای dq را نشان می‌دهد.

توان و گشتاور الکتریکی

توان ورودی کلی‌ای استاتور

$$P_s = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

توان ورودی کلی‌ای روتور و استاتور برحسب مولفه‌های dو q

$$P_s = \tfrac{3}{2}(v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \qquad P_r = \tfrac{3}{2}(v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr})$$

توان مربوط به دلتا چرخشی برابر است با:

$$\tfrac{3}{2}(\psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr})(p\theta_r)$$

گشتاور روتور برابر است با حاصل ضرب محورهای dو q در ماشین $(p\theta_r)(\tfrac{2}{p_f})$ است بنابراین گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با:

$$T_e = \tfrac{3}{2}(\psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr})\,\tfrac{p_f}{2}$$

معادله گشتاور

$$T_e - T_m = j\frac{d\omega_m}{dt} = j\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

گشتاور لختی

رابطه مربوط به گشتاور بار:

$$T_m = T_0\,(\bar{\omega}_r)^m$$

رابطه دیگری برای گشتاور بار که اغلب استفاده می‌شود

$$T_m = T_0\left[A\bar{\omega}_r^2 + B\bar{\omega}_r + C\right]$$

مشخصه های حالت ماندگار

$$i_a = I_m \cos(\omega_s t + \alpha)$$
$$i_b = I_m \cos(\omega_s t + \alpha - 120^\circ)$$
$$i_c = I_m \cos(\omega_s t + \alpha + 120^\circ)$$

با اعمال تبدیل dq داریم:

$$i_{ds} = I_m \cos\alpha \qquad i_{qs} = I_m \sin\alpha$$

$$i_s = i_a = i_{ds}\cos\omega_s t - i_{qs}\sin\omega_s t = i_{ds}\cos\omega_s t + i_{qs}\cos(\omega_s t + 90^\circ)$$

با استفاده از I_s و کمان مقدار موثر جریان استاتور در مبنای واحد مقادیر بالا را می‌توان بصورت مقادیر برداری زیر نوشت:

$$\textcircled{1}\ \tilde{I}_s = I_{ds} + j I_{qs} \qquad I_{ds} = \frac{i_{ds}}{\sqrt{2}},\ I_{qs} = \frac{i_{qs}}{\sqrt{2}}$$

$$\tilde{V}_s = \frac{V_{ds} + j V_{qs}}{\sqrt{2}} \qquad \textcircled{2}\ \tilde{I}_r = \frac{i_{dr} + j i_{qr}}{\sqrt{2}}$$

در حالت ماندگار عملگر p را از معادلات زیر حذف می‌کنیم:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \cancel{p\psi_{ds}}$$
$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \cancel{p\psi_{qs}}$$

با توجه به اینکه:

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \qquad \psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr}$$

داریم:

$$\textcircled{3}\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s L_{ss} i_{qs} - \omega_s L_m i_{qr} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s L_{ss} i_{ds} + \omega_s L_m i_{dr} \end{cases}$$

با ترکیب معادلات ① و ③ داریم:

$$\tilde{V}_s = R_s \tilde{I}_s + j\omega_s L_{ss}\tilde{I}_s + j\omega_s L_m \tilde{I}_r$$
$$= R_s \tilde{I}_s + j\omega_s (L_{ss} - L_m)\tilde{I}_s + j\omega_s L_m (\tilde{I}_s + \tilde{I}_r)$$
$$= R_s \tilde{I}_s + j X_s \tilde{I}_s + j X_m (\tilde{I}_s + \tilde{I}_r)$$

راکتانس نشتی استاتور $X_s = \omega_s (L_{ss} - L_m)$

راکتانس مغناطیس کننده $X_m = \omega_s L_m$

در روتور اتصال کوتاه $v_{dr} = v_{qr} = 0$ داریم:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qr} \end{cases} \qquad \begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - (p\theta_r)\psi_{qr} - \\ v_{qr} = R_r i_{qr} - (p\theta_r)\psi_{dr} \end{cases} \qquad p\theta_r = s\omega_s$$

با توجه به معادلات بالا داریم:

④ $$\begin{cases} v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - s\omega_s (L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qs}) \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + s\omega_s (L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds}) \end{cases}$$

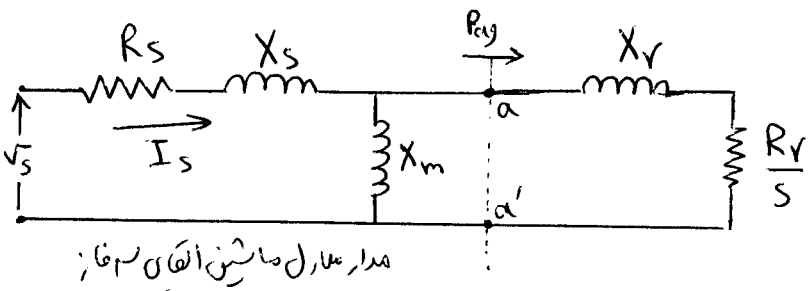
با توجه به معادلات ①، ② و ④ داریم:

$$v_r = 0 = \frac{R_r}{s}\tilde{I}_r + j\omega_s L_{rr}\tilde{I}_r + j\omega_s L_m \tilde{I}_s$$

$$= \frac{R_r}{s}\tilde{I}_r + jX_r\tilde{I}_r + jX_m(\tilde{I}_s + \tilde{I}_r)$$

راکتانس نشتی روتور $X_r = \omega_s(L_{rr} - L_m)$

مدار معادل



مدار معادل ماشین القایی سه فاز

$$P_{ag} = \frac{R_r}{s} I_r^2$$

$$P_{Lr} = R_r I_r^2$$

$$P_{sh} = P_{ag} - P_{lr} = R_r \frac{1-s}{s} I_r^2$$

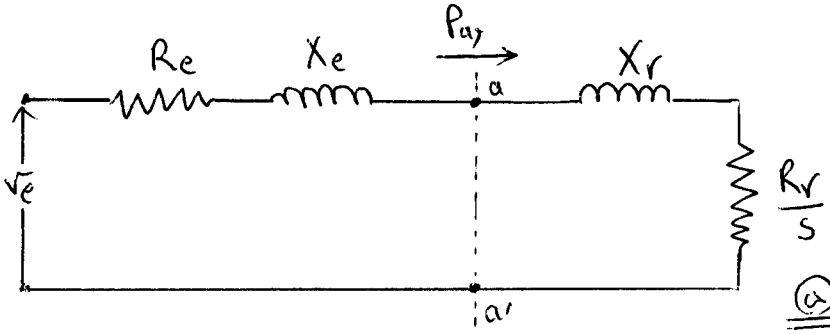
در این موتور سه فاز گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با:

$$T_e = \frac{3 P_{sh}}{\omega_m}$$

$$\omega_m = \omega_r \frac{2}{P_f} = \omega_s (1-s) \frac{2}{P_f}$$

$$\Rightarrow T_e = 3 \frac{P_f}{2} \frac{R_r}{s\omega_s} I_r^2 \quad ⓐ$$

مشخصه گشتاور سرعت

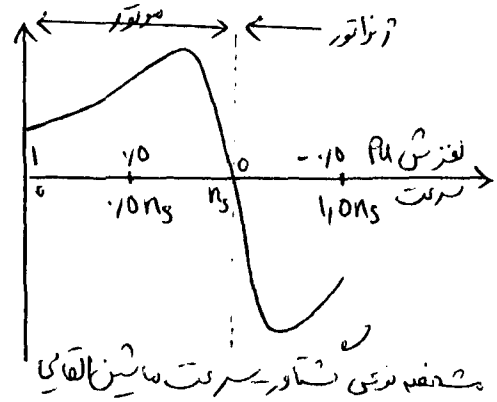


$$\tilde{I}_r = \frac{\tilde{v}_e}{(R_e + R_r/s) + j(X_e + X_r)}$$

$$\xRightarrow{ⓐ} T_e = 3 \frac{P_f}{2} \left(\frac{R_r}{s\omega_s}\right) \frac{v_e^2}{(R_e + R_r/s)^2 + (X_e + X_r)^2}$$

$$v_e = \frac{jX_m v_s}{R_s + j(X_s + X_m)}$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)}$$



مشخصه نوعی گشتاور-سرعت ماشین القایی

بین سرعت صفر و سرعت سنکرون ماشین القایی موتور عمل می‌کند و بالاتر از سرعت سنکرون لغزش منفی است و ماشین القایی ژنراتور کار می‌کند.

حداکثر گشتاور را از مدار زیر داریم:

$$Z = \frac{R_r}{S}$$

$$Z = \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2}$$

$$S_{T max} = \frac{R_r}{Z'}$$

گشتاور حداکثر برابر است با:

$$T_{max} = 3 \frac{P_f}{2\omega_s} \frac{0.5 V_e^2}{R_e + Z'} = 3 \frac{1}{\omega_{ms}} \frac{0.5 V_e^2}{R_e + Z'}$$

تأثیر مقاومت روتور بر بازده

اگر از تمام تلفات به جز تلفات مقاومتی صرف نظر کنیم داریم: $\eta = \frac{P_{sh}}{P_{ag}} \times 100 = 1 - S$ درصد

برای داشتن بازده بالا باید موتور با لغزش کم کار کند از این رو برای بازده بالا در حالت کاری کاری مستلزم داشتن مقاومت کم روتور است. از سوی دیگر برای داشتن گشتاور راه‌اندازی بالا نگه داشتن جریان راه‌اندازی و حفظ ضریب توان بالا مقاومت روتور باید بزرگ باشد.

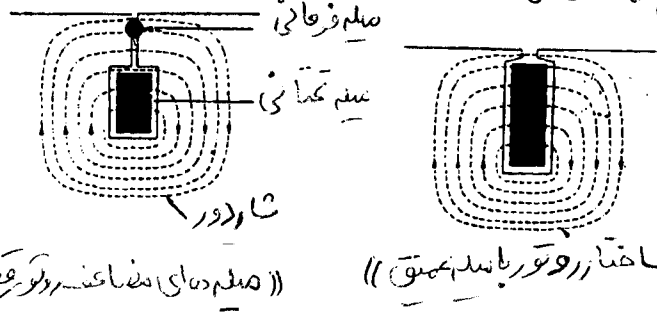
در روتور سیم‌بندی شده از طریق حلقه‌های لغزان مقاومت را با سیم روتور سری می‌کنند و زمانی که روتور به سرعت می‌گیرد مقاومت خارجی کاهش می‌یابد.

به دلیل گرانی روتور سیم‌بندی شده از روتور قفس سنجابی بیشتر استفاده می‌شود.

دو نوع طراحی برای روتور قفس سنجابی برای دستیابی به بازده بالا در نظر گرفته شده است.

۱. موتور قفس سنجابی با مقاومت بالا: با توجه به شکل میله‌های فوقانی روتور دارای سطح مقطع کوچک و مقاومت بالا هستند در زیر سطح روتور می‌باشند میله‌های تحتانی دارای سطح مقطع بزرگتر با مقاومت کمتر و اندوکتانس نشتی بزرگتر است. در راه‌اندازی فرکانس روتور بالاست جریان اکثر از میله تحتانی عبور می‌کند و در نتیجه مقاومت مؤثر روتور با مقاومت نسبتاً بالای میله‌های فوقانی است در حالت عادی کار جریان روتور عمدتاً از میله‌های تحتانی با مقاومت کم عبور می‌کند.

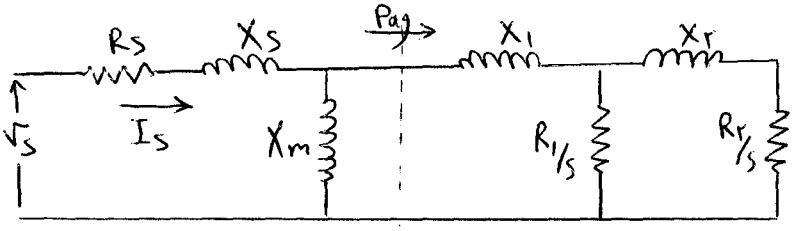
۲. موتور قفس سنجابی با میله‌های عمیق: در این روتور سطح مقطع مؤثر میله روتور در شروع کار کم و مقاومت بالاست و رفته رفته با کم شدن سطح مقطع افزایش و مقاومت کاهش می‌یابد.



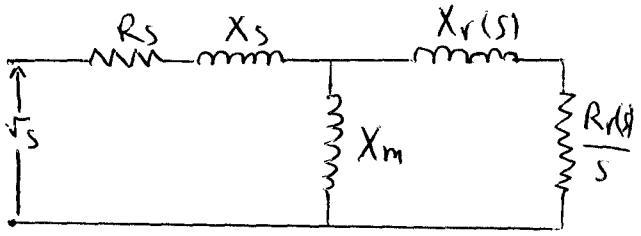
(میله‌های مضاعف روتور قفس سنجابی)

(ساختار روتور با میله عمیق)

(۴)



مدار معادل موتور القایی با روتور دو قفسی



مدار معادل تک روتره معمولی یا روتور دو قفسی یا روتور با شیار عمیق

$$R_r(s) = R_{r0}\,\frac{m^2 + m s^2 R_1/R_{r0}}{m^2 + s^2} \qquad X_r(s) = X_1\,\frac{R_{r0}(mR_1/R_r)}{m^2 + s^2}$$

$$R_{r0} = \frac{R_1 R_r}{R_1 + R_r} \qquad m = \frac{R_1 + R_r}{X_r}$$

پارامترهای روتور را می‌توان فقط با یک مدار که با تغییرات تابعی از لغزش تغییر می‌کند بیان می‌کنیم:

$$R_r(s) = \frac{R_{r0}}{2}\,\frac{\beta(\sinh\beta + \sin\beta)}{\cosh\beta - \cos\beta} \qquad X_r(s) = X_{r0} + \frac{R_{r0}}{2}\,\frac{\beta(\sinh\beta - \sin\beta)}{\cosh\beta - \cos\beta}$$

$$\beta = \sqrt{|s|}\,B \qquad B = 2d\sqrt{\mu_0 \omega_0/(2\rho)}$$

B: ضریب عمق میدان است که نشانگر راه‌اندازی موتور را تعیین می‌کند d: عمق شیار روتور

X_{r0}: راکتانس نشتی روتور است R_{r0}: مقاومت شیار روتور در حال کار، ρ: مقاومت مخصوص

نمایش برحسب یکای واحد

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base} \quad \text{rad/s (الکتریکی)} \qquad \omega_{mbase} = \omega_{base}(2/pf) \quad \text{rad/s (مکانیکی)}$$

$$Z_{sbase} = v_{sbase}/i_{sbase} \quad \Omega \qquad L_{sbase} = v_{sbase}/(i_{sbase}\,\omega_{base}) \quad H$$

$$VA_{base} = \tfrac{3}{2}(v_{sbase}\,i_{sbase}) \quad VA \qquad \text{یا در سه فاز:}$$

$$\psi_{sbase} = v_{sbase}/\omega_{base} \quad \text{ویبر-دور}$$

$$T_{base} = \tfrac{3}{2}(p_F/2)\,\psi_{sbase}\,i_{sbase} \quad N.m$$

برای سایر پارامترها داریم:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + p\psi_{ds}$$

با تقسیم طرفین بر v_{sbase} و با توجه به اینکه $v_{sbase} = Z_{sbase} i_{sbase} = \omega_{base}\psi_{sbase}$ داریم:

$$\frac{v_{ds}}{v_{sbase}} = \frac{R_s}{Z_{sbase}}\,\frac{i_{ds}}{i_{sbase}} - \frac{\omega_s}{\omega_{base}}\,\frac{\psi_{qs}}{\psi_{sbase}} + p\left[\frac{1}{\omega_{base}}\,\frac{\psi_{ds}}{\psi_{sbase}}\right]$$

نمایش برحسب یکای واحد:

$$\bar{v}_{ds} = \bar{R}_s \bar{i}_{ds} - \bar{\omega}_s \bar{\psi}_{qs} + \bar{p}\bar{\psi}_{ds} \qquad \bar{v}_{dr} = \bar{R}_r \bar{i}_{dr} - (p\theta_r)\psi_{qr} + \bar{p}\bar{\psi}_{dr}$$

$$\bar{v}_{qs} = \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_s \bar{\psi}_{ds} + \bar{p}\bar{\psi}_{qs} \qquad \bar{v}_{qr} = \bar{R}_r \bar{i}_{qr} + (p\theta_r)\psi_{dr} + \bar{p}\bar{\psi}_{qr}$$

$$P\theta_r = \frac{1}{\omega_{base}} (P\theta_r) = s\bar{\omega}_s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

با تقسیم معادلات شار دور در فضای dq ، $\psi_{sbase} = L_{sbase} i_{sbase}$ داریم:

$$\bar{\psi}_{ds} = \bar{L}_{ss}\bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \bar{i}_{dr} \qquad \bar{\psi}_{qs} = \bar{L}_{ss}\bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \bar{i}_{qr}$$

$$\bar{\psi}_{dr} = \bar{L}_{rr}\bar{i}_{dr} + \bar{L}_m \bar{i}_{ds} \qquad \bar{\psi}_{qr} = \bar{L}_{rr}\bar{i}_{qr} + \bar{L}_m \bar{i}_{qs}$$

$$\frac{T_e}{T_{base}} = \frac{\frac{3}{2}(\psi_{dr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr})(P_f/2)}{\frac{3}{2}(\psi_{sbase}\, i_{sbase})(P_f/2)}$$

$$\bar{T}_e = \bar{\psi}_{qr}\bar{i}_{dr} - \bar{\psi}_{dr}\bar{i}_{qr}$$

با تقسیم معادله (II) بر $T_{base} = \sqrt{A_{base}}/\omega_{mbase}$ داریم:

(II) $T_e - T_m = J\frac{d\omega_m}{dt}$

$$\frac{T_e}{T_{base}} - \frac{T_m}{T_{base}} = J\left(\frac{\omega_{mbase}}{\sqrt{A_{base}}}\right)\omega_{mbase} P\left(\frac{\omega_m}{\omega_{mbase}}\right)$$

$$P(\bar{\omega}_r) = \frac{1}{2H}(\bar{T}_e - \bar{T}_m) \qquad \bar{P}(\omega_r) = \frac{1}{2H\omega_{base}}(\bar{T}_e - \bar{T}_m)$$

$$H = 1/2\,\frac{J\,\omega^2_{base}}{\sqrt{A_{base}}} \qquad \bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{mbase}} = \frac{\omega_r/P_f}{\omega_{base}/P_f} = \frac{\omega_r}{\omega_{base}}$$

پارامتر H ، ثابت لختی ترکیبی موتور و بار مکانیکی است.

$$T_m = T_0 (\bar{\omega}_r)^m$$

به طور مشابه داریم:

تقسیم بر T_{base} ⟹ $\frac{T_m}{T_{base}} = \frac{T_0}{T_{base}}(\omega_r)^m \Longrightarrow \boxed{\bar{T}_m = \bar{T}_0 (\bar{\omega}_r)^m}$

$\bar{P}$: مشتق زمانی در فضای واحد است و رابطه زیر را با P که مشتق زمانی بر حسب ثانیه می‌باشد دارد:

$$\bar{P} = \frac{d}{d\bar{t}} = \frac{1}{\omega_{base}}\frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_{base}} P$$

ضمیمه در معادلات پایداری

با چشم پوشی از آثار گذرای استاتور و در حالتی که سیم پیچی روتور اتصال کوتاه است معادلات الکتریکی موتور القایی در مبنای واحد عبارت

زیراست:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds}$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs}$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + p\theta_r \psi_{dr} + p\psi_{qr}$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - p\theta_r \psi_{qr} + p\psi_{dr}$$

$$\psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_{rr} i_{qr}$$

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_{rr} i_{dr}$$

$$L_{ss} = L_s + L_m$$

L_s اندوکتانس نشتی استاتور

$$L_{rr} = L_r + L_m$$

L_r اندوکتانس نشتی روتور

در معادلات فوق در توری را با فقط یک سیم پیچ روتور توصیف کردیم. در حالت روتور قفس سنجابی مضاعف یا روتور با میله‌های عمیق و یا یک مدار معادل با یک سیم پیچ روتور بدست آورد که پارامترهای آن با لغزش تغییر می‌کند.

با منظور نگاهداری معادلات در مطالعات و برنامه‌های پایداری، با ذکر برهانی روتور و میدان رابطه بین زمان و جریان استاتور برحسب یک زمان معمول، یک راکتانس گذرا را معرفی کنیم. با توجه به معادلات ذیل داریم:

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_{rr} i_{dr} \Longrightarrow i_{dr} = \frac{\psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}}$$

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} = L_{ss} i_{ds} + L_m \frac{\psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}}$$

$$\psi_{ds} = \frac{L_m}{L_{rr}} \psi_{dr} + \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{ds}$$

به طور مشابه داریم:

$$\psi_{qs} = \frac{L_m}{L_{rr}} \psi_{dr} + \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{qs}$$

در نتیجه با جایگزینی ψ_{qs} در v_{ds} خواهیم داشت:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + v'_d$$

به طور مشابه برای v_{qs} خواهیم داشت:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + X'_s i_{ds} + v'_q$$

$$v'_q = \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \psi_{dr}$$

$$v'_d = -\frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \psi_{qr}$$

$X'_s = \omega_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right)$ راکتانس گذرای ماشین

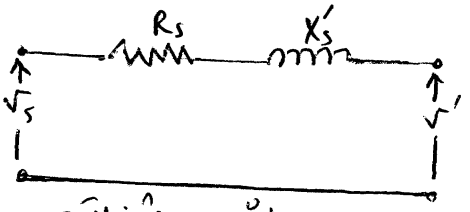
القایی

معادلات ولتاژ استاتور را می‌توان ترکیب و بصورت فازور بیان نمود:

$$V_{ds} + jV_{qs} = (R_s + jX'_s)(i_{ds} + j i_{qs}) + (V'_d + jV'_q)$$

با توجه به برابری مقادیر مؤثر و ماکزیمم در مبنای واحد داریم:

$$\tilde{V}_s = (R_s + jX'_s)\tilde{I}_s + \tilde{V}'$$



مدار معادل گذرای ماشین القایی

V_s = ولتاژ پایانه استاتور

V' = ولتاژ پشت امپدانس گذرا

با حذف جریانهای روتور و بیان شار روتورها بر حسب V'_d و V'_q در معادلات زیر داریم:

$$\begin{cases} R_r i_{dr} - p\theta_r \psi_{qr} + p\psi_{dr} = 0 = V_{dr} \\ R_r i_{qr} - p\theta_r \psi_{dr} + p\psi_{qr} = 0 = V_{qr} \end{cases}$$

$$p(V'_d) = -\frac{1}{T'_0}\left[V'_d + (X_s - X'_s) i_{qs}\right] + p\theta_r V'_q$$

$$p(V'_q) = -\frac{1}{T'_0}\left[V'_q - (X_s - X'_s) i_{ds}\right] - p\theta_r V'_d$$

$$T'_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} = \frac{L_{rr}}{R_r} \qquad X_s = \omega_s (L_s + L_m) = \omega_s L_{ss}$$

$$p\theta_r = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

T'_0: ثابت زمانی گذرای مدار باز ماشین القایی است و زمانی که استاتور مدار باز شود، میدان عکس العمل گذرای روتور را نشان می‌دهد.

برای معادله شتاب روتور داریم:

$$p(\omega_r) = \frac{1}{2H}(T_e - T_m)$$

$$T_e = \psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr} \qquad i_{dr} = \frac{\psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}}$$

$$T_e = \psi_{qr}\left(\frac{\psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_{rr}}\right) - \psi_{dr}\left(\frac{\psi_{qr} - L_m i_{qs}}{L_{rr}}\right)$$

$$= -\psi_{qr}\left(\frac{L_m}{L_{rr}}\right) i_{ds} + \psi_{dr}\left(\frac{L_m}{L_{rr}}\right) i_{qs}$$

$$= \frac{V'_d i_{ds} + V'_q i_{qs}}{\omega_s}$$

اگر $\omega_s = 1\ pu$ باشد داریم:

$$T_e = V'_d i_{ds} + V'_q i_{qs}$$

مدار رساره شده در شین القایی

همانگونه که مشخص است نیازی به کاسه دینامیک مربوط به مدارهای الکتریکی روتور نیست زیرا این حالت فرض می‌شود (دینامیک مدار روتور بسیار سریع است).

$$P(v'_d)=0=-\frac{1}{T'_0}\left[v'_d+(X_s-X'_s)i_{qs}\right]+P\vartheta_r v'_q$$

$$P(v'_q)=0=-\frac{1}{T'_0}\left[v'_q-(X_s-X'_s)i_{ds}\right]-P\vartheta_r v'_d$$

$$T_e=3P^2/2\left(R_r/s\omega_s\right)\frac{V_e^2}{(R_e+R_r/s)^2+(X_e+X_r)^2}$$

مدل موتور سنکرون شبیه ژنراتور سنکرون می‌باشد با این تفاوت که موتور سنکرون یک بار مکانیکی را می‌چرخاند

بدست آوردن پارامترهای مدل بار

۱. روش مبتنی بر آزمایش ۲. روش مبتنی بر مشخصه مولفه‌های تشکیل دهنده بار

روش مبتنی بر آزمایش: مشخصه بار در پله‌ها و میزان‌های مشخص در زمان‌های خاصی از روز و فصل، اندازه‌گیری می‌شود

مشخصه حالت ماندگار بار – ولتاژ: با تغییر دادن ولتاژ بار از طریق تغییر دهنده‌های تپ ترانسفورماتور بالا و پایین مقدار اسمی مشخصه‌های حالت ماندگار بار را می‌توان تعیین کرد.

مشخصه حالت ماندگار بار – فرکانس: با یک تپ منفک تشکیل دار و فرکانس را در بازه‌ی مورد نظر تغییر دار و مشخصه‌های حالت ماندگار بار را تعیین کرد

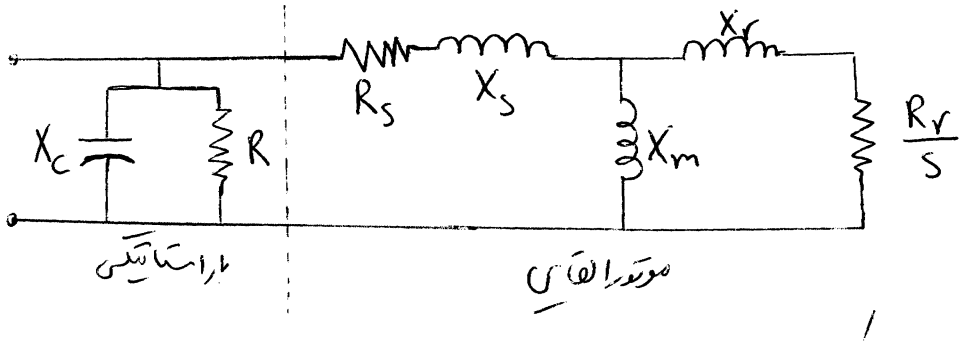
مشخصه دینامیکی بار – ولتاژ: تغییر دهنده‌ی تپ یک ترانسفورماتور را یک سری بالا و دیگری را یک پله پایین حرکت می‌دهیم به گونه‌ای که ولتاژ بار ثابت بماند پس از آن کدام از ترانسفورماتورها را از مدار خارج می‌کنیم. این موضوع باعث تغییر دامنه ولتاژ و زاویه فاز آن می‌شود با تغییر وضعیت اولیه تپ‌ها محدوده‌ای از تغییرات ولتاژ را هم جهت مثبت و منفی ایجاد کرد.

با انتخاب مناسب موقعیت تپ‌ها، حتی می‌توان روشی را که تغییر ولتاژ کم است تغییر زاویه ایجاد کرد. این موضوع در جداسازی تاثیر دامنه ولتاژ و تغییر زاویه موثر است.

اگر یک مجموعه خازنی در شین بار وجود داشته باشد می‌توان آنرا با مدار وارد یا خارج کرد تا در محل بار، تغییر دامنه ولتاژ بدون تغییر زاویه آن ایجاد شود.

عکس العمل‌هایی که با اینگونه تست می‌آیند عملاً عکس العمل‌های دینامیکی سیستم ژنراتور است.

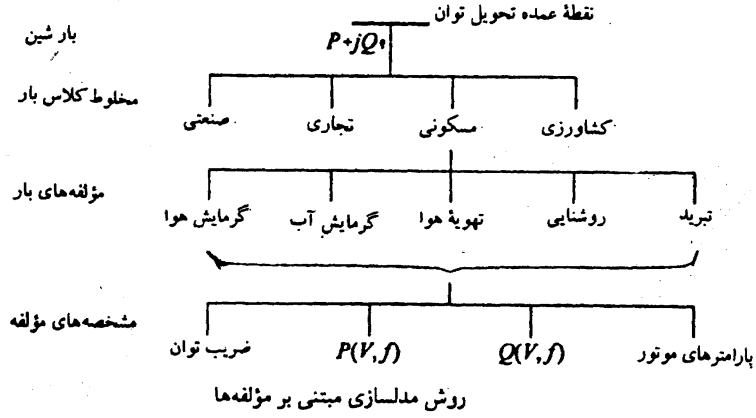
عکس العمل های اندازه گیری شده زمانی از دامنه ولتاژ، توان حقیقی و توان راکتیو بار را تعیین بار استدهای مدلی که در شکل زیر نمایش داده شده است مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل فرض می شود که بار تقریبی را می توان به صورت یک موتور القایی و یک بار استاتیکی موازی بیان نمود.



((مدل تریفاز موتور القایی و بار استاتیکی
برای نمایش بار صنعتی))

روش مبتنی بر مشخصه مولفه های تشکیل دهنده بار

این روش توسط موسسه اپری طرح چندین پروژه از سال ۱۹۷۶ میلادی مطرح شده است. در این روش استفاده از اطلاعات مربوط به اجزای تشکیل دهنده بار مطابق با شکل زیر است.



روش مدلسازی مبتنی بر مؤلفه‌ها

مدلهای بار تا حدود دقیق عکس العمل توان حقیقی حالت ماندگار در مقابل ولتاژ را پیش بینی کرده اند اما در خصوص توان راکتیو، توانایی کافی نداشته اند. همچنین روشهای گذرا، نتوانسته اند عکس العمل هر دو نوع توان (حقیقی و راکتیو) را پیش بینی نمایند. که با استفاده از مدلهای فیزیکی و روشهای نمایش چند مدل این مشکل رفع شده است.
از مدلهای موتور القایی تکفاز برای نمایش کمپرسورهای دستگاه های تهویه هوا استفاده شده است.

مشخصه‌های نوعی بار

الف) مشخصه‌های استاتیکی مولفه‌ها

جدول زیر مشخصه‌های نوعی را از مولفه‌های بار و از لحاظ وابستگی به ولتاژ و فرکانس بیان می‌کند.

مشخصه‌های استاتیکی مؤلفه‌های بار

مؤلفه	ضریب توان	∂P/∂V	∂Q/∂V	∂P/∂f	∂Q/∂f
تهویهٔ هوا					
موکزی سه فاز	۰/۹۰	۰/۰۸۸	۲/۵	۰/۹۸	-۱/۳
مرکزی تک فاز	۰/۹۶	۰/۲۰۲	۲/۳	۰/۹۰	-۲/۷
نوع پنجره	۰/۸۲	۰/۴۶۸	۲/۵	۰/۵۶	-۲/۸
آبگرمکن، چراغ خوراک پزی، فر، کباب پز	۱/۰	۲/۰	۰	۰	۰
ماشین ظرفشویی	۰/۹۹	۱/۸	۳/۶	۰	-۱/۴
ماشین لباسشویی	۰/۶۵	۰/۰۸	۱/۶	۳/۰	۱/۸
خشک‌کن لباس	۰/۹۹	۲/۰	۳/۲	۰	-۲/۵
یخچال	۰/۸	۰/۷۷	۲/۵	۰/۵۳	-۱/۵
تلویزیون	۰/۸	۲/۰	۵/۱	۰	-۴/۵
لامپهای رشته‌ای	۱/۰	۱/۵۵	۰	۰	۰
لامپهای فلوئورسنت	۰/۹	۰/۹۶	۷/۴	۱/۰	-۲/۸
موتورهای صنعتی	۰/۸۸	۰/۰۷	۰/۵	۲/۵	۱/۲
موتورهای پنکه	۰/۸۷	۰/۰۸	۱/۶	۲/۹	۱/۷
پمپهای کشاورزی	۰/۸۵	۱/۴	۱/۴	۵/۰	۴/۰
کورهٔ قوسی	۰/۷۰	۲/۳	۱/۶	-۱/۰	-۱/۰
ترانسفورمر (بی‌بار)	۰/۶۴	۳/۴	۱۱/۵	۰	-۱۱/۸

ب) مشخصه‌های استاتیکی انواع بار

جدول زیر مشخصه‌های نوعی را از انواع بار بیان می‌کند

کلاس بار	ضریب توان	∂P/∂V	∂Q/∂V	∂P/∂f	∂Q/∂f
مسکونی					
تابستان	۰/۹	۱/۲	۲/۹	۰/۸	-۲/۲
زمستان	۰/۹۹	۱/۵	۳/۲	۱/۰	-۱/۵
تجاری					
تابستان	۰/۸۵	۰/۹۹	۳/۵	۱/۲	-۱/۶
زمستان	۰/۹	۱/۳	۳/۱	۱/۵	-۱/۱
صنعتی	۰/۸۵	۰/۱۸	۶/۰	۲/۶	۱/۶
تجهیزات جنبی نیروگاه	۰/۸	۰/۱	۱/۶	۲/۹	۱/۸

ج) مشخصه‌های دینامیکی

داده‌های زیر داده‌های نوعی برای سه نوع مختلف باربر حسب پارامترهای مدل توان معادل است.

۱. مشخصه ترکیبی دینامیکی یک فیدر کم طول عمده یک بار تجاری را تغذیه می‌کند

$R_S = 0.001$ $X_S = 0.23$ $X_r = 0.23$

$X_m = 3$ $R_r = 0.02$ $H = 0.663$ $m = 5$

۲. یک موتور صنعتی بزرگ

$R_S = 0.007$ $X_{S-u} = 0.049$ $X_{SS} = 0.049$

$X_{r-u} = 0.267$ $X_{r-S} = 0.267$ $X_m = 3.62$

$R_r = 0.042$ $H = 1.6$ $m = 2$

$I_{sat_S} = 3$ $I_{sat_r} = 3$ جزئیات عمق میلم: 6.09

۳. یک موتور صنعتی کوچک

$R_S = 0.078$ $X_S = 0.045$ $X_r = 0.049$

$X_m = 2.67$ $R_r = 0.044$ $H = 1.5$ $m = 2$

هر فیبر رسید لذت تو

ولی برای رسیدن باید رفت