ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

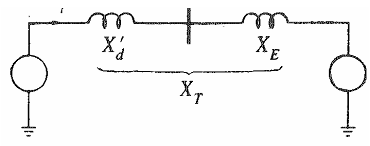
Power System Stability & Control

پایداری سیگنال کوچک سیستم مدرن یک ماشینه متصل به شین بینهایت

برای ژنراتور سیستم وبا صرفنظر از کلیه مقاومتها نمایش سیستم بصورت زیر خواهد بود. نیروی محرکه $\overline{E}$ متصل به راکتانس X_d بوده و اندازه آن قبل از وقوع اغتشاش ثابت فرض می شود. δ زاویه ولتاژ $\overline{E}$ می باشد که نسبت به ولتاژ $\overline{V}$ پیش فاز می باشد.

$I \qquad \overline{V}_T$

$\overline{E} = E\angle\delta$



$\overline{V} = V\angle 0$

در اینصورت با وقوع نوسان در روتور مقدار δ تغییر می یابد. با در نظر گرفتن $\overline{V}$ به عنوان فازور مرجع داریم:

$$\overline{I} == \frac{E\angle\delta - V\angle 0}{jX_T}$$

$$X_T = X_d + X_E$$

توان مختلط متصل به X_d به صورت زیر داده می شود:

$$\overline{S} = \text{P+jQ} = \overline{E} \quad \overline{I}^*$$

$$E\angle\delta\left(\frac{E\angle\delta - V\angle 0}{-jX_T}\right) = \frac{EV\sin\delta}{X_T} + j\frac{E(E - V\cos\delta)}{X_T}$$

با در نظر نگرفتن مقاومت استاتور, توان فاصله هوایی P_e با توان پایانه P برابر می باشد و در مبنای واحد گشتاور فاصله هوایی با توان فاصله هوایی برابر است. از این رو داریم:

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T}\sin\delta$$

خطی سازی حول نقطه کار نشان داده شده با $\delta = \delta_o$ نتیجه می دهد:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta}\Delta\delta = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_o(\Delta\delta)$$

معادله نوسان با در نظر گرفتن مولفه گشتاور میرا کننده:

$$\Delta w_r = w_r - w_o$$

$$dw_r = \frac{\Delta w_r}{w_c} = \frac{1}{w_o}\frac{ds}{dt}$$

$$\frac{ds}{dt} = w_o dw_r$$

$$\frac{2H}{w_o}\frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e - K_D dw_r$$

معادلات حرکت در مبنای واحد عبارت است از:

$$\frac{d\Delta w_r}{dt} = P\Delta w_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - k_D \Delta w_r)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = p\delta = w_o \Delta w_r$$

که در آن Δw_r انحراف سرعت در مبنای واحد , δ زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی , w_o سرعت مبنای زاویه روتور بر حسب رادیان بر ثانیه , و P عملکرد دیفرانسیلی d/dt با زمان t به ثانیه است. با خطی سازی معادله $\frac{d\Delta w_r}{dt}$ وجایگزینی ΔT_e داده شده با معادله مربوطه به دست می آوریم:

گشتاور در فاصله هوائی $$T_e = P = \frac{EV}{X_T}\sin\delta \rightarrow \Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial\delta}\Delta\delta = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_o(\Delta\delta) = K_S\Delta\delta$$

$$p\Delta w_r = \frac{1}{2H}[\Delta T_m - K_S \Delta\delta - K_D \Delta w_r]$$

که در آن K_S ضریب گشتاور سنکرون کننده داده سده با معادله زیر است:

$$K_S = [\frac{EV}{X_T}]\cos\delta_o$$

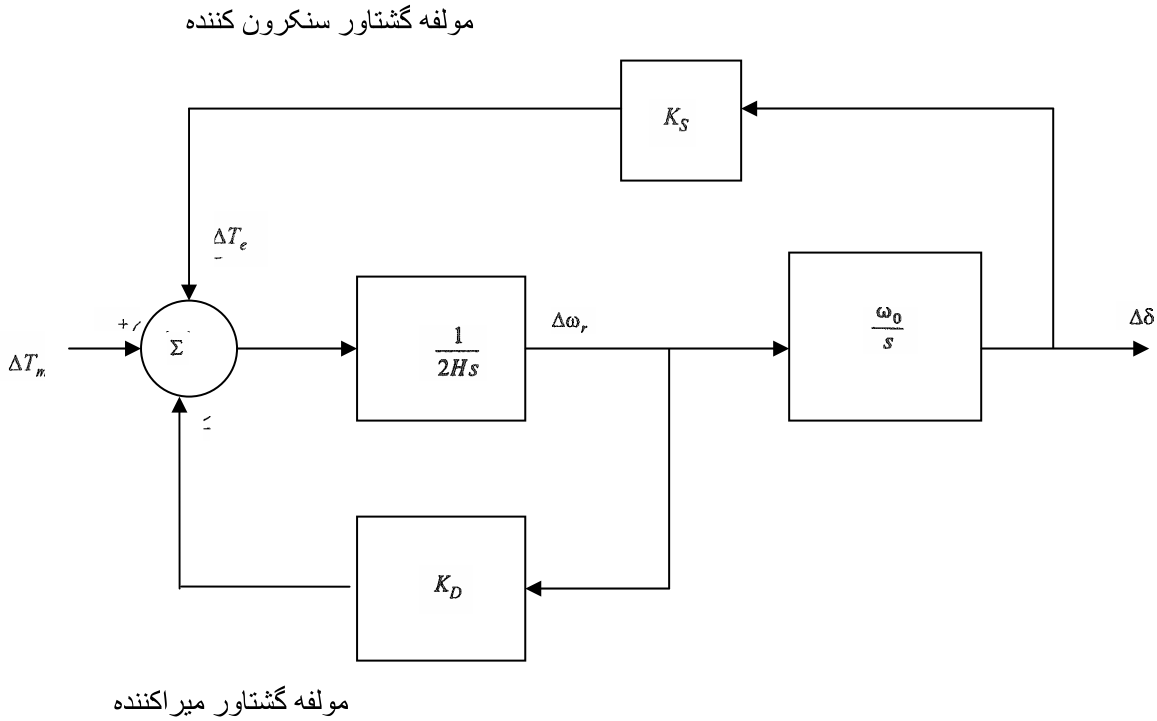
از خطی سازی معادله $\frac{d\delta}{dt}$ داریم:

$$p\Delta\delta = w_o \Delta w_r$$

با نوشتن معادلات $p\Delta w_r$ و $p\Delta\delta$ بصورت بردار-ماتریسی,به دست می آوریم:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ w_o & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\frac{1}{2H} \\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

که بصورت $x = Ax + bu$ است و مشاهده می شود که عناصر ماتریس A به پارامترهای سیستم K_D, H, X_T و شرایط اولیه نشان داده شده با مقادیر E و δ_o بستگی دارند. می توان از نمایش نمودار بلوکی شکل ۱۲-۵ برای توصیف عملکرد سیگنال کوچک استفاده کرد.



نمودار بلوکی سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت با مدل کلاسیک ژنراتور

$K_S =$ ضریب گشتاور سنکرون کننده بر حسب مبنای واحد گشتاور بر رادیان

$K_D =$ ضریب گشتاور میرا کننده بر حسب گشتاور مبنای واحد انحراف سرعت مبنای واحد

$H =$ ثابت لختی بر حسب $MW.S/MVA$

$\Delta w_r =$ انحراف سرعت بر حسب $(w_r - w_o)/w_o$

$\Delta\delta =$ انحراف زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی

S= عملگر لاپلاس

$w_o =$ سرعت ناشی بر حسب $2\pi f_o = elec.rad/s$

از نمودار بلوکی شکل فوق داریم:

$$\Delta\delta = \left[\frac{1}{2HS}(-K_S\Delta\delta - K_D\Delta w_r + \Delta T_m)\right] = \frac{w_o}{S}\left[\frac{1}{2HS}(-K_S\Delta\delta - K_D S\frac{\Delta\delta}{w_o} + \Delta T_m)\right]$$

از مرتب کردن این رابطه نتیجه می شود:

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H}S(\Delta\delta) + \frac{K_S}{2H}w_o(\Delta\delta) = \frac{w_0}{2H}\Delta T_m$$

بنابراین معادله مشخصه بصورت زیر داده می شود:

$$S^2 + \frac{K_D}{2H}S + \frac{K_S w_0}{2H} = 0$$

که بصورت کلی زیر است:

$$S^2 + \xi w_n S + w_n^2 = 0$$

بنابر این فرکانس طبیعی میرا نشده عبارت است از:

$$w_n = \sqrt{K_S\frac{w_0}{2H}}rad/s$$

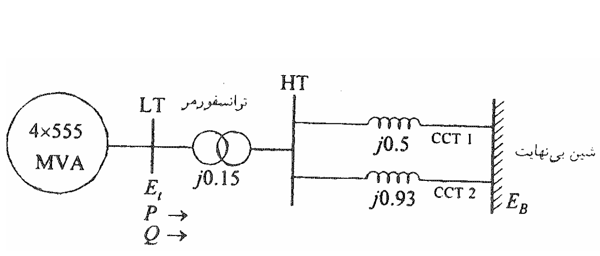
و نسبت میرایی برابر است با:

$$\xi = \frac{1}{2}\frac{K_D}{2Hw_n}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{K_D}{\sqrt{K_S 2Hw_0}}$$

با افزایش ضریب گشتاور سنکرون کننده K_S, فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرای کاهش می یابد. از سویی افزایش ضریب گشتاور میرا کننده K_D نسبت میرایی را افزایش داده, حال آنکه افزایش در ثابت لختی هر دو w_n, ξ را کاهش می دهد.

مثال- شکل زیر سیستمی قابل اعمال به نیروگاهی حرارتی (تشکیل شده از چهار واحد 555MVA , 24KV , 60Hz)را نشان می دهد.



راکتانسهای شبکه نشان داده شده در شکل , در مبنای واحد بر پایه مقادیر2220MVA , 24KV هستند (به طرف فشارضعیف ترانسفورمر بالا برنده ارجاع شده است)و فرض شده مقاومتها قابل چشم پوشی باشند. هدف از این مثال تحلیل مشخصه های پایداری سیگنال کوچک سیستم حول نقطه کارحالت ماندگار به دنبال از دست دادن مدار ۲ می باشد. وضعیت پیش از خطای سیستم در مبنای واحد رب پایه مقادیر 2220MVA , 24KV به صورت زیر است:

$$P=0.9 \quad Q=0.3 \quad \overline{V_T} = 1.0\angle 36 \quad \overline{V} = 0.995\angle 0$$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتورمعادل منفرد توصیف شده در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220MVA , 24KV مدل می شوند:

$$X_a = 0.3 \qquad H = 3.5 \quad MWS/MVA$$

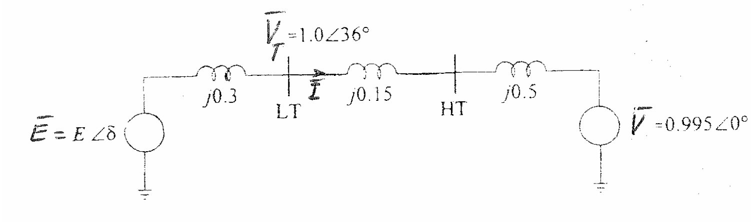
الف) معادلات حالت خطی شده سیستم را بنویسید. مقادیر ویژه فرکانس میرا شده نوسان (برحسبHz), نسبت میرایی و فرکانس طبیعی غیر میرا را برای هر یک از مقادیر ضریب میرایی (بر حسب سرعت مبنای واحد بر گشتاور مبنای واحد) تعیین کنید.

$$(i)K_D = 0(ii)K_D = -10/0(iii)K_D = 10/0$$

برای حالتی که $K_D = 10/0$باشد بردارهای ویژه چپ و راست و ماتریس مشارکت را پیدا کنید. اگر در $t = 0$, $\Delta\delta = 5$و $\Delta w = 0$ باشد, پاسخ زمانی را تعیین کنید

حل

الف) شکل زیر مدل مدار نشان دهنده نقطه کار حالت-ماندگار را پس از بروز خطا با کلیه پارامترهای توصیف شده در مبنای واحدبر پایه2220MVA نشان می دهد:



با در نظر گرفتن $\overline{V_T}$ بعنوان فازورمرجع جریان استاتورژنراتوربه صورت زیر داده می شود :

$$\text{مرجع اول} \quad \overline{V_T} = 1\angle 36 \qquad T = \frac{(P+jQ)^*}{\overline{V_T^*}} = \frac{0.9 - j0.3}{1/0}$$

$$\text{مرجع دوم} \quad \overline{V_T} = 1\angle 0 \qquad = 0.9 - j0.3 \quad pu$$

ولتاژمتصل به راکتانس گذرا عبارت است از :

$$\overline{E} = \overline{V_T} + jX_d\overline{I}$$

$$=1/0+j0/3(0/9-j0/3)$$

$$=1/09+j0/27=1/123\angle 13/92 \qquad pu$$

زاویه پیش فاز بودن $\overline{E}$ نسبت به V عبارت است از :

$$\delta_0=13/92+36=49/92$$

مجموع راکتانس سیستم خواهد شد:

$$X_T=0/3+0/15+0/5=0/95 \qquad pu$$

ضریب گشتاور سنکرون کننده متناظر از معادله ۱۲-۷۶ برابر است با :

$$K_S=\frac{EV}{X_T}\cos\delta_0$$

$$=\frac{1/123\times 0/995}{0/95}\cos 49/92$$

گشتاور بر رادیان $\quad = 0/757 \qquad pu$

بنابراین معادلات حالت خطی شده عبارت است از :

$$\begin{pmatrix}\Delta w_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H}\\ w_0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\frac{1}{2H}\\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

$$=\begin{pmatrix}-0/143K_D & -0/108\\ 377/0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0/143\\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

مقادیر ویژه ماتریس به صورت زیر داده می شوند:

$$\begin{vmatrix}-0/143K_D-\lambda & -0/108\\ 377/0 & -\lambda\end{vmatrix}=0$$

یا: $\quad \lambda^2+0/143K_D\lambda+40/79=0$

وبا مقایسه با شکل استاندارد ذیل:

$$\lambda^2+2\zeta w_n\lambda+w_n^2=0$$

خواهیم داشت:

$$w_n=\sqrt{40/79}=6/387 rad/s=1/0165 Hz$$

$$\zeta=0/143K_D/(2\times 6/387)=0/0112K_D$$

پس مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_1,\lambda_2=\pm w_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

فرکانس میرا شده خواهد شد:

$$w_d = w_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

در زیر نتایج خواسته شده برای مقادیر مختلف K_D آورده شده است:

K_D	۰	۱۰	-۱۰
مقادیر ویژه λ	۰+j۶/۳۹	-۰/۷۱۴+j۶/۳۵	۰/۷۱۴+j۶/۳۶
فرکانس میرا w_r	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۰۱Hz	۱/۰۱۰۱Hz
نسبت میرایی ζ	۰	۰/۱۱۲	-۰/۱۱۲
فرکانس طبیعی غیر میرا w_n	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۶۵Hz

ب) بردارهای ویژه راست به صورت زیر داده می شود:

$$(A-\lambda I)\phi = 0$$

برای سیستم داده شده با $K_D = 10$ معادله بالا چنین می شود:

$$\begin{pmatrix} -1/43-\lambda_1 & -0/108 \\ 377/0 & -\lambda_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \end{pmatrix} = 0$$

برای $\lambda = -0/714 + j6/35$ معادلات متناظر عبارت است از:

$$(0/714 + j6/35)\phi_{11} + 0/108\phi_{21} = 0$$

$$377/0\phi_{11} + (0/714 - j6/35)\phi_{21} = 0$$

معادلات بالا سمتقل خطی نیستند. همانطور که در مثال ۱۲-۱ بحث شد باید یکی از عناصر بردار ویژه متناظر با یک مقدار ویژه را به دلخواه انتخاب کنید. بنابراین, با فرض:

$$\phi_{21} = 1/0$$

داریم:

$$\phi_{11} = -0/0019 + j0/0168$$

بطور مشابهی بردار ویژه متناظر با $\lambda_2 = -0/714 - j6/35$ عبارت است از:

$$\phi_{12} = -0/0019 - j0/0168 \qquad \phi_{22} = 1/0$$

لذا ماتریس مدال بردار ویژه راست عبارت است از:

$$\phi = \begin{pmatrix} -0/0019 + j0/0168 & -0/0019 - j0/0168 \\ 1/0 & 1/0 \end{pmatrix}$$

بردارهای ویژه چپ نرمالیزه شده به صورت $\psi_1\phi_1 = 1/0$ عبارت است از:

$$\psi = \phi^{-1} = \frac{adj(\phi)}{|\phi|}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} 1/0 & -1/0 \\ 0/0019 + j0/0168 & -0/0019 + j0/0168 \end{pmatrix}^T}{(-0/0019 + j0/0168 + 0/0019 + j0/0168)}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix}$$

ماتریس مشارکت برابر می شود با:

$$P = \begin{pmatrix} \phi_{11}\psi_{11} & \phi_{12}\psi_{12} \\ \phi_{21}\psi_{21} & \phi_{22}\psi_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/5 + j0/056 & 0/5 - j0/056 \\ 0/5 - j0/056 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0/503\angle 6/4 & 0/503\angle -6/4 \\ 0/503\angle -6/4 & 0/503\angle 6/4 \end{pmatrix}$$

وپاسخ زمانی به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{pmatrix} \Delta w_r(t) \\ \Delta\delta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$$

که با فرض (رادیان) $\Delta\delta = 5 = 0/0873$ و $\Delta w_r = 0$ در $t = 0$ داریم:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} \\ \psi_{21} & \psi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r(0) \\ \Delta\delta(0) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 - j0/056 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0/0873 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/0436 - j0/0049 \\ 0/0436 + j0/0049 \end{pmatrix}$$

پاسخ زمانی انحراف سرعت عبارت است از:

$$\Delta w_r(t) = \phi_{11} c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{12} c_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$= (-0/0019 + j0/0168)(0/0436 - j0/0049)e^{(-0/714 + j6/35)t} +$$

$$(-0/0019 - j0/0168)(0/0436 + j0/0049)e^{(-0/714 - j6/35)t}$$

$$= -0/0015 e^{-0/714t} \sin(6/35t)$$

به طور مشابه پاسخ زمانی انحراف زاویه روتور عبارت است از:

$$\Delta\delta(t) = 0/088 e^{-0/714t} \cos(6/35t - 0/112)$$

پس با سیستمی مرتبه دوم با یک مد نوسانی پاسخ با فرکانس میراشده ۶/۳۵ رادیان بر ثانیه با $1/0101$ هرتز سرو کارداریم. نوسانها با ثابت زمانی $\frac{1}{0/714}$ ثانیه از بین خواهند رفت (که متناظر با نسبت میرایی $0/112\zeta$ است). از آنجا که این یک مد زاویه روتور است Δw_r و $\Delta\delta$ به طور مساوی در آن مشارکت دارند.