

استخراج سیستم تک ماشینه از سیستم چند ماشینه

سیستم قدرت با n تا مولد و m تا بار در نظر بگیرید. مدل ریاضی مطالعات پایداری چند ماشینه به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \\ P_{ei} = \sum |E_i| |E_j| y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9-2)$$

در حالت یک ژنراتور متصل به شین بی نهایت رابطه ی (۹-۲) به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \\ P_e = \sum_{j=1}^2 |E_i| |E_j| y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (10-2)$$

وقتی که راکتانس از طریق رابطه ی (۱۱-۲) به دست می آید:

$$\sum X = X_T + X_g + X_L \quad (11-2)$$

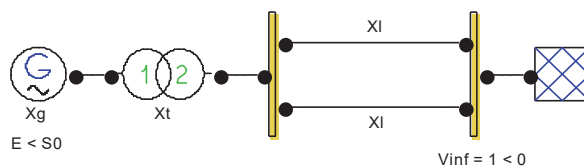
می توان درایه های ماتریس ادمیتانس و توان الکتریکی را از طریق روابط زیر به دست آورد.

$$Y_{11} = \frac{1}{j \sum X} = \frac{1}{\sum X} < -90, Y_{12} = Y_{21} = -(\frac{1}{\sum X} < -90) \quad (12-2)$$

$$P_e = |E_1| |E_1| Y_{11} \cos(\theta_{11}) + |E_1| |E_2| Y_{12} \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) = \frac{|E| |V_\infty|}{\sum X} \sin \delta \quad (13-2)$$

سناریوهای پایداری در سیستم تک ماشینه

مثال ۱- شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۴-۲: مدل شبکه ی تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت

در حالی که نیروگاه قدرت P_0 را به شبکه تزریق می کند، یکی از دو خط قطع می شوند. آیا سیستم پایدار می ماند؟

قبل از خطا : $P_m = P_0$, $\sum X = X_g + X_T + \frac{X_L}{2}$

$$P_e = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \Rightarrow P_{e0} = P_{\max} \sin \delta_0 \rightarrow \delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_{e0}}{P_{\max}}$$

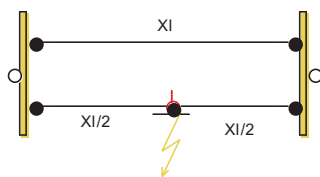
شرایط اولیه به صورت مقابل خواهد بود :

$$\begin{cases} \delta = \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt} = 0 \end{cases} \rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 + P'_{\max} \sin \delta)$$

بعد از قطع یک خط داریم : $P'_{\max} = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X'}$, $\sum X' = X_g + X_T + X_L$

باید معادله دیفرانسیل درجه دوم نوسان را با شرایط اولیه ای که داریم، حل کنیم و چک کنیم که آیا $\delta(t)$ محدود می شود یا خیر.

مثال ۲- اگر اتصال کوتاه در وسط یکی از خطوط شکل ۲-۴ اتفاق بیفتد و پس از t_d خط از دو طرف باز شود، پایداری را بررسی کنید.



شکل ۲-۵ : وقوع اتصال کوتاه در وسط خط انتقال

معادله ی نوسان حین خطا : $\frac{d\delta^2}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P''_{\max} \sin \delta)$

$$P''_{\max} = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X''} \Rightarrow \sum X'' = X_g + X_T + X_{Th}$$

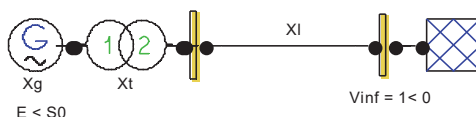
معادله ی نوسان پس از رفع خطا را با شرایط اولیه ی مقابل حل می کنیم:

$$\begin{aligned} \delta_0 &= f(t_d) \\ \frac{d\delta}{dt} &= f'(t_d) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \ddot{\delta} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P'_{\max} \sin \delta) \\ \Rightarrow \delta = g(t) \end{cases}$$

اگر $g(t)$ به مقدار ثابتی همگرا شود، سیستم پایدار می ماند.

مثال ۳- شبکه ی تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت را در نظر بگیرید :



شکل ۲-۶: مدل شبکه ی تک ماشینه ی متصل به شین بی نهایت

در حالی که نیروگاه قدرت P_0 را به شبکه تزریق می کند، به علت خطای مجازی خط برای t_d ثانیه قطع و مجددا بسته می شود. آیا نیروگاه پایدار می ماند؟

شرایط اولیه قبل از وقوع خطا :

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{\max}}, P_{\max} = \frac{|E||V_{\infty}|}{\sum X = X_L + X_g + X_T}$$

$$\begin{cases} \delta = \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt} = 0 \end{cases} \rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_e)$$

اگر خط قطع شود، توان الکتریکی عبوری صفر است و با حل معادله ی نوسان داریم :

$$\delta(t) = \frac{\omega_0}{4H} P_0 t^2 + \delta_0 = f(t)$$

در صورتی که در $t_d = T$ خط دوباره وصل شود، داریم :

$$\ddot{\delta}(t) = \frac{\omega_0}{2H} (P_0 - P_{\max} \sin \delta(t)) \text{ With: } \begin{cases} \delta_0 = f(T) = \frac{\omega_0}{4H} P_0 T^2 + \delta_0 \\ \frac{d\delta}{dt}(T) = \frac{\omega_0}{2H} P_0 T \end{cases}$$

برای آنکه نیروگاه پایدار بماند باید δ ژنراتور به δ_0 محدود برگردد.

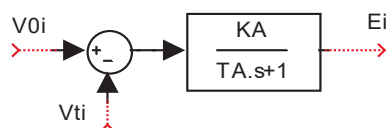
جهت ارزیابی پایداری گذرا در سیستم قدرت بدون نیاز به حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی توجه تمام محققین جهان به راه حلی مناسب معطوف شد.

با توجه به مشکلات حل معادله ی نوسان غیرخطی، قدم اول جهت تست پایداری، روش سطوح متساوی بود، سپس روش لیپانوف.

زیبایی روش لیپانوف این است که می گوید سیستم تا چه میزان قدرت قبل از اتصالی و یا زمان قطع می تواند داشته باشد تا پایدار بماند.

پایداری گذرای چند ماشینه با در نظر گرفتن سیستم های کنترلی

در پایداری کلاسیک فرض بر این بود که نیروی محرکه ی E_i, E_j و P_{mi} قدرت مکانیکی ورودی به مولد Δm ثابت است ولی با وجود سیستم های کنترلی، این مقادیر خروجی متغیر معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم های تحریک و گاورنر نیروگاه های مختلف می باشد. اگر فرض کنید سیستم تحریک دارای بلوک دیاگرام زیر باشد :



شکل ۲-۷ : بلوک دیاگرام سیستم تحریک

در نتیجه بایستی معادله ی دیفرانسیل زیر را به معادلات پایداری اضافه کرد :

$$E_i + T_{Ai} \frac{dE_i}{dt} = K_{Ai} (V_{0i} - V_{ti}) \quad (۲-۱۴)$$

در این صورت معادلات شبکه به صورت زیر در می آید:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \\ P_{ei} = \sum |E_i| |E_j| Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ E_i + T_{Ai} \frac{dE_i}{dt} = K_{Ai} (\Delta V_t) \end{cases} \quad (۲-۱۵)$$

همچنین اگر فرض شود بلوک دیاگرام حاکم بر سیستم گاورنر توربین به صورت زیر باشد:



شکل ۲-۸ : بلوک دیاگرام سیستم گاورنر توربین

باید دو معادله ی زیر را به معادلات پایداری شبکه اضافه کنیم:

$$\begin{cases} g_i + T_{gi} \frac{dg_i}{dt} = k_{gi} (\omega_{0i} - \omega_i) \\ P_{mi} + T_{ti} \frac{dP_{mi}}{dt} = k_{ti} g_i \end{cases} \quad (۲-۱۶)$$

وقتی که g_i میزان باز شدن شیر آب یا بخار باشد.

هر نیروگاه یک مدل تحریک و یک مدل گاورنر و توربین خاص دارد و بایستی معادلات دیفرانسیل همان مدل را برای نیروگاه منظور کرد.

روش های بهبود پایداری گذرا برای جلوگیری از Black-out

(۱) افزایش پایداری استاتیکی: با توجه به رابطه ی (۲-۱۷) با بهبود پایداری استاتیکی می توان پایداری گذرا را افزایش داد وقتی که حد پایداری استاتیکی، P_{max} می باشد.

$$P_{max} = \frac{|E||V_{\infty}|}{\sum X} \quad (2-17)$$

جهت افزایش پایداری استاتیکی می توان اقدامات زیر را انجام داد:

- افزایش سطح ولتاژ شبکه
- افزودن خط جدید
- کاهش راکتانس سری خط (استفاده از خط باندل شده)
- به کارگیری خازن سری در خط جهت جبران سازی
- رفع سریع خطا در شبکه با به کارگیری سیستم حفاظت و دژنکتورهای سریع
- به کارگیری کلیدهای وصل مجدد^۱ برای رفع خطاهای مجازی کوتاه مدت
- به کارگیری دژنکتورهای تک قطبی^۲ تا تنها فاز دچار خطا قطع شود.
- استفاده از ماشین های الکتریکی با اینرسی H بزرگ و راکتانس X کم
- سیستم های تحریک با پاسخ سریع و ضریب بهره ی بالا (گین)
- شیرزنی سریع^۳ تا بتوان P_m را در صورت کم شدن P_e کم کرد.
- ترمز مقاومتی^۴ به عنوان بار مجازی
- به کارگیری ادوات FACTS : نسل قدیم با ترستور نظیر SVC , CSC , TCR , HVDC و نسل جدید مثل STATCOM , UPFC , SSSC.
- بهره بردن از نقش نیروگاه های تلمبه ذخیره ای^۵ در بهبود پایداری زاویه ای

^۱ High speed recloser

^۲ single pole

^۳ fast valving

^۴ breaking resistor

^۵ DFIG

۲-۱-۳- نوسانات پیچشی و تشدید زیر سنکرون SSR

چون خازن سری به همراه اندوکتانس خط در مقابل اغتشاشات، دارای فرکانس نوسانی f_e می باشد، نوسانات قدرت به صورت flow روی گشتاور مکانیکی اثر می گذارند و به روتور گشتاور مقاوم T_e با فرکانس f_e را مطابق رابطه ی (۱۸-۲) اعمال می کنند و این در حالی است که قبلاً فرکانس گشتاور، فرکانس طبیعی شبکه بود. توضیحات بیشتر در این مورد در بخش ۳-۵ بیان شده است.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (۱۸-۲)$$

۲-۱-۴- ناپایداری ولتاژ Voltage Collapse

با افزایش الگوی مصرف بار (قدرت اکتیو- قدرت راکتیو) ولتاژ شین ها کاهش پیدا می کنند. نقطه ای که منجر به فروپاشی ولتاژ می گردد، حد بارگذاری برای پایداری ولتاژ است.

ژنراتور متصل به شین بی نهایت را در نظر بگیرید. ساده ترین فرم پایداری زاویه ای و ولتاژ برای ژنراتور متصل به شین بی نهایت به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \\ P_e = P_{max} \sin\delta \end{cases} \quad (۱۹-۲)$$

حد پایداری زاویه ای در $\delta = \delta_C$ به صورت رابطه ی (۲۰-۲) خواهد بود:

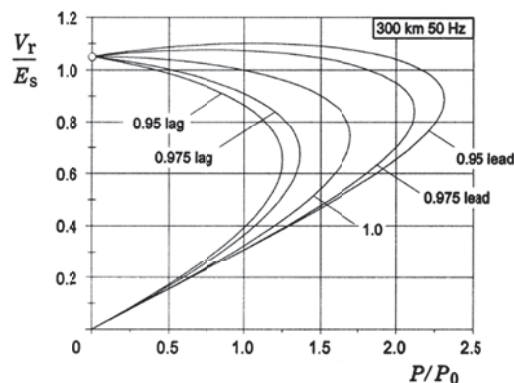
$$\begin{cases} P_{max} = \frac{|E||V_\infty|}{\sum X} \\ \delta_C = 90 \end{cases} \quad (۲۰-۲)$$

و حد انتقال قدرت اکتیو و حد انتقال قدرت راکتیو با $\cos\varphi$ ثابت به ترتیب با رابطه ی (۲۱-۲) و (۲۲-۲) بیان می شود:

$$\begin{cases} P_{max} = P_C = \frac{V_0^2(1 - \sin\varphi)}{2\sum X \cdot \cos^2\varphi} \\ V_C = \frac{V_0}{\cos\varphi} \sqrt{\frac{1 - \sin\varphi}{2}} \end{cases} \quad (۲۱-۲)$$

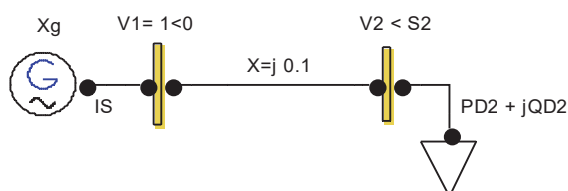
$$\begin{cases} Q_C = \frac{V_0^2(1 - \sin\phi)}{2 \sum X \cos^2\phi} \\ V_C = \frac{V_0}{\cos\phi} \sqrt{\frac{1 - \sin\phi}{2}} \end{cases} \quad (22-2)$$

و به این ترتیب تغییرات ولتاژ شین بار با ضریب قدرت های مختلف، مطابق شکل ۹-۲ به دست می آید.



شکل ۹-۲ : نمودار تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات توان اکتیو به ازای $\cos\phi$ های متفاوت

حال شبکه ی دو شینه ی زیر شامل بار و ژنراتور را در نظر بگیرید، با توجه به معادلات پخش بار روابط (۲۳-۲) و (۲۴-۲) برقرار است:



شکل ۱۰-۲ : شبکه ی شامل ژنراتور متصل به بار $P_D + jQ_D$

$$\begin{cases} P_{G_1} - P_{D_1} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ Q_{G_1} - Q_{D_1} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (23-2)$$

$$\begin{cases} P_{G_2} - P_{D_2} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ Q_{G_2} - Q_{D_2} = \sum |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (24-2)$$

چهار معادله، چهار مجهول شامل $P_{G_1}, Q_{G_1}, V_2, \delta$ به دست می آید.

مثال ۱- با در نظر گرفتن $|V_1| = 1^{pu}$, $P_{D_1} = Q_{D_1} = P_{G_2} = Q_{G_2} = 0$ و تغییر $P_{D_2} + jQ_{D_2}$ منحنی های ارائه شده را برای اطلاعات شبکه ی زیر به دست می آوریم.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j10 & j10 \\ j10 & -j10 \end{bmatrix}$$

$$P_{G1} = -10|V_1||V_2|\sin\delta_2$$

$$Q_{G1} = 10|V_1|^2 - 10|V_1||V_2|\cos\delta_2$$

$$-P_{D2} = -10|V_1||V_2|\sin\delta_2 \rightarrow \delta_2 = \sin^{-1} \frac{P_{D2}}{10|V_2|}$$

$$-Q_{D2} = -10|V_1||V_2|\cos\delta_2 + 10|V_2|^2 \rightarrow -10|V_2|\cos(\sin^{-1} \frac{P_{D2}}{10|V_2|}) + 10|V_2|^2 + Q_{D2} = 0$$

با حذف δ_2 بین روابط Q_{D2}, P_{D2} رابطه‌ی $|V_2|$ به دست می‌آید که با نرم افزار MATLAB قابل رسم است.

انواع ناپایداری ولتاژ

ناپایداری ولتاژ در دو بخش طبقه‌بندی می‌شود:

(۱) استاتیکی: با افزایش آرام بار به وجود می‌آید.

(۲) دینامیکی : با افزایش ناگهانی در مقدار بار به وجود می‌آید.

حد پایداری استاتیکی ولتاژ مطابق رابطه‌ی (۲۰-۲) و حد پایداری دینامیکی آن از نامساوی $P_L < P_{max}$ پیروی می‌کند و معادله‌ی نوسان در حالتی که ژنراتور در شین بی‌نهایت، بار را تغذیه می‌کند، به صورت رابطه‌ی (۱۹-۲) خواهد بود :

الگوریتم پایداری ولتاژ در یک شبکه‌ی چند شینه (نرم افزار PSAT)

در یک شبکه‌ی چند شینه جهت محاسبه‌ی ولتاژ شینه‌ها بر حسب الگو و رویه‌ی افزایش بار در شینه‌ها، می‌توان از طریق آنالیز حساسیت به ناپایداری پی برد. روابط کلی حاکم بر توان اکتیو و راکتیو از رابطه‌ی (۲۵-۲) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} P_k = P_G - P_D = \sum |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \\ Q_k = Q_G - Q_D = \sum |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (25-2)$$

با توجه به تئوری حساسیت روابط زیر را داریم:

$$\begin{cases} \Delta P_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum \frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} \Delta |V_i| \\ \Delta Q_k = \sum \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum \frac{\partial Q_k}{\partial V_1} \Delta V_i \end{cases} \quad (26-2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (27-2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (28-2)$$

$$\begin{cases} \delta(n+1) = \delta(n) + \mu \Delta \delta(n) \\ V(n+1) = V(n) + \mu \Delta V(n) \end{cases} \quad (29-2)$$

مقادیر استثنایی^۱: مقادیر ویژه $j^H \times j$ ژاکوبین $j^H \times j$ مقادیری حقیقی هستند. جذر مقادیر ویژه ی ماتریس $j^H \times j$ مقادیر استثنایی هستند وقتی j^H از رابطه ی (۳۰-۲) به دست آید:

$$j^H = (j^*)^T \quad (30-2)$$

قضیه : کوچک شدن مقادیر استثنایی σ_K نشان دهنده ی نزدیک شدن ماتریس ژاکوبین به حالت استثنایی و نزدیک شدن دترمینان آن به صفر است که این امر به واگرایی در محاسبات ولتاژ شین منجر می شود^۲.

۲-۲- طبقه بندی پدیده های گذرا و دینامیکی در سیستم قدرت

پدیده های گذرا و دینامیکی سیستم قدرت به صورت زیر طبقه بندی می شوند:

(۱) پدیده های زودگذر فوق العاده سریع^۳ مثل حالت گذرای اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه و کلیدزنی. راه حل مقابله با این اضافه ولتاژ میکروثانیه ای، نصب برق گیر در باس ترانسفورماتور است.

(۲) پدیده های زودگذر نیمه سریع^۴ مثل حالت گذرای اتصال کوتاه

^۱ Singular Value

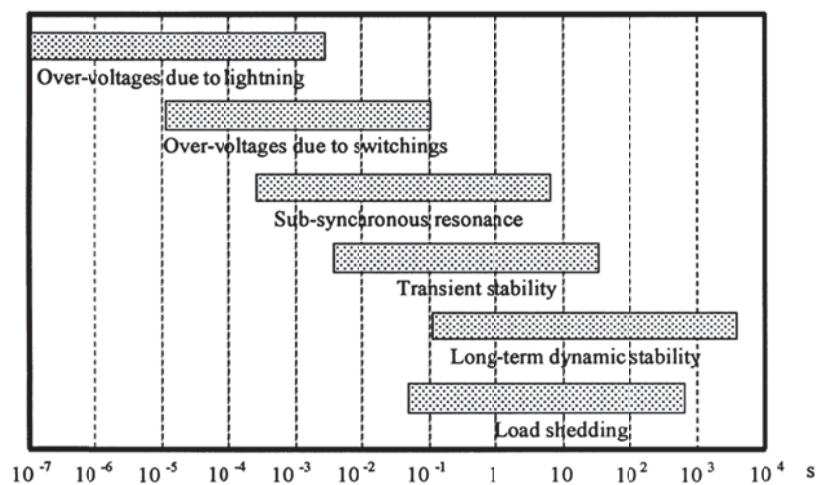
^۲ مراجعه شود به مقاله ی ناپایداری ولتاژ در جزیره قشم - هفتمین کنفرانس برق

^۳ Ultra Fast Transient

^۴ Medium Fast Transient

۳) پدیده زودگذر آهسته^۱ مرتبط با پایداری گذرا و دینامیکی ماشین های سنکرون سیستم قدرت، پایداری دینامیکی فرکانس پایین^۲

شکل ۲-۱۱ محدوده های زمانی پدیده های مختلف در مطالعه ی دینامیک سیستم قدرت را نشان می-دهد.



شکل ۲-۱۱ : محدوده های زمانی پدیده های مختلف در مطالعه ی دینامیک سیستم قدرت

بسته به نوع مطالعات پدیده های مختلف، عناصری را که بر سرنوشت مطالعه موثر هستند، مدلسازی می-کنیم. همچنین درجه ی مدل عناصر در مطالعات مختلف، متفاوت است.

^۱ Subtransient
^۲ SSR

تکالیف فصل دوم

۱. تمام بحث‌های پایداری زاویه‌ای (گذرا)، شامل مطالعات زمانی، تساوی سطوح و لیپانوف که روی ماشین سنکرون بررسی شد، روی ماشین آسنکرون نیز تعمیم دهید.
۲. گزارشات ملی و بین‌المللی را در رابطه با خاموشی‌های سراسری و باز وصل آن بررسی و ارائه نمایید.

تمرین های فصل دوم

۱. پدیده‌های مختلف در مطالعات دینامیک سیستم قدرت را شرح داده و عناصری از سیستم قدرت را که در سرنوشت این مطالعات دخالت می‌کنند، نام ببرید و درجه مدل‌سازی این عناصر را برای آن مطالعه تعیین کنید.

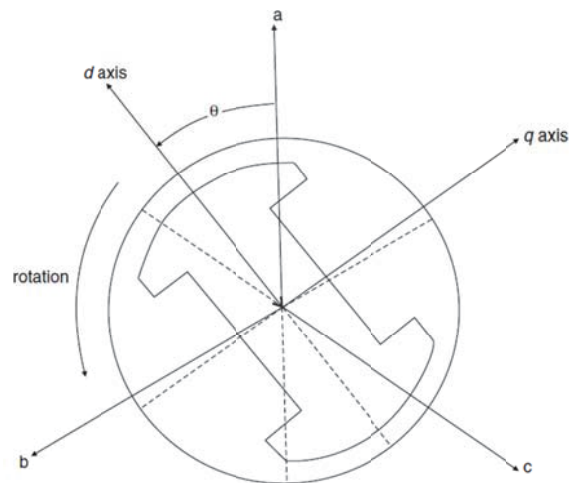
پروژه های پیشنهادی فصل دوم

۱. مقایسه‌ی روش‌های مختلف بررسی پایداری چند ماشین در سیستم‌های قدرت شامل روش‌های زمانی، سطوح مساوی و لیاپانوف.
۲. علاوه بر مطالعات Short Circuit , Voltage Build up بر روی یک ماشین سنکرون، مطالعات دینامیکی Load Rejection را در آزمایشگاه انجام دهید.
۳. مقابله با Load Rejection و طراحی بار مجازی با ترستور برای جلوگیری از Trip نیروگاه ناشی از قطع بار.
۴. پیش‌بینی Black Out [خاموشی سراسری] به روش لیاپانوف
۵. بررسی پایداری دینامیکی ولتاژ

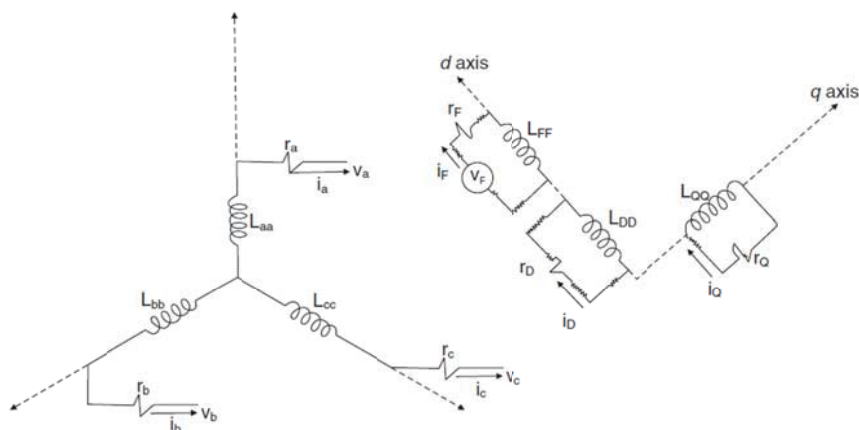
فصل سوم: مدل سازی اجزای سیستم قدرت

۳-۱- ماشین سنکرون

ژنراتور سنکرون یکی از عناصر مهم سیستم قدرت است. علاوه بر مشخصات قدرت (MW)، ولتاژ (KV)، سرعت (rpm) و فرکانس (Hz)، پارامترهای الکتریکی و مکانیکی دیگر نیز که در رفتار مولد به هنگام بهره‌برداری تأثیر می‌گذراند، جز مشخصات آنها توسط کارخانجات سازنده عرضه می‌شود.



شکل ۳-۱ : دیاگرام شماتیک ماشین سنکرون



شکل ۳-۲ : سیم پیچی های کوپل شده ی ماشین سنکرون

۳-۱-۱- مدل ریاضی ماشین سنکرون و معادلات ولتاژ (غیرالکتریکی)

مولد شامل سه سیم پیچ abc در استاتور که به صورت ستاره مستقیماً به زمین متصل هستند (یا از طریق امپدانس) و سیم پیچی های مستهلک کننده (damper) به صورت دو سیم پیچ اتصال کوتاه شده-ی Q, D روی دو محور d, q است. همین طور میدان دوار ژنراتور از طریق یک ولتاژ dc قابل کنترل دو سر سیم پیچی FF' تامین می شود. در مدل ژنراتور از اثر جریان گردشی فوکو در هسته ی یکپارچه صرف-نظر می کنیم. البته می توان اثر یکپارچگی را که موجب ایجاد جریان فوکو می شود، با یک سیم GG' روی محور q مدل کرد.

فرض های تسهیلی که در مدل ماشین سنکرون در نظر می گیریم، شامل موارد زیر است:

- (۱) ماشین را دوقطبی در نظر می گیریم.
- (۲) از اثر اشباع صرف نظر می کنیم.
- (۳) مولفه ی اصلی میدان در فاصله هوایی را در نظر گرفته و از هارمونیک ها صرف نظر می کنیم.
- (۴) از اثر پوستی در سیم ها صرف نظر می کنیم، چون ژنراتورها اکثراً در فرکانس 50^{Hz} هستند.
- (۵) از اثر هیستریزیس صرف نظر می کنیم.

مبحث اندوکتانس های ماشین سنکرون اهمیت ویژه ای دارد که در ادامه به آن می پردازیم.

وقتی موتور با سرعت ω می چرخد، اندوکتانس های خودی و متقابل سیم پیچ ها، بعضی ثابت و برخی تابع θ ، زاویه بین محور d و محور فرضی aa' ، می باشند و می توان این اندوکتانس ها را به صورت زیر دسته بندی نمود:

۱) اندوکتانس خودی فازهای استاتور که با روابط (۱-۳) تا (۳-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{aa} = L_S + L_m \cos 2\theta \quad (1-3)$$

$$L_{bb} = L_S + L_m \cos(2\theta + 120) \quad (2-3)$$

$$L_{cc} = L_S + L_m \cos(2\theta - 120) \quad (3-3)$$

۲) اندوکتانس‌های متقابل فازهای استاتور که با روابط (۴-۳) تا (۶-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_S + L_m \cos(2\theta - 120) \quad (4-3)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_S + L_m \cos 2\theta \quad (5-3)$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -M_S + L_m \cos(2\theta + 120) \quad (6-3)$$

۳) اندوکتانس‌های خودی سیم‌پیچ‌های روتور که طبق رابطه‌ی (۷-۳) محاسبه می‌شود.

$$L_{ff} = L_f, L_{DD} = L_D, L_{QQ} = L_Q \quad (7-3)$$

چون این سیم‌پیچ‌ها همراه روتور می‌چرخند، مقدارشان با زمان تغییر نمی‌کند.

۴) اندوکتانس‌های متقابل سیم‌پیچ‌های روتور که طبق رابطه‌ی (۸-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{FD} = L_{DF} = M_{FD} \quad (8-3)$$

چون دو سیم‌پیچ بر هم عمودند $L_{FQ} = L_{QF} = 0$ می‌باشد.

۵) اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچ میدان و فازهای استاتور که با روابط (۹-۳) تا (۱۱-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{Fa} = L_{aF} = M_F \cos \theta \quad (9-3)$$

$$L_{Fb} = L_{bF} = M_F \cos(\theta - 120) \quad (10-3)$$

$$L_{Fc} = L_{cF} = M_F \cos(\theta - 240) \quad (11-3)$$

۶) اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچ میرایی محور طولی (d) و فازهای استاتور که با روابط (۱۲-۳) تا (۱۴-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{Da} = L_{aD} = M_D \cos \theta \quad (12-3)$$

$$L_{Db} = L_{bD} = M_D \cos(\theta - 120) \quad (13-3)$$

$$L_{Dc} = L_{cD} : M_D \cos(\theta - 240) \quad (۱۴-۳)$$

۷) اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچ میرایی محور عرضی (q) و فازهای استاتور که با روابط (۱۵-۳) تا (۱۷-۳) محاسبه می‌شوند.

$$L_{qa} = L_{aq} = M_Q \sin \theta \quad (۱۵-۳)$$

$$L_{qb} = L_{bq} = M_Q \sin(\theta - 120) \quad (۱۶-۳)$$

$$L_{Qc} = L_{cQ} = M_Q \sin(\theta - 240) \quad (۱۷-۳)$$

در واقع ژنراتور، کوپلاژ الکترومغناطیسی بین شش تا سیم‌پیچی است.

معادلات ولتاژ استاتور و روتور مولد سنکرون قبل از اعمال تبدیل پارک به ترتیب مطابق روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) می‌باشد:

$$\begin{cases} V_a = -R_a i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \\ V_b = -R_b i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \\ V_c = -R_c i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \end{cases} \quad (۱۸-۳)$$

$$\begin{cases} V_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} \end{cases} \quad (۱۹-۳)$$

فلوی در برگیرنده‌ی سیم‌پیچ‌ها بر حسب اندوکتانس‌ها و جریان سیم‌پیچ‌ها با رابطه‌ی (۲۰-۳) محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (۲۰-۳)$$

۳-۱-۲- مدل پارک ماشین سنکرون و معادلات ولتاژ

با استفاده از تبدیل پارک سه اندوکتانس X_d, X_q, X_0 خواهیم داشت. توجه کنید در عمل، اندازه-گیری راکتانس به طریق آزمایشگاهی بسیار مشکل است. برای رهایی از این مشکل از طریق تبدیل پارک، به جای سه سیم پیچ abc در استاتور دو سیم پیچ d, q روی محور طولی d و محور عرضی q و یک سیم پیچ صفر (هموپلر) عمود به صفحه‌ی محور d, q داریم که این سیم‌پیچ در مطالعات سیستم‌های متقارن متعادل اثر ندارد و با سرعت ω می‌چرخد و این سیم‌پیچ‌ها آثار ناشی از سه فاز را دارند.

مقدار ولتاژ، جریان در سیم پیچ‌های d و q و 0 از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (۳-۲۱)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (۳-۲۲)$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (۳-۲۳)$$

اندوکتانس‌های سنکرون محورهای d, q و 0 با توجه به تبدیل پارک به ترتیب طبق روابط (۳-۲۴) تا

(۳-۲۶) محاسبه می‌شوند:

$$L_d = L_s - M_s + \frac{3}{2} L_m \rightarrow X_d = L_d \omega \quad (۳-۲۴)$$

$$L_q = L_s - M_s - \frac{3}{2} L_m \rightarrow X_q = L_q \omega \quad (۳-۲۵)$$

$$L_0 = L_s + 2M_s \rightarrow X_0 = L_0 \omega \quad (۳-۲۶)$$

معادلات ولتاژ استاتور و روتور مولد سنکرون پس از اعمال تبدیل پارک به ترتیب طبق روابط (۳-۲۷)

و (۳-۲۸) خواهد بود:

$$\begin{cases} V_d = -Ri_d - \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q\omega \\ V_q = -Ri_q - \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d\omega \\ V_0 = -Ri_0 - \frac{d\lambda_0}{dt} \end{cases} \quad (۲۷-۳)$$

$$\begin{cases} V_F = +R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} \end{cases} \quad (۲۸-۳)$$

وقتی که $R_a = R_b = R_c = R$ و روابط شار پیوندی محورهای d, q و 0 به ترتیب طبق روابط (۲۹-۳) تا (۳۱-۳) باشد.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_f \\ \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D \\ kM_F & L_F & M_{FD} \\ kM_D & M_{FD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \end{bmatrix} \quad (۲۹-۳)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & kM_Q \\ kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (۳۰-۳)$$

$$\lambda_0 = L_0 i_0 \quad (۳۱-۳)$$

۳-۱-۳- مدل مکانیکی ماشین سنکرون

معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر بخش مکانیکی ماشین سنکرون طبق رابطه‌ی (۳۲-۳) بیان می‌شود:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} + D\omega = T_m - T_e \\ T_e = i_d \lambda_q - i_q \lambda_d \end{cases} \quad (۳۲-۳)$$

در این بخش به اثبات رابطه‌ی گشتاور الکتریکی در ماشین سنکرون می‌پردازیم. رابطه‌ی (۳۳-۳) برای محاسبه‌ی توان الکتریکی را می‌دانیم:

$$P = i^T V = i^T \left[Ri + \frac{d}{dt} L(\theta) i + L(\theta) \frac{di}{dt} \right] = i^T Ri + i^T \frac{d}{dt} L(\theta) i + i^T L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (۳۳-۳)$$

اگر عبارت $\frac{1}{2} i^T L(\theta) i$ انرژی ذخیره شده در سیم پیچ ها و تلفات سیم پیچ ها باشد، توان ذخیره شده در میدان از رابطه ی (۳-۳۴) به دست می آید:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^T L(\theta) i \right) = \frac{1}{2} \frac{di^T}{dt} L(\theta) i + \frac{1}{2} i^T \frac{dL(\theta)}{dt} i \quad (۳-۳۴)$$

توان تحویلی الکتریکی مولد طبق رابطه ی (۳-۳۵) عبارت است از:

$$P_e = \frac{1}{2} i^T \frac{dL(\theta)}{dt} i = \frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} i = P_e = \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} i \right) \quad (۳-۳۵)$$

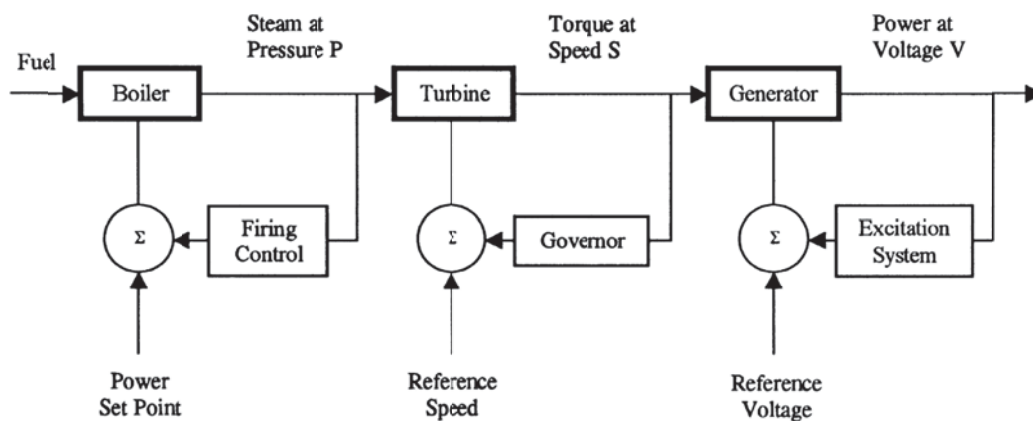
حال با استفاده از رابطه ی (۳-۳۶) می توان رابطه ی گشتاور الکتریکی را به دست آورد.

$$P_C = \omega T_e \quad (۳-۳۶)$$

$$T_e = \frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} i = \frac{1}{2} (B^T i_B)^T \frac{d}{d\theta} (B^{-1} L_B B) B^{-1} i_B = i_B^T B \frac{dB^{-1}}{d\theta} \lambda_B = i_d \lambda_q - i_q \lambda_d \quad (۳-۳۷)$$

۳-۲- سیستم تحریک

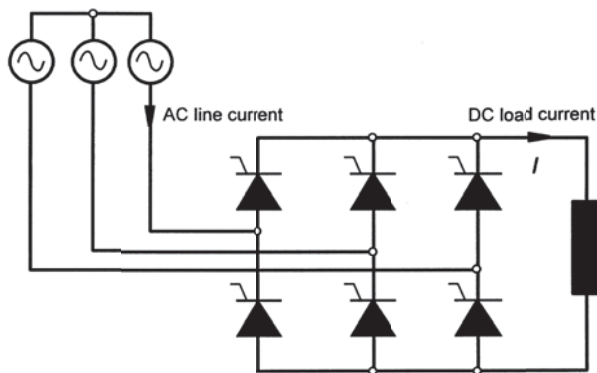
حلقه ی اصلی کنترل ژنراتور سنکرون را در نظر بگیرید:



شکل ۳-۳ : حلقه ی اصلی کنترل ژنراتور سنکرون

سیستم تحریک نشان داده شده در شکل، منبع تأمین جریان dc برای سیم پیچ میدان یعنی روتور مولد است. قدرت آن حدود یک تا دو درصد قدرت مولد است.

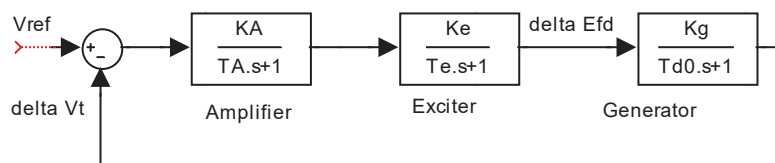
در مولدهای قدیمی، از یک موتور dc هم‌محور با مولد اصلی استفاده می‌شد و یا جریان dc از طریق حلقه‌های اصطکاک و جاروبک^۱ به روتور اصلی انتقال می‌یافت ولی در مولدهای امروزی از تحریک‌های Ac یا دیود گردان بدون جاروبک^۲ و یا از تحریک استاتیکی تریتستوری استفاده می‌شود.



شکل ۳-۴ : مدار یک سوساز سه فاز

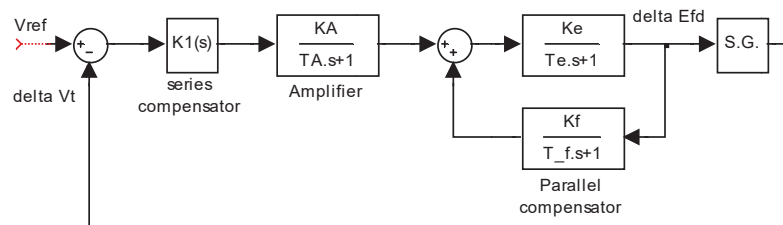
۳-۲-۱- بررسی دینامیکی سیستم های تحریک بدون جاروبک

بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جبران‌سازهای سری و موازی مطابق شکل ۳-۵ است:



شکل ۳-۵ : بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جبران‌سازهای سری و موازی

و بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جاروبک با در نظر گرفتن جبران‌سازهای سری و موازی مطابق شکل ۳-۶ خواهد بود:



^۱ Brush & Slipping
^۲ Brush less

شکل ۳-۶: بلوک دیاگرام سیستم تحریک بدون جاروبک با جبران سازه‌های سری و موازی

به عنوان یک حالت خاص، اگر به جای مدل درجه‌ی سه هفرون فیلیپس، مدل درجه یک ماشین سنکرون را بدون جبران‌کننده‌ها در نظر بگیریم، تابع تبدیل دیاگرام حلقه‌ی کنترل ولتاژ به صورت رابطه-ی (۳۸-۳) خواهد بود:

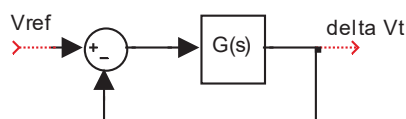
$$\frac{\Delta V_t}{\Delta E_{fd}} = \frac{k_g}{1 + ST'_{d0}} \quad (38-3)$$

وقتی که k_g, T'_{d0} از رابطه‌ی (۳۹-۳) محاسبه می‌شود:

$$(39-3)$$

۳-۲-۲- بررسی تاثیر سیستم تحریک در پایداری مولد

بر طبق شکل ۳-۵ بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون را می‌توان به صورت شکل ۳-۷ نمایش داد، وقتی که تابع تبدیل $G(S)$ از رابطه‌ی (۴۰-۳) محاسبه می‌گردد:



شکل ۳-۷: بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون

$$\rightarrow G(S) = \frac{k_A k_e k_g}{(1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0})} \quad (40-3)$$

در این صورت تابع تبدیل سیستم مطابق رابطه‌ی (۴۱-۳) خواهد بود:

$$\frac{\Delta V_t}{V_{ref}} = \frac{G(S)}{1 + G(S)} \quad (41-3)$$

ریشه‌های مخرج تابع تبدیل سیستم برای بررسی پایداری آن تعیین‌کننده است، در نتیجه باید به محاسبه‌ی آنها پرداخت وقتی که $K = k_A k_e k_g$ است.

$$1 + G(S) = 0 \rightarrow 1 + \frac{K}{(1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0})} = 0 \quad (42-3)$$

$$\rightarrow (1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0}) + K = 0$$

در نتیجه قطب‌های سیستم حلقه بسته از رابطه‌ی (۳-۴۲) به دست می‌آید و اگر ریشه‌های این معادله، یعنی S_i ها، دارای قسمت حقیقی منفی باشند، سیستم پایدار است.

جهت پایداری سیستم معمولاً شرایط زیر را داریم :

$$0.02^S < T_A < 0.1^S, \quad 0.5^S < T_e < 1^S, \quad 5^S < T'_{d0} < 10^S \quad (۳-۴۳)$$

اگر $K=0$ باشد، قطب‌های سیستم حلقه بسته از رابطه‌ی (۳-۴۴) به دست می‌آید:

$$S_1 = \frac{1}{T_A}, S_2 = -\frac{1}{T_e}, S_3 = -\frac{1}{T'_{d0}} \quad (۳-۴۴)$$

می‌توان مکان هندسی ریشه‌ها را وقتی K تغییر می‌کند، رسم نمود. با توجه به شکل مکان هندسی ریشه‌ها می‌توان ملاحظه نمود که به ازای بعضی از مقادیر K ریشه‌ها به سمت راست محور $j\omega$ رفته و سیستم ناپایدار می‌شود.

راه حل برای پایدار نمودن سیستم، استفاده از جبران‌کننده‌های پایدار ساز سیستم تحریک است. می‌دانیم با افزایش ضریب K خطای ماندگار کاهش پیدا می‌کند ولی باعث تضعیف پایداری می‌شود، اما با اضافه کردن جبران‌کننده‌های سری و موازی این تعارض برطرف می‌شود، لذا با افزودن یک جبران‌کننده ی سری با تابع تبدیل $K_1(S) = 1 + T_C S$ ، تابع تبدیل حلقه باز به صورت رابطه‌ی (۳-۴۵) در می‌آید:

$$G(S) = \frac{K(1 + ST_C)}{(1 + ST_A)(1 + ST_e)(1 + ST'_{d0})} \quad (۳-۴۵)$$

با تنظیم ثابت زمانی جبران‌کننده ی سری به صورت $T_C \simeq T_e$ ، تابع تبدیل حلقه باز به صورت زیر در می‌آید:

$$G(S) = \frac{K}{(1 + ST_A)(1 + ST'_{d0})} \quad (۳-۴۶)$$

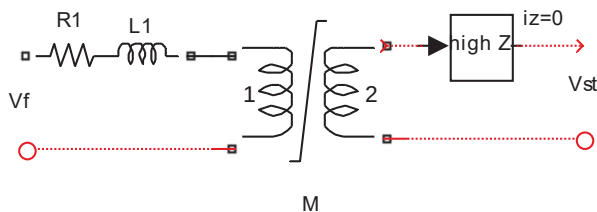
و مکان ریشه‌ها در حالت استفاده از جبران‌ساز سری به ازای $K=0$ طبق رابطه‌ی (۳-۴۷) به دست می‌آید:

$$S_1 = -\frac{1}{T_A}, S_2 = -\frac{1}{T'_{d0}} \quad (۳-۴۷)$$

در نتیجه، با افزایش بهره‌ی K ضمن اینکه سیستم پایدار است، خطای ماندگار نیز کاهش می‌یابد.

۳-۲-۳- بررسی حلقه ی کنترل ولتاژ مولد dc تحریک مستقل با جبران سازها

اگر مدار معادل از دو سر ترانس پایدارساز به عنوان جبران ساز موازی به صورت شکل ۸-۳ نمایش داده شود، رابطه ی (۵۰-۳) تابع تبدیل جبران ساز موازی را بیان می کند.



شکل ۸-۳ : مدار معادل از دو سر جبران ساز موازی

$$V_f = R_1 i_{ST} + L_1 \frac{di_{ST}}{dt} \quad (۴۸-۳)$$

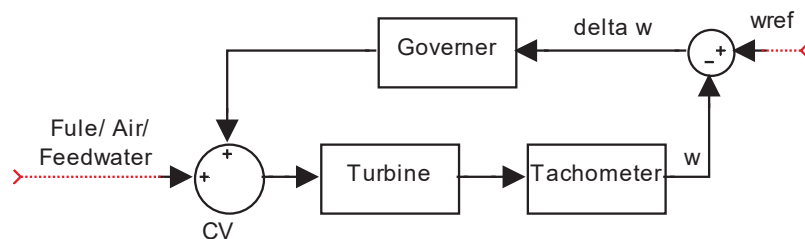
$$V_{ST} = M \frac{di_{ST}}{dt} \quad (۴۹-۳)$$

$$\frac{V_{ST}(S)}{V_f(S)} = \frac{MS}{R_1 + L_1 S} = \frac{k_f S}{1 + T_f S} \quad (۵۰-۳)$$

وقتی که V_{ST} ولتاژ ترانس سری، V_f ولتاژ فیلد ژنراتور و $T_f = \frac{L_1}{R_1}$ ، $k_f = \frac{M}{R_1}$ می باشد.

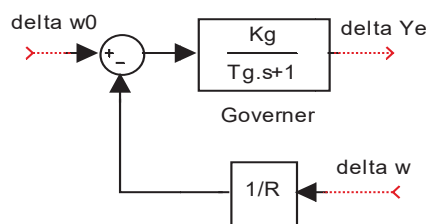
۳-۳- مدل سازی گاورنر

حلقه ی کنترل فرکانس را در نیروگاه مطابق شکل ۹-۳ در نظر بگیرید :



شکل ۹-۳ : حلقه ی کنترل فرکانس در نیروگاه

جیمز وات، اولین گاورنر مکانیکی (تنظیم کننده ی سرعت) را ساخت که مدل ریاضی آن توسط ماکسول، استخراج شده بود. تابع تبدیل، ورودی و خروجی گاورنر در شکل ۱۰-۳ نشان داده شده است.

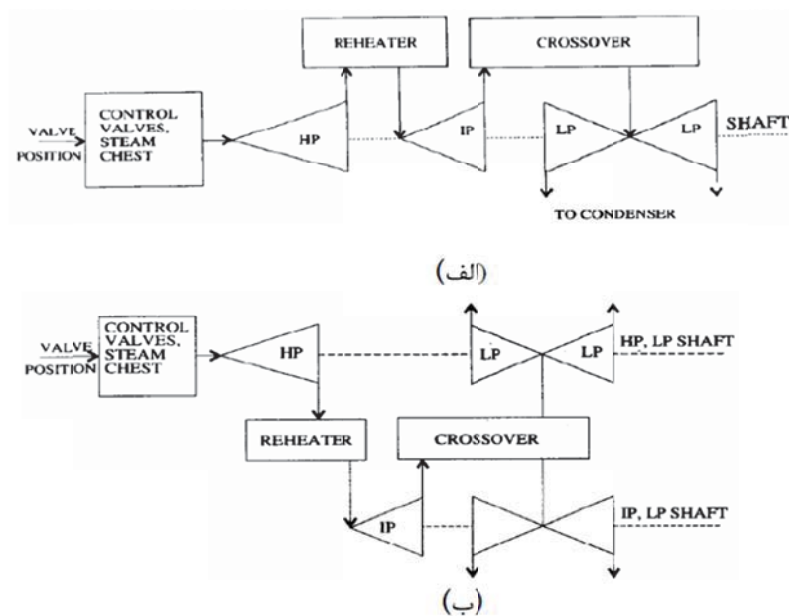


شکل ۳-۱۰ : بلوک دیاگرام گاورنر

وقتی که R، ضریب تنظیم گاورنر است.

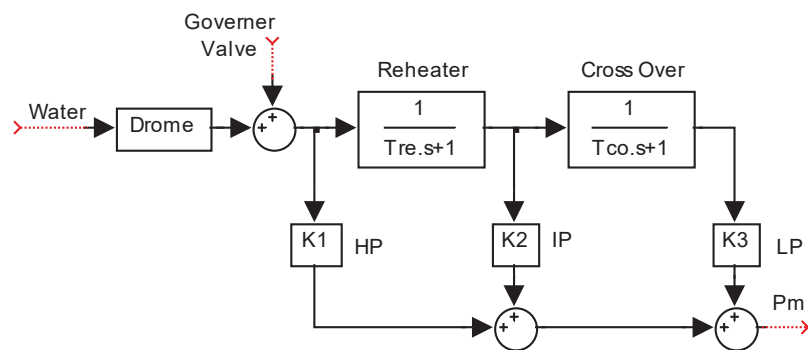
۳-۴- مدل سازی توربین

توربین بخار می تواند شامل سه طبقه توربین فشار قوی، فشار متوسط و فشار ضعیف باشد. شکل ۳-۱۱ توربین بخار را در دو حالت حضور یک Reheater نمایش می دهد.



شکل ۳-۱۱ : سیستم توربین بخار با یک گرم کننده ی مجدد (a) Tandem compound (b) Cross compound

و بلوک دیاگرام توربین بخار شکل فوق، مطابق شکل ۳-۱۲ خواهد بود:



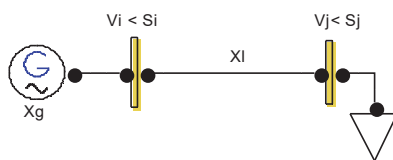
شکل ۳-۱۲ : بلوک دیاگرام توربین بخار

$$K_{1,HP} + K_{2,IP} + K_{3,LP} = 1 \quad (۵۱-۳)$$

وقتی که رابطه‌ی (۵۱-۳) بین گین‌های سه طبقه‌ی توربین برقرار باشد.

۳-۵- مدل توربوژنراتور متصل به شین بی نهایت

شکل ۳-۱۳ را در نظر بگیرید :



شکل ۳-۱۳ : مدل ژنراتور متصل به بار

قدرت انتقالی در خط از رابطه‌ی (۵۲-۳) به دست می‌آید:

$$P_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{x_{ij}} \sin \delta_{ij} \quad (۵۲-۳)$$

وقتی که $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ است.

ماکزیمم قدرت انتقالی در $\delta_{ij} = 90$ درجه اتفاق می‌افتد و مطابق رابطه‌ی (۵۳-۳) محاسبه می‌شود:

$$P_{max} = \frac{|V_i||V_j|}{x_{ij}} \quad (۵۳-۳)$$

با کاهش x_{ij} ، قدرت انتقالی در خط تا حد حرارتی خط افزایش می‌یابد و به دو روش می‌توان x_{ij} را

کم کرد:

(۱) احداث خط کمکی : در صورت مشابه بودن خط کمکی با خط اصلی راکتانس معادل خط از رابطه‌ی (۵۴-۳) به دست می‌آید:

$$x_{eq} = \frac{1}{2} x_{ij} \quad (54-3)$$

(۲) استفاده از خازن سری : اگر راکتانس خازنی را با x_C نمایش دهیم، راکتانس معادل خط از رابطه‌ی (۵۵-۳) به دست می‌آید:

$$x_{eq} = x_{ij} - x_C \quad (55-3)$$

دقت شود، حضور خازن سری اگرچه موجب کاهش راکتانس خط می‌شود، اما امکان وقوع نوسانات زیرسنکرون^۱ SSR را بر روی محور توربوژنراتور افزایش می‌دهد.

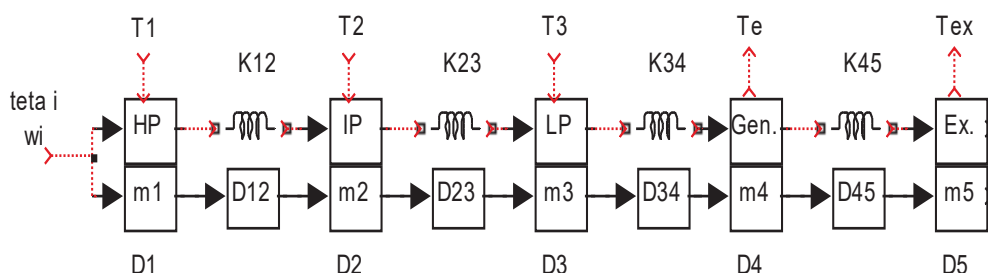
سلف L و خازن C خط دارای یک فرکانس طبیعی الکتریکی f_e مطابق رابطه‌ی (۵۶-۳) است. اگر مجموع f_e با یکی از فرکانس‌های f_m چند جرم و فنر روتور که همان مقادیر ویژه‌ی ماتریس A مدل چند جرم و فنر است، برابر فرکانس شبکه شد، انرژی زیادی بین شبکه و روتور مبادله می‌شود که موجب شکستن محور توربوژنراتور خواهد شد.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (56-3)$$

در نتیجه شرط وقوع SSR برقراری رابطه‌ی (۵۷-۳) است:

$$f = f_e + f_m \quad (57-3)$$

شکل ۱۴-۳ بلوک دیاگرام یک توربوژنراتور متصل به شین بی‌نهایت را نشان می‌دهد. وقتی که k ضریب فنر، D نمایش گر damper و توربین بخار تشکیل شده از چند طبقه‌ی $HP - IP - LP$ است.



شکل ۱۴-۳ : دیاگرام یک توربوژنراتور متصل به شین بی‌نهایت

معادله‌ی گشتاور جرم $\dot{M}$ ، با توجه به اینکه گشتاور محور و گشتاور توربین T_i مخالف یکدیگرند، در حالت کلی به صورت رابطه‌ی (۵۸-۳) است:

$$\begin{cases} M_i \Delta \dot{\omega}_i = \Delta T_i - D \Delta \omega_i + k_{i-1,i} (\Delta \theta_{i-1} - \Delta \theta_i) - k_{i,i+1} (\Delta \theta_i - \Delta \theta_{i+1}) \\ \Delta \dot{\theta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i \end{cases} \quad (58-3)$$

در ادامه برای توربوژنراتور نشان داده شده در شکل ۳-۱۴ معادلات گشتاور را می‌نویسیم وقتی که $i=1,2,\dots,5$ است. سه طبقه‌ی $LP-IP-HP$ توربین بخار نقش گشتاور محرک و ژنراتور نقش گشتاور مخالف را دارد. روابط (۵۹-۳) تا (۶۳-۳) به ترتیب برای سه طبقه توربین بخار $LP-IP-HP$ ، ژنراتور و تحریک نوشته شده‌اند.

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_H = \frac{1}{M_H} [\Delta T_H - D_H \Delta \omega_H - k_{HI} (\Delta \theta_H - \Delta \theta_I)] \\ \Delta \dot{\theta}_H = \omega_0 \Delta \omega_H \end{cases} \quad (59-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_I = \frac{1}{M_I} [\Delta T_I - D_I \Delta \omega_I - k_{HI} (\Delta \theta_H - \Delta \theta_I) - k_{IL} (\Delta \theta_I - \Delta \theta_L)] \\ \Delta \dot{\theta}_I = \omega_0 \Delta \omega_I \end{cases} \quad (60-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_L = \frac{1}{M_L} [\Delta T_L - D_L \Delta \omega_L + k_{IL} (\Delta \theta_I - \Delta \theta_L) - k_{LG} (\Delta \theta_L - \Delta \theta_G)] \\ \Delta \dot{\theta}_L = \omega_0 \Delta \omega_L \end{cases} \quad (61-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M_G} [-\Delta T_e - D_G \Delta \omega + k_{LG} (\Delta \theta_L - \Delta \delta) - k_{G,ex} (\Delta \delta - \Delta \theta_{ex})] \\ \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \end{cases} \quad (62-3)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_{ex} = \frac{1}{M_{ex}} [\Delta T_{ex} - D_{ex} \Delta \omega_{ex} + k_{G,ex} (\Delta \delta - \Delta \theta_{ex})] \\ \Delta \dot{\theta}_{ex} = \omega_0 \Delta \omega_{ex} \end{cases} \quad (63-3)$$

این معادلات دقیق است و برای بررسی پدیده‌ی SSR به جای رابطه‌ی (۳۲-۳) باید معادلات چند جرم و فنر فوق به کار رود.

معادلات دینامیکی چند جرم و فنر را می‌توان به صورت معادله حالت (۶۴-۳) بیان نمود وقتی که متغیرهای حالت و ورودی‌ها به ترتیب مطابق روابط (۶۵-۳) و (۶۶-۳) هستند:

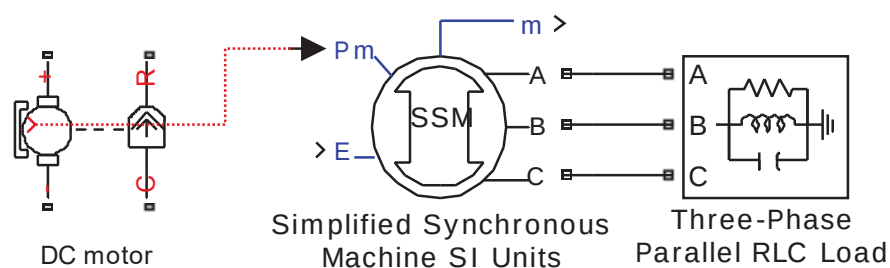
$$\dot{X}_m = [A]X_m + [B]u_m \quad (64-3)$$

$$X_m = [\Delta\omega_H, \Delta\theta_H, \Delta\omega_I, \Delta\theta_I, \Delta\omega_L, \Delta\theta_L, \Delta\omega, \Delta\delta, \Delta\omega_{ex}, \Delta\theta_{ex}]^T \quad (۶۵-۳)$$

$$u_m = [\Delta T_H, \Delta T_I, \Delta T_L, \Delta T_e, \Delta T_{ex}]^T \quad (۶۶-۳)$$

۳-۶- میکروماشین جهت مطالعات دینامیکی

شکل ۳-۱۵ را در نظر بگیرید که در آن از یک موتور dc جهت تامین توان مکانیکی ژنراتور سنکرون استفاده می شود تا مولد سنکرون بتواند توان الکتریکی مورد نیاز بار موردنظر را تامین نماید. این مجموعه به عنوان یک میکرو ماشین، جهت انجام مطالعات دینامیکی مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۳-۱۵ : مدل شماتیک میکروماشین

۳-۶-۱- دینامیک ولتاژ سازی در مختصات دو محوری و سه محوری

معادلات الکتریکی ماشین سنکرون در حوزه ی abc به صورت ماتریسی از رابطه ی (۶۷-۳) پیروی می کند:

$$v = -Ri - \frac{d\lambda}{dt} \quad (۶۷-۳)$$

وقتی که ماتریس ها به صورت روابط (۶۸-۳) تا (۷۱-۳) در نظر گرفته می شوند:

$$v = [v_a, v_b, v_c, -v_F, -v_D, -v_Q]^T \quad (۶۸-۳)$$

$$i = [i_a, i_b, i_c, i_F, i_D, i_Q]^T \quad (۶۹-۳)$$

$$\lambda = [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q]^T \quad (۷۰-۳)$$

$$R = [r, r, r, r_F, r_D, r_Q]^T \quad (۷۱-۳)$$

با توجه به صرف نظر کردن از اثر اشباع و خطی بودن اندوکتانس های سیم پیچ ها، ۳۶ اندوکتانس خودی و متقابل داریم که با ماتریس رابطه ی (۷۲-۳) نمایش داده می شود:

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} L_{11}(\theta) & L_{12}(\theta) \\ L_{21}(\theta) & L_{22}(\theta) \end{bmatrix} \quad (۷۲-۳)$$

وقتی که درایه‌های ماتریس اندوکتانس از روابط (۷۳-۳) تا (۷۵-۳) به دست می‌آیند:

$$L_{11}(\theta) = \begin{bmatrix} L_s + L_m \cos 2\theta & -M_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & -M_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \\ -M_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -M_s + L_m \cos 2\theta \\ -M_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -M_s + L_m \cos 2\theta & L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (۷۳-۳)$$

$$L_{12}(\theta) = L_{21}(\theta) = \begin{bmatrix} M_F \cos \theta & M_D \cos \theta & M_Q \sin \theta \\ M_F \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & M_D \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & M_Q \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \\ M_F \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & M_D \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & M_Q \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (۷۴-۳)$$

$$L_{22}(Q) = \begin{bmatrix} L_F & M_{FD} & 0 \\ M_{FD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (۷۵-۳)$$

و با استفاده از رابطه‌ی (۷۶-۳) می‌توان رابطه‌ی (۶۷-۳) را به صورت رابطه‌ی (۷۷-۳) نوشت:

$$\lambda = [L(\theta)]i \quad (۷۶-۳)$$

$$v = -Ri - \frac{dL}{dt}i - L \frac{di}{dt} \quad (۷۷-۳)$$

در نتیجه شش تا معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی متغیر با زمان خواهیم داشت. برای تبدیل رابطه‌ی ولتاژ به معادلات غیرخطی ثابت با زمان از تبدیل پارک استفاده می‌کنیم. وقتی که ماتریس تبدیل P از رابطه‌ی (۷۸-۳) پیروی کند و با ضرب ماتریس B در هر یک از کمیت‌ها معادل آنها را طبق رابطه‌ی (۸۰-۳) در فضای جدید داشته باشیم.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (۷۸-۳)$$

$$B = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (۷۹-۳)$$

$$v_B = Bv, \lambda_B = B\lambda, i_B = Bi \quad (۸۰-۳)$$

در نتیجه می توان رابطه ی شار پیوندی را به صورت رابطه ی (۸۱-۳) نوشت:

$$B^{-1}\lambda_B = L(\theta)B^{-1}i_B \quad (۸۱-۳)$$

با ضرب نمودن ماتریس B در رابطه ی فوق خواهیم داشت:

$$\lambda_B = BL(\theta)B^{-1}i_B = L_B i_B \quad (۸۲-۳)$$

که L_B مطابق رابطه ی (۸۳-۳) تعریف شده و محاسبه می شود:

$$L_B = BL(\theta)B^{-1} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_{FD} & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_{FD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (۸۳-۳)$$

وقتی که $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$ است و پارامترهای ماتریس L_B از روابط زیر به دست می آیند:

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad (۸۴-۳)$$

$$L_d = L_s - M_s + \frac{3}{2}L_m \quad (۸۵-۳)$$

$$L_q = L_s - M_s - \frac{3}{2}L_m \quad (۸۶-۳)$$

در نتیجه ملاحظه می شود در رابطه ی (۸۲-۳) درایه های L_B ثابت و مستقل از زمان هستند.

اگر رابطه ی اصلی ولتاژ یعنی رابطه ی (۶۷-۳) را به حوزه ی $dq0$ ببریم و ماتریس B را در آن ضرب نماییم، به رابطه ی (۸۸-۳) می رسیم.

$$B^{-1}v_B = -RB^{-1}i_B - \frac{d}{dt}(B^{-1}\lambda_B) \quad (۸۷-۳)$$

$$v_B = -BRB^{-1}i_B - B\frac{d}{dt}(B^{-1}\lambda_B) = -\Re i_B - B\frac{dB^{-1}}{dt}\lambda_B - \frac{d}{dt}\lambda_B \quad (۸۸-۳)$$

وقتی که $\Re = -BRB^{-1}$ باشد، $\lambda_B \frac{dB^{-1}}{dt}$ ولتاژ چرخشی و $\frac{d\lambda_B}{dt}$ ولتاژ ترانسفورماتوری است.

اگر معادله‌ی v_B را برای محورهای $dq0$ بازنویسی نماییم، به روابط (۸۹-۳) تا (۹۱-۳) دست می‌یابیم.

$$\begin{cases} v_d = -r'_d i_d - \omega \lambda_d - \frac{d\lambda_d}{dt} \\ v_F = -r_F i_F - \frac{d\lambda_F}{dt} \\ v_D = -r_D i_D - \frac{d\lambda_D}{dt} = 0 \end{cases} \quad (۸۹-۳)$$

$$\begin{cases} v_q = -r_i i_q + \omega \lambda_d - \frac{d\lambda_q}{dt} \\ v_Q = -r_Q i_Q - \frac{d\lambda_Q}{dt} = 0 \end{cases} \quad (۹۰-۳)$$

$$v_0 = r_0 i_0 - \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (۹۱-۳)$$

معادلات شار در محورهای $dq0$ نیز از روابط (۹۲-۳) تا (۹۴-۳) به دست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D \\ kM_F & L_F & M_{FD} \\ kM_D & M_{FD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \end{bmatrix} \quad (۹۲-۳)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & kM_Q \\ kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (۹۳-۳)$$

$$\lambda_0 = i_0 L_0 \quad (۹۴-۳)$$

در نتیجه، اگر از محور صفر صرف نظر شود، بر بخش الکتریکی ماشین سنکرون، پنج معادله‌ی دیفرانسیل غیر خطی ثابت با زمان حاکم است.

۳-۷- مدل خطی هفرون فیلیپس ماشین سنکرون

در فصل پنج کتاب فواد و اندرسون، ماشین سنکرون با توجه به مدل غیرخطی دو محوری‌اش به روش زیر، حول نقطه‌ی کار خطی شده است.

اگر متغیر x_i از مقدار نامی x_{i0} به اندازه Δx_i تغییر کند یعنی مقدار جدید $x_{i0} + \Delta x_i$ را بگیرد، جملات غیرخطی زیر را به صورت زیر خطی می‌کنیم.

الف) برای عنصر غیر خطی $x_i x_j$ را پس از نمو رابطه‌ی (۳-۹۵) را داریم:

$$(x_{i0} + \Delta x_i)(x_{j0} + \Delta x_j) = x_{i0}x_{j0} + x_{i0}\Delta x_j + x_{j0}\Delta x_i + \Delta x_i\Delta x_j \quad (۳-۹۵)$$

چون $\Delta x_j, \Delta x_i$ کوچک هستند، از حاصلضرب آنها صرف نظر می کنیم و به رابطه‌ی (۳-۹۶) دست می یابیم.

$$(x_{i0} + \Delta x_i)(x_{j0} + \Delta x_j) - x_{i0}x_{j0} = x_{i0}\Delta x_j + \Delta x_i x_{j0} \quad (۳-۹۶)$$

ب) روابط مثلثاتی را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \cos(\delta_0 + \Delta\delta) = \cos\delta_0 \cos\Delta\delta - \sin\delta_0 \sin\Delta\delta \\ \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \sin\delta_0 \cos\Delta\delta + \cos\delta_0 \sin\Delta\delta \end{cases} \quad (۳-۹۷)$$

اگر $\Delta\delta$ کوچک باشد، به رابطه‌ی (۳-۹۸) می رسیم:

$$\begin{cases} \cos(\delta_0 + \Delta\delta) - \cos\delta_0 = \Delta\delta \sin\delta_0 \\ \sin(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin\delta_0 = \Delta\delta \cos\delta_0 \end{cases} \quad (۳-۹۸)$$

دو نکته‌ی مهم را باید در مورد مولد سنکرون در نظر بگیریم:

(۱) E'_q معادل ولتاژ ایجاد شده در استاتور ناشی از λ_f است وقتی که $L_{aa} = L_a + L_{md}$ است.

$$E'_q = \lambda_f \frac{L_{md}}{\sqrt{3}L_f} \quad (۳-۹۹)$$

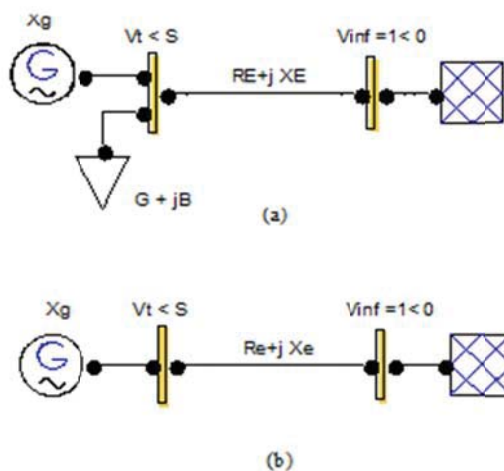
(۲) E_{fd} معادل ولتاژ v_f برده شده به طرف استاتور است.

$$E_{fd} = v_f \frac{L_{md}}{\sqrt{3}r_f} \quad (۳-۱۰۰)$$

در نتیجه با مفروضات فوق معادلات یک ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت در دو حالت شکل

(۳-۱۶) و با مراجعه به مقاله‌ی داده شده با اقتباس از فصل پنج کتاب فواد، به صورت یک سیستم خطی

درجه‌ی سه می باشد.

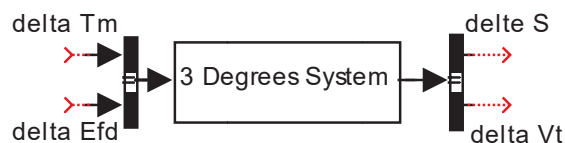


شکل ۳-۱۶ : ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت

شکل (b) ۳-۱۶ با مدار شکل (a) ۳-۱۶ به شرط محاسبه‌ی امپدانس خط از رابطه‌ی (۳-۱۰۱)، معادل خواهد بود:

$$R_e + jX_e = \frac{R_E + jX_E}{1 + (R_E + jX_E)(G + jB)} \quad (3-101)$$

ورودی و خروجی این سیستم درجه سه را می‌توان به صورت شکل ۳-۱۷ نمایش داد.



شکل ۳-۱۷ : نمایش شماتیک ماشین سنکرون به عنوان یک سیستم درجه سه

و در نهایت روابط خطی شده‌ی ماشین سنکرون درجه سه مطابق روابط زیر خواهد بود:

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + K_3 T'_{d0}} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{1 + K_3 T'_{d0} S} \Delta \delta \quad (3-102)$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3-103)$$

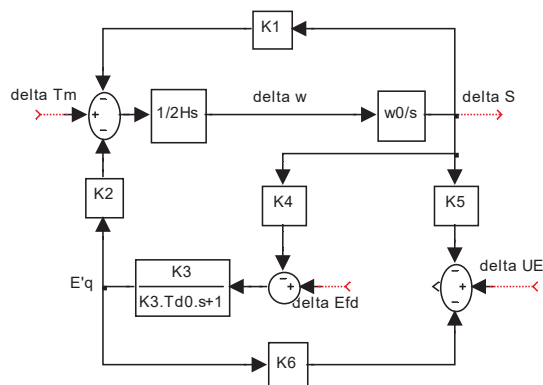
$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (3-104)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e) \\ \Delta \omega = \Delta \dot{\delta} \end{cases} \quad (3-105)$$

به طوری که ضرایب K بر حسب پارامترهای مولد، خط، بار و نقطه‌ی کار بهره‌برداری به دست می‌آید. در ادامه به بررسی بلوک دیاگرام مولد سنکرون با سه درجه آزادی (درجه ۳) در دو حالت می‌پردازیم.

۳-۲-۱- حالت بدون تحریک

در این حالت دیاگرام مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون مطابق شکل ۳-۱۸ خواهد بود.



شکل ۳-۱۸ : مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون بدون تحریک

جهت محاسبه‌ی پارامترهای K_1 تا K_6 از روابط زیر استفاده می‌کنیم:

$$K_1 = \frac{X_q - X'_d}{X_e + X'_d} I_{q_0} V_0 \sin \delta_0 + \frac{E_{q_0} V_0}{X_e + X_q} \cos \delta_0 \quad (۱۰۶-۳)$$

$$K_2 = \frac{V_0 \sin \delta_0}{X_e + X'_d} \quad (۱۰۷-۳)$$

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e} \quad (۱۰۸-۳)$$

$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X_e + X'_d} V_0 \sin \delta_0 \quad (۱۰۹-۳)$$

$$K_5 = \frac{X_q}{X_e + X_q} \cdot \frac{V_{d_0}}{V_{t_0}} V_0 \cos \delta_0 - \frac{X'_d}{X_e + X'_d} \cdot \frac{V_{q_0}}{V_{t_0}} V_0 \sin \delta_0 \quad (۱۱۰-۳)$$

$$K_6 = \frac{X_e}{X_e + X'_d} \cdot \frac{V_{q_0}}{V_{t_0}} \quad (۱۱۱-۳)$$

وقتی که V_{q0} ولتاژ محور q در نقطه‌ی کار، V_{d0} ولتاژ محور d در نقطه‌ی کار، V_{t0} ولتاژ ترمینال مولد، I_{q0} جریان محور q در نقطه‌ی کار و I_{d0} جریان محور d در نقطه‌ی کار است و مقادیر این پارامترها از پخش بار به دست می‌آیند.

ضمناً مقادیر ولتاژ، جریان و زاویه‌ی پیچش در نقطه‌ی کار در مختصات dq0 مطابق روابط (۱۱۲-۳) تا (۱۱۴-۳) بیان می‌شود:

$$\begin{cases} V_{d0} = \frac{P_0 V_{t0}}{\sqrt{P_0^2 + \left(Q_0 + \frac{V_{t0}^2}{X_q}\right)^2}} \\ V_{q0} = \sqrt{V_{t0}^2 - V_{d0}^2} \end{cases} \quad (112-3)$$

$$\begin{cases} I_{d0} = \frac{P_0 - I_{q0} V_{q0}}{V_{d0}} = \frac{Q_0 + I_{d0} V_{d0}}{V_{q0}} \\ I_{q0} = \frac{V_{d0}}{X_q} = \frac{E'_{q0} - X'_d I_{d0}}{X_q} \end{cases} \quad (113-3)$$

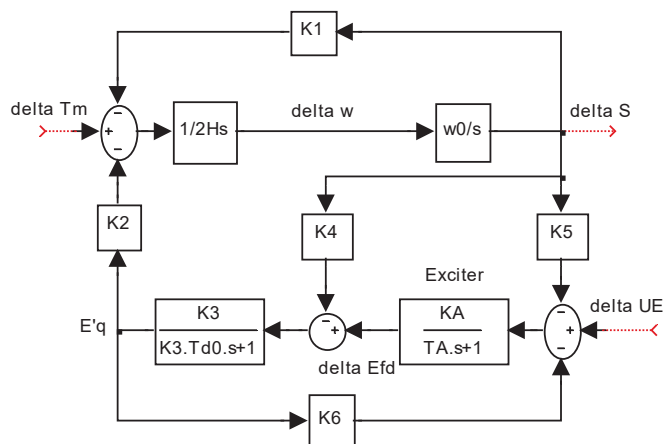
$$\delta_0 = \tan^{-1} \frac{V_{d0}}{V_{q0}} \quad (114-3)$$

توجه کنید بر اساس مقاله‌ی آقای Flamming به جز K_3 ، سایر ضرایب وابسته به نقطه‌ی کار ماشین هستند و همه ضرایب مثبت‌اند به جز K_5 که مثبت و منفی می‌تواند باشد.

با تغییر P و Q، قطب‌ها جابه‌جا شده و نقاط پایداری و ناپایداری سیستم مورد نظر مشخص می‌شود.

۳-۷-۲- حالت حضور تحریک درجه یک

در این حالت دیاگرام مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون مطابق شکل ۱۹-۳ خواهد بود.



شکل ۳-۱۹ : مدل هفرون فیلیپس مولد سنکرون با تحریک درجه یک

وقتی که تابع تبدیل تحریک درجه یک با ضریب بهره‌ی K_A و ثابت زمانی T_A مطابق رابطه‌ی (۳-۱۱۵) باشد.

$$\frac{E_{fd}}{\Delta U_E} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (۳-۱۱۵)$$

۳-۸- معادلات حالت سیستم تک ماشینه

با توجه به شکل ۳-۱۹ معادله‌ی حالت سیستم تک‌ماشینه با رابطه‌ی (۳-۱۱۶) بیان می‌شود.

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta u \quad (۳-۱۱۶)$$

وقتی که ماتریس‌های A و B ، متغیرهای حالت و ورودی‌ها مطابق روابط (۳-۱۱۷) و (۳-۱۱۸) تعریف شوند:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-k_1}{2H} & \frac{-k_2}{2H} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-k_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{T'_{d0}k_3} & \frac{-1}{T'_{d0}} \\ 0 & \frac{-k_A k_5}{T_A} & \frac{-k_A k_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix}, B = [0] \quad (۳-۱۱۷)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta U_E \end{bmatrix} \quad (۳-۱۱۸)$$

با تغییر K_A می توان قطبها را به سمت چپ میل داد، ولی این کار راه حل اساسی جهت پایداری نیست. راه حل طراحی یک PSS است. به طوری که PSS سرعت را اندازه گیری کرده و ورودی های فضای حالت را تغییر می دهد.

توجه کنید در نقاط کار مختلف K_1 تا K_6 تغییر می کند و در مورد یک سیستم تک ماشینه در نقاط کار مختلف، به دو روش زیر می توان وضعیت پایداری نیروگاه را بررسی کرد.

(۱) از طریق مقادیر ویژه ی ماتریس A و معادلات حالت سیستم

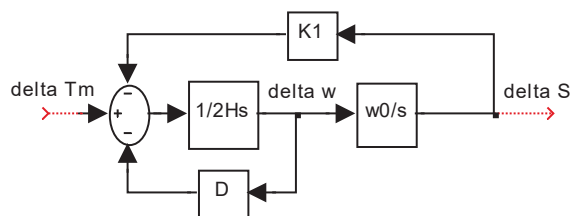
(۲) از طریق مقادیر قطب های تابع تبدیل بین ورودی ΔU_E و خروجی $\Delta \omega$ وقتی که $\Delta T_m = 0$ باشد. رابطه ی (۱۱۹-۳) مخرج تابع تبدیل را نشان می دهد که از درجه ی چهار است و ریشه های مخرج به عنوان قطب های سیستم برای ما مهم است .

$$D(s) = S^4 + \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T'_{d0} k_3} \right) S^3 + \left(\frac{1}{T'_{d0} T_A k_3} + \frac{k_A k_6}{T'_{d0} T_A} + \frac{k_1 \omega_0}{2H} \right) S^2 + \left(\frac{k_1 \omega_0}{2HT'_{d0} k_3} + \frac{k_1 \omega_0}{2HT_A} - \frac{K_4 k_2 \omega_0}{2HT'_{d0}} \right) S + \left(\frac{k_A k_6 k_1 \omega_0}{2HT'_{d0} T_A} + \frac{k_1 \omega_0}{2HT'_{d0} k_3} - \frac{k_2 k_4 \omega_0}{2HT'_{d0} T_A} - \frac{k_4 k_5 k_2 \omega_0}{2HT'_{d0} T_A} \right) \quad (119-3)$$

۳-۹- طراحی PSS برای یک سیستم تک ماشینه

الگوریتم طراحی پایدار ساز سیستم قدرت معمولی^۱ به صورت زیر است:

(۱) محاسبه ی نوسانات مُد مکانیکی از طریق حلقه مکانیکی و حذف قسمت الکتریکی: چون ثابت زمانی در حلقه ی مکانیکی بزرگ است، تفکیک مدهای مکانیکی و الکتریکی به راحتی صورت می گیرد. مدهای مکانیکی دارای فرکانس پایین اند و فرکانس مدهای مکانیکی یک سیستم تک-ماشینه مطابق شکل ۳-۲۰ با صرف نظر کردن از حلقه ی الکتریکی در مدل تک ماشینه به سادگی از حلقه ی مکانیکی به دست می آید.



شکل ۳-۲۰: حلقه ی مکانیکی مدل تک ماشینه با صرف نظر کردن از حلقه ی الکتریکی

در این صورت تابع تبدیل حلقه ی مکانیکی با رابطه ی زیر بیان می شود:

$$G(S) = \frac{\Delta \delta(S)}{\Delta T_m(S)} = \frac{2H}{\omega_0} S^2 + \frac{D}{\omega_0} S + K_1 \quad (۱۲۰-۳)$$

اگر مخرج تابع تبدیل فوق را مساوی صفر قرار دهیم، به فرکانس نوسانات ریشه ی مخرج دست می یابیم.

$$\delta = \sigma \pm j\omega_d \Rightarrow \omega_d = \sqrt{\frac{k_1 \omega_0}{2H} - \left(\frac{D}{2H}\right)^2} \quad (۱۲۱-۳)$$

اگر از میرایی صرف نظر کنیم و $D=0$ باشد، ω_n ، فرکانس نوسانات فرکانس پایین مُد مکانیکی است.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_1 \omega_0}{2H}} \quad (۱۲۲-۳)$$

f_n حدود 1^{Hz} می باشد و به دلیل کوچک بودن اندازه ی فرکانس، این نوسانات را فرکانس پایین می گویند.

توجه کنید با مقایسه ی رابطه (۱۲۰-۳) با رابطه ی استاندارد سیستم درجه دو طبق رابطه ی (۱۲۳-۳)

مقدار میرایی این مُدها مطابق رابطه ی (۱۲۴-۳) به دست می آید.

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \quad (۱۲۳-۳)$$

$$2\xi\omega_n = \frac{D}{2H} \rightarrow \xi = \frac{D}{4H\omega_n} = \frac{D}{\sqrt{8Hk_1\omega_0}} \quad (۱۲۴-۳)$$

۲) محاسبه ی تأخیر فاز ناشی از دینامیک سیستم تحریک و میدان، که همان فاز تابع تبدیل بین

$\Delta U_E, E'_q$ است، بدین ترتیب که ابتدا تابع تبدیل بین $\Delta U_E, E'_q$ را با حذف قسمت مکانیکی به

دست آورده، سپس تأخیر فاز را به ازای $S = j\omega_n$ محاسبه می کنیم.

توجه کنید اگر تحریک از درجه ی یک باشد، طبق مدل هفرون فیلیپس تابع تبدیل و تأخیر فاز

به صورت رابطه ی (۱۲۵-۳) و (۱۲۶-۳) است:

$$G_E(S) = \frac{K_A K_3}{(1 + ST_A)(1 + ST'_{d0} k_3) + K_A K_3 K_6} \quad (۱۲۵-۳)$$

$$G_E(S)|_{S=j\omega_n} = |G_E(j\omega_n)| \angle G_E(j\omega_n) \quad (۱۲۶-۳)$$

۳ طراحی یک جبران ساز پیش فاز $G_C(S)$ برای جبران این تاخیر، به طوری که رابطه‌ی (۱۲۷-۳) به ازای $S = j\omega_n$ برقرار باشد:

$$\angle G_C(S) + \angle G_E(S) = 0 \quad (۱۲۷-۳)$$

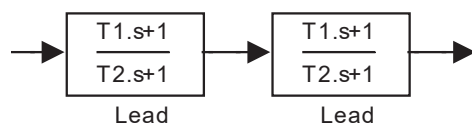
معمولاً تابع جبران ساز پیش فاز به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$G_C(S) = \left(\frac{1+ST_1}{1+ST_2} \right)^n; T_1 > T_2, n=1,2 \quad (۱۲۸-۳)$$

به عنوان مثال اگر $T_1 = 2^s, T_2 = 0.2^s$ باشد، کنترل کننده‌ی پیش فاز مطابق رابطه‌ی (۱۲۹-۳) در فرکانس $f_n = 1^{Hz}$ به اندازه‌ی ۳۴° زاویه‌ی پیش فاز ایجاد می‌کند.

$$G_C(S)|_{S=j\omega_n=j2\pi f_n} = \frac{1+2S}{1+0.2S} = |G_C(j\omega_n)| \angle 34^\circ \quad (۱۲۹-۳)$$

چنانچه $\angle G_C(S) = 64^\circ$ شود، باید $n = 2$ باشد، یعنی مطابق شکل ۲۱-۳ از دو کنترل کننده‌ی پیش فاز استفاده می‌کنیم.



شکل ۲۱-۳: بلوک دیاگرام دو کنترل کننده‌ی پیش فاز

۴ طراحی ضریب بهره K_C : با انتخاب ضریب میرایی ξ_n در محدوده‌ی $[0.1, 0.3]$ و با استفاده از رابطه‌ی (۱۳۰-۳)، K_C به دست می‌آید.

$$K_C = \frac{2H\omega_n \xi_n}{K_2 |G_C(j\omega_n)| |G_E(j\omega_n)|} \quad (۱۳۰-۳)$$

۵ بلوک Rest: وقتی که PSS نوسانات فرکانس پایین را تشخیص می‌دهد، بایستی توسط این بلوک وارد عمل شود و این در حالی است که در حالت عادی، بلوک Rest باید PSS را از مدار خارج نگه دارد. تابع تبدیل این بلوک مطابق رابطه‌ی (۱۳۱-۳) و زاویه و ضریب بهره‌ی آن در فرکانس ω_n مطابق رابطه‌ی (۱۳۲-۳) است:

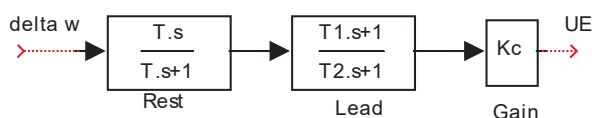
$$G_{rest} = \frac{ST}{1+ST} \quad (۱۳۱-۳)$$

$$|G_{Rest}(j\omega_n)| \angle G_{Rest}(j\omega_n) \approx 1 \angle 0^\circ \quad (۱۳۲-۳)$$

به طوری که در فرکانس ω_n قدر مطلق تابع Rest برابر یک و زاویه آن صفر است، لذا در این فرکانس PSS را وارد مدار کرده و در دیگر فرکانسها قدر مطلق آن صفر (خیلی کوچک) و زاویه آن بزرگ است و در نتیجه در این فرکانسها PSS را از مدار خارج می کند.

در واقع، بلوک Rest در فرکانس پایین مثلا 1^{Hz} دارای T بزرگ و برابر 1^s و در فرکانسهای دیگر T آن یک عدد بسیار کوچک نزدیک به صفر است.

در نتیجه با صرف نظر کردن از بلوک فیلتر و محدودساز، دیاگرام PSS به صورت شکل ۳-۲۲ است.



شکل ۳-۲۲ : بلوک دیاگرام PSS

در ادامه به مطالعه دینامیکی فرکانس پایین سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت می پردازیم. مدل خطی یک سیستم تک ماشینه همراه با یک سیستم تحریک درجه یک (مدل هفرون فلیپس)، یک سیستم درجه چهار می باشد.

می دانیم در نقاط کار مختلف یک نیروگاه مقادیر K_1 تا K_6 متفاوتند، چنانچه معادلات حالت سیستم مورد نظر را بنویسیم، از روی مقادیر ویژه می توان به پایداری دینامیک فرکانس پایین محلی پی برد. به این ترتیب که مثبت نبودن بخش حقیقی مقادیر ویژه، پایداری نیروگاه را در نقاط مختلف کار مشخص می کند. از چهار مقدار ویژه یا مُد، دو مُد مربوط به حلقه مکانیکی و دو مُد مربوط به حلقه الکتریکی است.

۳-۹-۱- مثال طراحی

معادلات حالت یک نیروگاه متصل به شین بی نهایت را برای مطالعات دینامیکی با در نظر گرفتن مدل تحریک درجه یک در دو حالت زیر به دست آورید.

الف) بدون PSS ب) با حضور PSS

$$G:H = 4.26, \quad D = 0, \quad T'_{d0} = 7.76, \quad X_d = 0.97, \quad X'_d = 0.19, \quad X_q = 0.55, \quad f = 60Hz$$

Exciter: $K_A = 50$, $T_A = 0.5^s$

Work Point: $P_{e0} = 1^{P.U.}$, $Q_{e0} = 0.15^{P.U.}$, $V_t = 1.05^{P.U.}$

حل : الف) با توجه به روابط مولفه های dq و فرمول های K_1 تا K_6 داریم:

$$k_1 = 0.54, k_2 = 1.2, k_3 = 0.658, k_4 = 0.698, k_5 = -0.095, k_6 = 0.81$$

و می توان ماتریس A و مقادیر ویژه ی مدل تک ماشینه ی هفرون فیلیپس بدون PSS را به دست آورد.

$$\rightarrow \det(A - \lambda I) = 0 \rightarrow \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$$

ب) طراحی PSS طبق الگوریتم توضیح داده شده و با انتخاب $T = 3^s$, $T_2 = 0.1$, $\xi_n = 0.3$ به صورت زیر خواهد بود:

$$\omega_n = 4.707 \text{ rad} \rightarrow |G_e(s)| \angle G_e(s) \big|_{s=j\omega_n} = 1.001 < -47.57^\circ$$

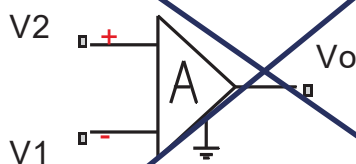
$$\rightarrow \angle G_c(j4.707) = \frac{1 + T_1(j4.707)}{1 + T_2(j4.707)} = 47.57^\circ \rightarrow T_1 = 0.685$$

$$k_C = \frac{2H\omega_n\xi_n}{k_2|G_c(j\omega_n)||G_e(j\omega_n)|} = 7.09$$

$$\text{Rest Block} = \frac{3S}{1 + 3S}$$

۳-۱۰- یادآوری تقویت کننده ی عملیاتی OP-AMP و تحقق PSS آنالوگ به کمک آن

OP-AMP عبارت است از تقویت کننده ی دیفرانسیلی با بهره ی بالا با Z_{in} بسیار زیاد و Z_{out} بسیار کوچک. شکل ۳-۲۳ نمایش یک OP-AMP می باشد.



شکل ۳-۲۳ : نمایش OP-AMP

توجه کنید OP-AMP، اختلاف ولتاژ بین دو سیگنال ورودی را اخذ کرده و آن را در خروجی با گین حلقه باز A_d تقویت می کند. رابطه ی (۳-۱۳۳) ولتاژ ورودی و خروجی آپامپ را بیان می کند.