

طراحی PSS¹ غیرخطی بر اساس حل معادله² HJB برای یک سیستم تک ماشینه

اسماعیل فلاح چولابی
دانشجوی دکترا
دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

محمدجواد یزدانپناه
استادیار
گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

سیستمهای تنظیم خودکار ولتاژ (AVR³) که برای ثابت نگه داشتن ولتاژ ترمینالهای ژنراتور در حالت کار دائمی بکار می روند، در هنگام بروز اغتشاش با سعی در ثابت نگه داشتن جریان تحریک، ممکن است تأثیری منفی بر روی میرا کردن نوسانات توان داشته باشند. برای از بین بردن این نوسانات از یک حلقه کنترل ولتاژ اضافی استفاده می گردد که با عنوان پایدار کننده سیستم قدرت (PSS) شناخته می شود. روشهای مختلفی برای طراحی PSS استفاده شده است که از آن جمله می توان به استفاده از تنظیم کننده های بهینه خطی (LQR⁴) اشاره کرد. تحقیقاتی که اخیراً در زمینه مهندسی کنترل انجام شده، برتری کنترل کننده های غیر خطی در مواردی مانند افزایش ناحیه پایداری سیستم در مقابل عدم قطعیت پارامترهای آن، یا به عبارت بهتر افزایش حوزه اعتبار کنترل کننده را نشان می دهند. در این مقاله مزیت بکارگیری کنترل کننده بهینه غیرخطی در طراحی PSS برای افزایش ناحیه پایداری سیستم در مقابل اغتشاش، نسبت به PSS طراحی شده بر اساس LQR نشان داده شده است. روش طراحی بر اساس حل تقریبی معادلات هامیلتون-جاکوبی-بلمن (HJB) برای سیستم ژنراتور به همراه AVR می باشد. شبیه سازی های انجام شده صحت ادعاهای صورت گرفته در زمینه برتری PSS با کنترل غیرخطی را نشان می دهند.

واژه های کلیدی

پایدار کننده سیستم قدرت، کنترل بهینه غیرخطی، معادله HJB.

Nonlinear PSS Design Based on Solving HJB Equation for Single Machine Power System

M. J. Yazdanpanah
Assistant Professor
Electrical Engineering Department,
Tehran University

E. Falah Choolabi
Ph. D. Student
Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

AVR system which are used for generator voltage regulation, may have negative influence on damping of power swings. To eliminate this negative influence a supplementary control loop known as the power system stabilizer (PSS) is used. Different methods have been developed for PSS design problem which among them linear quadratic regulators (LQR) can be pointed. Recent researchs in control engineering show that using nonlinear controllers may increase the stability of system with controller. In this paper concepts of nonlinear optimal control are used for design of nonlinear PSS. For this purpose HJB equations for generator & AVR are introduced and solved with an approximation method. It has been shown that the stability of the system with nonlinear PSS is more than linear PSS whose design is based on LQR method. This conclusion has been confirmed with simulation results on a typical system.

Keywords

Power system stabilizer, Nonlinear optimal control, HJB equation.

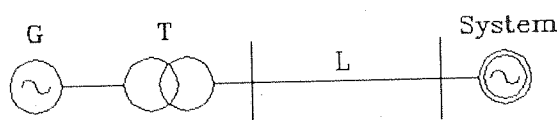
کنترل کننده‌های با فیدبک خطی می‌باشند. در [8] نیز صحت این موضوع برای یک ربات انعطاف‌پذیر نشان داده شده است. در حالیکه کنترل کننده خطی H_{∞} برای سیگنال فرمان بزرگتر از 3.6 Rad ناپایدار می‌شد کنترل کننده غیرخطی H_{∞} به سیگنال فرمان 2π Rad جواب درست می‌داد [8].

در این مقاله صحت مطالب فوق در طراحی PSS بر اساس کنترل غیرخطی مورد بررسی و تأیید قرار می‌گیرد. طراحی یک PSS بهینه غیرخطی در این مقاله بر اساس حل تقریبی معادله HJB انجام شده است که در جای خود کار نوینی می‌باشد. در روش حل تقریبی معادله HJB سعی می‌شود بجای بدست آوردن جواب دقیق برای این معادله که در حالت کلی ناممکن می‌باشد، سری تیلور جواب بصورت تقریبی ولی در عین حال تا درجه دلخواه محاسبه گردد. در بخش ۱ مختصری درباره مدل ژنراتور، AVR و سیستم قدرت و همچنین نحوه عمل AVR و PSS بحث شده است. بخش ۲ به معرفی معادله HJB و همچنین نحوه حل تقریبی آن برای سیستم مورد بررسی می‌پردازد. در بخش ۳ نتایج حل معادله HJB برای یک سیستم نمونه و نتایج شبیه‌سازی کنترل کننده‌های طراحی شده آورده شده‌اند. در بخش ۴ با بررسی عملکرد کنترل کننده‌های از درجات مختلف، جمع‌بندی نهایی از نتایج شبیه‌سازی و همچنین مزایا و معایب کنترل کننده‌های طراحی شده ارائه گردیده است. برای خلاصه شدن بحث‌های اصلی تعاریف متغیرها و همچنین برخی جزئیات مربوط به روابط در بخش ضمیمه آورده شده‌اند.

۱- بررسی عملکرد AVR و PSS برای یک

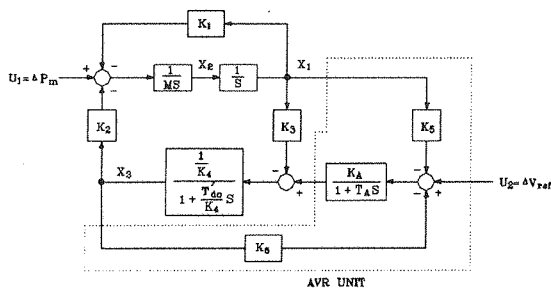
سیستم تک‌ماشینه

سیستم قدرت مورد بررسی در این مقاله از یک ژنراتور سنکرون تشکیل شده که با واسطه ترانس و خط انتقال به بقیه شبکه متصل است. برای سادگی بقیه شبکه بصورت شبکه بینهایت مدل شده است.



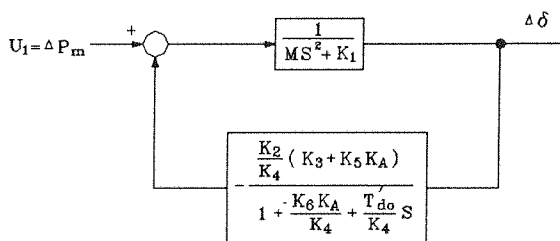
شکل (۱-۱) دیاگرام تک‌خطی سیستم.

در حال حاضر ژنراتورهای سنکرون تقریباً به عنوان منابع منحصربفرد انرژی الکتریکی در سیستمهای قدرت شناخته می‌شوند. توان مکانیکی ژنراتور از طریق سیستم محرک مکانیکی که معمولاً یک توربین است تأمین می‌شود. ولتاژ تحریک از طریق سیستم تحریک تأمین می‌شود که توسط تنظیم کننده خودکار ولتاژ (AVR) کنترل می‌گردد. رفتار دینامیکی AVR به گونه‌ای است که در شرایطی ممکن است باعث کاهش پایداری سیستم گردد. به این ترتیب که در هنگام بروز نوسان در توان خروجی، AVR با سعی در ثابت نگه داشتن جریان تحریک، با جریانهای میراکننده روتور که در اثر نوسان بوجود می‌آیند مخالفت می‌کند [1]. این میرایی منفی را می‌توان با اضافه کردن یک حلقه کنترلی که PSS نامیده می‌شود برطرف کرد. در این حلقه کنترلی از تغییرات توان (سرعت یا فرکانس) فیدبک گرفته می‌شود تا نوسانات ناخواسته ولتاژ ترمینال ناشی از عملکرد AVR جبران گردد. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه طراحی PSS انجام گرفته است که طیف وسیعی از روشها را شامل می‌شود. از طراحی PSS بصورت یک فیدبک خطی ساده تا طراحی کنترل کننده تطبیقی [2] و همچنین روشهای هوشمند نظیر فازی و عصبی [3, 4]. یکی از روشهای طراحی PSS استفاده از تنظیم کننده‌های خطی (LQR) می‌باشد [1]. در این تکنیک، فیدبک حالت طوری طراحی می‌شود که یک تابع هزینه تعریف شده برای سیستم حداقل گردد. تابع هزینه بصورت تابعی درجه دوم از متغیرهای حالت سیستم و همچنین ورودی انتخاب می‌شود. فیدبک حالت بدست آمده در این روش از درجه اول می‌باشد [۵]. استفاده از این روش با وجود مزیت سادگی دارای معایبی نظیر حساسیت کنترل کننده به تغییرات پارامترهای سیستم و همبستگی محدودیت دامنه اغتشاش قابل کنترل برای سیستم می‌باشد. به عبارت بهتر حوزه اعتبار کنترل کننده LQR در مواجهه با سیستم واقعی که یک سیستم غیر خطی است دارای محدودیتهای قابل توجهی می‌باشد. این محدودیتهای توجه مهندسين کنترل را به استفاده از کنترل کننده‌های غیر خطی برای طراحی PSS جلب کرده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از روش تابع لیانوف در طراحی PSS اشاره کرد [6]. استفاده از کنترل کننده‌های غیر خطی با وجود پیچیدگی نسبتاً بیشتر آنها به کنترل کننده‌های خطی دارای این مزیت قابل توجه است که حوزه پایداری سیستم را افزایش می‌دهد. نویسندگان [7] اثباتی برای این موضوع ارائه کردند که کنترل کننده‌های با فیدبک غیر خطی همیشه دارای حوزه اعتبار بیشتری نسبت به



شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام ژنراتور و AVR.

که در آن K_1 تا K_6 تابع نقطه کار سیستم و برای یک نقطه کار مشخص مقادیر ثابتی هستند. برای بحث درباره پایداری سیستم ژنراتور و AVR می‌توان تابع انتقال $X_1(s)/U_1(s)$ را مطالعه نمود. چون مقدار T_A معمولاً کوچک است می‌توان از آن صرفنظر کرد و با صفر قرار دادن U_2 بلوک کنترلی فوق را بصورت زیر خلاصه کرد:



شکل (۴-۱) بلوک خلاصه شده ژنراتور و

AVR برای محاسبه $X_1(s)/U_1(s)$.

مشاهده می‌شود که سیستم حلقه‌باز دارای قطبی در $(K_4 + K_6K_A)/T'_{d0}$ می‌باشد که قدر مطلق آن از قطب حلقه‌باز سیستم ژنراتور، $-K_4/T'_{d0}$ ، بزرگتر است. ولی با در نظر گرفتن اینکه K_5 معمولاً مقداری منفی دارد، با رسم مکان هندسی ریشه‌ها مشاهده خواهد شد که پایداری سیستم ژنراتور و AVR نسبت به سیستم ژنراتور تنها کاهش یافته است [1]. در حقیقت مزیت AVR در تنظیم ولتاژ در شرایط کار دائمی می‌باشد. به همین دلیل برای اینکه هم از امتیاز AVR استفاده شود و هم نوسانات فرکانس پایین کنترل گردند حلقه کنترلی دیگری به سیستم اضافه می‌شود که آنرا پایدارکننده سیستم قدرت (PSS) می‌نامند.

همانطور که در معادلات (۱-۱) تا (۴-۱) دیده می‌شود سیستم ژنراتور و AVR دارای دو ورودی P_m ، توان مکانیکی ورودی و V_{ref} ، ولتاژ مرجع برای پایانه ژنراتور می‌باشد. از آنجایی که دینامیک قسمتهای مکانیکی در مقابل دینامیک قسمتهای الکتریکی خیلی کند است در طی اغتشاشات

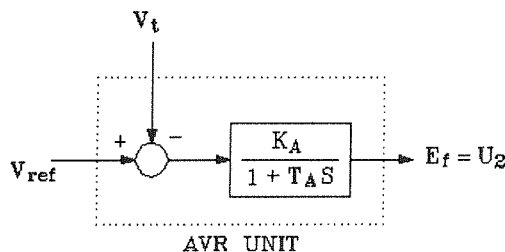
مدل درجه ۳ ژنراتور سنکرون را می‌توان بصورت زیر نوشت [1]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (1-1)$$

$$M \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = P_m - \frac{E'_q V_s}{x'_d} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_q x'_d} \sin 2\delta \quad (2-1)$$

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{x_d}{x'_d} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V_s \cos \delta \quad (3-1)$$

با فرض اینکه واحد AVR دارای دینامیکی از درجه اول باشد می‌توان معادله دینامیکی آنرا بصورت زیر نوشت:



شکل (۲-۱) بلوک دیاگرام واحد AVR.

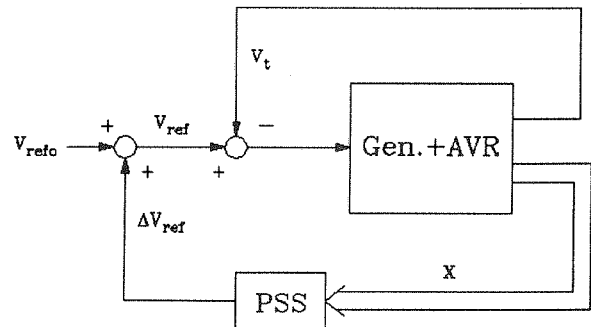
$$T_A \frac{dE_f}{dt} = K_A V_{ref} - K_A V_t - E_f \quad (4-1)$$

که در آن می‌توان رابطه V_t را بصورت زیر نوشت:

$$V_t = \sqrt{V_{td}^2 + V_{tq}^2} = \left[\left(\frac{X_q}{x_q} V_s \sin \delta \right)^2 + \left(\frac{X'_d}{x'_d} V_s \cos \delta + \frac{x'_d - X'_d}{x'_d} E'_q \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5-1)$$

اگر نقطه کار پایدار سیستم $\delta = \delta_0$ ، $\Delta\omega = 0$ ، $E'_q = E'_{q0}$ و $E_f = E_{f0}$ در نظر گرفته شود می‌توان معادلات سیستم را حول نقطه کار بسط داد. در بخش بعد توضیح داده خواهد شد که برای بدست آوردن کنترل کننده‌ای از درجه n باید معادلات سیستم را تا درجه n حول نقطه کار بسط داد. اگر معادلات سیستم حول نقطه کار تا درجه ۱ بسط داده شوند بلوک دیاگرام زیر برای سیستم بدست خواهد آمد:

سرعی مانند اتصال کوتاه، سیستم کنترل توان عملاً دخالتی نمی‌کند. به عبارت بهتر ورودی P_m را می‌توان ثابت در نظر گرفت. بنابراین PSS فقط می‌تواند روی V_{ref} تأثیر بگذارد. در حقیقت عمل PSS اضافه کردن یک سیگنال اضافی ΔV_{ref} به سیگنال ورودی V_{ref0} است بطوریکه بتواند نوسانات ولتاژ را جبران نماید و مؤلفه میرا کننده‌ای هم‌فاز با $\Delta\omega$ ایجاد نماید [6]. با این توصیف می‌توان بلوک دیاگرام کنترلی زیر را برای بیان نحوه عملکرد PSS رسم کرد:



شکل (۵-۱) بلوک دیاگرام ژنراتور و AVR به همراه حلقه کنترلی PSS.

در حلقه کنترلی فوق X می‌تواند متغیرهای مختلفی از قبیل انحراف سرعت $\Delta\omega$ ، توان تولیدی ژنراتور P ، انحراف فرکانس Δf و یا EMF حالت گذرا یعنی E'_q باشد. در این مقاله انحراف متغیرهای حالت سیستم نسبت به نقطه کار یعنی $X = [\Delta\delta \quad \Delta(\Delta\omega) \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_f]^T$ در نظر گرفته شده است.

۲- طراحی PSS بر اساس معادله HJB

کنترل بهینه عبارتست از تعیین سیگنالهای کنترلی برای یک سیستم بطوری که ضمن برآوردن یک سری قیود فیزیکی که بر آن سیستم حاکم است، تابع معیار مشخصی را نیز حداقل یا حداکثر نماید. برای بدست آوردن تابع کنترلی که تابع معیار را حداقل یا حداکثر کند دو روش کلی وجود دارد. اول استفاده از اصل « حداقل‌یابی پونتریاگن » و دوم استفاده از برنامه‌ریزی پویای بلمن [۵]. روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد در زیر مجموعه روش دوم قرار می‌گیرد. این روش بر مبنای اصل کلی زیر استوار است:

« یک سیاست بهینه دارای این خاصیت است که بدون توجه به نحوه تصمیم‌گیری تا شرایط حاضر - مبنی اینکه بهینه بوده یا خیر - تصمیم‌گیری برای شرایط حال حاضر به بعد باید یک سیاست بهینه را با توجه به حالت ایجاد

شده از تصمیم‌گیری اولیه دنبال نماید [۵].» اصل فوق را اصل بهینگی می‌نامند. استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا و اصل بهینگی منجر به یک معادله دیفرانسیل نسبی غیرخطی می‌شود که با عنوان معادله هامیلتون-جاکوبی-بلمن یا به اختصار HJB شناخته می‌شود. بیان معادله HJB به اختصار بصورت زیر می‌باشد [۵]:

گیریم سیستمی با معادله دیفرانسیل زیر توصیف شود:

$$\dot{x} = a(x(t), u(t), t) \quad (1-2)$$

که در آن بردار متغیرهای حالت و بردار ورودی‌های سیستم است و مطلوب باشد سیستم فوق چنان کنترل گردد که تابع معیار زیر حداقل گردد:

$$J = h(x(t_f), t_f) + \int_0^{t_f} g(x(\tau), u, \tau) d\tau \quad (2-2)$$

که در آن g و h توابع مشخصی بوده، t_0 و t_f ثابت هستند. در این صورت معادله هامیلتون - جاکوبی - بلمن بیان می‌دارد که:

$$J_t^*(x(t), t) + H(x(t), u^*(x(t), J_x^*, t), t) = 0 \quad (3-2)$$

که در آن J^* حداقل تابع معیار، u^* بردار ورودی که به ازای آن تابع H حداقل می‌شود و H تابع هامیلتونین است که بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$H(x(t), u(t), J_x^*, t) = g(x(t), u(t), t) + J_x^{*T}(x(t), t) \cdot [a(x(t), u(t), t)] \quad (4-2)$$

همانطور که مشاهده می‌شود معادله HJB یک معادله دیفرانسیل جزئی - پاره‌ای است و پیدا کردن پاسخ تحلیلی دقیق برای J^* که در آن صدق کند فوق‌العاده مشکل و در حالت کلی ناممکن است. با این حال روشهای تقریبی برای پیدا کردن J^* بصورت تقریبی وجود دارد که یکی از آنها استفاده از بسط سری تیلور تا درجه دلخواه می‌باشد. از آنجایی که طبق رابطه (۴-۲) u^* تابعی از J_x^* است، بیان J^* بصورت بسط سری تیلور درجه n ، منتهی به کنترل‌کننده‌ای با درجه $(n-1)$ می‌شود. برای بدست آوردن J^* بصورت بسط تیلور تا درجه n ، می‌توان از روشی که شرح مختصر آن در زیر می‌آید استفاده کرد [8]:

با انجام یک تغییر متغیر، متغیرهای حالت سیستم انحراف متغیرهای حالت اصلی از مقدار پایدار اولیه در نظر

گرفته می‌شوند.

$$J = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{2} q_1 (\delta - \delta_0)^2 + \frac{1}{2} q_2 (\Delta\omega)^2 + \frac{1}{2} r (\Delta V_{ref})^2 \right) dt \quad (5-2)$$

که در آن q_1 ، q_2 و r اعدادی ثابت و مثبت در نظر گرفته می‌شوند. برای بدست آوردن کنترل کننده‌ای از درجه ۱ باید بسط تیلور J^* تا درجه ۲ محاسبه گردد. برای این کار همانطور که توضیح داده شد باید معادلات سیستم، یعنی معادلات (۱-۱) تا (۴-۱)، بصورت بسط سری تیلور تا درجه ۱ حول نقطه کار نوشته شوند:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (2-6-الف)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = (C_2 x_{o3} \cos x_{o1} + 2C_3 \cos 2x_{o1})x_1 + (C_2 \sin x_{o1})x_3 \quad (2-6-ب)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = (-C_6 \sin x_{o1})x_1 + C_5 x_3 + C_4 x_4 \quad (2-6-ج)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = \frac{(C_{10}^2 - C_{12}^2) \sin x_{o1} \cos x_{o1} - C_{11} C_{12} x_{o3} \sin x_{o1}}{[(C_{10} \sin x_{o1})^2 + (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})^2]^{\frac{1}{2}}} C_9 x_1 + \frac{C_9 C_{11} (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})}{[(C_{10} \sin x_{o1})^2 + (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})^2]^{\frac{1}{2}}} x_3 + C_8 x_4 + C_7 u \quad (2-6-د)$$

تعریف متغیرهای x_1 ، x_2 ، x_3 ، x_4 ، x_{o1} ، x_{o2} ، x_{o3} و x_{o4} و ضرایب C_1 ، C_2 ، C_3 ، C_4 ، C_5 ، C_6 ، C_7 ، C_8 ، C_9 ، C_{10} ، C_{11} ، C_{12} در بخش ضمیمه آورده شده است. با توجه به معادلات سیستم و تابع هزینه می‌توان تابع هامیلتونین H را بصورت زیر تشکیل داد:

$$H = \frac{q_1}{2} x_1^2 + \frac{q_2}{2} x_2^2 + \frac{r}{2} u^2 + J_{x1}^* x_2 + J_{x2}^* [(C_2 x_{o3} \cos x_{o1} + 2C_3 \cos 2x_{o1})x_1 + (C_2 \sin x_{o1})x_3] + J_{x3}^* [(-C_6 \sin x_{o1})x_1 + C_5 x_3 + C_4 x_4] + J_{x4}^* \left[\frac{(C_{10}^2 - C_{12}^2) \cos x_{o1} - C_{11} C_{12} x_{o3}}{[(C_{10} \sin x_{o1})^2 + (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})^2]^{\frac{1}{2}}} C_9 x_1 + \frac{C_9 C_{11} (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})}{[(C_{10} \sin x_{o1})^2 + (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})^2]^{\frac{1}{2}}} x_3 + C_8 x_4 + C_7 u \right] \quad (7-2)$$

برای پیدا کردن u^* که تابع هامیلتونین را حداقل

در صورتی که معادله دیفرانسیل بیان کننده سیستم شامل عبارتهای غیرخطی باشد، این عبارتهای غیرخطی بصورت بسط سری تیلور تا درجه $(n-1)$ نوشته می‌شوند.

J^* بصورت یک چند جمله‌ای درجه n از متغیرهای حالت سیستم (x_1, x_2, \dots, x_m) نوشته می‌شود. در این بیان که معادل بیان J^* بصورت بسط سری تیلور از متغیرهای x_1, x_2, \dots, x_m می‌باشد، ضرایب هر یک از جملات مجهول در نظر گرفته می‌شود. برای اینکه بیان J^* بصورت بسط سری تیلور کامل باشد حتماً باید تمام ترکیب‌های ممکن تا درجه n در عبارت J^* منظور شوند. تمام ترکیب‌های ممکن از درجه ۱ برای متغیرهای x_1, x_2, \dots, x_m و ...، صرفنظر از ضریب آنها، از بسط عبارات $(x_1 + x_2 + \dots + x_m)^n$ قابل حصول است.

جایگذاری عبارت در نظر گرفته شده برای J^* در معادله HJB یعنی رابطه (۲-۳) انجام گرفته و سپس ضرایب جملات مختلف دسته‌بندی (فاکتورگیری) می‌شوند. برای اینکه تساوی صفر در معادله HJB برقرار شود ضرایب جملات مختلف به شکل $x_1^{i1} \cdot x_2^{i2} \cdot \dots \cdot x_m^{im}$ متحد با صفر قرار داده می‌شوند که به این ترتیب یک سری معادلات غیرخطی بر حسب ضرایب مجهول در بسط تیلور J^* بدست می‌آید.

دستگاه معادلات غیر خطی بدست آمده بر حسب ضرایب مجهول بسط J^* ، با روشهای عددی نظیر نیوتن - رافسن حل می‌شود و مقدار هر ضریب محاسبه می‌گردد. با تعیین این ضرایب مجهول، بسط سری تیلور J^* تعیین می‌گردد که به نوبه خود u^* را تعیین خواهد کرد.

با این مقدمه ادامه بحث درباره سیستم ژنراتور و AVR دنبال می‌گردد. برای سادگی در دنبال کردن روابط، بحث در مورد طراحی کنترل کننده درجه ۱ که معادل تخمین J^* تا درجه ۲ می‌باشد پی گیری می‌شود. بدیهی است برای بدست آوردن کنترل کننده‌های از درجات بالاتر روش کار مشابه خواهد بود. لازم به ذکر است که کنترل کننده مرتبه ۱ در حقیقت همان تنظیم کننده LQR می‌باشد. واضح است که می‌توان مستقیماً معادله ریکاتی مربوطه را جهت حصول کنترل کننده مرتبه اول در نظر گرفت ولی به جهت تبیین کیفیت محاسبه کنترل کننده‌های غیر خطی، برای کنترل کننده خطی هم روش فوق الذکر پی گرفته می‌شود. برای طراحی کنترل بهینه قبل از هر چیز باید تابع هزینه‌ای برای سیستم تعریف شود. با توجه به اهمیت نوسانات زاویه بار δ و سرعت روتور $\Delta\omega$ در پایداری سیستم ژنراتور و AVR می‌توان تابع هزینه‌ای بصورت زیر برای سیستم تعریف کرد:

می‌کند مشتق H مساوی صفر قرار داده می‌شود:

$$-\frac{C_7^2}{2r} K_9^2 + K_5 + \frac{q_2}{2} = 0 \quad \text{ضریب } x_2^2 \text{ : (ب-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{C_7^2}{r} K_{10}^2 + A_5 K_{10} + A_2 K_8 + 2C_5 K_3 = 0 \quad \text{ضریب } x_3^2 \text{ : (ج-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{2C_7^2}{r} K_4^2 + C_4 K_{10} + 2C_8 K_4 = 0 \quad \text{ضریب } x_4^2 \text{ : (د-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{C_7^2}{r} K_9 K_7 + A_4 K_9 + A_3 K_8 + 2A_1 K_2 + 2K_1 = 0 \quad \text{ضریب } x_1 x_2 \text{ : (ه-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{C_7^2}{r} K_7 K_{10} + A_4 K_{10} + A_1 K_8 + A_5 K_7 + C_5 K_6 + A_2 K_5 + 2A_3 K_3 = 0 \quad \text{ضریب } x_1 x_3 \text{ : (و-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{2C_7^2}{r} K_4 K_7 + A_3 K_{10} + A_1 K_9 + C_8 K_7 + C_4 K_6 + 2A_4 K_4 = 0 \quad \text{ضریب } x_1 x_4 \text{ : (ز-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{C_7^2}{r} K_{10} K_9 + A_5 K_9 + C_5 K_8 + K_6 + 2A_2 K_2 = 0 \quad \text{ضریب } x_2 x_3 \text{ : (ک-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{2C_7^2}{r} K_9 K_4 + C_8 K_9 + C_4 K_8 + K_7 = 0 \quad \text{ضریب } x_2 x_4 \text{ : (ل-۱۲-۲)}$$

$$-\frac{2C_7^2}{r} K_{10} K_4 + (C_5 + C_8) K_{10} + A_2 K_9 + 2A_5 K_4 + 2C_4 K_3 = 0 \quad \text{ضریب } x_3 x_4 \text{ : (م-۱۲-۲)}$$

که در آنها A_1 تا A_5 بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A_1 = C_2 x_{o3} \cos x_{o1} + 2C_3 \cos 2x_{o1} \quad \text{(الف-۱۳-۲)}$$

$$A_2 = C_2 \sin x_{o1} \quad \text{(ب-۱۳-۲)}$$

$$A_3 = -C_6 \sin x_{o1} \quad \text{(ج-۱۳-۲)}$$

$$A_4 = \frac{(C_{10}^2 - C_{12}^2) \sin x_{o1} \cos x_{o1} - C_{11} C_{12} x_{o3} \sin x_{o1}}{\left[(C_{10} \sin x_{o1})^2 + (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})^2 \right]^{1/2}} C_9$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \rightarrow ru + C_7 J_{x_4}^* = 0 \rightarrow u^* = -\frac{C_7}{r} J_{x_4}^*$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial u^2} = r > 0 \rightarrow \text{تابع } H \text{ را حداقل می‌کند} \quad \text{(۸-۲)}$$

با جایگذاری u^* در رابطه (۸-۲) حداقل تابع H بدست می‌آید. بیان J^* بصورت چند جمله‌ای درجه ۲ از x با ضرایب مجهول می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$J^* = K_1 x_1^2 + K_2 x_2^2 + K_3 x_3^2 + K_4 x_4^2 + K_5 x_1 x_2 + K_6 x_1 x_3 + K_7 x_1 x_4 + K_8 x_2 x_3 + K_9 x_2 x_4 + K_{10} x_3 x_4 \quad \text{(۹-۲)}$$

که در آن ضرایب K_1 تا K_{10} مجهول می‌باشند. در این صورت J_x^* بصورت زیر خواهد بود:

$$J_{x_1}^* = \frac{\partial J^*}{\partial x_1} = 2K_1 x_1 + K_5 x_2 + K_6 x_3 + K_7 x_4 \quad \text{(الف-۱۰-۲)}$$

$$J_{x_2}^* = \frac{\partial J^*}{\partial x_2} = 2K_2 x_2 + K_5 x_1 + K_8 x_3 + K_9 x_4 \quad \text{(ب-۱۰-۲)}$$

$$J_{x_3}^* = \frac{\partial J^*}{\partial x_3} = 2K_3 x_3 + K_6 x_1 + K_8 x_2 + K_{10} x_4 \quad \text{(ج-۱۰-۲)}$$

$$J_{x_4}^* = \frac{\partial J^*}{\partial x_4} = 2K_4 x_4 + K_7 x_1 + K_9 x_2 + K_{10} x_3 \quad \text{(د-۱۰-۲)}$$

با توجه به روابط (۸-۲) و (د-۱۰-۲) می‌توان نوشت:

$$u^* = -\frac{C_7}{r} (2K_4 x_4 + K_7 x_1 + K_9 x_2 + K_{10} x_3) \quad \text{(۱۱-۲)}$$

با جایگذاری روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) در رابطه تابع هامیلتونین، یعنی رابطه (۷-۲)، می‌توان معادله HJB را تشکیل داد. نتیجه خلاصه شده پس از مرتب کردن ضرایب چند جمله‌ای و متحد صفر قرار دادن هر یک از ضرایب، به دستگاه معادلات غیر خطی زیر بر حسب K_1 تا K_{10} منتهی می‌شود:

$$\text{ضریب } x_1^2 \text{ : } -\frac{C_7^2}{2r} K_7^2 + A_4 K_7 + A_3 K_6 + A_1 K_5 + \frac{q_1}{2} = 0$$

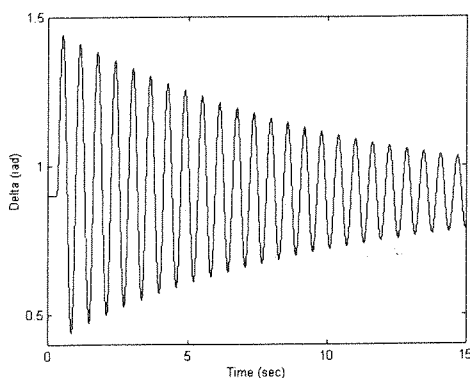
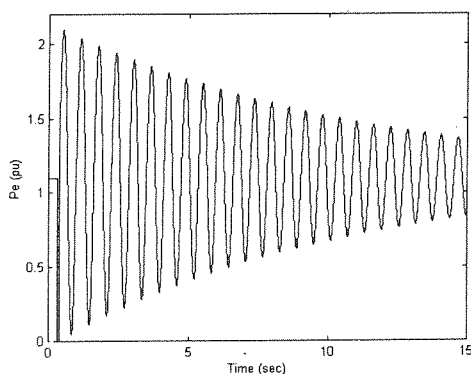
$$80.04550985x_1x_3 - 8680492645e-2x_1x_4 - 3223456778x_2^2 + 2807048226x_2x_3 + 2608952848e-4x_2x_4 - 3.636107232x_3^2 - 7883818080e-3x_3x_4 - 4274864801e-7x_4^2 - 67.58354095x_1 + 1.014952144x_2 - 42.31150220x_3 - 4593800576e-2x_4$$

(۲-۱۳-۵)

$$A_5 = \frac{C_9 C_{11} (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})}{[(C_{10} \sin x_{o1})^2 + (C_{11} x_{o3} + C_{12} \cos x_{o1})^2]^{\frac{1}{2}}}$$

(۲-۱۳-۵)

هر یک از کنترل کننده‌های فوق، مطابق شکل (۱-۵) به همراه ژنراتور و AVR مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. در مرحله اول وضعیتی که یک اتصال کوتاه در باس بینهایت اتفاق بیفتد و پس از 0.10s رفع شود، شبیه‌سازی شده است. شکل (۱-۳) تغییرات زاویه بار و توان خروجی ژنراتور را برای سیستم ژنراتور و AVR بدون PSS نشان می‌دهد. در حالتی که یک اتصال کوتاه موقتی به مدت 0.1 s در باس بینهایت اتفاق بیفتد.



شکل (۱-۳) تغییرات زاویه بار و توان خروجی برای سیستم ژنراتور و AVR بدون PSS.

از شکل‌های بالا می‌توان اثر واحد AVR در کاهش پایداری دینامیکی سیستم را به روشنی مشاهده نمود. همانطور که مشاهده می‌شود پس از برطرف شدن اغتشاش، توان و زاویه بار تا برگشت به وضعیت پایدار اولیه شدیداً نوسان می‌کنند. در شکل (۲-۳) تغییرات زاویه بار و توان خروجی ژنراتور برای سیستم ژنراتور و AVR به همراه PSS مرتبه اول نشان داده شده است. می‌توان دید که با

همانطور که مشاهده می‌شود معادلات (۲-۱۲) بیان‌کننده یک دستگاه معادلات غیر خطی بر حسب ضرایب K_1 تا K_{10} می‌باشند. که با روش‌های حل دستگاه معادلات غیرخطی نظیر نیوتن-رافسن از طریق بکارگیری نرم‌افزارهای سمبلیک مانند Maple یا Mathematica قابل حل است.

۳- طراحی و شبیه‌سازی PSS برای یک سیستم نمونه

روش بیان شده برای طراحی PSS که در بخش ۲ توضیح داده شد برای یک سیستم نمونه مورد استفاده قرار گرفت. برای بدست آوردن کنترل کننده، محاسبات پارامتری نظیر بسط تیلور معادلات سیستم، جاگذاری u^* و J_x^* در معادله HJB، مرتب کردن ضرایب و نهایتاً حل معادلات غیرخطی به کمک نرم‌افزار Maple-4 انجام شد. پارامترها و شرایط اولیه سیستم نمونه در ضمیمه آمده‌اند. تحت این شرایط کنترل کننده‌های محاسبه شده تا مرتبه ۳ به صورت زیر محاسبه شدند:

کنترل کننده مرتبه ۱:

$$u^* = -67.58354095x_1 + 1.014952146x_2 - 42.31150222x_3 - 4593800579e-2x_4$$

کنترل کننده مرتبه ۲:

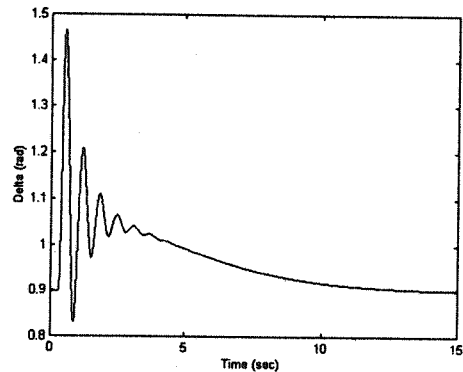
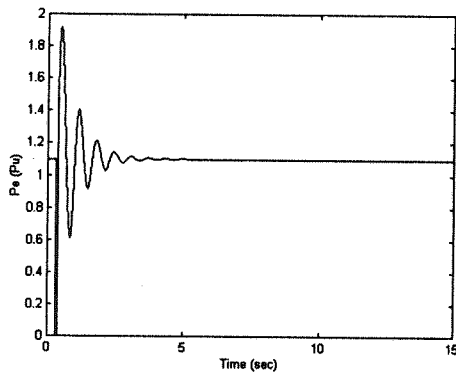
$$u^* = -55.42518540x_1^2 + 2.547314406x_1x_2 - 80.04550980x_1x_3 - 8680492635e-2x_1x_4 - 3223456781x_2^2 + 2807048453x_2x_3 + 2608953094e-4x_2x_4 - 3.636107482x_3^2 - 7883818615e-3x_3x_4 - 4274865093e-7x_4^2 - 67.58354095x_1 + 1.014952150x_2 - 42.31150231x_3 - 4593800588e-2x_4$$

کنترل کننده مرتبه ۳:

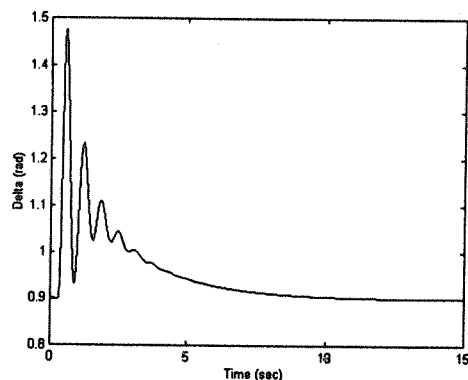
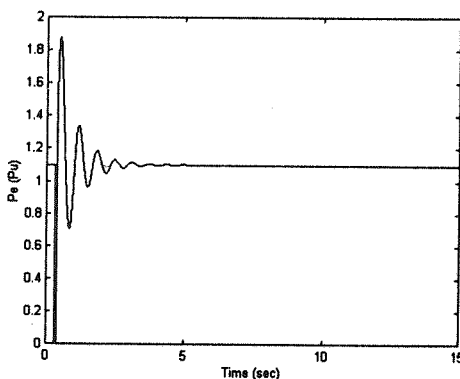
$$u^* = 50.24356280x_1^3 + 1.060244794x_1^2x_2 + 4.402576809x_1^2x_3 + 4958515644e-9x_1^2x_4 + 2768116275x_1x_2^2 + 4128976538x_1x_2x_3 + 4516331309e-4x_1x_2x_4 - 1.558582859x_1x_3^2 - 3343156518e-3x_1x_3x_4 - 1793401208e-7x_1x_4^2 + 1615800604e-2x_2^3 + 1879592309e-2x_2^2x_3 + 2321309964e-6x_2^2x_4 - 2137185297x_2x_3^2 - 4645636896e-4x_2x_3x_4 - 2524408760e-8x_2x_4^2 + 1.746666919x_3^3 + 5683896060e-3x_3^2x_4 + 6165305845e-7x_3x_4^2 + 2229143208e-11x_4^3 - 55.42518535x_1^2 + 2.547314408x_1x_2 -$$

خروجی ژنراتور برای همان سیستم قبلی، این بار با PSS از مرتبه‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این موارد نیز مشابه PSS مرتبه ۱ نوسانات توان و زاویه بار به سرعت میرا شده‌اند.

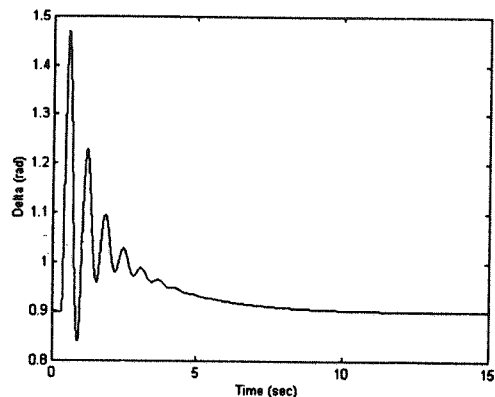
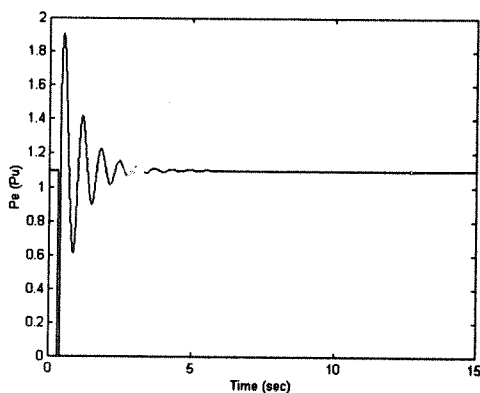
اضافه شدن واحد PSS، نوسانات توان و زاویه بار به سرعت میرا شده‌اند و سیستم به وضعیت پایدار قبل از بوجود آمدن اغتشاش برگشته است. در شکل‌های (۳-۳) و (۴-۳) تغییرات زاویه بار و توان



شکل (۲-۳) تغییرات زاویه بار و توان خروجی برای سیستم ژنراتور و AVR با PSS مرتبه ۱، در حالتی که یک اتصال کوتاه موقتی به مدت 0.1 s در باس بینهایت اتفاق بیفتد.



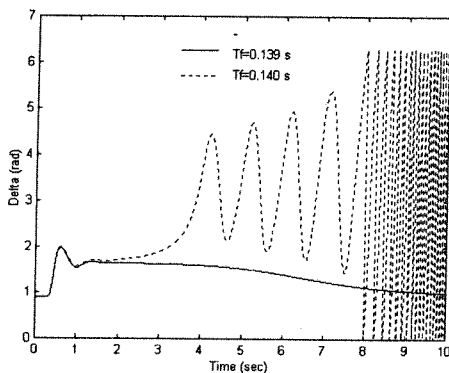
شکل (۳-۳) تغییرات زاویه بار و توان خروجی برای سیستم ژنراتور و AVR با PSS مرتبه ۲، در حالتی که یک اتصال کوتاه موقتی به مدت 0.1 s در باس بینهایت اتفاق بیفتد.



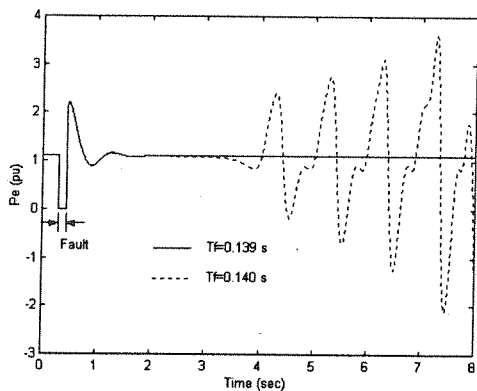
شکل (۴-۳) تغییرات زاویه بار و توان خروجی برای سیستم ژنراتور و AVR با PSS مرتبه ۳، در حالتی که یک اتصال کوتاه موقتی به مدت 0.1 s در باس بینهایت اتفاق بیفتد.

بیشتر از همین زمان برای سیستم با PSS مرتبه ۲ تنظیم کرد. به این ترتیب می‌توان مطمئن بود که با وجود تاخیر بیشتر در عملکرد رله‌ها برای سیستم با PSS مرتبه ۳، سیستم به نقطه تعادل خود برمی‌گردد. شکل‌های (۳-۷)، (الف)، (ب) و (ج) بیان‌کننده عملکرد کنترل‌کننده مرتبه ۲ برای دو اتصال کوتاه، یکی به مدت 0.139s و دیگری به مدت 0.140s می‌باشند. برای حالت اول که با خط توپر نشان داده شده، کنترل‌کننده موفق شده نوسانات گشتاور و زاویه بار را کنترل کند و مقدار این دو را به مقداری که قبل از اتصال کوتاه داشتند برگرداند، در حالیکه برای اتصال کوتاه 0.140s سیستم ناپایدار شده است. این نتایج نشان می‌دهند که قدرت تحمل اتصال کوتاه برای سیستم با PSS مرتبه ۲ حداکثر 0.139s است.

در شکل‌های (۳-۸)، (الف)، (ب) و (ج) عملکرد دو کنترل‌کننده مرتبه ۲ و ۳ برای اتصال کوتاهی به مدت 0.17s با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای این مدت اتصال کوتاه کنترل‌کننده مرتبه ۳ توانسته است سیستم را به حالت قبل از اتصال کوتاه برگرداند (خط توپر)، در حالیکه با کنترل‌کننده مرتبه ۲ سیستم ناپایدار شده است.



شکل (الف) زاویه بار - زمان.

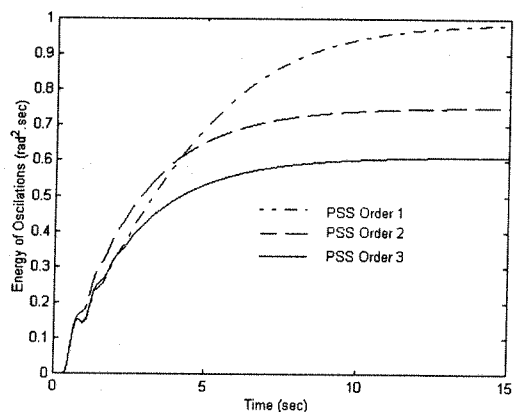


شکل (ب) توان تولیدی - زمان.

مطابق شکل‌ها به نظر می‌رسد که عملکرد همه کنترل‌کننده‌ها برای این مدت اتصال کوتاه تقریباً مشابه است. برای بررسی عمیق‌تر نحوه عملکرد هر یک از کنترل‌کننده‌ها، از انرژی موجود در نوسانات بعنوان معیاری جهت سنجش نحوه میرا کردن نوسانات توسط هر کنترل‌کننده استفاده می‌شود. انرژی موجود در نوسانات زاویه بار را می‌توان بصورت زیر تعریف کرد:

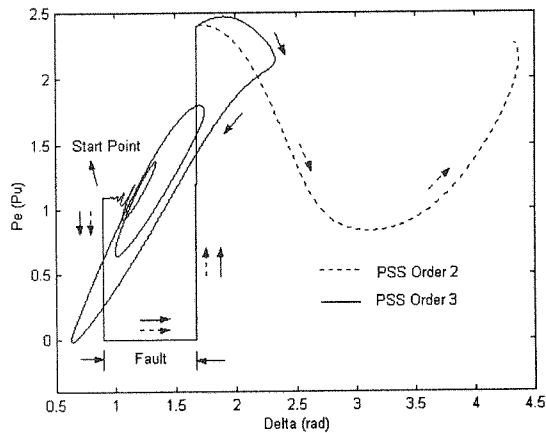
$$E_{\delta}(t) = \int_0^t (\delta(\tau) - \delta_0)^2 d\tau \quad (1-3)$$

با انتخاب معیار فوق می‌توان نحوه میرا کردن نوسانات زاویه بار توسط هر یک از کنترل‌کننده‌ها را با هم مقایسه کرد. این مقایسه در شکل (۳-۶) انجام شده است.



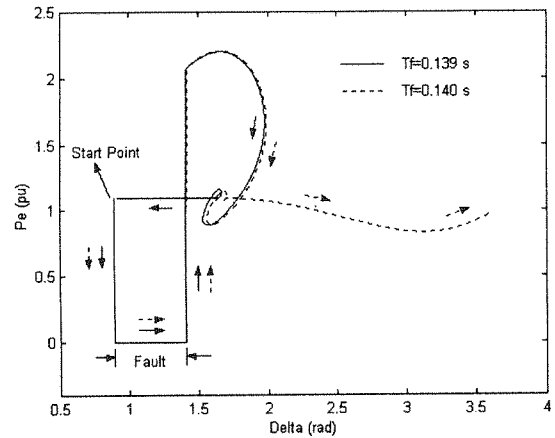
شکل (۳-۶) انرژی نوسانات زاویه بار برای کنترل‌کننده‌های مختلف.

می‌توان دید که از نظر کنترل انرژی نوسانات، کنترل‌کننده مرتبه ۳ دارای بهترین عملکرد می‌باشد. این قابلیت به شکل دیگر، در حداکثر دامنه اغتشاش قابل تحمل برای سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف ظاهر می‌شود. مدت زمان اتصال کوتاه تعیین‌کننده دامنه انحراف متغیرهای حالت سیستم از مقدار پایدار اولیه آنها می‌باشد. بنابراین توانایی یک PSS در کنترل نوسانات بزرگتر، می‌تواند با مدت زمان تحمل اتصال کوتاه توسط سیستم سنجیده شود. با افزایش مدت زمان اتصال کوتاه از $T_f=0.1s$ ، سیستم با کنترل‌کننده مرتبه ۱ بلافاصله ناپایدار می‌شود، در حالیکه برای کنترل‌کننده مرتبه ۲ زمان اتصال کوتاه قابل تحمل برای سیستم $T_f=0.139s$ می‌باشد. این زمان برای کنترل‌کننده مرتبه ۳ برابر با $T_f=0.19s$ است. بنابراین برای سیستمی که در آن از PSS مرتبه ۳ استفاده شده می‌توان زمان عملکرد رله‌های حفاظتی را 90ms بیشتر از زمان مشابه برای سیستم دارای PSS مرتبه ۱ و 50ms



(ج) توان تولیدی - زاویه بار.

شکل (۳-۸) مقایسه عملکرد دو کنترل کننده مرتبه ۲ و ۳ برای اتصال کوتاهی به مدت $T_f=0.170s$.

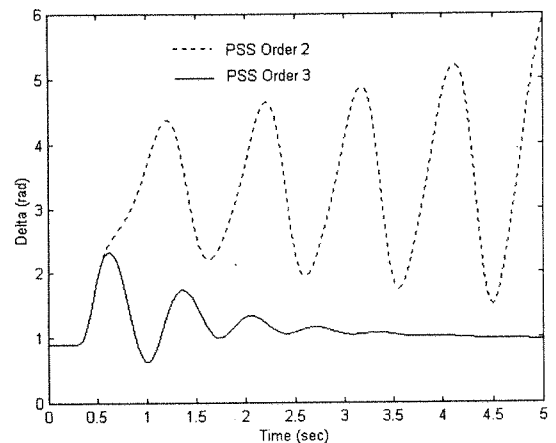


(ج) توان تولیدی - زاویه بار.

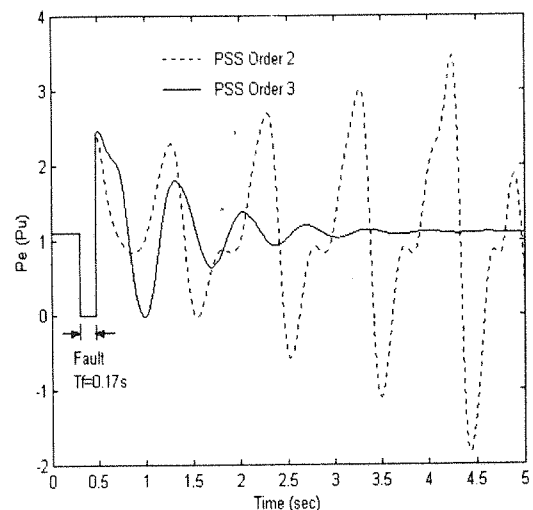
شکل (۳-۷) مقایسه عملکرد کنترل کننده مرتبه ۲ برای دو زمان اتصال کوتاه $T_f=0.139s$ و $T_f=0.140s$.

۴ - نتیجه گیری

در این مقاله طراحی یک نوع PSS غیرخطی ارائه شد. طراحی بر اساس حل معادله هامیلتون-چاکوبی-بلمن (HJB)، برای مدل درجه سه ژنراتور به همراه مدل درجه یک AVR انجام گرفت. تابع هزینه بصورت مجموع مربعات وزن دار مربوط به تغییرات زاویه بار و سرعت روتور در مقابل تغییر ولتاژ مرجع AVR در نظر گرفته شد. معادله HJB بدست آمده برای بدست آوردن ورودی بهینه که به ازای آن تابع هزینه حداقل می شود، حل گردید. حل معادله HJB به معنی حل یک معادل دیفرانسیل جزئی-پارهای است که معمولاً بصورت تحلیلی قابل حل نمی باشد. لذا از یک روش تقریبی برای حل معادله مزبور استفاده شده است که در آن پاسخ معادله تحلیلی بصورت سری تیلور تا درجه دلخواه محاسبه می گردد. روند حل برای بدست آوردن تقریب درجه یک از جواب بطور کامل همراه با جزئیات بیان شد که روش کار برای بدست آوردن درجات بالاتر جواب نیز مشابه آن می باشد. روش ارائه شده برای یک سیستم نمونه بکار گرفته شد و سه کنترل کننده بر اساس حل معادله HJB تا سه درجه مختلف محاسبه گردید: سه طراحی شده به همراه سیستم ژنراتور و AVR مورد شبیه سازی قرار گرفتند و عملکرد هر یک از آنها در میرا کردن نوسانات ایجاد شده در سیستم بررسی گردید. اغتشاشاتی در سیستم با شبیه سازی یک اتصال کوتاه موقتی در باس بینهایت ایجاد شد. مدت زمان اتصال کوتاه تعیین کننده میزان انحراف متغیرهای حالت سیستم از مقدار پایدار اولیه آنها می باشد. بنابراین توانایی یک PSS در کنترل نوسانات بزرگتر، با مدت زمان تحمل اتصال کوتاه توسط سیستم



(الف) زاویه بار - زمان.



(ب) توان تولیدی - زمان.

$$C_1 = \frac{P_m}{M}, \quad C_2 = -\frac{V_s}{x'_d M}, \quad C_3 = \frac{V_s^2}{2M} \frac{x_q - x'_d}{x_q x'_d},$$

$$C_4 = \frac{1}{T'_{do}}, \quad C_5 = -\frac{x_d}{x'_d T'_{do}}, \quad C_6 = \frac{V_s(x_d - x'_d)}{x'_d T'_{do}}$$

$$C_7 = \frac{K_A}{T_A}, \quad C_8 = -\frac{1}{T_A}, \quad C_9 = -\frac{K_A}{T_A},$$

$$C_{10} = \frac{V_s X_q}{x_q}, \quad C_{11} = \frac{x'_d - X'_d}{x'_d}, \quad C_{12} = \frac{V_s X'_d}{x'_d}$$

۵-۲ - پارامترها و شرایط اولیه برای سیستم نمونه [6]

$$S_n = 1.157 \text{ pu}, \quad \cos\phi = 0.95 \text{ (Lag)}, \quad V_s = 1.216 \text{ pu}, \quad M = 0.0205 \text{ pu}$$

$$X'_d = 0.33 \text{ pu}, \quad X_q = 2.48, \quad x_d = 3.01 \text{ pu}, \quad x_q = 2.89 \text{ pu}, \quad x'_d = 0.74 \text{ pu}$$

$$K_A = 0.5, \quad T_A = 0.001 \text{ s}, \quad T'_{do} = 9.2 \text{ s}$$

$$\delta_o = \tan^{-1} \left(\frac{x_q S_n \cos\phi}{V_s^2 + x_q S_n \sin\phi} \right) = 0.9 \text{ rad},$$

$$(\Delta\omega)_o = 0 \text{ rad/s}$$

$$E'_{qo} = x'_d \frac{S_n}{V_s} \sin(\phi + \delta_o) + V_s \cos\delta_o = 1.413 \text{ pu}$$

$$E_{fo} = \frac{x_d}{x'_d} E'_{qo} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V_s \cos\delta_o = 3.44 \text{ pu}$$

$$V_{to} = \left(\left(\frac{X_q}{x_q} V_s \sin\delta_o \right)^2 + \left(\frac{X'_d}{x'_d} V_s \cos\delta_o + \frac{x'_d - X'_d}{x'_d} E'_{qo} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 1.386 \text{ pu}$$

$$V_{refo} = \frac{E_{fo}}{K_A} + V_{to} = 8.264 \text{ pu}$$

$$C_1 = 53.617, \quad C_2 = -80.646, \quad C_3 = 36.534, \quad C_4 = 0.109, \quad C_5 = -0.444, \quad C_6 = -0.408$$

$$C_7 = 500, \quad C_8 = -1000, \quad C_9 = -500, \quad C_{10} = 1.045, \quad C_{11} = 0.551, \quad C_{12} = 0.546$$

$$q_1 = 100, \quad q_2 = 50, \quad r = 1$$

مورد سنجش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی این موضوع را نشان داد که حداکثر زمان تحمل اتصال کوتاه برای کنترل کننده‌های مرتبه ۱ و ۲ کمتر از مقدار آن برای کنترل کننده مرتبه ۳ می‌باشد. این تفاوت برای PSS مرتبه ۳ و مرتبه ۱ برابر 90ms و برای PSS مرتبه ۲ برابر 50ms می‌باشد. معنی این عبارت این است که با PSS مرتبه ۳، سیستم می‌تواند مدت زمان بیشتری اتصال کوتاه را تحمل کند بدون اینکه نیاز باشد رله‌های حفاظتی عمل کنند. با توجه به این موضوع، می‌توان گفت که حوزه اعتبار کنترل کننده مرتبه ۳ نسبت به کنترل کننده‌های مرتبه ۱ و ۲ بیشتر است. این امر تأییدی است بر این موضوع که حوزه اعتبار کنترل کننده‌های غیرخطی نسبت به کنترل کننده‌های خطی بیشتر است. به تعبیر دیگر کنترل کننده‌های غیرخطی قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به متناظرهای خطی خود دارند.

۵ - ضمیمه

۵-۱- تعاریف متغیرها

E_f : ولتاژ تحریک.

E'_q : مؤلفه q مربوط به EMF گذرای داخلی.

K_A : بهره کنترل AVR.

M : ضریب اینرسی.

P_m : توان مکانیکی که توسط محرک مکانیکی تأمین می‌شود.

T_A : ثابت زمانی کنترل AVR.

T'_{do} : ثابت زمانی مدار باز محور d در حالت گذرا.

V_{ref} : ولتاژ مرجع، ورودی کنترل AVR.

V_s : ولتاژ در باس بینهایت.

V_t : ولتاژ در ترمینال ژنراتور.

X'_d : راکتانس محور d ژنراتور در حالت گذرا.

X_q : راکتانس محور q ژنراتور در حالت دائمی.

x_d : مجموع راکتانس محور d، بین ژنراتور و باس بینهایت در حالت دائمی.

x_q : مجموع راکتانس محور q، بین ژنراتور و باس بینهایت در حالت دائمی.

x'_d : مجموع راکتانس محور d، بین ژنراتور و باس بینهایت در حالت گذرا.

ω_s و ω : سرعت روتور و سرعت سنکرون.

$\Delta\omega = \omega - \omega_s$: انحراف سرعت روتور از سرعت سنکرون.

δ : زاویه روتور نسبت به مرجع سنکرون (نسبت به بردار \bar{V}_s سنجیده می‌شود)، زاویه بار.

$x_1 = \delta - \delta_o$, $x_2 = \Delta\omega$, $x_3 = E'_q - E'_{qo}$, $x_4 = E_f - E_{fo}$, $u = V_{ref} - V_{refo}$

$x_{o1} = \delta_o$, $x_{o2} = 0$, $x_{o3} = E'_{qo}$, $x_{o4} = E_{fo}$

- 1- Power System Stabilizer
- 2- Hamition-Jacobii-Bellman
- 3- Automatic Voltage Control
- 4- Linear Quadratic Regulator

مراجع

- « مقدمه‌ای بر تئوری کنترل بهینه », مرکز نشر دانشگاه صنعتی
امیرکبیر، ۱۳۷۹
- [1] Y.N.Yu , “ Electric Power System Dynamics”, Academic Press , New York , 1983
- [2] G.P.Chen, O.P.Malik, Y.H.Qin, G.Y.Xu, “An Adaptive Power System Stabilizer Based on the Self-Optimising Pole Shifting Control Strategy”, IEEE Trans., 1993, EC-8, (4), pp. 639-645.
- [3] K.S.Al-Olimat, A.A.Ghandakly, “Intelligent Parallel Controller Based on Fuzzy Linguistic Rules” , South Eastern Symposium on System Theory-2001, Proc. 33rd, pp. 359-363.
- [4] Y.L.Abdelmagid, M.Bettayeb, M.M.Dawoud, “Simultaneous Stablisation of Power Systems Using Genetic Algorithms”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. 1997, 144, (1), pp. 39-44.
- [۵] دونالد کرک، ترجمه دکتر سید کمال‌الدین نیکروش،
- [7] J.Machowski, J.W.Bialek, J.R.Bumby, “ Excitation Control System for Use with Synchronous generators”, IEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution . Vol. 145 , No. 5 , Sept. 1998.
- [8] M.J.Yazdanpanah, K.Khorasani, R.V.Patel, “ On the Estimate of the Domain of Validity of Non-Linear H_{∞} Control ”, INT. J. Control., 1999, Vol.72, No.12, pp. 1097-1105.
- [9] M.J.Yazdanpanah, K.Khorasani, R.V.Patel, “ Uncertainty Compensation for a Flexible-Link Manipulator Using Nonlinear H_{∞} Control ”, INT. J. Control., 1998, Vol.69, No.6, pp. 753-771.