

## طراحی پایدارسازسیستم قدرت بر اساس تئوری کنترل لغزشی برای سیستم قدرت چند ماشینه

غضنفر شاهقلیان<sup>(۱)</sup> - امین رجبی<sup>(۲)</sup> - بهرام کریمی<sup>(۳)</sup> - محمدرضا یوسفی<sup>(۴)</sup>

(۱) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

(۲) کارشناس ارشد - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

(۳) استادیار - گروه برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

(۴) دانشجوی دکترای برق - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۸۸

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۸

**خلاصه:** در این مقاله روشی جدید بر اساس تئوری کنترل لغزشی برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت (PSS) ارائه می‌شود. هدف این کنترل کننده افزایش پایداری و بهبود پاسخ دینامیکی یک سیستم قدرت چند ماشینه می‌باشد. به منظور طراحی کنترل کننده لغزشی، ابتدا مدل غیرخطی سیستم به شکل نرمال تبدیل می‌شود که باعث تسهیل در طراحی کنترل کننده غیرخطی برای آن می‌شود و پس از آن کنترل کننده لغزشی پیشنهادی ارائه خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این کنترل کننده در برابر ایجاد تغییر در پارامترهای سیستم و نیز ایجاد اغتشاش در سیستم مقاوم می‌باشد. همچنین برای نشان دادن کارایی بهتر روش پیشنهادی، نتایج روش کنترل لغزشی با روش طراحی کلاسیک (جبران‌ساز پس فاز - پیش فاز) مورد مقایسه قرار گرفته است. هدف اصلی از به کارگیری این روش بهبود رفتار کنترل کننده به منظور دستیابی به زمان نشست کوتاه‌تر و میزان فراجهدش کمتر در پاسخ دینامیکی سیستم می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** پایدارساز سیستم قدرت (PSS)، سیستم قدرت چند ماشینه، کنترل حالت لغزشی (SMC).

### ۱- مقدمه

با تغییر شرایط کارکرد سیستم در حالت عملکرد عادی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از آنجایی که سیستم‌های قدرت به شدت غیرخطی هستند، PSSهای کلاسیک با پارامترهای ثابت، نمی‌توانند از عهده تغییرات شدید در شرایط کارکرد سیستم برآیند. همچنین تغییرات در پارامترهای تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ باعث تغییرات شدید در وضعیت سیستم می‌شود. بنابراین در عمل پایدارساز کلاسیک کارایی خوبی نخواهد داشت [۹، ۱۰]. هم اکنون مطالعات زیادی بر روی PSSها در سیستم‌های قدرت صورت می‌پذیرد که شامل جایابی بهینه PSSها، هماهنگی PSSها و همچنین به کارگیری روشهای موثرتر در طراحی PSS است [۱۱]. در زمینه اخیر استفاده از تئوری کنترل بهینه [۱۲]، کنترل کننده‌های تطبیقی [۱۳] و همچنین روشهایی چون کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۲] و الگوریتم ژنتیک [۱۴، ۱۵]، ارائه شده‌اند. یکی از روشهایی که در طراحی کنترل کننده‌های سیستم‌های غیرخطی به کار می‌رود، روش کنترل حالت لغزشی (SMC) می‌باشد.

در سالهای اخیر برای افزایش پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت روشهای مختلفی ارائه شده است. تنظیم کننده‌های مدرن ولتاژ و سیستم‌های تحریک با قابلیت پاسخ دهی سریع می‌توانند با افزایش گشتاور سنکرون کننده ماشین، برای بهبودی پایداری گذرا در سیستم مورد استفاده قرار گیرند، ولی ممکن است اثر منفی بر میرایی نوسانات روتور به وجود آورند. یک راه حل مناسب برای رفع این مشکل مجهز کردن ژنراتور به کنترل کننده‌ای می‌باشد که یک سیگنال تکمیلی در ورودی ولتاژ مرجع در تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ وارد کند. این وسیله پایدارساز سیستم قدرت (PSS) نامیده می‌شود [۸-۱]. روشهای کنترلی مختلفی برای طراحی PSS پیشنهاد شده که از میان آنها PSSهای کلاسیک که دارای جبران کننده‌های پس فاز - پیش فاز می‌باشند به دلیل ساختار ساده، انعطاف پذیری و پیاده‌سازی آسان مورد استفاده اغلب شرکتها قرار گرفته است. اما بازدهی این پایدارسازها

مدل غیرخطی دقیق ژنراتور سنکرون یک مدل مرتبه شش است، اما معمولاً این مدل با ساده سازی به یک مدل مرتبه سوم کاهش می یابد. معادلات مربوط به مدل مرتبه سوم ژنراتور سنکرون عبارتند از:

$$\frac{d}{dt} \delta(t) = \omega(t) - \omega_0$$

$$\frac{d}{dt} \omega = -\frac{K_D}{2H} (\omega(t) - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e(t)) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} E'_q(t) = \frac{1}{T'_{do}} (E_F(t) - E_q(t))$$

که در آن نیروی محرکه مغناطیسی محور q ژنراتور معادل در سیم پیچ تحریک ژنراتور عبارتند از:

$$E_q(t) = \frac{X'_d}{X'_d} E'_q(t) - \frac{x_d - x'_d}{X'_d} V_s \cos(\delta(t))$$

و توان الکتریکی برابر است با:

$$E_F(t) = k_c u_F(t)$$

$$P_e(t) = \frac{V_s E_q(t)}{X_d} \sin(\delta(t))$$

$\delta$  زاویه روتور،  $\omega$  سرعت روتور،  $P_e$  توان مکانیکی ورودی ژنراتور،  $x_d$  راکتانس ژنراتور در محور d،  $x'_d$  راکتانس حالت گذرای ژنراتور در محور d،  $X_d$  مجموع راکتانس های ژنراتور در محور d،  $X'_d$  مجموع راکتانس های گذرای ژنراتور در محور d،  $u_F$  ورودی تقویت کننده سیستم تحریک با بهره  $K_c$ ،  $T'_{do}$  ثابت زمانی اتصال کوتاه محور d ژنراتور در حالت گذرا،  $V_s$  ولتاژ شین بی نهایت،  $\omega_0$  سرعت سنکرون ژنراتور،  $H$  ثابت اینرسی ژنراتور،  $K_D$  ثابت میرایی ژنراتور می باشند.

حالت های سیستم برای ژنراتور لام را به صورت زیر تعیین می کنیم:

$$x_{1j}(t) = \delta_j(t)$$

$$x_{2j}(t) = \omega_j(t) - \omega_{oj} \quad (3)$$

$$x_{3j}(t) = E'_{qj}(t)$$

بنابراین بردار حالت سیستم برای هر یک از ژنراتورها به صورت زیر خواهد بود:

$$j(t) = [x_{1j}(t) \ x_{2j}(t) \ x_{3j}(t)]^T \mathbf{x} \quad (4)$$

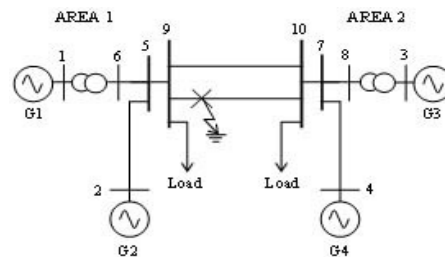
به منظور بیان واضح تر معادلات غیر خطی سیستم، ثابت هایی به صورت زیر برای هر یک از ژنراتورها تعریف می گردد:

از این روش برای کنترل رباتها، موتورها و سیستم های مکانیکی استفاده شده است و نشان داده شده که رفتار مطلوب سیستم حلقه بسته را تضمین می کند [۱۶]. استفاده از تئوری کنترل حالت لغزشی برای طراحی پایدار ساز سیستم قدرت با استفاده از مدل خطی شده سیستم در [۱۷] و [۱۸] به کار گرفته شده است. یکی از معایب استفاده از مدل خطی شده سیستم برای طراحی کنترل کننده، کاهش میزان کارایی کنترل کننده در هنگام وقوع اغتشاشات بزرگ و نیز ایجاد تغییرات شدید در پارامترهای سیستم می باشد. در این مقاله کنترل کننده لغزشی پیشنهادی با استفاده از مدل غیرخطی سیستم که با استفاده از یک تبدیل مناسب به شکل نرمال تبدیل شده است، طراحی می گردد. از آنجایی که این کنترل کننده نیاز به مکانیزم سوئیچینگ بسیار سریع دارد باعث ایجاد نوسانات نامطلوب (چترینگ) در سیستم می شود که وجود این نوسانات ممکن است باعث فعال شدن دینامیک های مدل نشده سیستم شود. یک روش مناسب برای حذف این نوسانات که در این مقاله استفاده شده است، استفاده از لایه مرزی است.

مطالبی که در این مقاله بیان می شوند به این شرح است: در قسمت دوم به بیان مدل دینامیکی ژنراتور سنکرون پرداخته خواهد شد. در قسمت سوم اصول طراحی کنترل کننده های حالت لغزشی بیان خواهد شد. در قسمت چهارم به منظور تسهیل در طراحی کنترل کننده غیر خطی برای سیستم، با استفاده از یک تبدیل مناسب مدل غیرخطی ژنراتور سنکرون به شکل نرمال تبدیل خواهد شد و در ادامه کنترل کننده لغزشی پیشنهادی برای سیستم معرفی می شود. در قسمت پنجم پایدار ساز سیستم قدرت کلاسیک که بر اساس جبران کننده های پس فاز- پیش فاز می باشد معرفی می شود و در قسمت ششم نتایج شبیه سازی های کامپیوتری انجام شده بر روی سیستم غیرخطی با استفاده از روش پیشنهادی و روش طراحی کلاسیک آمده است.

## ۲- مدل دینامیکی ژنراتور سنکرون

یک سیستم قدرت چند ماشینه استاندارد شامل چهار ژنراتور سنکرون، در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم دارای دو ناحیه می باشد که هر ناحیه دارای دو ژنراتور سنکرون مجهز به سیستم های کنترل تحریک است.



شکل (۱): دیاگرام تک خطی سیستم قدرت چند ماشینه دو ناحیه ای  
Fig. (1): The block diagram of a two regional multi machine linear single power system

### ۳- کنترل حالت لغزشی

یکی از روشهایی که در طراحی کنترل کننده‌های سیستم‌های غیرخطی به کار می‌رود، روش کنترل حالت لغزشی می‌باشد. این روش بر اساس متغیرهای حالت سیستم تعریف می‌شود. از این تکنیک معمولاً در سیستم‌هایی استفاده می‌شود که شناخت دقیقی نسبت به مشخصات آنها در دست نیست و یا سیستم ممکن است تحت تاثیر متغیرهای پیش بینی نشده قرار گیرد. عمده‌ترین مزیت این روش مقاوم کردن سیستم در برابر تغییرات می‌باشد. کنترل حالت لغزشی نشان داده است که توانایی رسیدن به عملکرد مطلوب را با وجود عدم قطعیت در پارامترهای سیستم و همچنین وجود منابع اغتشاش خارجی، دارا می‌باشد. در این روش با استفاده از سوئیچ کردن بینهایت سریع قسمتی از سیگنال کنترل، کنترل کننده‌ی پایدار مقاومی را می‌توان طراحی نمود. از طرفی عمل سوئیچ کردن موجب نوسانات نا مطلوب در سیستم می‌گردد که وجود این نوسانات ممکن است باعث فعال شدن دینامیک‌های مدل نشده‌ی سیستم شود. یک روش مناسب برای حذف این نوسانات، استفاده از لایه مرزی است [۲۰، ۱۹].

کنترل کننده حالت لغزشی پیشنهادی بر اساس یک الگوریتم سه مرحله‌ای طراحی می‌شود. مرحله اول تبدیل سیستم غیرخطی اصلی به شکل نرمال می‌باشد. مرحله دوم طراحی سطح لغزشی خطی برای سیستم است و مرحله سوم طراحی سیگنال کنترل به گونه‌ای که اولاً از هر حالت اولیه مسیر حالت را به سطح لغزش برساند و ثانیاً با رسیدن به این سطح، مسیر حالت بر روی آن سطح باقی بماند. به منظور تشریح این روش سیستم غیر خطی مرتبه  $n$  چند ورودی - چند خروجی (MIMO) زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + G(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (10)$$

که  $x \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ ,  $u \in \mathcal{R}^{m \times 1}$  و  $y \in \mathcal{R}^{l \times 1}$  به ترتیب بردار حالت، بردار ورودی و بردار خروجی سیستم هستند و همچنین  $f(x) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  و  $G(x) \in \mathcal{R}^{n \times m}$  و  $h(x) \in \mathcal{R}^{l \times 1}$  میدان‌های برداری هموار می‌باشند. در ادامه الگوریتم سه مرحله‌ای طراحی کنترل کننده‌ی حالت لغزشی بیان خواهد شد.

۳-۱- تبدیل سیستم به شکل نرمال: تبدیل سیستم داده شده به شکل نرمال اولین گام در فرایند طراحی کنترل کننده حالت لغزشی پیشنهادی است، برای انجام این کار با استفاده از یک تبدیل مناسب به صورت  $z(t) = T(x)$ ، سیستم غیرخطی (۱۰) به صورت زیر به شکل نرمال در می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = z_2(t) \\ \dot{z}_2(t) = z_3(t) \\ \vdots \\ \dot{z}_{n-1}(t) = z_n(t) \\ \dot{z}_n(t) = f(z) + G(z)u \end{cases}, \quad y(t) = z_1(t) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1j} &= -\frac{K_{Dj}}{2H_j} \\ \alpha_{2j} &= -\frac{\omega_{oj}}{2H_j X'_{dj}} V_s \\ \alpha_{3j} &= \frac{\omega_{oj}(x_{dj} - x'_{dj})}{4H_j X_{dj} X'_{dj}} V_s^2 \\ \alpha_{4j} &= \frac{\omega_{oj}}{2H_j} P_{mj} \\ \alpha_{5j} &= -\frac{1}{T'_{doj}} \frac{X_{dj}}{X'_{dj}} \\ \alpha_{6j} &= \frac{x_{dj} - x'_{dj}}{T'_{doj} X'_{dj}} V_s \end{aligned} \quad (5)$$

بنابراین با جایگذاری معادلات (۵) در (۱) و (۲)، معادلات بیانگر ژنراتور سنکرون  $z$  ام به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1j}(t) &= x_{2j}(t) \\ \dot{x}_{2j}(t) &= \alpha_{1j} x_{2j}(t) + \alpha_{2j} x_{3j}(t) \sin(x_{1j}(t)) \\ &\quad + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}(t)) + \alpha_{4j} \end{aligned} \quad (6)$$

که  $u_j(t)$  ورودی کنترل کننده‌ی سیستم است و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$u_j(t) = \frac{k_{ej}}{T'_{doj}} u_{fj}(t) \quad (7)$$

همچنین مقادیر مطلوب حالت‌های سیستم هر یک از ژنراتورهای سنکرون را با پارامترهای  $x_{3dj}$  و  $x_{2dj}$ ،  $x_{1dj}$  نشان می‌دهیم. بنابراین بردار حالت‌های مطلوب سیستم به صورت  $D_j^T x$  خواهد بود.

انحراف زاویه توان از مقدار مطلوب آن نیز به عنوان خروجی کنترل شده‌ی هر یک از ژنراتورها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$y_j(t) = x_{1j}(t) - x_{1dj} \quad (8)$$

همچنین با استفاده از معادلات (۶)، مقادیر  $x_{3dj}$  و  $x_{2dj}$ ،  $x_{1dj}$  باید در روابط زیر صدق کنند:

$$\begin{aligned} \left( -\frac{\alpha_{1j}\alpha_{6j}}{2\alpha_{5j}} + \alpha_{3j} \right) \sin(2x_{1dj}) - \frac{\alpha_{2j}}{\alpha_{5j}} u_{dj} \sin(x_{1dj}) \\ + \alpha_{4j} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$x_{2dj} = 0$$

$$x_{3dj} = -\frac{\alpha_{6j}}{\alpha_{5j}} \cos(x_{1dj}) - \frac{1}{\alpha_{5j}} u_{dj}$$

پارامتر  $u_{dj}$  بیانگر ورودی کنترل کننده‌ی سیستم است به گونه‌ای که حالت‌های سیستم به مقادیر مطلوب دست پیدا کنند.

$$\begin{aligned} z_{1j}(t) &= x_{1j}(t) - x_{1dj} \\ z_{2j}(t) &= x_{2j}(t) \\ z_{3j}(t) &= \alpha_{1j} x_{2j}(t) + \alpha_{2j} x_{3j}(t) \sin(x_{1j}(t)) \\ &\quad + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}(t)) + \alpha_{4j} \end{aligned} \quad (15)$$

با استفاده از روابط (۹) و (۱۵) می‌توان اثبات نمود که اگر  $z_j(t)$  در  $t \rightarrow \infty$  به صفر همگرا شود، آنگاه  $x_j(t)$  در  $t \rightarrow \infty$  به  $x_{dj}$  همگرا می‌شود.

به ازای  $\sin(x_{1j}(t)) \neq 0$  معکوس تبدیل بیان شده در (۱۵) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} x_{1j}(t) &= z_{1j}(t) + x_{1dj} \\ x_{2j}(t) &= z_{2j}(t) \\ x_{3j}(t) &= 1/(\alpha_{2j} \sin(z_{1j}(t) + x_{1dj}))(z_{3j}(t) - \alpha_{1j} z_{2j}(t) \\ &\quad - \alpha_{3j} \sin(2(z_{1j}(t) + x_{1dj})) - \alpha_{4j}) \end{aligned} \quad (16)$$

شرط  $\sin(x_{1j}(t)) \neq 0$  به این معنی است که:

$$x_{1j}(t) = \delta_j(t) \neq n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17)$$

از آنجایی که ناحیه عملکرد زاویه توان ژنراتور سنکرون در بازه  $(0, \pi)$  می‌باشد، بنابراین شرط  $\sin(x_{1j}(t)) \neq 0$  همیشه در ناحیه عملکرد، برقرار است. البته باید توجه داشت که اگر  $\delta_j(t)$  در بازه  $(0, \pi)$  قرار نگرفته باشد، سنکرونیسم از دست رفته است.

با قرار دادن رابطه‌ی (۶) در (۱۵) معادلات ژنراتور سنکرون به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{1j}(t) &= z_{2j}(t) \\ \dot{z}_{2j}(t) &= z_{3j}(t) \\ \dot{z}_{3j}(t) &= f_j(z) + G_j(z)u_j \\ y_j(t) &= z_{1j}(t) \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} f_j(z) &= \left( \begin{aligned} &(\alpha_{1j} + \alpha_{5j})z_{3j} - \alpha_{1j}\alpha_{5j}z_{2j} \\ &+ \left( \frac{1}{2}\alpha_{1j}\alpha_{6j} - \alpha_{3j}\alpha_{5j} \right) \sin(2(z_{1j} + x_{1dj})) \\ &+ 2\alpha_{3j}z_{2j}\cos(2(z_{1j} + x_{1dj})) \\ &+ z_{2j}\cot(z_{1j} + x_{1dj}) \left( \begin{aligned} &z_{3j} - \alpha_{1j}z_{2j} \\ &- \alpha_{3j}\sin(2(z_{1j} + x_{1dj})) - \alpha_{4j} \end{aligned} \right) \\ &- \alpha_{4j}\alpha_{5j} \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

و

$$G_j(z) = \alpha_{2j} \sin(z_{1j} + x_{1dj}) \quad (20)$$

همچنین باید توجه داشت که در دستگاه اصلی توابع  $f_j(z) = f_{1j}(x)$  و  $G_j(z) = G_{1j}(x)$  به صورت زیر هستند:

### ۳-۲- طراحی سطوح لغزش: در گام دوم برای طراحی کنترل کننده

حالت لغزشی، سطحی به نام سطح لغزش تعریف می‌شود. سطح لغزش در واقع سطحی است که متغیرهای حالت برای رساندن خود به شرایط پایدار، روی آن قرار می‌گیرند. بنابراین با هر شرط اولیه‌ای، می‌بایست متغیرهای حالت سیستم، ابتدا خود را به این سطح رسانده و سپس با مرجع قرار دادن این سطح پس از نوساناتی خود را به مبدأ برسانند. معادله‌ی هر یک از سطوح لغزش به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که درجه‌ی آن یک درجه کمتر از مرتبه‌ی سیستم باشد. یک فرم متداول برای تعیین سطوح لغزش به صورت زیر است:

$$S_i(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \rho_{ik} y_i^{(k)}(t) = 0 \quad \forall i = \overline{1, m} \quad (12)$$

که در این رابطه  $n$ ، مرتبه‌ی سیستم و ضرایب  $\rho_{ik}$  به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که پاسخ گذرای مطلوب برای خروجی‌های سیستم به دست آید.

### ۳-۳- طراحی توابع کنترل: توابع کنترلی به گونه‌ای انتخاب

می‌شوند که اولاً از هر حالت اولیه، هر حالت  $x$  را در یک زمان محدود به سطح لغزش برساند و ثانیاً با رسیدن به این سطح، مسیر حالت بر روی آن سطح باقی بماند. در روش کنترل حالت لغزشی هر یک از مولفه‌های توابع کنترلی،  $u_i$ ، که دارای سوئیچینگ بسیار سریع می‌باشند، یک ساختار غیرخطی به صورت زیر دارند:

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(t, x) & S_i(x) > 0 \\ u_i^-(t, x) & S_i(x) < 0 \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, m} \quad (13)$$

این توابع کنترلی باید به گونه‌ای انتخاب شوند که شرط وجود کنترل حالت لغزشی را بر آورده کنند [۱۸]. یک فرم بسیار متداول این شرط به صورت زیر است:

$$S_i(x)\dot{S}_i(x) < 0 \quad \forall i = \overline{1, m} \quad (14)$$

### ۴- طراحی کنترل کننده لغزشی

هدف از این قسمت طراحی یک کنترل کننده بر مبنای تئوری کنترل لغزشی برای ژنراتور سنکرون است، به طوری که حالت‌های سیستم را در مقادیر مطلوب آن تنظیم کند و پایداری شبکه را در نقطه کار با وجود نامعینی‌ها حفظ کند و همچنین سرعت میرایی نوسانات را افزایش دهد. معادلات (۶) و (۸) که بیانگر سیستم ژنراتور سنکرون هستند به شدت غیر خطی‌اند. بنابراین در مرحله اول برای تسهیل در طراحی کنترل کننده‌ی غیر خطی از یک تغییر متغیر مناسب به صورت  $x = T_j^{-1}(z)$  برای تبدیل سیستم به شکل نرمال استفاده می‌شود. این تغییر متغیر برای هر یک از ژنراتورها به صورت زیر می‌باشد:

$$S_j \dot{S}_j = -S_j \eta_j \text{sign}(S_j) = -\eta_j |S_j| < 0 \quad (28)$$

در نتیجه با انتخاب تابع کنترلی به فرم (۲۵) شرط وجود کنترل حالت لغزشی برای سیستم برآورده شد. از آنجایی که  $\eta_j$  یک مقدار اکیداً مثبت انتخاب می‌شود، هر یک از حالت‌های سیستم با هر شرط اولیه‌ای، در یک زمان محدود خود را به سطح لغزش می‌رسانند و به سمت مبدا حرکت می‌کنند. از آنجایی که سطح لغزشی  $S$  در یک زمان محدود به صفر همگرا می‌شود، خروجی  $z_{1j}(t) = y_j(t)$  نیز بر طبق معادله دیفرانسیلی  $\ddot{y}_j(t) + \rho_{1j} \dot{y}_j(t) + \rho_{2j} y_j(t) = 0$  می‌شود. از آنجایی که  $z_{1j}(t)$  در  $t \rightarrow \infty$  به صفر همگرا می‌شود، پس  $z_{2j}(t)$  و  $z_{3j}(t)$  نیز در  $t \rightarrow \infty$  به سمت صفر میل می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این کنترل کننده همگرایی مجانبی  $(z_{1j}(t), z_{2j}(t), z_{3j}(t))$  را در  $t \rightarrow \infty$  تضمین می‌کند.

با استفاده از رابطه‌ی (۱۶) تابع کنترلی داده شده در رابطه (۲۵) در دستگاه اصلی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u_j = \frac{1}{\alpha_{2j} \sin(x_{1j})} \left( -(\alpha_{1j} + \rho_{1j}) \left( \alpha_{1j} x_{2j} + \alpha_{2j} x_{3j} \sin(x_{1j}) \right) + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}) + \alpha_{4j} \right) + \frac{1}{\alpha_{2j} \sin(x_{1j})} \left( -\alpha_{2j} (\alpha_{5j} x_{3j} + \alpha_{6j} \cos(x_{1j})) \sin(x_{1j}) - \alpha_{2j} x_{2j} x_{3j} \cos(x_{1j}) - 2\alpha_{3j} x_{2j} \cos(2x_{1j}) \right) + \frac{1}{\alpha_{2j} \sin(x_{1j})} (-\rho_{2j} x_{2j} - \eta_j \text{sign}(S_j)) \quad (29)$$

که در آن:

$$S_j = \alpha_{1j} x_{2j} + \alpha_{2j} x_{3j} \sin(x_{1j}) + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}) + \alpha_{4j} + \rho_{1j} x_{2j} + \rho_{2j} (x_{1j} - x_{1dj}) \quad (30)$$

بنابراین با اعمال کنترل کننده‌ی طراحی شده در روابط (۲۹) و (۳۰) و اعمال آن به سیستم داده شده در روابط (۶) و (۸) همگرایی مجانبی  $(x_{1j}(t), x_{2j}(t), x_{3j}(t))$  به مقادیر مطلوبشان در  $t \rightarrow \infty$  نیز تضمین می‌شود.

طراحی تابع کنترلی سیستم با استفاده از تابع علامت باعث ایجاد نوسانات نامطلوب در سیستم می‌شود که وجود این نوسانات ممکن است باعث فعال شدن دینامیک‌های مدل نشده سیستم شوند. یک روش مناسب برای حذف این نوسانات، استفاده از لایه مرزی با پهنای  $\varepsilon_j$  در  $S_j(x) = 0$  است. در این صورت خواهیم داشت:

$$u_j = \frac{1}{\alpha_{2j} \sin(x_{1j})} \left\{ \left( -(\alpha_{1j} + \rho_{1j}) \left( \alpha_{1j} x_{2j} + \alpha_{2j} x_{3j} \sin(x_{1j}) \right) + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}) + \alpha_{4j} \right) + \left( -\alpha_{2j} (\alpha_{5j} x_{3j} + \alpha_{6j} \cos(x_{1j})) \sin(x_{1j}) - \alpha_{2j} x_{2j} x_{3j} \cos(x_{1j}) - 2\alpha_{3j} x_{2j} \cos(2x_{1j}) \right) + \left( -\rho_{2j} x_{2j} - \eta_j \text{sat}\left(\frac{S_j}{\varepsilon_j}\right) \right) \right\} \quad (31)$$

که  $\varepsilon_j > 0$  تعیین کننده‌ی پهنای لایه‌ی مرزی در همسایگی سطوح لغزشی است.

$$f_{1j}(x) = \alpha_{1j} \left( \alpha_{1j} x_{2j} + \alpha_{2j} x_{3j} \sin(x_{1j}) \right) + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}) + \alpha_{4j} + \alpha_{2j} (\alpha_{5j} x_{3j} + \alpha_{6j} \cos(x_{1j})) \sin(x_{1j}) + \alpha_{2j} x_{2j} x_{3j} \cos(x_{1j}) + 2\alpha_{3j} x_{2j} \cos(2x_{1j}) \quad (21)$$

و

$$G_{1j}(x) = \alpha_{2j} \sin(x_{1j}) \quad (22)$$

مدل به دست آمده برای ژنراتور سنکرون که در رابطه (۱۸) بیان شد برای طراحی کنترل کننده‌ی حالت لغزشی به کار می‌رود. سپس کنترل کننده‌ی طراحی شده با استفاده از تبدیل  $(z^{-1} = T_j x_j)$  که در رابطه‌ی (۱۶) آمده است به دستگاه اصلی برگردانده می‌شود. مرحله‌ی دوم طراحی کنترل کننده‌ی حالت لغزشی، تعیین سطح لغزش است. با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) سطح لغزشی برای سیستم مورد نظر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_j = \ddot{y}_j + \rho_{1j} \dot{y}_j + \rho_{2j} y_j = z_{3j} + \rho_{1j} z_{2j} + \rho_{2j} z_{1j} \quad (23)$$

که ثابتهای  $\rho_{1j}$  و  $\rho_{2j}$  اعداد اسکالر مثبت هستند و به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که پاسخ گذرای مطلوب برای خروجی سیستم به دست آید. با استفاده از رابطه (۱۵) معادله سطح لغزش بر حسب متغیرهای  $x_{1j}(t), x_{2j}(t), x_{3j}(t)$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_j = \alpha_{1j} x_{2j} + \alpha_{2j} x_{3j} \sin(x_{1j}) + \alpha_{3j} \sin(2x_{1j}) + \alpha_{4j} + \rho_{1j} x_{2j} + \rho_{2j} (x_{1j} - x_{1dj}) \quad (24)$$

باید توجه داشت که با تعیین سطح لغزش به شکل فوق همگرایی خروجی سیستم به صفر، وقتی  $t \rightarrow \infty$  بر روی سطح لغزشی  $S_j(x) = 0$  تضمین می‌شود.

مرحله‌ی سوم طراحی کنترل کننده حالت لغزشی پیشنهادی، انتخاب تابع کنترلی برای سیستم است که به صورت زیر می‌باشد:

$$u_j(z) = \frac{-1}{G_j(z)} (f_j(z) + \rho_{1j} z_{3j} + \rho_{2j} z_{2j} + \eta_j \text{sign}(z_{3j} + \rho_{1j} z_{2j} + \rho_{2j} z_{1j})) \quad (25)$$

که  $\eta_j$  یک عدد اسکالر مثبت است و مقدار آن توسط طراح تعیین می‌شود. برای بررسی شرط وجود کنترل حالت لغزشی با مشتق گیری از معادله‌ی (۲۳) و استفاده از رابطه (۱۸) داریم:

$$\dot{S}_j = \ddot{y}_j + \rho_{1j} \dot{y}_j + \rho_{2j} \dot{y}_j = f_j(z) + G_j(z) u_j + \rho_{1j} z_{3j} + \rho_{2j} z_{2j} \quad (26)$$

با جایگذاری معادله‌ی (۲۵) در (۲۶) خواهیم داشت:

$$\dot{S}_j = f_j(z) + \rho_{1j} z_{3j} + \rho_{2j} z_{2j} + (-f_j(z) - \rho_{1j} z_{3j} - \rho_{2j} z_{2j} - \eta_j \text{sign}(z_{3j} + \rho_{1j} z_{2j} + \rho_{2j} z_{1j})) = -\eta_j \text{sign}(z_{3j} + \rho_{1j} z_{2j} + \rho_{2j} z_{1j}) = -\eta_j \text{sign}(S_j) \quad (27)$$

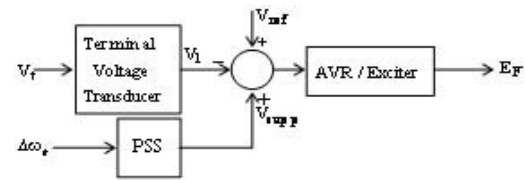
بنابراین:

۵- پایدارساز سیستم قدرت کلاسیک

به منظور نشان دادن کارایی بهتر کنترل کننده پیشنهادی، نتایج حاصل از استفاده از این کنترل کننده با کنترل کننده کلاسیک که شامل تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ و پایدارساز سیستم قدرت (AVR+PSS) است، مقایسه می شود. در روش کلاسیک، جهت میرا کردن نوسانات الکترومکانیکی ژنراتور از جبران ساز پس فاز - پیش فاز استفاده می شود تابع انتقالی که معمولاً برای این نوع PSS استفاده می شود به صورت زیر خواهد بود:

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \frac{(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_2)(1+sT_4)} \frac{sT_W}{(1+sT_W)} \quad (32)$$

بلوک دیاگرام این کنترل کننده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام کنترل کننده AVR+PSS

Fig. (2): The block diagram of an AVR+PSS controller

این کنترل کننده شامل یک سیستم تحریک تریستوری نوع STIA مربوط به استاندارد IEEE همراه با تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ (AVR) و پایدارساز سیستم قدرت (PSS) می باشد. بلوک دیاگرام پایدارساز سیستم قدرت در شکل (۳) نشان داده شده است که قسمتهای مختلف آن عبارتند از بلوک بهره که اثر مهمی بر میرایی نوسانهای روتور دارد و مقدار میرایی ایجاد شده از PSS را تعیین می کند، بلوک پاکساز که حذف کننده اثر حالت ماندگار می باشد و به صورت یک فیلتر بالاگذر عمل می کند و بلوک جبران ساز که این بلوک برای جبران سازی پس فاز بین ورودی تحریک کننده (خروجی PSS) و گشتاور الکتریکی ژنراتور، مشخصه پیش فاز مناسب را فراهم می کند. ثابت زمانی های  $T_1$ ،  $T_2$ ،  $T_3$  و  $T_4$  باید به گونه ای تنظیم شوند که یک میرایی قابل قبول در نوسانات فرکانس فراهم گردد. بنابراین نخستین گام در طراحی جبران سازی فاز، محاسبه ی پاسخ فرکانسی بین

ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی ژنراتور می باشد. پاسخ فرکانسی مورد نظر هر ماشین، به امپدانس مدار معادل تونن پایانه های آن حساس، ولی تقریباً از دینامیک سایر ماشینها مستقل است. بنابراین می توان فرض کرد کلیه ماشین های دیگر به صورت شین های بی نهایت عمل می کنند و بدین ترتیب دینامیک آنها از محاسبه ی پاسخ حذف می شود. در حالی که امپدانس صحیح تونن در پایانه های ماشین تحت مطالعه باقی نگه داشته می شود. بنابراین مشخصه فاز حاصل، شکل تقریباً ساده ای از اثر فرکانس های طبیعی ماشینهای خارجی دارد. تابع انتقال مبدل ولتاژ ترمینال و AVR/Exciter به ترتیب به صورت زیر هستند:

$$G_{TVT}(s) = \frac{1}{1+sT_R} \quad (33)$$

$$G_{AVR}(s) = K_A \quad (34)$$

بنابراین معادله ی کنترل کننده ی AVR+PSS را می توان به صورت زیر نوشت:

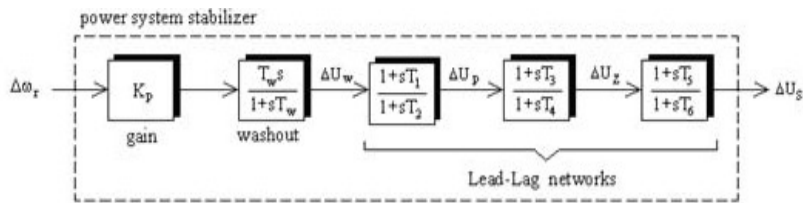
$$E_F = K_A (V_{ref} - V_1 + V_{supp}) \quad (35)$$

که در آن خروجی مبدل ولتاژ ترمینال،  $V_{supp}$  خروجی پایدارساز سیستم قدرت و  $V_{ref}$  مقدار ولتاژ مرجع سیستم می باشد.

۶- نتایج شبیه سازی

شبیه سازی های صورت گرفته در این مقاله بر روی سیستم قدرت چند ماشینه نشان داده شده در شکل (۱) انجام شده است. این سیستم از طریق دو خط انتقال، 400 MW انرژی را از ناحیه یک به ناحیه دو انتقال می دهد. پارامترهای نامی ژنراتورهای سیستم مورد مطالعه، در قسمت ضمیمه داده شده است.

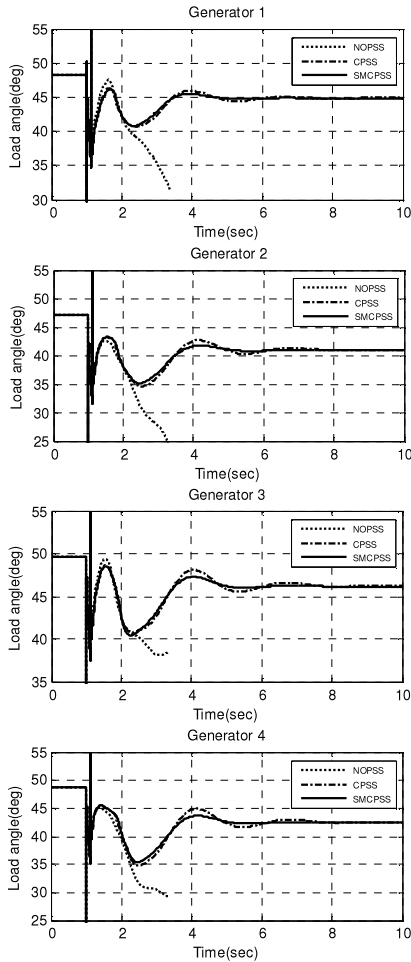
جهت ارزیابی الگوریتم ارائه شده برای پایدارساز لغزشی پیشنهادی (SMCPSS) و مقایسه آن با کنترل کننده کلاسیک (AVR+PSS) و بدون پایدارساز (NOPSS) سیستم را تحت شرایط بهره برداری مختلف مورد شبیه سازی قرار می دهیم. لازم به ذکر است در تمامی شبیه سازی های انجام شده از مدل غیرخطی سیستم استفاده شده است.



شکل (۳): نمودار بلوکی پایدارساز سیستم قدرت کلاسیک

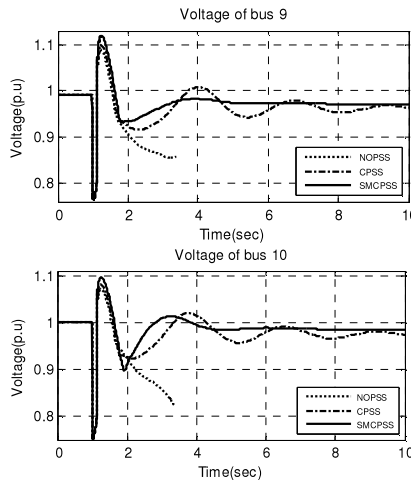
Fig. (3): The schematic block diagram of a classic power system stabilizer

۶-۱- ایجاد خطای سه فاز متقارن: در حالت اول پاسخ سیستم به ایجاد خطای سه فاز متقارن در زمان  $t=1$  ثانیه مطابق آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۴) نتایج حاصل از پایدارساز لغزشی، پایدارساز کلاسیک و بدون پایدارساز، جهت میرا کردن نوسانات سرعت روتور ژنراتورها نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که میزان فراجاهش سرعت روتور ژنراتورها با وجود پایدارساز لغزشی نسبت به پایدارساز کلاسیک کاهش یافته و نیز سرعت میرایی نوسانات سرعت روتور ژنراتورها به میزان قابل توجهی نسبت به پایدارساز کلاسیک افزایش یافته است. همچنین پاسخ دینامیکی متغیرهای دیگر سیستم از قبیل زاویه بار ژنراتورها و ولتاژ ترمینال‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود وجود پایدارساز لغزشی در سیستم باعث کاهش میزان فراجاهش و کاهش زمان نشست زاویه بار هر یک از ژنراتورها شده و همچنین باعث افزایش سرعت میرایی ولتاژ ترمینال‌های مورد بررسی، می‌شود. همچنین نتایج نشان داده شده در این شکل‌ها نشان می‌دهد که سیستم با تحریک کننده‌ی تریستوری (بدون PSS) ناپایدار گذراست.



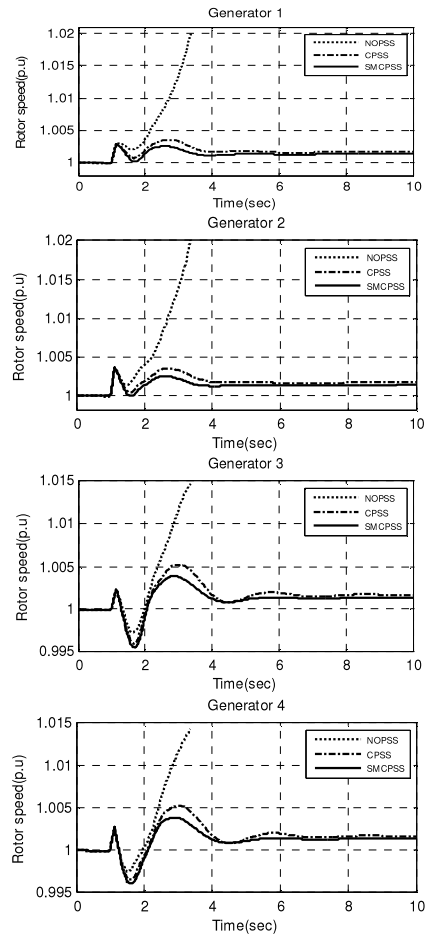
شکل (۵): مقایسه تغییرات زاویه بار ژنراتورها (حالت اول)

Fig. (5): Comparison of load angle variations of generators (case I)



شکل (۶): مقایسه تغییرات ولتاژ ترمینال‌های سیستم (حالت اول)

Fig. (6): Comparison of voltage variations of system terminals (case I)



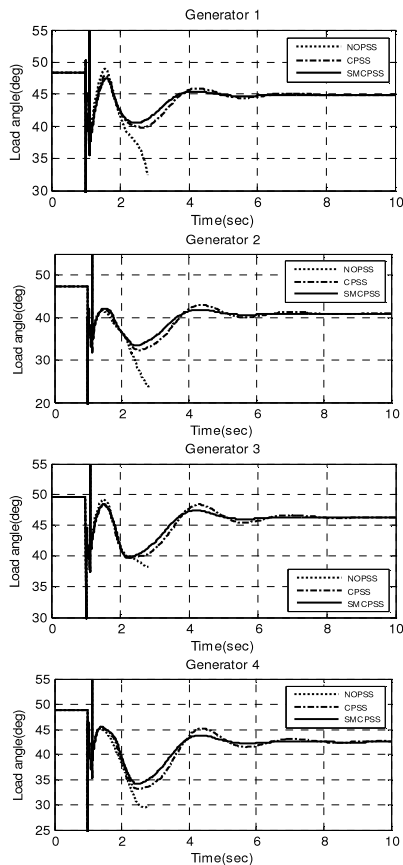
شکل (۴): مقایسه تغییرات سرعت ژنراتورها (حالت اول)

Fig. (4): Comparison of various generator speeds

است. شکل (۹) نیز نشان دهنده تغییرات ولتاژ ترمینال‌های ۹ و ۱۰ سیستم می‌باشد که بیانگر بهبودی پاسخ سیستم مجهز به پایدارساز لغزشی، نسبت به پایدارساز کلاسیک می‌باشد. نتایج نشان داده شده در این شکل‌ها نیز بیانگر این است که سیستم با تحریک کننده‌ی تریستوری (بدون PSS) ناپایدار گذراست.

#### ۷- نتیجه گیری

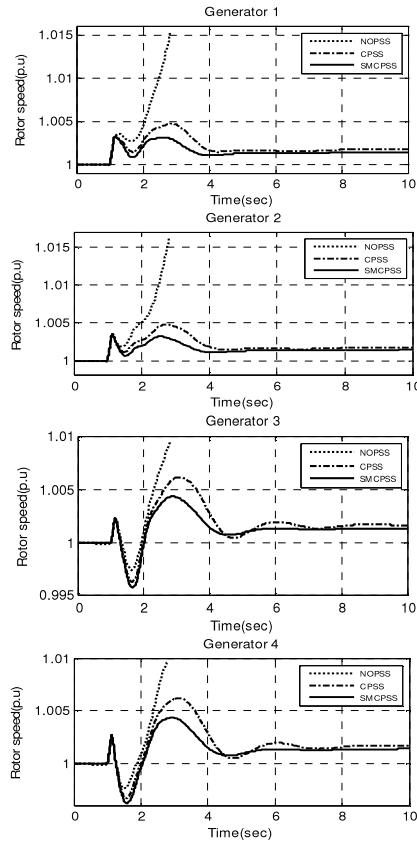
از آنجایی که سیستم‌های قدرت به شدت غیرخطی هستند استفاده از کنترل کننده‌ای که بتواند با تغییر شرایط کارکرد سیستم، پایداری سیستم را حفظ کند و سرعت میرایی نوسانات را افزایش دهد و دارای بازدهی و عملکرد مناسب در مواجهه با نامعنی‌های به وجود آمده در سیستم باشد، امری ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام شده استفاده از تئوری کنترل لغزشی در طراحی پایدارساز سیستم قدرت باعث افزایش سرعت میرایی نوسانات سرعت روتور، ولتاژ ترمینال و زاویه بار هر یک از ژنراتورها شده و نیز باعث کاهش در میزان فراجهدش انحراف سرعت روتور و زاویه بار هر یک از ژنراتورها، با ایجاد اغتشاش در سیستم و نیز ایجاد تغییر در پارامترهای سیستم، در مقایسه با پایدارساز سیستم قدرت کلاسیک، می‌گردد.



شکل (۸): مقایسه تغییرات زاویه بار ژنراتورها (حالت دوم)

Fig. (8): Comparison of load angle variations of generators (case II)

۶-۲- تغییر در ضریب بهره سیستم تحریک: در حالت دوم به منظور بررسی مقاوم بودن پایدار ساز لغزشی به ایجاد تغییر در یکی از پارامترهای سیستم، فرض می‌شود که مقدار ضریب بهره سیستم تحریک ژنراتور یک  $(G1)$ ،  $K_A$ ، از مقدار 200 به 100 تغییر پیدا کند. در این شرایط جدید میزان سرعت روتور و زاویه بار هر یک از ژنراتورها و ولتاژ ترمینال‌های ۹ و ۱۰ را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل (۷) نشان دهنده تغییرات سرعت روتور ژنراتورها در شرایط جدید کارکرد سیستم می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد پایدار ساز لغزشی نسبت به تغییر ایجاد شده در پارامتر سیستم کارایی و بازدهی خود را به خوبی حفظ می‌کند و در شرایط جدید نیز نوسانات سرعت روتور هر یک از ژنراتورها در مقایسه با پایدارساز کلاسیک کمتر می‌باشد و همچنین سرعت میرایی نوسانات سرعت ژنراتورها به میزان قابل توجهی نسبت به پایدارساز کلاسیک افزایش یافته است.



شکل (۷): مقایسه تغییرات سرعت ژنراتورها (حالت دوم)

Fig. (7): Comparison of speed variations of generator (case II)

شکل (۸) نیز نشان دهنده تغییرات زاویه بار هر یک از ژنراتورها در شرایط جدید کارکرد سیستم می‌باشند. همانگونه که ملاحظه می‌شود با وجود پایدارساز لغزشی انحراف زاویه بار هر یک از ژنراتورها از مقدار مرجع آنها قبل از ایجاد خطا، نسبت به پایدارساز کلاسیک کاهش یافته است و همچنین سرعت میرایی نوسانات زاویه بار هر کدام از ژنراتورها افزایش قابل توجهی نسبت به پایدار ساز کلاسیک داشته



پارامترهای ژنراتورها در مبنای واحد بر پایه‌ی مگا ولت آمپر و کیلو ولت نامی در جدول‌های (۱) و (۲) آمده است.

Table (1): Nominal parameters of two regional synchron generators

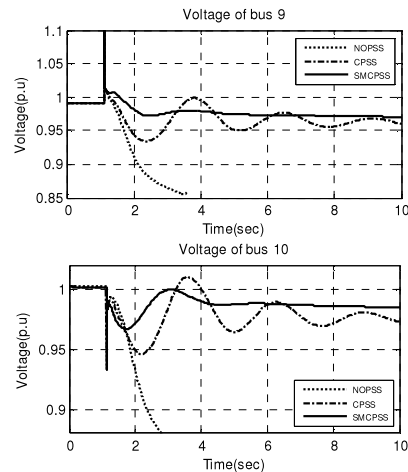
جدول (۱): پارامترهای نامی ژنراتورهای سنکرون سیستم دو ناحیه‌ای

Gen	$R_s$	$X_d$	$X'_d$	$X_q$	$X'_q$	$X_l$
	p.u	p.u	p.u	p.u	p.u	p.u
1	0.0025	1.8	0.3	1.7	0.55	0.2
2	0.0025	1.8	0.3	1.7	0.55	0.2
3	0.0025	1.8	0.3	1.7	0.55	0.2
4	0.0025	1.8	0.3	1.7	0.55	0.2

Table (2): Nominal parameters of two regional synchron generators

جدول (۲): پارامترهای نامی ژنراتورهای سنکرون سیستم دو ناحیه‌ای

Gen	$T'_{do}$	$T'_{qo}$	H	$K_D$	$K_A$	$T_R$
	sec	sec	sec	p.u	-	sec
1	8	0.4	6.5	0	200	0.02
2	8	0.4	6.5	0	200	0.02
3	8	0.4	6.175	0	200	0.02
4	8	0.4	6.175	0	200	0.02



شکل (۹): مقایسه تغییرات ولتاژ ترمینال‌های سیستم (حالت دوم)  
Fig. (9): Comparison of voltage variations of system terminals (case II)

### ۸- ضمیمه

سیستم نشان داده شده در شکل (۱) شامل دو ناحیه‌ی مشابه با یک ارتباط ضعیف است که هر ناحیه از دو واحد کنار هم هر کدام دارای مقدار نامی 900 MVA، 20 KV و 60 Hz تشکیل شده است.

### مراجع

- [1] M. Bouhamida, M.A. Denai, "Robust stabilizer of electric power generator using  $H_\infty$  with placement constraints", *Jou. of Elec. Eng.*, Vol.56, No.7-8, pp.176-182, 2005.
- [2] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [3] G. Shahgholian, M. Arezoomand, H. Mahmoodian, "Analysis and simulation of the single machine infinite bus power system stabilizer and parameters variation effects", *IEEE/ICIAS*, pp.167-171, Nov. 2007.
- [4] Y.J. Lin, "Systematic approach for the design of a fuzzy power system stabilizer", *IEEE/POWERCON*, pp.747-752, Nov. 2004.
- [5] A. Shoulaie, M. Bayati-Poudeh, G. Shahgholian, "Damping torsional torques in turbine-generator shaft by novel PSS based on genetic algorithm and fuzzy logic", *Jou. of Trans. on Elec. Tech. (JTET)*, Vol.1, No.1, pp.3-10, Win. 2009.
- [6] V. Bandal, B. Bandyopadhyay, "Robust decentralised output feedback sliding mode control technique-based power system stabiliser (PSS) for multimachine power system", *IET Con. The. and App.*, Vol.1, No.5, pp.1512-1522, Sep. 2007.
- [7] A.G.E. Abera, B. Bandyopadhyay, "Digital redesign of sliding mode control with application to power system stabilizer", *IEEE/IECON*, pp.164-169, Orlando, Nov. 2008.
- [8] G. Gurralla, I. Sen, "Power system stabilizers design for interconnected power systems", *IEEE Trans. on Pow. Sys.*, Vol.25, No.2, pp.1042-1051, May 2010.
- [9] V. Bandal, B. Bandyopadhyay, A.M. Kulkarni, "Decentralized sliding mode control technique based power system stabilizer for multimachine power system", *IEEE/CCA*, pp.55-60, Toronto Canada, Aug. 2005.
- [10] J. Faiz, G. Shahgholian, M. Arezoomand, "Analysis and simulation of the AVR system and parameters variation effects", *IEEE/POWRENG*, pp.450-453, April 2007.
- [11] G. Cheng, L.Q. Zhan, "Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers using improved particle swarm optimization", *IEEE/APPEEC*, pp.1-4, March 2009.
- [12] R. Tiako, K.A. Folly, "Impact of weighting coefficients on the convergence rate of the steepest descent algorithm used for the design of an optimal power system stabilizer (OPSS)", *IEEE/AUPEC*, pp.1-6, Sydney, NSW, Dec. 2008.
- [13] S. Zhang, F.L. Luo, "An improved simple adaptive control applied to power system stabilizer", *IEEE Trans. on Pow. Elec.*, Vol.20, No.2, pp.369-375, Feb. 2009.
- [14] C.J. Chen, T.C. Chen, H.J. Ho, C.C. Ou, "PSS design using adaptive recurrent neural network controller", *IEEE/ICNC*, Vol.2, pp.277-281, Tianjin, Dec. 2009.

- [15] S. Panda, N.P. Padhy, "Application of genetic algorithm for PSS and FACTS based controller design", *Inte. Jou. of Com. Met.*, Vol.5, No.4, pp.607-620, 2008.
- [16] R. Pradhan, S. Panda, "Application of genetic algorithm based PSS for two-area AGC system in deregulated scenario", *IEEE/NABIC*, pp.1207-1212, Coimbatore, Dec. 2009.
- [17] K.D. Young, V.I. Utkin, U. Ozguner, "A control engineer's guide to sliding mode control", *IEEE Trans. on Con. Sys. Tech.*, Vol.7, No.3, pp.328-342, Aug. 2002.
- [18] S.I. Safie, M. MdShah, A.R. Hasimah, A. Wahab, H.M. Yusri, "Sliding mode control power system stabilizer for single machine connected to infinite bus", *IEEE/PECON*, pp.122-126, Dec. 2008.
- [19] M.L. Kothari, J. Nada, K. Bhattacharya, "Design of variable structure power system stabilizer with desired eigen values in sliding mode", *IEE Proc.-C*, Vol.140, No.4, July 1993.
- [20] Y. Lee, Y.B. Shtessel, "Comparison of a feedback linearization controller and sliding mode controllers for a permanent magnet stepper motor", *IEEE/SSST*, pp.258-262, Baton Rouge, Mar./April 1996.