

# طراحی و شبیه‌سازی همزمان کنترل‌کننده‌های پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی و خازن سری کنترل شده با تریستور در سیستم قدرت چندماشینه

آرمان فتح‌اللهی

دانشجوی دکتری - دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۷

**خلاصه:** در این مقاله به منظور میراسازی نوسانات الکترومکانیکی و غلبه بر مشکلات حاصل از تقریب خطی سیستم غیرخطی که پایداری سیستم را در یک همسایگی از شرایط تعادل محدود می‌کند، از یک پایدارساز سیستم قدرت غیرخطی مبنی بر تئوری کنترل ترکیبی (هم‌افزایی) و کنترل-کننده خازن سری کنترل شده با تریستور<sup>۱</sup> (TCSC) به طور همزمان استفاده شده است. پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی، کاملاً بر اساس یک مدل غیرخطی ساده شده سیستم ارائه می‌گردد. برای بررسی تاثیرگذاری همزمان این کنترل‌کننده‌ها شبیه‌سازی در سیستم‌های قدرت تک ماشین و چند ماشین و تحت اغتشاشات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد همزمان TCSC و پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی<sup>۲</sup> (SPSS) ظرفیت بسیار بالایی را برای میرایی نوسانات و بهبود پایداری در مقایسه با پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی و سیستم قدرت مجهز به PSS<sup>۳</sup> مرسوم تنظیم شده با الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> (GAPSS) در هر سیستم قدرت دینامیکی غیرخطی از خود نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** پایدارساز سیستم قدرت بهینه شده با الگوریتم ژنتیک (GAPSS)، پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی (SPSS)، تریستور کنترل شده با خازن سری (TCSC)، پایداری، کنترل ترکیبی

## Simultaneous Design and Simulation of Synergetic Power System Stabilizers and a Thyristor-Controller Series Capacitor in Multi-Machine Power Systems

Arman Fathollahi

PhD Student in Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran  
a.fathollahi@yahoo.com

In this study, we used a non-linear power system stabilizer based on synergetic control theory and a thyristor-controller series capacitor (TCSC) simultaneously in order to damp electromechanical oscillations and overcome the problems of linear approximation in a non-linear system which limits system stability in a neighborhood of equilibrium. The proposed synergetic combination of power system stabilizers is completely based on a simplified non-linear model of the system. In order to examine the simultaneous effect of these controllers, we investigated the simulation in single- and multi-machine power systems under various contingencies. Simulation results indicated that the simultaneous performance of TCSC and the synergetic power system stabilizer (SPSS) show a high capacity for damping oscillations and improving stability as compared with SPSS and PSS tuned with genetic algorithm (GAPSS) in any non-linear dynamic power system.

**Index Terms:** power system stabilizer tuned with genetic algorithm (GAPSS), synergetic power system stabilizer (SPSS), thyristor-controller series capacitor (TCSC), stability, synergetic control.

## ۱- مقدمه

با افزایش جمعیت و پیشرفت جوامع در زمینه تکنولوژی‌های مختلف، انرژی الکتریکی مورد استقبال قرار گرفته و مصرف آن رو به افزایش است [۱،۲]. مشکلات پایداری سیگنال کوچک، از میانه‌های قرن گذشته در سیستم‌های قدرت گزارش شده که معمولاً به دلیل نوسانات الکترومکانیکی با میرایی ضعیف و مدت زمان طولانی بوجود می‌آیند. در سیستم قدرت اغتشاشات متفاوتی در اثر نوسانات الکترومکانیکی با دامنه‌ی کم و فرکانس پایین در روتور ژنراتور سنکرون رخ می‌دهد. عدم میرا کردن این نوسانات می‌تواند باعث از دست رفتن سنکرونیسم سیستم یا جداسدن سیستم از بخش‌های دیگر شود [۲۴]. پایدارسازهای سیستم قدرت (PSSs) به طور معمول برای میراسازی گشتاور ژنراتور سنکرون استفاده می‌شوند تا به وسیله تولید سیگنال‌های کنترل تکمیلی برای سیستم تحریک ژنراتور، این نوسانات را کاهش دهند [۴]. ادوات FACTS<sup>۵</sup> مانند TCSC توانایی افزایش انعطاف-پذیری عملکرد، کنترل‌پذیری و پایداری سیستم‌های قدرت را دارند [۵-۷]. TCSC معمولاً در خطوط انتقال بلند سیستم‌های قدرت نصب می‌گردد [۸]. از مزایای کاربرد TCSC می‌توان به سازمان‌دهی جریان قدرت، کاهش اجزای نامتقارن، کاهش خاموشی در شبکه، فراهم کردن تنظیم ولتاژ، محدود کردن خطاهای اتصال کوتاه جریان، میرا کردن نوسانات توان و بهبود پایداری گذرا اشاره کرد [۹]. با توجه به کاربرد PSS برای میراسازی نوسانات توان و بهبود پایداری گذرا ممکن است PSS نتواند میرایی کافی برای نوسانات سیستم را فراهم کند، لذا در این حالت برای عملکرد بهینه با حداقل نوسانات هماهنگی بین PSS و TCSC انجام می‌شود [۱۰].

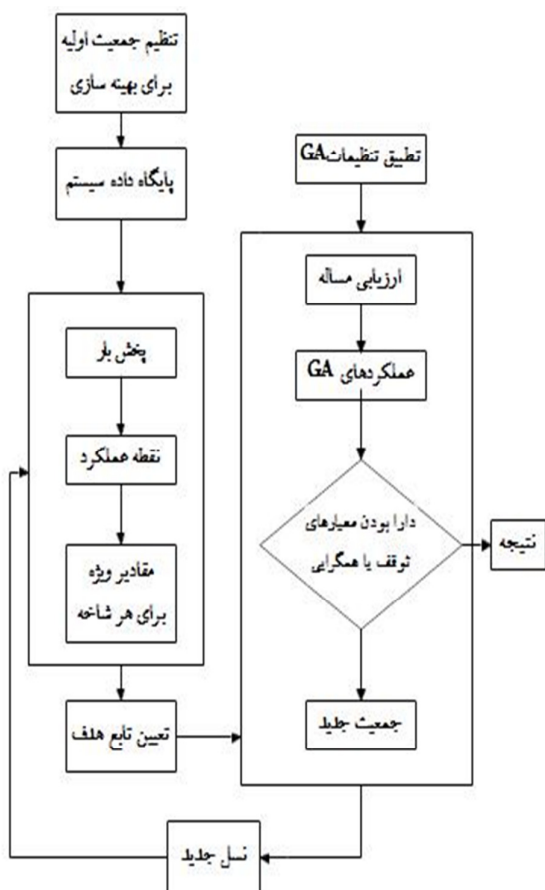
سیستم قدرت یک سیستم به شدت غیرخطی است و پایدارسازهای سیستم قدرت که براساس خطی‌سازی سیستم قدرت غیرخطی طراحی شده‌اند، نمی‌توانند پایداری سیستم را تضمین کنند. این خطی‌سازی با این فرض است که اغتشاشات آنقدر کوچک هستند که خطای تقریب خطی با در نظر گرفتن مدل غیرخطی در یک گستره‌ی قابل قبول باقی بمانند. حال آنکه اگر سیستم تحت یک اغتشاش بزرگ قرار بگیرد میزان عملکرد این پایدارسازها مورد بحث است. از این‌رو در این مقاله هماهنگی TCSC و SPSS که کاملاً با ماهیت غیرخطی سیستم قدرت مطابقت دارد و نسبت به تحقیقات گذشته در این زمینه، ظرفیت بالاتری برای کاهش نوسانات الکترومکانیکی سیستم ایجاد می‌کند مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور بهبود عملکرد CPSSها روش‌های مختلفی برای طراحی آنها ارائه شده که در ادامه مروری مختصر بر جدیدترین آنها خواهیم داشت [۱۱،۱۲]. در مقاله [۱۳] با استفاده از یک روش جدید بر مبنای منطق فازی با چند ورودی در سیستم قدرت تک ماشینه و در مقاله [۱۴] و [۱۵] به ترتیب با استفاده از روش‌های کنترل مد لغزشی فازی خود-تنظیم و مد لغزشی فازی تطبیقی در سیستم قدرت دوناحیه‌ای و چهارماشینه به بهینه‌سازی پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت پرداخته شده است. الگوریتم جستجوی هوشمند پسگرد برای

بهینه‌سازی پارامترهای PSS در سیستم‌های قدرت چندماشینه با مقیاس بزرگ را در [۱۶] می‌توان دید. نویسندگان در مقاله [۱۷] بهینه‌سازی پارامترهای CPSS را به وسیله الگوریتم CS<sup>v</sup> در سیستم قدرت نه باسه و سه ماشینه انجام داده‌اند. کنارا و همکارانش در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی یک PSS بر اساس الگوریتم تخصیص ساختار ویژه در سیستم قدرت ۶۸ باسه پرداخته‌اند [۱۸]. علاوه بر روشهای ذکر شده که به تنظیم پارامترهای PSS بر پایه مدل خطی شده سیستم قدرت با استفاده از برخی روش‌های هوش مصنوعی می‌پردازد، می‌توان به روشهای جدید کنترل غیرخطی مانند فیدبک مستقیم خطی‌سازی [۱۹] و بهینه‌سازی چندمنظوره‌ی قوی برای تنظیم PSS [۲۰] و روش‌های دیگر اشاره کرد. همچنین طراحی توام دو کنترل‌کننده‌ی میراساز سیستم قدرت در مقاله‌های مختلفی مانند هماهنگی TCSC و CPSS با استفاده از روش بهینه‌سازی حساسیت توان فعال در سیستم ۶۸ باسه به منظور تنظیم پارامترهای CPSS و TCSC [۲۱]، هماهنگی SVC<sup>۸</sup> و CPSS با استفاده از الگوریتم پرواز میوه اصلاح شده در سیستم قدرت یکپارچه سه ناحیه‌ای همراه با مزرعه بادی [۲۲] و هماهنگی PV-STATCOM<sup>۹</sup> و CPSS که در یک سیستم دوناحیه‌ای و چهار ماشینه که یک دستگاه PV خورشیدی ۱۵۰ مگاوات به یکی از خطوط انتقال میانی آن متصل است در [۲۳] ارائه شده است.

در این مقاله هماهنگی TCSC و SPSS بر مبنای سیستم قدرت غیرخطی طراحی شده است. برای اثبات تاثیرگذاری هماهنگی TCSC و SPSS این سیستم، با سیستم مجهز به تنها یک SPSS و سیستم مجهز به GAPSS که به ترتیب در مقاله‌های [۲۴] و [۲۵] در یک سیستم قدرت SMIB ارائه شده، مقایسه شده است. همچنین مقایسه گفته شده در دو سیستم قدرت چندماشینه (دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه و سه ماشینه و نه باسه) نیز انجام گرفته است. بنابراین این مقاله علاوه بر پیشنهاد یک روش جدید و موثر، مبتنی بر هماهنگی SPSS و TCSC به صورت ضمنی به مقایسه بین دو مقاله [۲۴] و [۲۵] در سیستم‌های قدرت تک‌ماشینه و چند ماشینه می‌پردازد که این مساله نیز قابل توجه است. ادامه این مقاله به صورت زیر ارائه می‌گردد: در بخش دوم روش عمومی طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر تئوری کنترل ترکیبی بیان شده و روش عمومی به دست آوردن پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت سنتی و TCSC بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در بخش سوم مدل سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت<sup>۱۱</sup> (SMIB) به همراه TCSC را بررسی کرده و مدل دینامیکی سیستم را ارائه می‌دهیم. در بخش چهارم طراحی پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی برای سیستم مجهز به TCSC ارائه شده است. بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی در سیستم قدرت تک-ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و دو سیستم قدرت چندماشینه (سیستم قدرت سه ماشینه و نه باسه و سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهارماشینه) برای مقایسه و ارزیابی روش پیشنهادی در بخش پنجم آورده شده است. در انتها نتیجه‌گیری مقاله در بخش ششم ارائه شده است.

- یک جفت شاخه که دارای مقدار تابع هدف بالاتری هستند به عنوان والدین شاخه‌های دیگر انتخاب می‌شوند و تولید ادامه می‌یابد [۲۹]. در این مقاله از یک الگوریتم ژنتیک جدید مبتنی بر فضاهای جستجوی دینامیکی استفاده شده است، از آنجایی که عملکرد بهینه‌سازی در الگوریتم GA وابستگی زیادی به تعیین فضاهای جستجوی پارامترهای بهینه‌سازی شده دارد، این الگوریتم در شبیه‌سازی‌هایی که در فضای غیرخطی هستند، می‌تواند بسیار قوی عمل کند. این روش که الگوریتم آن در فلوجارت شکل (۱) نشان داده شده است، به تفضیل در مرجع [۲۵] ارائه شده است. پارامترهای GAPSS و کنترل‌کننده TCSC با استفاده از الگوریتم ژنتیک جدید مبتنی بر فضاهای جستجوی دینامیکی گفته شده، بهینه‌سازی شده است.



شکل (۱): فلوجارت الگوریتم ژنتیک

Fig. (1): Genetic algorithm flowchart

### ۳- مدل سیستم قدرت

در این مقاله از یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت مجهز به TCSC مطابق شکل (۲) استفاده شده است. این سیستم از یک ژنراتور سنکرون که توان آن به وسیله یک توربین همراه با یک گاورنر تأمین می‌شود و به وسیله یک سیستم تحریک خارجی تحریک می‌گردد، تشکیل شده است. همچنین بلوک دیاگرام TCSC در شکل (۳) نشان داده شده است.

## ۲- طراحی کنترل‌کننده‌ها

### ۲-۱- روش کنترل ترکیبی

روش کنترل ترکیبی (هم افزایی) روشی است که در آن سیگنال‌های کنترلی به نحوی انتخاب می‌شوند که تاثیر توأمان دو یا چند سیگنال نتیجه مؤثرتری نسبت به مجموع تاثیرات تک تک سیگنالها به دست دهد. در طراحی کنترل‌کننده ترکیبی در ابتدا یک سطح کنترلی که در این مقاله مقادیر نامیده می‌شود، تعریف می‌گردد. زمانی که دینامیک سیستم روی این مقادیر حرکت می‌کند پایداری سیستم تضمین می‌شود. در مرحله بعد سیستم به گونه‌ای طراحی می‌گردد که مجبور به حرکت روی این مقادیر شود که این امر پایداری سراسری را نتیجه می‌دهد. یک سیستم غیرخطی در فرم فضای حالت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

که در آن  $x$  و  $u$  به ترتیب بردار متغیرهای حالت و بردار ورودی می‌باشند. متغیر اصلی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\psi = \psi(x) \quad (2)$$

که در آن  $\psi(x)$  تابعی از متغیرهای سیستم است و هدف کنترل برای کنترل‌کننده با محدود کردن عملکرد سیستم در مقادیر  $\psi(x)=0$  ارائه می‌شود. دینامیک تکامل متغیر  $\psi(x)$  عبارت است از:

$$k\psi + \dot{\psi} = 0 \quad (3)$$

که در آن  $k$  یک ضریب ثابت و پارامتر کنترلی است که سرعت همگرا بودن سیستم کنترلی را در مقادیر ارضاء کننده‌ی معادله (۲) نشان می‌دهد. با استفاده از قانون مشتق‌گیری زنجیره‌ای رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$k \frac{d}{dx} \psi \dot{x} + \dot{\psi} = k \frac{d\psi}{dx} f(x, u) + \dot{\psi} = 0 \quad (4)$$

با تعریف مناسب متغیر  $\psi(x)$  و انتخاب صحیح ثابت  $k$ ، خروجی کنترل کننده می‌تواند بر روی معادله (۴) حرکت کند [۲۶].

### ۲-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی بر پایه‌ی انتخاب طبیعی و ژنتیک‌های طبیعی است. در الگوریتم ژنتیک شاخه‌های متفاوتی داریم که هر کدام راه‌حلی برای مسئله مورد نظر است. بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک با انتخاب مقادیر اولیه تصادفی برای هر شاخه شروع می‌شود [۲۷]. در هر تکرار الگوریتم ژنتیک یک شاخه جدید تولید می‌کند که می‌تواند بهتر یا بدتر از راه‌حل‌های قبلی باشد. اگر شاخه به دست آمده بهتر بود نگاه داشته می‌شود و جایگزین شاخه‌های قبلی می‌گردد و اگر بدتر بود حذف می‌شود. این سیکل تا جایی که بهترین پاسخ‌ها تعیین شود، ادامه خواهد یافت. گمان می‌رود شاخه‌هایی که در آخرین تکرار هستند بهترین راه‌حل برای مسئله باشند. به طور کلی الگوریتم ژنتیک یک پروسه تولید شاخه‌های بهینه به صورت زیر دارد [۲۸]:

- هر شاخه با استفاده از تابع هدف (شایستگی) ارزیابی می‌گردد.
- جمعیت به حالت تولید رفته و شاخه‌های جدیدی تولید می‌شود.

ترکیبی برای از بین بردن نوسانات توان، علاوه بر انحراف سرعت چرخش روتور از سرعت سنکرون، توان الکتریکی اکتیو خروجی ( $P_e$ ) هم به عنوان ورودی PSS استفاده می‌گردد و متغیر اصلی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\Psi_{li} = \alpha_{li}(\omega_i - \omega_{ref}) - (P_{ei} - P_{ref}) \quad (16)$$

که در آن  $\alpha_{li}$  یک ضریب مثبت و  $\omega_{ref}$  و  $P_{ref}$  به ترتیب مقادیر مرجع سرعت زاویه‌ای چرخشی و توان الکتریکی اکتیو خروجی ژنراتور می‌باشند. در طراحی PSS به روش ترکیبی، هدف عملکرد سیستم در مقادیر  $\Psi_{li}=0$  است. با جایگذاری معادله (۱۶) در معادله (۳) داریم:

$$k_{li}\dot{\Psi}_{li} + \Psi_{li} = 0, \quad k_{li} > 0 \quad (17)$$

با ساده‌سازی داریم:

$$\alpha_{li}\dot{\omega}_i - \dot{P}_{ei} = -\frac{1}{k_{li}}[\alpha_{li}(\omega_i - \omega_{ref}) - (P_{ei} - P_{ref})] \quad (18)$$

با استفاده از قانون مشتق‌گیری زنجیره‌ای و معادله (۹) مشتق توان الکتریکی در ماشین نام عبارت است از:

$$\dot{P}_{ei} = \frac{E_{bi} \dot{E}'_{qi}}{X'_{dei}} \sin \delta_i + \frac{E_{bi} E'_{qi} \dot{\delta}_i}{X'_{dei}} \cos \delta_i - \frac{E_{bi}^2 (x_{qi} - x'_{di}) \dot{\delta}_i}{X'_{dei} X'_{qei}} \cos 2\delta_i \quad (19)$$

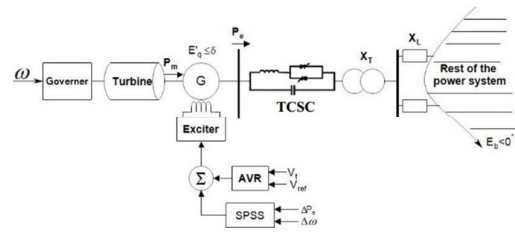
با جایگذاری معادله (۱۹) در معادله (۱۸) به دست می‌آید:

$$\alpha_{li} \dot{\omega}_i - \frac{E_{bi} \dot{E}'_{qi}}{X'_{dei}} \sin \delta_i - \frac{E_{bi} E'_{qi} \dot{\delta}_i}{X'_{dei}} \cos \delta_i + \frac{E_{bi}^2 (x_{qi} - x'_{di}) \dot{\delta}_i}{X'_{dei} X'_{qei}} \cos 2\delta_i \quad (20)$$

با جایگذاری معادلات (۷) و (۱۰) در معادله (۲۰) می‌توان خروجی PSS و ورودی سیستم تحریک را به صورت زیر به دست آورد:

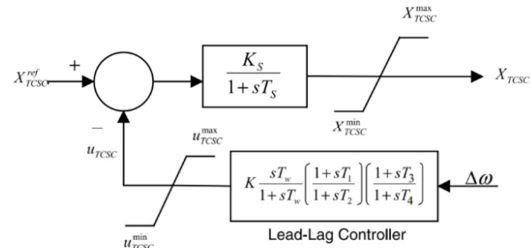
$$u_{pssi} = \frac{\alpha_{li} X'_{dei} T'_{doi}}{2H_i k_{ei} E_{bi} \sin \delta_i} (P_{mi} - P_{ei} - D_i (\omega_i - 1)) + \frac{X'_{dei} T'_{doi}}{k_{ei} E_{bi} k_{li} \sin \delta_i} (\alpha_{li} (\omega_i - \omega_{ref}) - (P_{ei} - P_{ref})) - \frac{T'_{doi} E'_{qi} \cos \delta_i}{k_{ei} \sin \delta_i} \omega_b (\omega_i - 1) + \frac{T'_{doi} E_{bi} (x_{qi} - x'_{di}) \cos \delta_i}{k_{ei} X'_{qei} \sin \delta_i} \omega_b (\omega_i - 1) + \frac{E_{qi}}{k_{ei}} - E_{fdi} \quad (21)$$

$u_{pssi}$  مسیر متغیرهای حالت را مجبور به صدق در معادله (۱۷) می‌نماید که طبق آن مسیر با یک ضریب ثابت  $\alpha_{li}$  به مقادیر  $\Psi_{li}=0$  میل می‌کند و پس از این زمان  $\Psi_{li}=0$  می‌ماند، از این زمان به بعد مسیر حالت با معادله (۱۶) نشان داده می‌شود. این معادله یک وابستگی خطی بین دو



شکل (۲): سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت به همراه یک

TCSC  
Fig. (2): SMIB power system with a TCSC



شکل (۳): بلوک دیاگرام TCSC به همراه کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز

Fig. (3): Block diagram of a TCSC

معادلات غیرخطی سیستم قدرت به‌همراه TCSC برای آمین ژنراتور در یک سیستم قدرت چند ماشینه عبارتند از:

$$\dot{\delta}_i = \omega_b (\omega_i - 1) \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H} (P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i) \quad (6)$$

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{doi}} (-E_{qi} + k_{ei} (E_{fdi} + u_{pssi})) \quad (7)$$

$$\dot{E}_{fdi} = \frac{k_{Ai}}{1+sT_{Ai}} (E_{fdi} - V_{ti}) \quad (8)$$

$$P_{ei} = \frac{E'_{qi} E_{bi}}{X'_{dei}} \sin \delta_i - \frac{E_{bi}^2 (x_{qi} - x'_{di})}{2X'_{dei} X'_{qei}} \sin 2\delta_i \quad (9)$$

$$E_{qi} = \frac{X_{dei} E'_{qi}}{X'_{dei}} - \frac{(x_{di} - x'_{di})}{X'_{dei}} E_{bi} \cos \delta_i \quad (10)$$

$$\dot{X}_{TCSCi} = \frac{1}{T_{Si}} (K_{Si} (X_{TCSCi}^{ref} - u_{TCSCi}) - X_{TCSCi}) \quad (11)$$

$$X_{effi} = X_{Ti} + X_{Li} - X_{TCSCi} \quad (12)$$

$$X'_{dei} = x'_{di} + X_{effi} \quad (13)$$

$$X'_{qei} = x_{qi} + X_{effi} \quad (14)$$

$$X_{dei} = x_{di} + X_{effi} \quad (15)$$

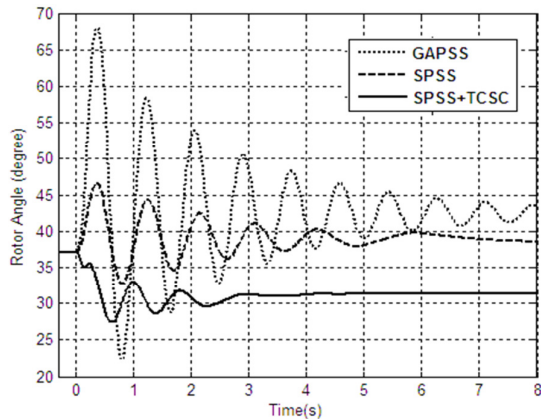
تعریف پارامترهای مورد استفاده در معادلات (۵) تا (۱۵) در مراجع [۱۳، ۱۷، ۱۸] به تفصیل بیان شده است.

#### ۴- طراحی پایدارساز سیستم قدرت مبتنی بر تئوری کنترل

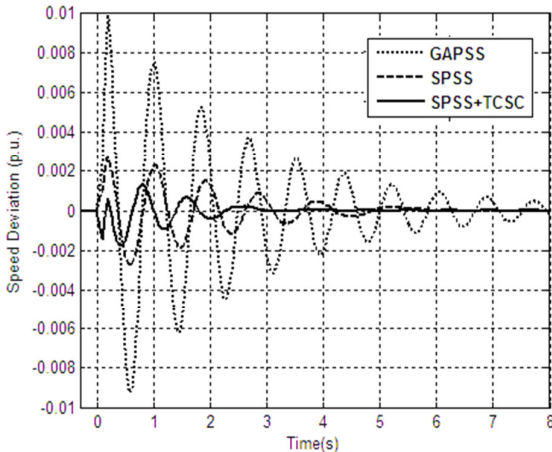
##### ترکیبی در سیستم قدرت مجهز به TCSC

در این بخش طراحی پایدارساز سیستم قدرت ترکیبی برای سیستم قدرت مجهز به TCSC بیان می‌شود. در پایدارساز سیستم قدرت

انتقال موازی (که مجموعشان  $X_L$  است) حذف می‌شود. در زمان  $t=0.1s$  زمانی که خطا رفع شد خط قطع شده، دوباره وصل می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در طی این خطا در شکل (۵) آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود ترکیب TCSC و SPSS در کاهش نوسانات الکترومکانیکی، بسیار موفق‌تر از SPSS و GAPSS عمل می‌کند. همچنین عملکرد مناسب هماهنگی TCSC و SPSS را در اغتشاشات بزرگ نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در کاهش ماکزیمم فراجش و کاهش در زمان نشست بسیار مؤثر عمل می‌کند. برای مثال در شبیه‌سازی زاویه روتور ژنراتور زمان نشست در مقایسه با SPSS از  $6/85$  ثانیه به  $3/56$  ثانیه تقلیل یافته است. جدول (۲) مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی در مورد درصد کاهش در زمان نشست و درصد کاهش در ماکزیمم فراجش روش پیشنهادی را نسبت به SPSS و GAPSS. در سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت طی خطای اتصال کوتاه سه‌فاز را در تغییرات سرعت روتور ژنراتور نشان می‌دهد.



الف) زاویه روتور ژنراتور در خطای اتصال کوتاه سه فاز



ب) تغییرات سرعت در خطای اتصال کوتاه سه فاز

شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین

بینهایت طی خطای اتصال کوتاه سه فاز

Fig. (5): Simulation results of single machine power system under three phase short circuit fault

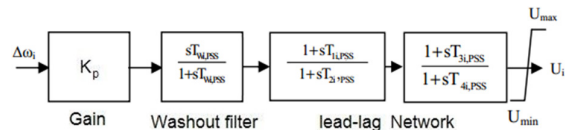
متغیر  $\omega$  و  $P_e$  برقرار می‌کند که به واسطه آن سیستم یک درجه کاهش مرتبه پیدا می‌کند که این امر خود در جهت پایداری سیستم گام برمی‌دارد.

### ۵- نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این قسمت به منظور اثبات تاثیرگذاری روش پیشنهادی شبیه‌سازی عددی روی سه سیستم قدرت مختلف به شرح زیر انجام گرفته شده است.

#### ۵-۱- سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت (SMIB)

در این بخش برای ارزیابی سیستم طی اغتشاشات گوناگون، یک خطای اتصال کوتاه سه فاز به سیستم اعمال و نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است. در طی خطای فوق سیستم قدرت تجهیز شده با SPSS و TCSC، با سیستم قدرت همراه با GAPSS (که یک پایدارساز سیستم قدرت پیش‌فاز-پس‌فاز مطابق شکل (۴) است که به وسیله الگوریتم ژنتیک مبتنی بر فضاهای جستجوی دینامیکی پارامترهای آن بهینه‌سازی شده است) و همچنین با سیستم مجهز به SPSS مقایسه شده است. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی برای GAPSS و SPSS و TCSC برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت در جدول (۱) آمده است [۲۴،۲۵،۲۹].



شکل (۴): پایدارساز سیستم قدرت پیش‌فاز-پس‌فاز

Fig. (4): Lead-lag power system stabilizer

Table (1): The parameters utilized in the simulation of GAPSS, SPSS, and TCSC for the SMIB power system

جدول (۱): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم قدرت تک

ماشینه متصل به شین بی‌نهایت

Components	Parameters
GAPSS	$K_{PSS}=49.9998$ , $T_w=10s$ , $T_1=0.0999s$ , $T_2=0.0100s$ , $T_3=0.1000s$ , $T_4=0.0107s$ $U_{PSS,Max}=0.15$ , $U_{PSS,Min}=-0.15$
SPSS	$K_1=0.1$ , $\alpha_1=0.1$ $U_{SPSS,Max}=1.5$ , $U_{SPSS,Min}=-1.5$
TCSC	$K_{TCSC}=90.4111$ , $T_w,TCSC=10s$ , $T_{1,TCSC}=0.3080s$ , $T_{2,TCSC}=0.1000s$ , $T_{3,TCSC}=0.3080s$ , $T_{4,TCSC}=0.1000s$
by GA	$U_{TCSC,Max}=0.15$ , $U_{TCSC,Min}=-0.15$ $K_S=1$ , $T_S=0.05s$ , $X_{TCSC,ref}=1$ $X_{TCSC,max}=0.15$ , $X_{TCSC,min}=-0.15$

خطای اتصال کوتاه سه‌فاز: در این قسمت یک خطای اتصال کوتاه سه فاز در زمان  $t=0$  به سیستم اعمال می‌گردد و پس از آن یکی از خطوط

ثانیه این خط قطع می‌شود، را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود هماهنگی TCSC و SPSS در میراسازی نوسانات نسبت به سیستم مجهز به SPSS و GAPSS بسیار تاثیرگذارتر و قوی‌تر است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در کاهش ماکزیمم فراجش و کاهش در زمان نشست بسیار موثر عمل می‌کند. در شبیه‌سازی اختلاف زاویه بار بین ژنراتور ۲ و ۳ زمان نشست در مقایسه با SPSS از  $5/2$  ثانیه به  $3/12$  ثانیه تقلیل یافته است. برای مثال جدول (۴) مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی در مورد درصد کاهش در زمان نشست و درصد کاهش در ماکزیمم فراجش روش پیشنهادی را نسبت به SPSS و GAPSS، در سیستم قدرت سه ماشینه و نه باسه را در اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۱ و ۲، نشان می‌دهد.

Table (3): The parameters utilized in the simulation of GAPSS, SPSS, and TCSC for the nine-bus three-machine power system

Components	Parameters
GAPSS	$K_{PSS}=11.8531, T_w=10s,$ $T_1=0.9911s, T_2=0.0501s,$ $T_3=0.2700s, T_4=0.0511s$ $U_{PSS,Max}=0.15, U_{PSS,Min}=-0.15$
SPSS	$K_1=0.1, \alpha_1=0.1$ $U_{SPSS,Max}=1.5, U_{SPSS,Min}=-1.5$
TCSC	$K_{TCSC}=4.2716, T_w,TCSC=10s,$ $T_{1,TCSC}=0.4601s, T_{2,TCSC}=0.0528s,$ $T_{3,TCSC}=0.1503s, T_{4,TCSC}=0.0522s$
by GA	$U_{TCSC,Max}=0.15, U_{TCSC,Min}=-0.15$ $K_S=1, T_S=0.05s, X_{TCSC,ref}=1$ $X_{TCSC,max}=0.15, X_{TCSC,min}=-0.15$

Table (4): Numerical comparison of simulation results in three machine nine bus power system

جدول (۴): مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت سه ماشینه و نه باسه طی خطای اتصال کوتاه سه فاز

ردیف	روش	زمان نشست	فروچش
۱	روش SPSS	۴/۸	۱/۱
۲	روش GAPSS	۵/۱	۱/۳
۳	روش پیشنهادی	۴/۱	۰/۶
	تغییرات روش ۳ نسبت به روش ۱	%۱۴.۵۸	%۴۵.۴۵
	تغییرات روش ۳ نسبت به روش ۲	%۱۹.۶۰	%۵۳.۸۰

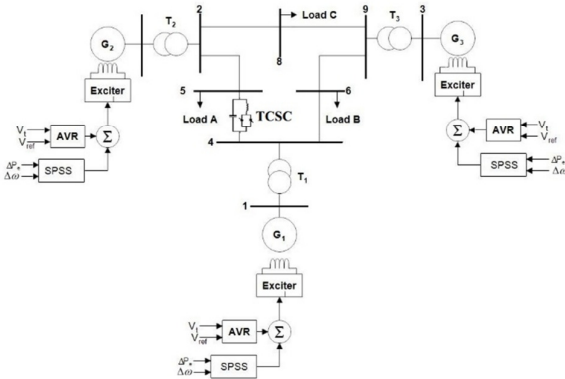
Table (2): Numerical comparison of simulation results in a single-machine power system connected to infinite bus due to three-phase short circuit fault

جدول (۲): مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت طی خطای اتصال کوتاه سه‌فاز

ردیف	روش	زمان نشست	فراجش
۱	روش SPSS	۸/۶	۰/۰۰۹۹
۲	روش GAPSS	۴/۹	۰/۰۰۲۷
۳	روش پیشنهادی	۲/۸	۰/۰۰۰۶۶
	تغییرات روش ۳ نسبت به روش ۱	%۳۸.۴	%۷۵.۲
	تغییرات روش ۳ نسبت به روش ۲	%۶۴.۶	%۹۸

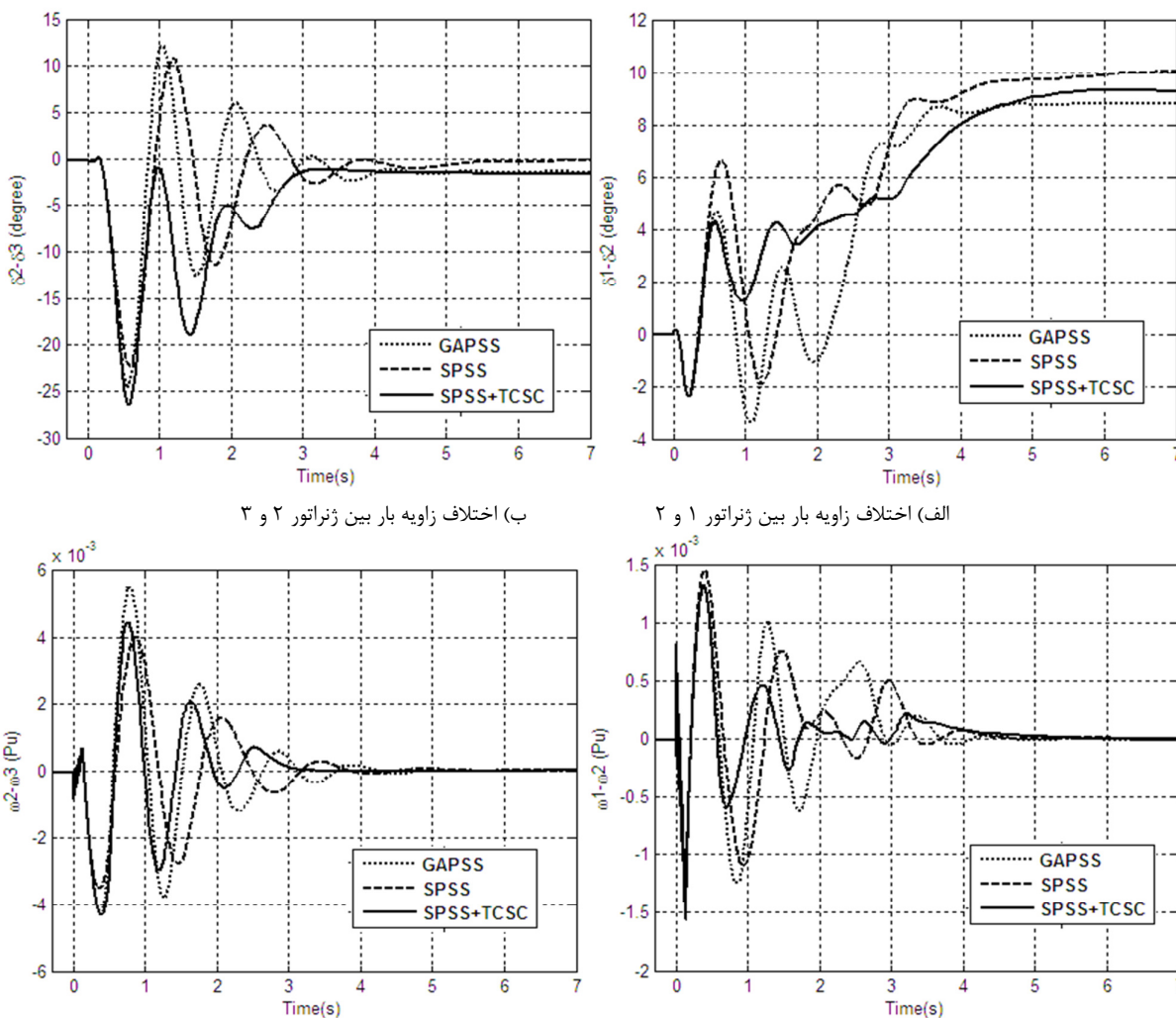
#### ۵-۲- سیستم قدرت نه باسه و سه ماشینه

دیگرام تک خطی سیستم قدرت سه ماشینه و نه باسه به همراه TCSC در شکل (۷) نشان داده شده است. برای بررسی عملکرد سیستم تحت بار غیرخطی، یک بار اندوکتیو به باس هشت متصل شده است. همچنین هر ژنراتور با یک سیستم تحریک که آن هم با یک پایدارساز سیستم قدرت مجهز گردیده، شبیه‌سازی شده است. همچنین یک TCSC بین باس‌های چهار و پنج در این سیستم در نظر گرفته شده است. پارامترهای سیستم قدرت نه باسه و سه ماشینه به همراه TCSC در جدول (۳) آمده است [۳۱]. اطلاعات تکمیلی برای سیستم قدرت نه باسه و سه ماشینه در مرجع [۳۲،۳۳] بیان شده است.



شکل (۶): دیگرام تک خطی سیستم قدرت سه ماشینه و نه باسه  
Fig. (6): Nine-bus three-machine power system with TCSC

شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی را زمانی که خطای اتصال کوتاه سه فاز در خط انتقال بین باس‌های ۶ و ۹ در زمان صفر رخ داده و در زمان ۰/۱



ب) اختلاف زاویه بار بین ژنراتور ۲ و ۳

الف) اختلاف زاویه بار بین ژنراتور ۱ و ۲

د) اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۲ و ۳

ج) اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۱ و ۲

شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت سه ماشینه و نه باسه

Fig. (7): Simulation results of three-machine and nine-bus power system

ثانیه اتفاق می‌افتد. این خطای اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۰/۱۵ ثانیه در سیستم باقی می‌ماند و سپس از آن پاک می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در این سیستم در شکل (۱۰) آمده است. این نتایج، عملکرد بهتر و تأثیرگذارتر سیستم مجهز به TCSC و SPSS در میراسازی نوسانات نسبت به دیگر حالات را تایید می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در کاهش ماکزیمم فروجهش و کاهش در زمان نشست بسیار موفقتر عمل می‌کند. در شبیه‌سازی اختلاف زاویه بار بین ژنراتور ۱ و ۲ ماکزیمم فروجهش در مقایسه با SPSS از ۴۰ درجه به ۳۷/۸ درجه تقلیل یافته است. برای مثال جدول (۶) مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی در مورد درصد کاهش در زمان نشست و درصد کاهش در ماکزیمم فروجهش روش پیشنهادی را نسبت به SPSS و SPSS، در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه را در اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۳ و ۴، نشان می‌دهد.

### ۵-۳- سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه

دیگرام تک خطی سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه به همراه TCSC که هر ناحیه با دو ژنراتور ۹۰۰ MW و ۲۰ KV مجهز شده، در شکل (۹) نشان داده شده است. هریک از ژنراتورها به وسیله یک ترانسفورماتور به خط انتقال ۲۳۰ KV متصل شده و میزان توان انتقالی از ناحیه‌ی یک به ناحیه‌ی دو ۴۰۰ MV می‌باشد. این دو ناحیه توسط دو خط انتقال ۲۲۰ Km به هم متصل شده‌اند و همچنین هر ژنراتور با یک سیستم تحریک که آن هم با یک پایدارساز سیستم قدرت مجهز گردیده، شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است TCSC در این سیستم در یکی از خطوط انتقال ۱۱۰ KM بین باس‌های ۸ و ۹ قرار گرفته است. پارامترهای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه به همراه TCSC در جدول (۵) آمده است [۳۴]. اطلاعات تکمیلی برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه در [۳۵] آمده است.

اغتشاش وارد شده به این سیستم، یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز است که روی یکی از دو خط ۱۱۰ km بین باس‌های ۷ و ۸ و در زمان صفر

Table (6): Numerical comparison of simulation results in two area four machine power system

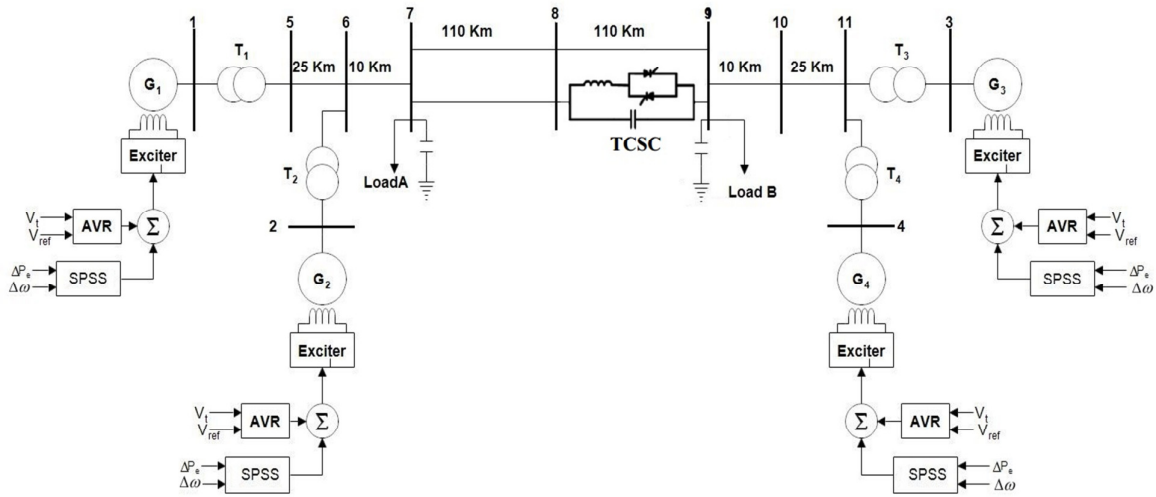
جدول (۶): مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه طی خطای اتصال کوتاه سه فاز

ردیف	روش	زمان نشست	فروچاهش
۱	روش SPSS	۳/۵۱	۲/۸۲
۲	روش GAPSS	۴/۳۰	۳/۷۶
۳	روش پیشنهادی	۲/۵۹	۲/۴۱
	تغییرات روش ۳ نسبت به روش ۱	%۲۵.۷۱	%۱۴.۲۸
	تغییرات روش ۳ نسبت به روش ۲	%۳۹.۵۳	%۳۶.۸۴

Table (5): The parameters utilized in the simulation of GAPSS, SPSS, and TCSC for the two-area four-machine power system

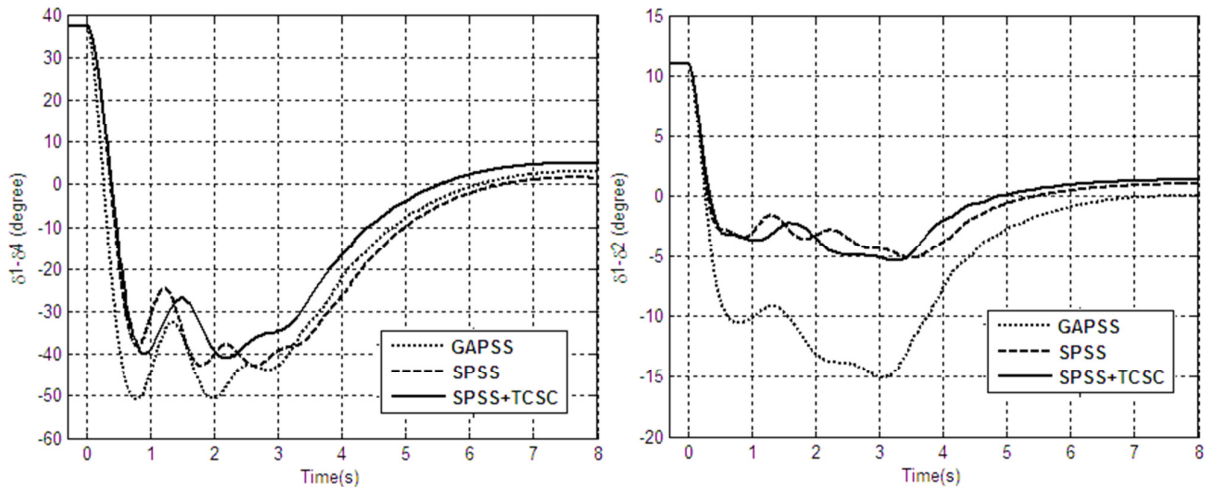
جدول (۵): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم قدرت دوناحیه‌ای و چهار ماشینه

Components	Parameters
GAPSS of generator 1,3	$K_{PSS}=1.1108, T_W=10s, T_1=0.6098s, T_2=0.1605s, T_3=0.6098s, T_4=0.1605s$ $U_{PSS,Max}=0.15, U_{PSS,Min}=-0.15$
GAPSS of generator 2,4	$K_{PSS}=1.0777, T_W=10s, T_1=0.7500s, T_2=0.2146s, T_3=0.7500s, T_4=0.2146s$ $U_{PSS,Max}=0.15, U_{PSS,Min}=-0.15$
SPSS	$K_1=0.1, \alpha_1=0.1$ $U_{SPSS,Max}=1.5, U_{SPSS,Min}=-1.5$
TCSC	$K_{TCSC}=0.0555, T_{W,TCSC}=10s, T_{1,TCSC}=0.0815s, T_{2,TCSC}=0.3844s, T_{3,TCSC}=0.0815s, T_{4,TCSC}=0.3844s$
by GA	$U_{TCSC,Max}=0.15, U_{TCSC,Min}=-0.15$ $K_S=1, T_S=0.05s, X_{TCSC,ref}=1$ $X_{TCSC,max}=0.15, X_{TCSC,min}=-0.15$



شکل (۸): دیاگرام تک خطی سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه

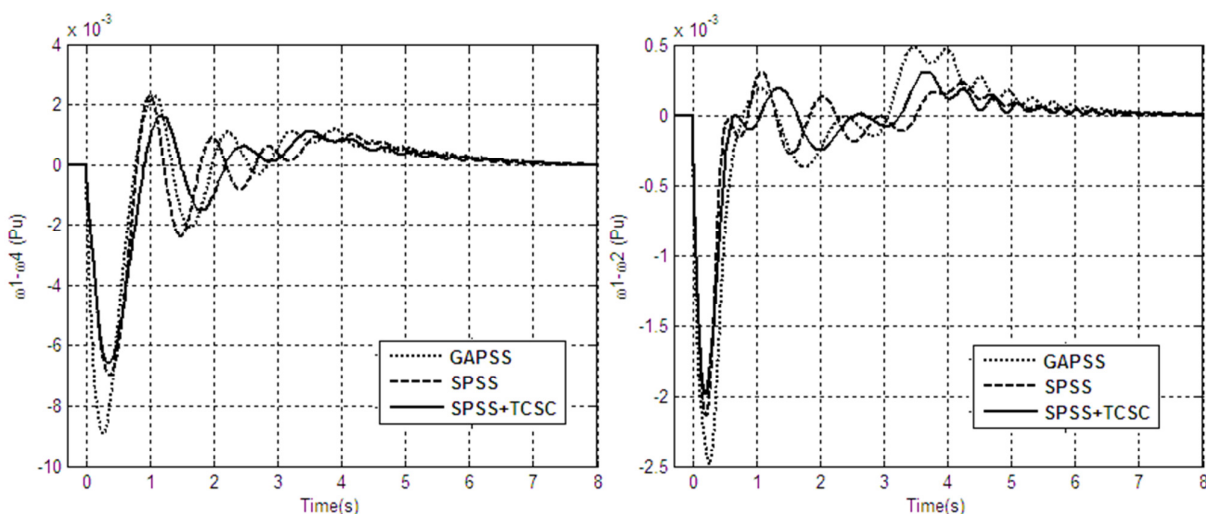
Fig. (8): Single-line diagram of the two-area four-machine power system with TCSC



(ب) اختلاف زاویه بار بین ژنراتور ۱ و ۴

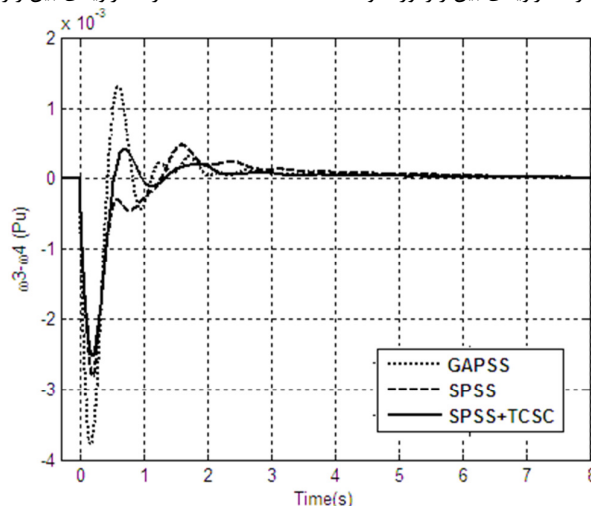
(الف) اختلاف زاویه بار بین ژنراتور ۱ و ۲





د) اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۱ و ۴

ج) اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۱ و ۲



ه) اختلاف سرعت زاویه‌ای بین ژنراتور ۳ و ۴

شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه

Fig. (9): Simulation results of two area four machine power system

خطای اتصال کوتاه سه‌فاز، در مقایسه با پایدارساز ترکیبی غیرخطی و پایدارساز بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بینهایت و دو سیستم قدرت چندماشینه (سه ماشینه و نه باس و دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه) و تحت اغتشاشات متفاوت از خود نشان می‌دهد.

#### پی‌نوشت:

- 1- Thyristor-controlled series capacitor
- 2- Synergetic power system stabilizer
- 3- Power system stabilizer
- 4- Genetic algorithm power system stabilizer
- 5- Flexible alternating current transmission system
- 6- Conventional power system stabilizer
- 7- Cuckoo search
- 8- Static var compensator
- 9- PV solar farm as a static synchronous compensator
- 10- Single machine infinite bus

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از ترکیب کنترل‌کننده TCSC و پایدارساز سیستم قدرت غیرخطی ترکیبی برای کاهش نوسانات الکترومکانیکی و افزایش پایداری در سیستم‌های قدرت تک‌ماشینه و چندماشینه استفاده شده است. خروجی PSS برای سیستم مجهز شده به TCSC براساس تئوری کنترل ترکیبی طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی علاوه بر غلبه بر مشکلات حاصل از خطی‌سازی و ساده‌سازی سیستم‌های قدرت که به منظور به‌دست آوردن پارامترهای PSS مرسوم انجام می‌گردد و موجب محدود شدن پایداری سیستم حول یک همسایگی از شرایط تعادل می‌شود، میرایی بیشتری را به واسطه به کار بردن TCSC در سیستم‌های قدرت تک ماشینه و چندماشینه نتیجه داده است. همچنین ترکیب ارائه شده تاثیر بیشتری در کاهش نوسانات و پایدارکردن سیستم قدرت در حین اغتشاشات سیگنال کوچک و اغتشاشات سیگنال بزرگ

## مراجع

- [1] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, Gh. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 5, No. 20, pp. 37-54, Winter 2015.
- [2] M. Tavoosi, B. Fani, E. Adib, "Stability analysis and control of DFIG based wind turbine using FBC strategy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 15, pp. 31-42, Autumn 2013.
- [3] G. Shahgholian, A. Rajabi, B. Karimi, M.R. Yousefi, "Design of power system stabilizer based on sliding mode control theory for multi-machine power system", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 1, No. 10, pp. 13-22, June 2015.
- [4] B.M. Nomikos, C.D. Vournas, "Power system stabilizer based on point wise min-norm control law", *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 215-224, Feb. 2017.
- [5] G. Shahgholian, J. Faiz, "Coordinated control of power system stabilizer and FACTS devices for dynamic performance enhancement- State of art ", *Proceeding of the IEEE/IEPS*, pp. 1-6, Kyiv, Ukraine, June 2016.
- [6] E. Jafari, A. Marjanian, S. Silaymani, G. Shahgholian, "Designing an emotional intelligent controller for IPFC to improve the transient stability based on energy function", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 478-489, 2013.
- [7] A. Behdan, B. Fani, E. Adib, "Reliability evaluation of power system SVC types using a markov chain", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 13-22, Summer 2015.
- [8] M. Ghasemi, A.R. Roosta, B. Fani, "Coordinated control of FACTS devices by using ADALINE neural network to enhance the transient stability of power system", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 3, No. 9, pp. 27-40, Spring 2012.
- [9] G. Shahgholian, A. Movahedi, "Coordinated control of TCSC and SVC for system stability enhancement using ANFIS method", *International Review on Modelling and Simulations*, Vol. 4, No. 5, pp. 2367-2375, Oct. 2011.
- [10] F. Mogharrab-Tehrani, G. Shahgholian, H. Pourghassem, "Dynamic study and stability analyze of damping cohefision and reactance in TCSC controller connected on optimization SMIB system", *Proceeding of the IEEE/ICCSN*, pp. 270-274, China, May 2011.
- [11] G. Shahgholian, M. Maghsoodi, A. Movahedi, "Fuzzy proportional integral controller desin for thyristor controlled series capacitor and power system stabilizer to improve power system stability", *Revue Roumaine Des Sciences Techniques*, Vol. 61, No. 4, pp. 418-423, 2016.
- [12] G. Shahgholian, "Review of power system stabilizer: Application, modeling, analysis and control strategy", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 41-52, Sep. 2013.
- [13] A. Shoulaie, M. Bayati-Poudeh, G. Shahgholian, "Damping torsional torques in turbine generator shaft by novel PSS based on genetic algorithm and fuzzy logic", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 1, No. 2, pp.3-10, Summer 2010.
- [14] M.A. Masrob, M.A. Rahman, C.B. Butt, G.H. George, "Design of a novel multi-input fuzzy logic power stabilizer for a reduced order power system", *Proceeding of the IEEE/APPEEC*, pp. 2611-2616, Oct.2016.
- [15] A.R. Tavakoli, A. Seifi, "Adaptive self-tuning PID fuzzy sliding mode control for mitigating power system oscillations", *Neurocomputing*, Vol. 218, pp. 146-153, Dec. 2016.
- [16] M. Farahani, S. Ganjefar, "Intelligent power system stabilizer design using adaptive fuzzy sliding mode controller", *Neurocomputing*, Vol. 226, No. 2, pp. 135-144, Feb. 2017.
- [17] N.N. Islam, M.A. Hannan, H. Shareef, "An application of backtracking search algorithm in designing power system stabilizers for large multi-machine system", *Electrical Power Systems Research*, Vol. 237, pp. 175-187, May 2017.
- [18] S.M. Abd Elazim, E.S. Ali, "Optimal power system stabilizers design via cuckoo search algorithm", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 75, pp. 99-107, Feb. 2016.
- [19] A.I. Konara, U.D. Annakkage, "Robust power system stabilizer design using eigenstructure assignment", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 31, No. 3, , pp. 1845-1853, May 2016.
- [20] S. Yang, P. Wang, Y. Tang, "Feedback linearization based current control strategy for modular multilevel converters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 1, pp. 1-5, Feb. 2017.
- [21] W. Song, T. sakao, "A customization-oriented framework for design of sustainable product/service system", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 140, No. 3, pp. 1672-1685, Jan. 2017.
- [22] H. Hasanvand, M. R. Arvan, B. Mozafari, T. Amraee, "Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 140, No. 3, pp. 1672-1685, Jan. 2017.
- [23] X.Y. Bian, Y. Geng, K.L. Lo, Y. Fu, "Coordination of PSSs and SVC damping controller to improve probabilistic small-signal stability of power system with wind farm integration", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 31, No. 3, pp. 2371-2382, May. 2016.
- [24] H. Maleki, R.K. Varma, "Coordinated control of PV solar system as STATCOM (PV-STATCOM) and power system stabilizers for power oscillation damping", *Proceeding of the IEEE/PESGM*, pp. 1-5, Boston, MA, USA, July 2016.

- [25] Z. Jiang, "Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory", *Electrical Power Systems Research*, Vol.79, pp.855-862, Jun. 2009.
- [26] M. Jebali, O. Kahouli, H. Hadj Abdallah, "Power system stabilizer parameters optimization using genetic algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.25, pp.78-83, July 2016.
- [27] W. Zhu, Y. Zheng, J. Dai, J. Zhou, "Design of integrated synergetic controller for the excitation and governing system of hydraulic generator unit", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.58, pp.79-87, Feb. 2017.
- [28] A. Najar-Khodabakhsh, M.R. Moradian, L. Najar-Khodabakhsh, N.R. Abjadi, "Stabilization of electromagnetic suspension system behavior by genetic algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 3, No. 11, pp. 53-61, Summer 2013.
- [29] H. Alkhatib, J. Duveau, "Dynamic genetic algorithms for robust design of multimachine power system stabilizers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.45, No.1, pp.242-251, Feb. 2013.
- [30] Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido, "Robust coordinated design of excitation and TCSC-based stabilizers using genetic algorithms", *Electric Power Systems Research*, Vol.69, No. 2-3, pp.129-141, May. 2004.
- [31] P. Zhao, W. Yao, J. Wen, L. Jiang, S. Wang, S. Cheng, "Improved synergetic excitation control for transient stability enhancement and voltage regulation of power systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 68, pp. 44-51, June 2015.
- [32] P. Bera, D. Das, T.K. Basu, "Coordinated design of excitation and tcsc-based stabilizers for multimachine power system sign in or purchase", *Proceeding of the IEEE/INDICON*, pp.1-4, Kolkata, India, Dec. 2010.
- [33] L. Lima, "Task force on benchmark systems for stability controls", *IEEE PES*, Vol. 31, pp. 14, May. 2014.
- [34] Z. Bouchama, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, "Reaching phase free adaptive fuzzy synergetic power system stabilizer", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 77, pp. 43-49, May 2016.
- [35] B.R. Gamino, P.B. deAraujo, E.V. Fortes, L.F.B. Martins, "Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an elite genetic algorithm", *Proceeding of the IEEE/INDUSCON*, pp. 1-8, Curitiba, Brazil, Nov. 2016.
- [36] T. Fernandes, E.G. Junior, G.L. Luc, "Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PP, No. 1, pp. 1-1, Jan. 2016.

