

## طراحی پایدار ساز جامع فازی سیستم قدرت با قابلیت حذف تداخل

مصطفی باقری پور<sup>۱\*</sup>، مصطفی جزائری<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۰۳	در این مقاله روشی برای کاهش برهم‌کنش بین پایدارسازهای سیستم قدرت در شبکه‌های بزرگ چند ماشینه و از این رو بهبود پایداری سیگنال کوچک پیشنهاد می‌شود. بردار بهره‌های نسبی دینامیکی (DRGA) معیاری برای شناسایی زوج‌های ورودی - خروجی با ارتباط قوی به منظور تجزیه یک سیستم چند ورودی - چند خروجی به چند سیستم تک ورودی - تک خروجی در فرکانس‌های مختلف می‌باشد. با استفاده از ماتریس DRGA، روشی کارآمد و ساده برای کسب اطلاعاتی در مورد چگونگی برهم‌کنش بین خود PSSها در فرکانس‌های مختلف مربوط به مدهای الکترومکانیکی سیستم قدرت معرفی می‌شود. این اطلاعات سپس برای طراحی یک سیستم پس پردازشگر استفاده می‌شود تا برهم‌کنش منفی بین PSSها را با مدیریت سیگنال‌های خروجی حذف نماید. برای افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش حساسیت نسبت به تغییرات نقطه کارسیستم، PSSها و سیستم پس پردازشگر پیشنهادی بر مبنای منطق فازی طراحی می‌شوند. روش پیشنهادی بر روی سیستم آزمون دو ناحیه‌ای در محیط Matlab مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پس پردازشگر فازی توانسته به طور رضایت‌بخشی با به حداقل رساندن تداخل منفی بین پایدارسازهای سیستم قدرت به طور همزمان هم پایداری سیگنال کوچک را اصلاح کرده و هم حساسیت این پایدارسازها به تغییر نقطه کار را کاهش دهد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۲	
<b>واژگان کلیدی:</b> پایدارساز سیستم قدرت، تداخل، DRGA. پس پردازشگر فازی.	

### ۱- مقدمه

میراسازی نوسانات فرکانس کم یکی از مهمترین مباحث پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت می‌باشد، که ریشه در مدهای مکانیکی ژنراتورهای سنکرون دارد. گسترش روزافزون سیستم‌های قدرت به دلیل افزایش تعداد ژنراتورها، احداث خطوط انتقال جدید به همراه بکارگیری سیستم‌های تحریک سریع‌تر باعث شده تا میرایی ذاتی مدهای نوسانی کاهش یابد. بنابراین اهمیت بهبود پایداری سیگنال کوچک در سیستم‌های مدرن امروزی بیش از پیش آشکار می‌شود. ورود و خروج بارهای سبک یا سنگین و حتی بروز اختلالات کوچک و متداول، احتمال تحریک مدهای نوسانی فرکانس پائین سیستم که از میرایی کمی برخوردارند، را افزایش می‌دهد. پایدارساز سیستم قدرت (Power System Stabilizer) برای بالا بردن میرایی این

مدهای مکانیکی بیش از چند دهه است که در سیستم قدرت به کار گرفته می‌شود [۱]. در سیستم‌های قدرت بزرگ، ممکن است ناحیه‌های متعددی ایجاد شود که هر کدام از این ناحیه‌ها دارای مدهای نوسانی منحصر به فردی نسبت به سایر ناحیه‌های سیستم می‌باشند که به آنها مدهای درون ناحیه‌ای گفته می‌شود [۲]. با توجه به ماهیت چند ورودی - چند خروجی بودن سیستم قدرت، این ناحیه‌ها بر روی یکدیگر اثرات متقابل دینامیکی داشته و می‌توانند نوسانات قدرت با فرکانسی پائین‌تر را تجربه کنند. چنین نوساناتی به نوسانات بین ناحیه‌ای موسوم است. زمانی که سیستم قدرت در این فرکانس‌ها به نوسان در آید در حقیقت انرژی بین این نواحی مبادله می‌شود [۳]. برای جلوگیری از تحریک مدهای الکترومکانیکی بایستی میرایی این مدها در سیستم قدرت

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mostafabp@gmail.com  
۱. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

داشته اما هیچ تضمینی برای جلوگیری از تداخل عملکرد در شرایط مختلف سیستم ندارند. زیرا در تعیین توابع عضویت و قوانین فازی این FPSS ها، تداخل بین پایدارسازها به صورت دینامیکی لحاظ نشده است. برای برطرف کردن این معضل ابتدا باید معیار و یا اطلاعات درستی در مورد نحوه برهم کنش پایدارسازها بدست آورد و سپس کنترلی طراحی کرد که حداقل تداخل را داشته باشد. روش‌های استفاده شده در [۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۸] برای محاسبه تداخل تقریباً قانع‌کننده هستند، ولی دارای مشکلاتی نیز می‌باشند، به عنوان مثال در [۱۲ و ۱۸] برای شناسایی برهم کنش قسمت‌های مختلف سیستم‌های قدرت از روشی مبتنی بر گشتاور تحریک‌کننده و ضرایب مشارکت گشتاور میرایی استفاده شده است. که هر دوی این پارامترها توسط روابط وابسته به مقادیر ویژه فرمول‌بندی و محاسبه می‌شوند. بنابراین برای محاسبه تداخل‌های شدید، باید مقادیر ویژه سیستم در تمام ترکیب‌های بکارگیری PSS ها محاسبه شده و با مقادیر ویژه حالات دیگر مقایسه شود. اما برای سیستم‌های بزرگ در نظر گرفتن کلیه حالات ترکیب PSS ها و آنالیز تداخل در هر حالت بسیار دشوار و شاید غیرممکن باشد. بنابراین نیاز به روشی کارآمد و در عین حال ساده‌تر احساس می‌شود.

یکی از روش‌های تحلیل سیستم‌های چند ورودی - چندخروجی، تجزیه آن به چند سیستم تک ورودی - تک خروجی می‌باشد. برای انتخاب زوج‌های ورودی - خروجی با وابستگی بیشتر از ماتریسی به نام  $RGA^3$  استفاده می‌شود که اولین بار در [۱۹] مطرح شده و معیاری برای تعیین زوج‌های مناسب تک ورودی - تک خروجی از یک سیستم چند ورودی - چند خروجی در حالت استاتیکی می‌باشد. در [۲۰ و ۲۱] محاسبه RGA به صورت دینامیکی و در فرکانس‌های مختلف مطرح شده است. این ماتریس‌ها بیشتر برای تحلیل سیستم‌های مربوط به مهندسی شیمی کاربرد پیدا کرده‌اند [۲۲ و ۲۳]. در [۲۴] ماتریس RGA برای جایابی بهینه PSS ها بکار گرفته شده است. ماتریس RGA برای اندازه‌گیری تداخل بین حلقه‌های کنترلی بکار رفته، و از نتایج آن برای انتخاب بهینه مکان PSS ها به صورتی که تداخل کمتری داشته باشند، استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از ماتریس RGA دینامیکی روشی

موقعی که نوسانات شروع می‌شوند افزایش یابد تا کارایی و عملکرد بهتری در مواجهه با این پدیده حاصل شود [۴-۶]. با این حال هنوز دو مشکل مهم در طراحی PSS وجود دارد که توجه بیشتر محققان را برای برطرف کردن آنها به خود معطوف داشته است.

اولا با توجه به شرایط متغیر سیستم قدرت، نقطه کار سیستم دائما در حال تغییر است، این طبیعت متغیر اثرات بسیار زیادی بر روی قطب‌ها، پایداری سیستم و متناسب با آن کارایی کنترلهای از جمله PSS<sup>۱</sup> های سیستم قدرت خواهد داشت [۷]. PSS های سنتی با پارامترهای ثابت نمی‌توانند در همه شرایط کاری عملکرد مناسبی داشته باشند. برای برطرف کردن این مشکل در دهه گذشته توجه زیادی به طراحی PSS ها با استفاده از کنترلهای فازی FPSS<sup>۲</sup> شده است. مقالات بسیاری در زمینه ترکیب شبکه‌های عصبی و یا روش‌های بهینه‌سازی هوش جمعی و ترکیب آن با کنترل فازی برای غلبه به این مشکل و عملکرد بهتر بررسی شده است [۸-۱۱].

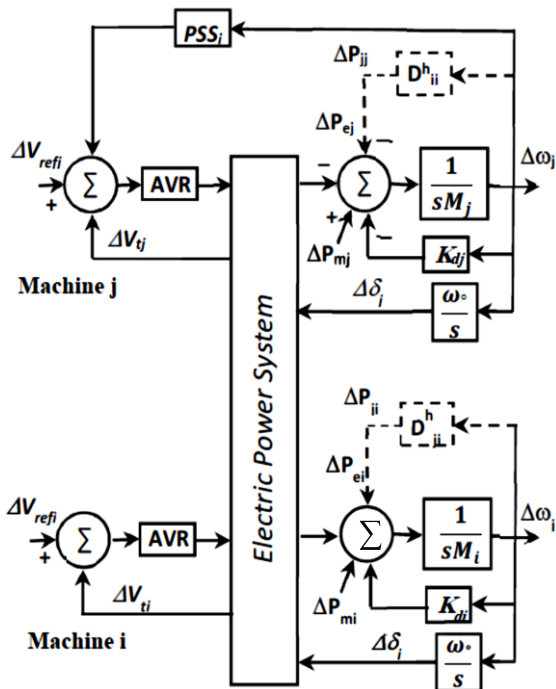
بعلاوه در یک سیستم قدرت بزرگ عملکرد پایدارسازهای متعدد می‌تواند تحت تاثیر تداخل ضعیف و یا حتی غیر قابل قبول باشد [۳]. یکی از دشواری‌های طراحی PSS ها هماهنگ سازی با سایر PSS ها در یک سیستم چند ماشینه است. در هنگام طراحی PSS های سنتی در یک سیستم چند ماشینه علاوه بر در نظر گرفتن قطب‌های مربوط به ماشین متناسب با همان PSS، اثر سایر ناحیه‌ها و PSS ها، تحت عنوان پارامترهای مشارکت نیز در نظر گرفته می‌شود. تحقیقات زیادی تحت عنوان هماهنگ سازی بین PSS ها برای یک سیستم چند ماشینه به روش‌های مختلفی انجام شده است [۱۴-۱۲]. اما با توجه به متفاوت بودن تداخل بین پایدارسازها در فرکانس‌های مختلف و تغییر نحوه برهم‌کنش روی یکدیگر در شرایط کاری متفاوت، PSS سنتی با پارامترهای ثابت نمی‌تواند کارایی رضایت‌بخشی در همه شرایط کاری ارائه دهد. از این رو در دهه گذشته مطالعات بسیاری در خصوص طراحی PSS های فازی هماهنگ برای یک سیستم چند ماشینه انجام شده است، تا عملکرد بهتری نسبت به PSS های سنتی داشته باشند [۱۷-۱۵]. طراحی هماهنگ FPSS به دلیل انعطاف‌پذیری در شرایط کار مختلف عملکرد بهتری

<sup>3</sup> Relative Gain Array

<sup>1</sup> Power System Stabilizer

<sup>2</sup> Fuzzy Power System Stbilizer

سیگنال‌های دیگری از  $\Delta\omega_j$  از طریق  $PSS_j$  و سیستم قدرت تحت عنوان  $\Delta P_{ji}$  به سایر ژنراتورهای سیستم قدرت ( $i$  نشان‌دهنده شماره‌های ژنراتورها است) اعمال می‌شود. این جزء  $\Delta p_{ji}$  دارای اختلاف فاز با  $\Delta\omega_j$  ژنراتور  $i$ ام می‌باشد و به عنوان گشتاور تحریک‌کننده از طریق عملکرد  $PSS_j$  بر روی سایر ژنراتورهای سیستم اثر می‌گذارد [۱۸]. حال اگر ماشین  $i$ ام مجهز به PSS باشد عملکرد این پایدارساز سیستم قدرت ( $PSS_i$ ) روی ماشین  $i$ ام با اثری که مربوط به ماشین  $j$ ام است دچار برهم‌کنش می‌شوند [۱۲ و ۱۸]. این برهم‌کنش گاهی مثبت بوده و سبب بهبود میرایی می‌شود و گاهی منفی بوده و سبب تداخل عملکردی می‌شود. برای سیستم تست استاندارد دو ناحیه‌ای [۲۸]، ابتدا برای هر چهار ماشین PSS های سنتی پیش‌فاز - پس فاز با استفاده از مدل هفرون - فلیپس طراحی شده، مدهای نوسانی ماشین دوم و چهارم در دو حالت استفاده هم‌زمان و به تنهایی PSS های دوم و چهارم، محاسبه شده و در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات جدول ۱ نشان می‌دهد که با اعمال PSS مربوط به ماشین چهارم، و تداخل عملکردی با PSS مربوط به ماشین دوم، میرایی مدهای الکترومکانیکی ماشین دوم کمی کاهش می‌یابد.



شکل ۱: مولفه‌های گشتاور ژنراتور  $j$  و  $i$  از طریق PSS تحریک می‌کنند

جدیدی برای شناسایی میزان و نحوه تداخل بین پایدارسازها مطرح شده است، که علاوه بر دقت بالا در فرکانس‌های مربوط به مدهای نوسانی، روش محاسبه بسیار ساده‌تر و سریع‌تری دارد.

برای رفع مشکل اول، تمام PSS های سیستم قدرت به صورت فازی طراحی می‌شود تا حساسیت کمتری نسبت به تغییر نقطه کار سیستم داشته باشند، و برای رفع مشکل دوم، یعنی تداخل بین پایدارسازها، ابتدا روشی بر مبنای ماتریس بهره‌های نسبی دینامیکی ( $DRGA^1$ ) پیشنهاد شده است، تا بتوان اطلاعاتی در مورد تداخل بین پایدارسازها بدست آورد، به این منظور ابتدا تمام PSS های سنتی موجود در شبکه به صورت PSS فازی برای هر ژنراتور به صورت جداگانه طراحی می‌شود، با محاسبه ماتریس RGA دینامیکی ( $DRGA$ ) برای سیستم قدرت، اطلاعاتی راجع به نحوه تداخل PSS ها در فرکانس‌های مدهای نوسانی با یکدیگر بدست آورده شده و سپس با استفاده از این اطلاعات، یک سیستم پس پردازشگر فازی برای کل شبکه طراحی می‌شود، تا با دریافت سیگنال خروجی تمامی PSS های فازی و پردازش روی این سیگنال‌ها، در خروجی سیگنال‌های کنترلی را با حداقل تداخل به ماشین‌های شبکه ارائه دهد.

جهت انجام عملیات پس پردازش روی سیگنال PSS های هر ماشین و هماهنگ‌سازی آن‌ها با یکدیگر به منظور جلوگیری از بروز تداخل، می‌بایست تمام سیگنال PSS ها در یک جا جمع‌آوری شده و بر روی آنها پردازش صورت گیرد. بنابراین پیشنهاد شده است به جای همه PSS های فازی سیستم، یک کنترلر فازی برای کل سیستم طراحی شود. ورودی این کنترل‌کننده شامل سیگنال‌های سرعت و شتاب زاویه‌ای همه ماشین‌های سیستم و خروجی آن نیز سیگنال PSS مربوط به هر ماشین خواهد بود.

## ۲- مفهوم برهم کنش متقابل

در شکل (۱) مدل خطی شده یک سیستم قدرت نمونه با  $n$  ماشین داده شده که ژنراتور  $j$  به همراه PSS در نظر گرفته شده است. در مد نوسانی  $\lambda_h$  رتور ماشین  $j$ ام، تغییرات سرعت  $\Delta\omega_j$  از طریق  $PSS_j$  و سایر اجزای سیستم قدرت به  $\Delta p_{ej}$  تبدیل شده و به عنوان گشتاور تحریک‌کننده به شفت ژنراتور  $j$ ام اعمال می‌شود. همچنین

<sup>1</sup> Dynamic Relative Gain Array

جدول ۱: مقادیر ویژه الکترومکانیکی سیستم چهار ماشینه

نمونه	
مقادیر ویژه ماشین دوم PSS <sub>2</sub> در مدار	مقادیر ویژه ماشین دوم PSS <sub>2</sub> و PSS <sub>4</sub> به طور هم‌زمان در مدار
$-3.9025 \pm j6.4376$	$-3.7625 \pm j6.6494$

درباره نحوه برهم‌کنش پایدارسازها، ماتریس DRGA پیشنهاد می‌شود. این ماتریس حالت دینامیکی ماتریس RGA است.

برای یک سیستم چند ورودی - چند خروجی که می‌تواند با رابطه  $y = G(s)u$  تعریف شود، به صورتی که  $G(s) = [g_{ij}(s)]$  باشد، درایه  $\lambda_{ij}$  ماتریس RGA، نسبتی از وابستگی بین ورودی داده شده  $u_i$  و خروجی  $y_j$  را نشان می‌دهد و می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\lambda_{ij} = \frac{\left. \frac{y_j}{u_i} \right|_{u_k=0, k \neq i}}{\left. \frac{y_j}{u_i} \right|_{y_k=0, k \neq j}} \quad (1)$$

درایه های RGA یک ماتریس غیرمفرد مربعی A (که معمولاً ماتریس انتقال سیستم است) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$RGA(A) = A \otimes A^{-T} \quad (2)$$

که  $A^{-T}$  ترانهاده معکوس ماتریس A و  $\otimes$  ضرب جز به جز می‌باشد. این ماتریس برای تعیین جفت ورودی - خروجی‌های مناسب در حالت استاتیکی یک سیستم چند ورودی - چند خروجی و امکان‌پذیری تجزیه آن به چند سیستم یک ورودی - یک خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماتریس RGA بر اساس اطلاعاتی که در درایه‌هایش نهفته است بر هم‌کنش ورودی‌ها و خروجی‌ها بر روی یکدیگر را مشخص می‌سازد. هر درایه این ماتریس یک عدد صحیح است که با معیارهای زیر ارزیابی می‌شود:

۱- بین صفر و یک باشد و هر چه عدد به یک نزدیک‌تر باشد زوج ورودی - خروجی ارتباط بیشتری داشته و برای جفت کردن مناسب‌تر هستند.

۲- اگر عدد خیلی بزرگ‌تر از یک باشد آن زوج مناسب نخواهد بود.

۳- اگر عدد منفی باشد به هیچ وجه نباید ورودی و خروجی مربوطه را به صورت یک زوج در نظر گرفت.

در سال‌های اخیر بکارگیری RGA در سیستم‌های چند ورودی و چند خروجی به ویژه در علوم و مهندسی کاربرد فراوانی پیدا کرده است. این جایگاه بیشتر به دلیل دقت و سهولت مناسب این روش در معرفی جفت‌های مناسب برای سیستم‌های پیچیده می‌باشد [۲۰]. برای مثال یک سیستم دو ورودی و دو خروجی مطابق شکل (۲) می‌تواند توسط

این تداخل سبب بروز مشکلاتی در زمان میراسازی نوسانات فرکانس کم خواهد شد، زیرا هر کدام از PSS ها با یک سرعت و ثابت زمانی خاص خود عمل خواهند کرد. در زمانی که در یک ناحیه نوسانات فرکانس پایینی رخ دهد، قطعاً ناحیه دیگر نیز دچار این اختلالات خواهد شد، که در این صورت PSS های هر ناحیه با یک سرعت و ثابت زمانی خاصی عکس‌العمل نشان خواهند داد، این عملکرد هم‌زمان ممکن است باعث تحریک مدهای نوسانی ناحیه‌ها شده و نهایتاً کل سیستم را به وضعیت نوسانی بکشاند. بنابراین تنظیمات و ترکیب استفاده از PSS ها باید به گونه‌ای باشد که میراسازی نوسانات فرکانس کم بدون تداخل و یا با حداقل تداخل منفی در حالت رضایت‌بخشی صورت پذیرد. برای دستیابی به چنین شرایطی کنترل فازی پس پردازشگر پیشنهاد شده است که میزان سیگنال PSS ها و زمان مشارکت PSS ها در سیستم را با توجه به نحوه برهم‌کنش و تداخل آنها با یکدیگر تعیین کرده و برای دستیابی به بهترین هماهنگی پایدارسازهای با برهم‌کنش کمتر را شناسایی و فعال می‌کند.

### ۳- ماتریس DRGA

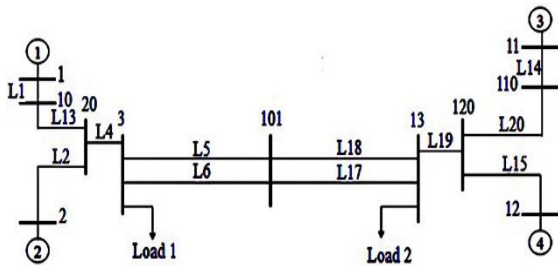
در مرجع [۱۲] مشارکت PSS ها در تعیین مقدار گشتاور تحریک‌کننده توسط عامل مشارکت گشتاور تحریک‌کننده بررسی شده است. با استفاده از افزایش ضریب ثابت PSS ها و بررسی تاثیر آن در انتقال مدهای الکترومکانیکی ناحیه‌های دیگر (ناحیه‌ای به جز ناحیه‌ای که PSS مورد بررسی در آن قرار دارد) به چپ یا راست، مشارکت هر پایدارساز در انتقال مدهای سایر ژنراتورها بدست می‌آید. با توجه به اینکه تمام حالات ترکیب PSS ها باید بررسی شده و در هر حالت مراحل ذکر شده انجام شود، این روش برای سیستم‌های قدرت بزرگ، اگر غیر ممکن نباشد بسیار زمان‌بر و دشوار خواهد بود. علاوه بر آن تمام محاسبات در حالت پایدار و نقطه کار نامی انجام می‌شود. در حالی که در صورت بروز اختلال، تداخل بین PSS ها در فرکانس مربوط به مدهای نوسانی رخ می‌دهد. برای دستیابی به اطلاعاتی

هرچه درایه‌های این ماتریس به یک نزدیک‌تر باشند بیانگر ارتباط بیشتر بین ورودی و خروجی متناظر در فرکانس  $\omega$  بوده و همین خاصیت است که این ماتریس را به ابزار مفیدی برای تحلیل دینامیکی تبدیل می‌کند.

برای کسب اطلاعات قابل اعتماد در مورد برهم‌کنش PSS ها، تعیین درست یک ماتریس  $G(s)$  سیستم بسیار حائز اهمیت است، به گونه‌ای که ماتریس DRGA محاسبه شده برای آن حاوی اطلاعاتی در خصوص برهم‌کنش PSS ها باشد. از طرفی نیز استخراج اطلاعات صحیح از ماتریس DRGA، نیازمند رعایت اصول و قواعد خاصی می‌باشد که متاثر از خواص ماتریس DRGA و همچنین معادلات و خصوصیات سیستم قدرت است. روش پیشنهادی برای استفاده از ماتریس DRGA در بخش بعد ارائه شده است.

#### ۴- محاسبه تداخل PSS ها با ماتریس DRGA

روش پیشنهادی استفاده از ماتریس DRGA نسبت به روش ضرایب مشارکت و روش مانده‌ها ساده‌تر بوده و همچنین قابلیت محاسبه تداخل در فرکانس مربوط به مدهای نوسانی را داراست که این می‌تواند دقت محاسبات را افزایش دهد. به منظور نشان دادن عملکرد و درستی اطلاعات بدست آمده از ماتریس DRGA برای یک سیستم نمونه، از هر دو روش آنالیز مقادیر ویژه (محاسبه گشتاور تحریک‌کننده) و ماتریس DRGA، بر هم‌کنش پایدارسازها محاسبه و مقایسه می‌شوند.



شکل ۳: سیستم قدرت دو ناحیه‌ای چهار ماشینه مورد مطالعه

شبکه انتخاب شده برای این مطالعه، سیستم استاندارد دو ناحیه‌ای چهار ماشینه است، که در شکل (۳) نشان داده شده است. ژنراتورهای ۱ و ۲ در ناحیه اول و ژنراتورهای ۳ و ۴ در ناحیه دوم قرار دارند. از آنجایی که حوزه عملکردی در اینجا پایداری فرکانس کم است، مدل مرتبه ۴ برای ماشین‌های سنکرون استفاده می‌شود. بعلاوه برای AVR<sup>۱</sup> مدل مرتبه یک و PSS نیز مدل مرتبه ۳ استفاده می‌شود.

ماتریس انتقال  $G(s)$  توصیف می‌شود.

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

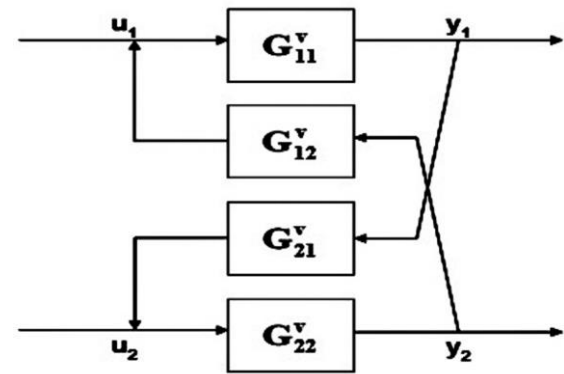
ماتریس RGA برای این سیستم به فرم معادله زیر خواهد بود.

$$RGA(G(0)) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{22} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

که در آن هر کدام از بهره‌های نسبی از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$RGA = \frac{(y_1/u_1)_{ol}}{(y_1/u_1)_{cl}} = \frac{1}{1 - \frac{g_{12}g_{21}}{g_{11}g_{22}}} = \lambda_{11} \quad (۵)$$

جزء  $k = \frac{g_{12} g_{21}}{g_{11} g_{22}}$  به عنوان خارج قسمت برهم‌کنش شناخته می‌شود و در [۲۲] و [۲۳] برای بدست آوردن بیشترین ارتباط ممکن بین یک جفت ورودی - خروجی استفاده می‌شود.



شکل ۲: سیستم کنترل دو ورودی - دو خروجی

روش آرایه بهره‌های نسبی همچنین می‌تواند ابزار مفیدی برای تجزیه و تحلیل برهم‌کنش در حوزه فرکانس باشد. درایه‌های این ماتریس وابسته به فرکانس بوده و اولین بار در [۲۰] مطرح شده و گاهی اوقات DRGA نامیده می‌شود که برای بررسی برهم‌کنش سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی در هر فرکانسی بکار می‌رود. DRGA محاسبه RGA در هر فرکانس کاری است  $(G(\omega))$  DRGA که مانند RGA اطلاعاتی راجع به نحوه ارتباط و برهم‌کنش ورودی‌ها و خروجی‌ها در فرکانس مربوطه ( $\omega$ ) ارائه می‌دهد.

$$DRGA(G(\omega)) = \begin{bmatrix} |\lambda_{11}| & |\lambda_{12}| \\ |\lambda_{21}| & |\lambda_{22}| \end{bmatrix} \quad (۶)$$

<sup>۱</sup> Automatic Voltage Regulator

است.

انتقال قسمت حقیقی مدهای نوسانی می‌تواند به چپ یا راست باشد و همچنین قسمت موهومی می‌تواند کم یا زیاد شود (فرکانس نوسانات را تغییر دهد). اگر انتقال یک قطب در اثر بکارگیری PSS یک ماشین به گونه‌ای باشد که میرایی آن مد نوسانی بهبود پیدا کند، آن PSS بر هم‌کنش مثبت با ماشین‌های مربوط در آن مد نوسانی دارد و اگر میرایی آن مد را کاهش دهد، بر هم‌کنش منفی خواهد بود. برای هر مد نوسانی دیاگرامی مشابه شکل (۴) ترسیم می‌شود تا بتوان از روی آن مقدار و جهت تاثیر یک PSS را بر روی مدهای نوسانی سایر ماشین‌ها تشخیص داد.

مد نوسانی درون ناحیه‌ای  $-2.0473 \pm j6.3848$  مربوط به ژنراتورهای ۱ و ۲ (ناحیه اول) می‌باشد و شکل (۴) میزان انحراف این مد در اثر بکارگیری تک تک PSS ماشین‌ها در سیستم را نشان می‌دهد. محور عمودی شماره PSS ها را نشان داده و محور افقی میزان انحراف مد نوسانی، در اثر بکارگیری PSS متناسب با آن سطر را نشان می‌دهد. نمودارهای سمت راست و چپ به ترتیب تغییرات قسمت موهومی و حقیقی مدهای نوسانی را نشان می‌دهند.

از نمودار شکل (۴) مشخص است که مد نوسانی  $-2.0473 \pm j6.3848$  که مربوط به ژنراتورهای ۱ و ۲ می‌باشد و در ناحیه اول قرار گرفته است، با ورود PSS ماشین سوم، به سمت چپ منتقل شده و فرکانس نوسانات آن کمی افزایش یافته است.

حال برای نشان دادن بر هم‌کنش و اثر متقابل پایدارسازها بر روی یکدیگر، PSS مربوط به ماشین ۲ از ناحیه اول و PSS مربوط به ماشین ۴ از ناحیه دوم، به صورت هم‌زمان در شبکه بکار گرفته می‌شوند تا اثر متقابلشان روی عملکرد یکدیگر بررسی شود. مقادیر ویژه این حالت در ستون پنجم جدول ۴ آورده شده و ضریب میرایی مدهای نوسانی آن در ستون ششم درج شده است. برای مقایسه آسان‌تر در ستون اول و دوم به ترتیب مقادیر ویژه و ضریب میرایی مدهای نوسانی در حالت بکارگیری PSS ماشین ۲ به تنهایی، آورده شده است و در ستون سوم و چهارم به ترتیب مقادیر ویژه و ضریب میرایی مدهای نوسانی موقعی که فقط ماشین ۴ مجهز به پایدارساز است، آورده شده است. با توجه به فرکانس مقادیر ویژه و تاثیر پذیری آنها از بکارگیری PSS ها مد نوسانی بین ناحیه‌ای مشخص شد و در ستون ۶،۴،۲ با اندیس (IA) نشانه‌گذاری شده است.

همچنین فرض می‌شود توان حقیقی ورودی به ژنراتورها طی اختلالات سیستم ثابت باقی بماند. مشخصات اجزای شبکه در [۲۸] داده شده است.

#### ۴-۱- تجزیه و تحلیل بر هم‌کنش PSS ها با استفاده از مقادیر ویژه سیستم

پارامترهای پایدارساز سیستم سنتی که با تابع تبدیل رابطه (۷) معرفی می‌شود بر مبنای مدل هفرون - فلیپس (Heffron-Phillips) برای هر ماشین در حالت منفرد و متصل به شین بی‌نیهایت در بار کامل محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$G(s) = K_{pss} \times \frac{sT_w}{1+sT_w} \times \frac{1+sT_{n1}}{1+sT_{d1}} \times \frac{1+sT_{n2}}{1+sT_{d2}} \quad (7)$$

جدول ۲: پارامترهای PSS محاسبه شده برای هر ماشین به صورت منفرد متصل به شین بی‌نیهایت

GEN4	GEN3	GEN2	GEN1	$pss$
69.967	70.625	70.177	70.625	$kpss$
3	3	3	3	$tw$
0.2301	0.228	0.219	0.228	$t_{n1}$
0.05	0.05	0.05	0.05	$t_{d1}$
0.2	0.21	0.205	0.21	$t_{n2}$
0.05	0.05	0.05	0.05	$t_{d2}$

ابتدا برای بررسی میزان اثرگذاری PSS ماشین بر یک روی پایداری سیگنال کوچک سایر ماشین‌ها در سیستم مطالعه، PSS ماشین‌ها تک تک و به تنهایی در سیستم قدرت بکار برده و تاثیر آنها بر سایر ماشین‌ها نشان داده می‌شود. اثر PSS ها بر روی سایر ماشین‌ها با محاسبه مقادیر ویژه در هر حالت قابل ارزیابی است. به این صورت که با بکارگیری PSS یک ماشین در سیستم، مدهای الکترومکانیکی سایر ماشین‌ها به چپ یا راست منتقل می‌شوند. این اطلاعات در جدول ۳ آمده است.

از آنجائی که در فرمول‌بندی معادلات سیستم قدرت مطالعه از تغییرات سرعت و زاویه رتور ماشین به عنوان متغیر حالت استفاده شده و شین بی‌نیهایت در سیستم در نظر گرفته نشده است لذا ماتریس حالت چنین سیستمی یک یا دو مقدار ویژه صفر خواهد داشت [۲۸]. مقدار ویژه صفر که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در این راستا قابل توضیح

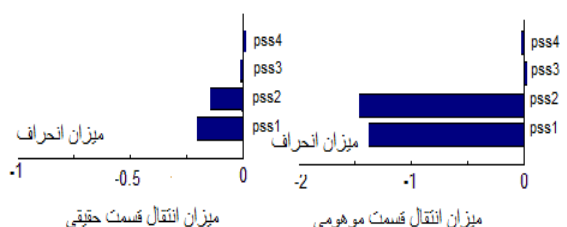
جدول ۳: مقادیر ویژه و شاخص میرایی شبکه چهار ماشینه در نقطه کار نامی

بدون PSS	با PSS <sub>1</sub>	با PSS <sub>2</sub>	با PSS <sub>3</sub>	با PSS <sub>4</sub>
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.5000	-0.1689	-0.1119	-0.1701	-0.1135
-0.448 ± j3.593	-0.9458	-1.3301	-0.9408	-1.3573
-4.4840	-0.6501 ± j3.384	-0.608 ± j3.341	-0.7603 ± j3.199	-0.832 ± j3.128
-5.4510	-4.4767	-4.4804	-4.4842	-4.4817
-5.881 ± j0.209	-2.2591 ± j4.792	-2.195 ± j4.763	-5.4345	-1.735 ± j4.994
-2.047 ± j6.384	-5.4466	-5.4453	-1.9911 ± j5.224	-5.4398
-1.386 ± j7.269	-5.869 ± j0.201	-5.854 ± j0.210	-5.9049 ± j0.155	-5.8438 ± j0.220
-13.4945	-1.387 ± j7.269	-1.385 ± j7.265	-2.0504 ± j6.388	-2.0467 ± j6.383
-14.6088	-10.3380	-9.6262	-9.7231	-9.3269
-21.9599	-13.4959	-13.4953	-14.6199	-14.6028
-28.8658	-17.9962	-20.5050	-15.6370	-18.5250
-70.4509	-23.1344	-23.9916	-28.3071	-28.0695
-77.1586	-24.2 ± j30.34	-23.02 ± j32.12	-22.34 ± j34.156	-21.34 ± j36.89
-86.5499	-73.3324	-72.6705	-70.8418	-70.9808
-88.7949	-77.8586	-77.6161	-79.5439	-78.7626
	-87.4600	-87.9554	-86.5542	-86.5519
	-88.7946	-88.8229	-89.8334	-90.3742

جدول ۴: مقادیر ویژه سیستم در حالت بار نامی

بکارگیری PSS <sub>2</sub>	ضریب میرایی	بکارگیری PSS <sub>4</sub>	ضریب میرایی	بکارگیری PSS <sub>2,4</sub>	ضریب میرایی
0.0000		0.0000			
-0.1119		-0.1135			
-1.3301		-1.3573			
-0.6088 ± j3.341		-0.8321 ± j3.128		0.0000	
-4.4804		-4.4817		-0.0724	
-2.1950 ± j4.763		-1.7349 ± j4.994		-0.3581	
-5.4453		-5.4398		-1.7384	
-5.8543 ± j0.210		-5.8438 ± j0.22		-1.1255 ± j2.822	
-1.3855 ± j7.266	0.179 (IA)	-2.0467 ± j6.383	0.2570 (IA)	-4.4781	0.3704 (IA)
-9.6262	0.418	-9.3269	0.3282	-1.7092 ± j4.968	0.3253
-13.4953	0.187	-14.6028	0.3053	-2.2042 ± j4.841	0.4144
-20.5050		-18.5250		-5.4346	
-23.9916		-28.0695		-5.8176 ± j0.221	
-23.02 ± j32.12		-21.34 ± j36.894		-9.4460 ± j0.298	
-72.6705		-70.9808		-18.4573	
-77.6161		-78.7626			
-87.9554		-86.5519			
-88.8229		-90.3742			

گشتاور تحریک کننده، لازم است تمامی حالت‌های ترکیبی ممکن بکارگیری PSS ها با یکدیگر را در سیستم بررسی نموده و با سایر حالات مقایسه نمود، که اگر غیر ممکن نباشد، بسیار دشوار و زمان‌بر خواهد بود.



شکل ۴: انتقال مقدار ویژه  $-2.0473 \pm j6.3848$  در اثر ورود PSS

محاسبه دقیق ماتریس DRGA برای یک ماتریس انتقال

با نگاهی به ستون پنجم که مقادیر ویژه سیستم در حالت بکارگیری هم‌زمان PSS<sub>2</sub> و PSS<sub>4</sub> را نشان می‌دهد، و مقایسه آن با ستون سوم، اثر متقابل PSS<sub>4</sub> از ناحیه دوم، بر روی مد نوسانی  $-2.047 \pm j6.384$  مربوط به ناحیه اول، مشخص است که باعث کاهش میرایی آن شده است. اگرچه این کاهش در نقطه کار نامی سیستم کم است، ولی در سایر نقاط کاری، مثلاً در حالت پرباری یا توزیع ناهمگن بار در دو ناحیه سیستم، می‌تواند بیشتر باشد و از طرفی هم در سیستم‌های بزرگ‌تر، با ناحیه‌های بیشتر، این مشکل بسیار جدی‌تر است. برای رسیدن به اطلاعات کاملی راجع به نحوه برهم‌کنش و تداخل بین تمام PSS های یک سیستم بزرگ، با استفاده از روش ضرایب مشارکت و

تاثیرگذاری PSS ها بر روی یکدیگر است. نکته مهم و قابل توجه این است که برای بالا بردن دقت ارزیابی تداخل هر ناحیه، می‌توان ماتریس DRGA را در فرکانس مربوط به مد الکترومکانیکی آن ناحیه محاسبه کرد. این سبب می‌شود اطلاعات بدست آمده از ماتریس DRGA، میزان تداخل بین PSS آن ناحیه با سایر PSS ها، در فرکانس متناسب با مد نوسانی آن ناحیه را ارائه دهد. ماتریس DRGA برای حالت استفاده هم‌زمان PSS دوم و چهارم در فرکانس مد نوسانی درون ناحیه‌ای مربوط به ژنراتور دوم (ناحیه اول) که در اینجا  $\omega = 6.384(\text{rad/sec})$  می‌باشد، به صورت زیر خواهد بود.

$$DRGA = \begin{pmatrix} 1.0341 & 0.4084 & 0.0063 & 0.0075 \\ 0.4125 & 1.0289 & 0.0039 & 0.0039 \\ 0.0198 & 0.0094 & 0.9923 & 0.6209 \\ 0.0228 & 0.0188 & 0.5869 & 1.0227 \end{pmatrix} \quad (8)$$

با توجه به درایه های (۱ و ۲) و (۲ و ۱)، بیشترین برهم‌کنش را PSS های ۱ و ۲ بر روی هم دارند. این نتیجه منطقی است زیرا این دو پایدارساز روی دو ژنراتور واقع در ناحیه اول عمل می‌کنند. همچنین با توجه به درایه‌های (۳ و ۴) و (۴ و ۳) مشخص می‌شود که PSS های ۳ و ۴ در یک ناحیه دیگر هستند. اما با استناد به درایه‌های (۱ و ۴)، (۲ و ۴) و (۴ و ۱)، (۴ و ۱)، (۲ و ۴) و (۴ و ۱) PSS ژنراتور سوم روی PSS های ۱ و ۲ از ناحیه‌های اول بیشتر است. از طرفی هم PSS1 نسبت به PSS2 با PSS های ناحیه دوم بیشتر تداخل دارد.

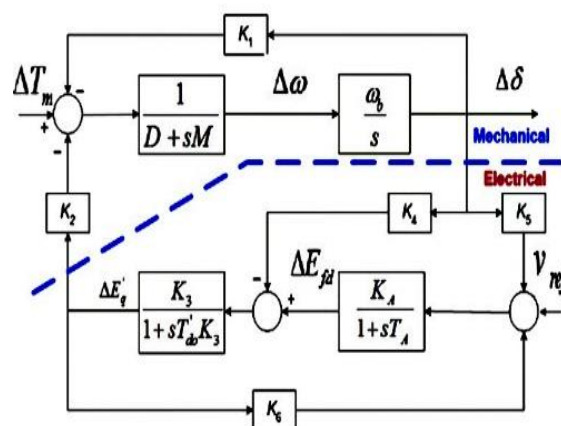
به طور مشابه، برای سیستم‌های واقعی بزرگ‌تر، از روی ماتریس DRGA به راحتی می‌توان PSS هایی که در یک ناحیه قرار دارند را مشخص کرد و همچنین PSS هایی از ناحیه‌های مختلف را که دارای تداخل هستند، تعیین کرده و معیاری نیز برای میزان تداخل آنها بدست آورد. تا اینجا به منظور شناسایی نحوه ارتباط و برهم‌کنش پایدارسازها با یکدیگر، ماتریس RGA دینامیکی، در فرکانس مربوط به مدهای نوسانی هر ناحیه (که در محدوده ۰,۲ تا ۲ قرار دارند) محاسبه شد و معیاری برای تداخل بین پایدارسازها در فرکانس مدهای الکترومکانیکی بدست آمد. ویژگی این اطلاعات در این است که:

۱- در شبکه‌های واقعی و بزرگ‌تر بسیار ساده‌تر از سایر روش‌ها قابل محاسبه می‌باشد. به عنوان مثال برای شبکه ۱۶ ماشینه استاندارد تست شده و نتایج رضایت‌بخشی

مناسب از سیستم و بکارگیری ویژگی‌های ماتریس DRGA می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری در مورد تداخل بین پایدارسازهای سیستم قدرت ارائه دهد.

#### ۴-۲- کاربرد ماتریس DRGA در آنالیز تداخل

برای محاسبه ماتریس DRGA، ابتدا یک ماتریس انتقال مربعی  $G(s)$  برای سیستم قدرت تعریف می‌شود. نکته مهم انتخاب ورودی‌ها و خروجی‌های مناسب برای این ماتریس است به نحوی که ارتباط بین این ورودی‌ها و خروجی‌ها بیانگر ارتباط بین PSS ها باشد، از این‌رو ورودی سیستم کنترل ولتاژ ( $V_{ref}$ ) ماشین‌ها (محلی که سیگنال کنترل PSS به آن اعمال می‌شود)، به عنوان ورودی و سرعت زاویه‌ای همه ماشین‌ها ( $\Delta\omega$ ) به عنوان خروجی در نظر گرفته شده و ماتریس انتقال  $G(s)$  برای این ورودی‌ها و خروجی‌ها محاسبه می‌شود. از آنجایی که سیگنال خروجی PSS به نقطه  $V_{ref}$  اضافه می‌شود بنابراین  $V_{ref}$  حاوی اطلاعات خروجی PSS است. از طرف دیگر تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ( $\Delta\omega$ ) که در ماتریس  $G(s)$  به عنوان خروجی انتخاب شده است، سیگنال ورودی PSS است. بنابراین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های ماتریس  $G(s)$  حاوی اطلاعاتی در مورد برهم‌کنش PSS ها خواهد بود. سیگنال‌های ورودی و خروجی برای سیستم قدرت یک ماشین در مقابل شین بی‌نهایت در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: نمایش ورودی و خروجی مناسب برای محاسبه  $G(s)$  (ماتریس انتقال سیستم حاوی اطلاعات برهم‌کنش PSS ها)

اکنون با محاسبه ماتریس DRGA اطلاعاتی راجع به برهم‌کنش و ارتباط  $V_{ref}$  به عنوان ورودی و  $\Delta\omega$  به عنوان خروجی بدست می‌آید، که این اطلاعات همان اطلاعات



حاصل شده است. هفرون - فلیپس، CPSS و سپس کنترلر فازی (FPSS) طراحی می‌شود. معمولاً تنظیمات پارامترهای فازی توسط یک متخصص یا به صورت سعی و خطا و یا با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی انجام می‌شود. بنابر این رسیدن به یک حالت ایده‌آل و یا قانع‌کننده بسیار دشوار است [۲۶ و ۲۵]. از طرف دیگر یک کنترلر فازی قوی و انعطاف‌پذیر سبب عملکرد مناسب در محدوده وسیعی از نقاط کار سیستم و نوسانات مختلف خواهد شد. تنظیمات و توابع عضویت FPSS در ادامه معرفی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

#### ۵-۱- تنظیمات فازی

عملگرهای فازی باید بر اساس پاسخ‌دهی توابع عضویت انتخاب شوند، عملگرهای انتخابی در FPSS به صورت زیر تدوین شده اند:

A و B را دو متغیر فازی با توابع عضویت  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(x)$  در نظر می‌گیریم.

برای AND از min فازی استفاده شده است که به صورت زیر مشخص می‌گردد.

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad x \in X \quad (9)$$

برای OR از max فازی استفاده شده است که به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\mu_D(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad x \in X \quad (10)$$

همچنین برای NOT از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\mu_{CA}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad x \in X \quad (11)$$

۲- در روش ماتریس DRGA اطلاعات بدست آمده در فرکانس مدهای الکترومکانیکی یعنی محدوده عملکرد PSS ها بدست می‌آید، که این باعث افزایش دقت اطلاعات در مورد برهم‌کنش PSS ها و در نتیجه خروجی کنترلر طراحی شده از روی این اطلاعات می‌شود.

اطلاعات بدست آمده از DRGA در مورد برهم‌کنش بین ناحیه‌ها، برای طراحی پایدارسازهایی با حداقل تداخل استفاده می‌شود. روند طراحی پایدارسازها به این صورت است که ابتدا برای برطرف کردن مشکل حساس بودن CPSS ها به تغییر مداوم نقطه کار، آنها به شکل فازی (FPSS) طراحی شده و سپس در سیستم قدرت نمونه، مورد بررسی قرار می‌گیرند و با محاسبه دقیق ماتریس DRGA برای سیستم قدرت، معیاری برای نحوه تداخل FPSS ها بدست می‌آید، که با استفاده از این اطلاعات پس پردازشگر فازی طراحی می‌شود تا تداخل موجود را حذف و یا کاهش دهد.

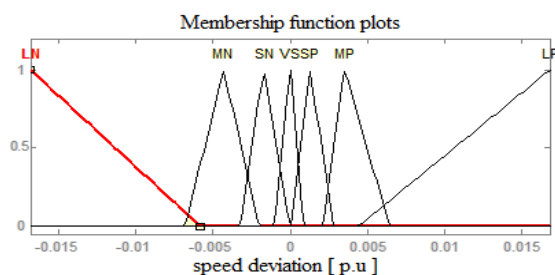
#### ۵- طراحی کنترلر فازی

هدف اصلی برطرف کردن هم‌زمان دو مشکل اساسی PSS ها یعنی ۱- تغییر مداوم نقطه کار سیستم ۲- تداخل بین پایدارسازهای ناحیه‌های مختلف، در سیستم‌های قدرت بزرگ است. برای برطرف کردن مشکل اول و کاهش تاثیر تغییر مداوم نقطه کار پیشنهاد شده که CPSS های هر ماشین به صورت فازی طراحی شوند. ابتدا برای هر ماشین به صورت مجزا و متصل به شین بی‌نهایت از روی مدل

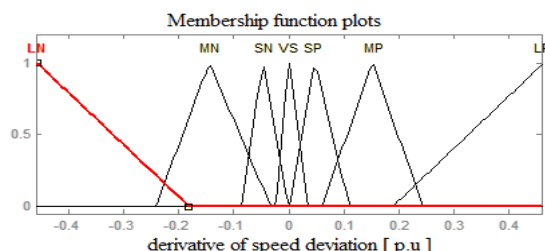
جدول ۵: قوانین PSS فازی

$\Delta\omega$ : تغییرات سرعت	شتاب زاویه‌ای: $\Delta\omega'$						
	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
LP	Z	SP	MP	LP	LP	LP	LP
MP	SN	Z	SP	MP	MP	LP	LP
SP	MN	SN	Z	SP	SP	MP	LP
Z	MN	MN	SN	Z	SP	MP	MP
SN	LN	MN	SN	SN	Z	SP	MP
MN	LN	LN	MN	MN	SN	Z	SP
LN	LN	LN	LN	LN	MN	SN	Z

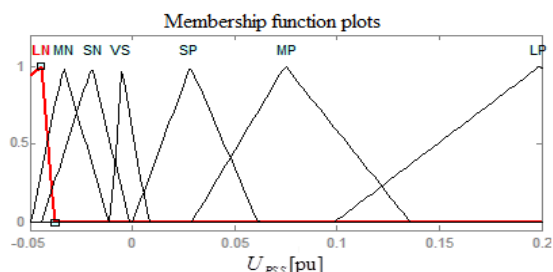
نامی و ایجاد اختلالی به صورت یک خطای سه فاز متقارن به مدت ۵۰ میلی ثانیه روی خط L5 بین شین‌های ۳ و ۱۰۱ در سیستم چهار ماشینه، نمودار خروجی CPSS که بر روی تحریک ماشین اول نصب شده در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به نمودار شکل (۶) و همچنین سایر آزمون‌های مشابه، می‌توان گفت در زمانی که نوسانات فرکانس کم در بیشترین مقدار خود هستند، سیگنال ولتاژ خروجی CPSS، در حداکثر یا حداقل خود قرار دارد، و پس از میرا شدن نوسانات فرکانس پایین، با نزدیک شدن به میرایی کامل، سیگنال کنترلی CPSS که به تحریک ماشین اعمال می‌شود، دارای تغییرات زیادی حول محور عمودی است و در صورتی که از دقت مناسبی برخوردار نباشد ممکن است سایر مدهای نوسانی سیستم را تحریک کند.



شکل ۷: تابع عضویت مربوط به ورودی اول یا سرعت زاویه‌ای هر ماشین



شکل ۸: تابع عضویت مربوط به ورودی دوم یا مشتق تغییرات سرعت زاویه‌ای (شتاب زاویه‌ای) هر ماشین



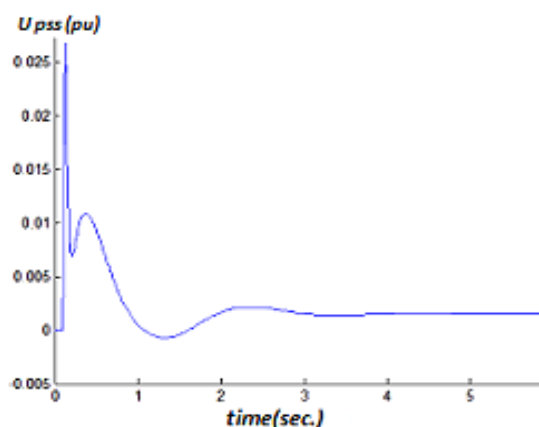
شکل ۹: تابع عضویت مربوط به خروجی هر PSS یا سیگنال اعمالی به سیستم تحریک هر ماشین

بنابراین برای عملکرد بهتر PSS فازی می‌بایست در زمان

بعلاوه از min فازی برای استلزام و از max فازی برای اجتماع استفاده شده است. برای ترکیب نیز از رابطه زیر استفاده شده است [۱۷]:

$$\mu_B(x) = \max(\min(\mu_R(x, y))) \quad (12)$$

نافازی ساز نوع centroid نیز برای تبدیل سیگنال‌های خروجی بکار گرفته شده است. در [۲۷] برای ورودی PSS فازی  $\Delta\omega$  (سرعت زاویه ای) و  $\Delta\omega'$  (شتاب زاویه‌ای) در نظر گرفته شده است. جدول ۵ قواعد فازی را برای این کنترل کننده نشان می‌دهد [۲۷].



شکل ۶: تغییرات زمانی سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم تحریک ماشین اول از طریق CPSS ماشین اول

جدول ۶ تعریف پارامترهای جدول ۵ را ارائه می‌کند.

جدول ۶: تعریف پارامترهای فازی

پارامتر	تعریف
LN	منفی - بزرگ
MN	منفی - متوسط
SN	منفی - کوچک
Z	صفر
SP	مثبت - کوچک
MP	مثبت - متوسط

### ۵-۲- انتخاب توابع عضویت

برای پایدارساز سنتی CPSS که به صورت زیر تعریف می‌شود:

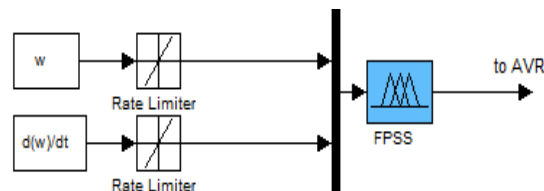
$$G(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_w}{1+sT_w} \times \frac{1+sT_{n1}}{1+sT_{d1}} \times \frac{1+sT_{n2}}{1+sT_{d2}}$$

پارامترها برای هر ژنراتور در حالت منفرد و متصل به شین بی‌نیامت، با استفاده از مدل هفرون - فلیپس محاسبه و در جدول ۲ داده شده‌اند. با شبیه‌سازی رفتار سیستم در بار

## ۶- پایدار ساز جامع فازی مجهز به پس پردازشگر فازی

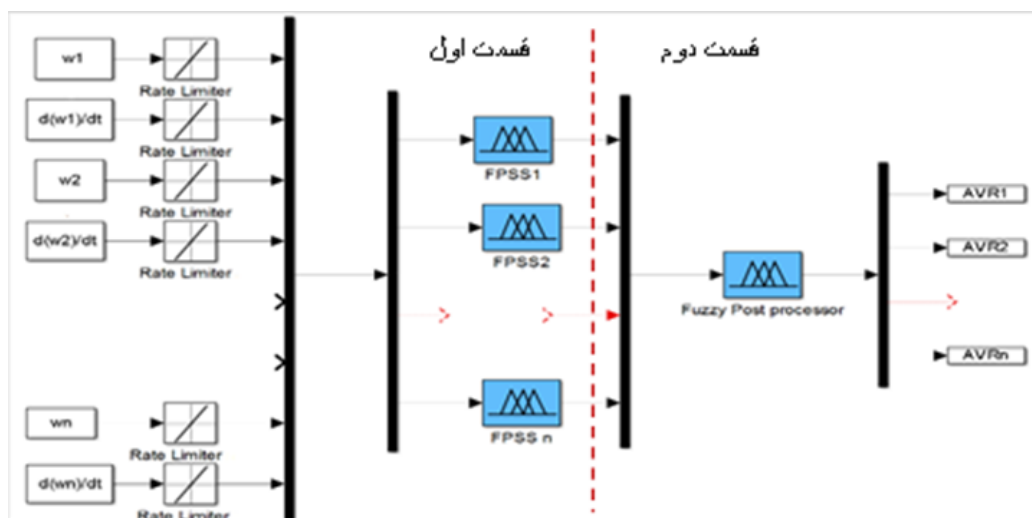
پایدارسازهای فازی طراحی شده برای هر ژنراتور در حالت ژنراتور منفرد متصل به شین بی‌نهایت (مدل سیستم قدرت یک ماشین متصل به شین بی‌نهایت)، در نقطه کار نامی بهترین عملکرد را در میراسازی ارائه می‌دهند. اما در شبکه چند ماشینه با چندین پایدارساز، FPSS ها ممکن است دچار برهم‌کنش منفی شده و کارایی قبل را نداشته باشند و یا برهم‌کنش مثبت باشد و عملکرد هم‌زمان آنها میرایی را بهبود ببخشد. بنابر این نیاز به یک واحد تصمیم‌گیر احساس می‌شود تا هم از عملکرد هم‌زمان FPSS های دارای تداخل جلوگیری کرده، و هم اجازه عملکرد هم‌زمان FPSS های دارای برهم‌کنش مثبت را بدهد. نکته مهم دیگر آنکه با توجه به تغییرات دائمی شرایط سیستم قدرت، نحوه برهم‌کنش پایدارسازها نیز متغیر است، لذا سیستم پس پردازش‌کننده به صورت فازی طراحی می‌شود تا نسبت به تغییر شرایط کاری سیستم انعطاف‌پذیری داشته باشد. برای اینکه این پس پردازشگر فازی بتواند روی سیگنال پایدارسازهای فازی پردازش انجام دهد می‌بایست سیگنال‌های خروجی FPSS کلیه ماشین‌ها را در ورودی خود داشته باشد و پس از پردازش روی آنها سیگنال متناسب با AVR هر ماشین را در خروجی به نحوی ارائه دهد تا تداخل بین پایدارسازها حذف و یا به حداقل برسد. نمایش بلوکی طرح پیشنهادی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

میراسازی و به خصوص در زمان میراشدن کامل نوسانات، دقت بسیار بالایی داشته باشد. برای دستیابی به این ویژگی تجمع توابع عضویت در حوالی نقطه صفر پیشنهاد می‌شود. توابع عضویت برای ورودی و خروجی هر PSS به صورت شکل‌های (۷) تا (۱۰) انتخاب شده است. محدوده توابع عضویت ورودی اول و دوم با انجام شبیه‌سازی و با اعمال یک خطای سه فاز متقارن در حالت ژنراتور منفرد متصل به شین بی‌نهایت، به دست آمده‌اند. محدوده تابع عضویت خروجی نیز با بکارگیری CPSS های ارائه شده در جدول ۲ در شبیه‌سازی بدست آمده است. تا اینجا مدل فازی CPSS برای هر ژنراتور طراحی شد. نمایش بلوکی FPSS در شکل (۱۰) داده شده است.



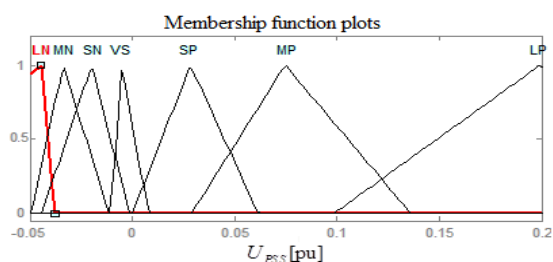
شکل ۱۰: نمایش بلوکی پایدارساز فازی

فازی شدن PSS انعطاف‌پذیری پایدارساز را نسبت به تغییرات نقطه کار سیستم بیشتر می‌کند. سیگنال کنترلی FPSS ها که به AVR یک ماشین شبکه اعمال می‌شود، روی نوسانات فرکانس پایین کل شبکه تاثیر می‌گذارد بنابراین FPSS ها نیز مانند PSS ها در کار هم‌زمان در شبکه چند ماشینه ممکن است دچار تداخل عملکردی شوند. برای رفع این مشکل در بخش بعد یک پس پردازشگر به منظور حذف تداخل پیشنهاد شده است.



شکل ۱۱: نمایش بلوکی پایدارساز فازی مجهز به پس پردازشگر

(۱۳) در نظر گرفت.



شکل ۱۳: تابع عضویت ورودی و خروجی پس پردازشگر

و نکته مهم‌تر اینکه وقتی دو پایدارساز در یک فرکانس خاص (فرکانس مربوط به مد نوسانی) دارای تداخل باشند، لزوماً در سایر فرکانس‌ها (فرکانس مربوط به سایر مدهای نوسانی) تداخل ندارد و ممکن است در فرکانس‌هایی دارای برهم‌کنش مثبت نیز باشند.

پس قوانین فازی باید به گونه‌ای تعیین شوند که پس پردازشگر فازی بتواند در حالت‌های مختلف، عملکرد مطلوبی ارائه دهد. پارامترهای توابع عضویت، در جدول ۳ داده شده‌اند.

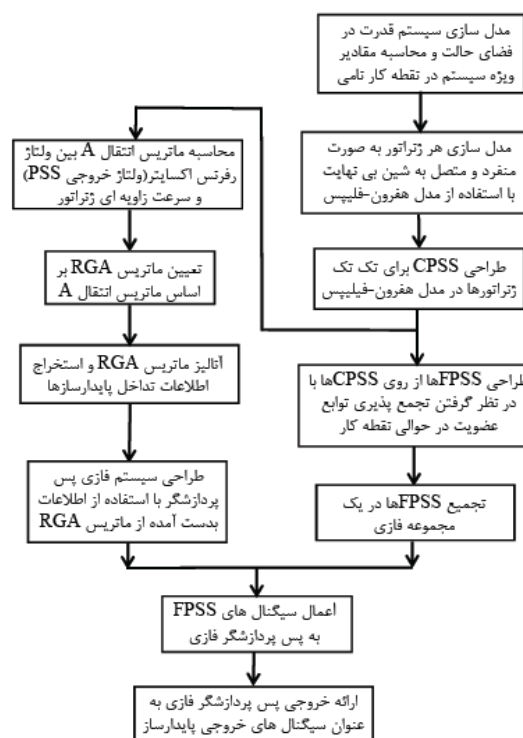
اساس تدوین قوانین فازی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.  
۱- اگر FPSS ها تداخل نداشته باشند عملکرد هم‌زمان آنها بلامانع است.

۲- اگر FPSS ها تداخل کمی داشته باشند، و نوسانات در یک ناحیه زیاد، و در ناحیه دیگر کم باشد، با توجه به اینکه FPSS ها با یکدیگر تداخل دارند بهتر است FPSS مربوط به ناحیه‌ای که دامنه نوساناتش بزرگ‌تر است، فعال بوده و FPSS ناحیه دیگر، غیر فعال باقی بماند.

۳- اگر FPSS ها تداخل کمی داشته باشند، در صورتی که نوسانات هر دو ناحیه برابر باشد، باید هر دو FPSS فعال باشند، زیرا با اینکه تداخل کم باعث کاهش کارایی هر دو FPSS می‌شود، ولی هر FPSS میرایی مربوط به ناحیه خود را بسیار بهبود می‌بخشد. بنابر این در مجموع عملکرد هم‌زمان FPSS ها در این حالت میرایی بهتری را ارائه می‌دهد.

۴- اگر FPSS ها دارای تداخل زیادی باشند، در همه حالات بهتر است یکی از FPSS ها که بر روی هر دو ناحیه اثر مثبت بیشتری دارد، فعال باشد، و دیگری غیر فعال شود. در سیستم مطالعه دو ناحیه ای چهار ماشینه، دو پایدارساز ۲ و ۴ که به ترتیب مربوط به ناحیه اول و دوم می‌باشند در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به محاسبات ماتریس DRGA در بخش ۴ مشخص شد که این دو پایدارساز با یکدیگر

قسمت اول در شکل (۱۱) بیانگر FPSS های یک شبکه و قسمت دوم پس پردازشگر فازی را نشان می‌دهد. طبق بلوک دیاگرام شکل (۱۱) یاباید FPSS ها روی ژنراتور مربوطه نصب و سیگنال خروجی آن به پس پردازشگر ارسال شود و یا تمام FPSS ها در یک واحد کنترل به صورت جامع طراحی شوند. مراحل طراحی کنترل پیشنهادی در فلوجارت شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۲: فلوجارت مراحل طراحی کنترل پیشنهادی

## ۱-۶- پس پردازشگر فازی برای کاهش تداخل

پس پردازشگر فازی باید روی اطلاعات خروجی FPSS ها، پس پردازش انجام دهد.

عملکرد پس پردازشگر اساساً باید به گونه‌ای باشد که از کار هم‌زمان پایدارسازهایی که دارای تداخل هستند، به صورت فازی جلوگیری کند، این با تعیین تنظیمات، قوانین فازی و توابع عضویت مناسب با استفاده از اطلاعات ماتریس DRGA ممکن خواهد بود. برای تدوین توابع عضویت و قوانین فازی سیستم پس پردازشگر فازی دو نکته حائز اهمیت است.

اولاً پس پردازشگر به تعداد پایدارسازهای سیستم، سیگنال ورودی دریافت می‌کند و تنظیمات فازی آن نیز مشابه تنظیمات FPSS هاست. با توجه به توضیحات بخش ۵، توابع عضویت ورودی و خروجی را می‌توان مطابق شکل

(ماشین ۴) کم باشد، برای جلوگیری از تداخل، بهتر است PSS ماشین ۴ غیر فعال باشد. اما در صورتی که نوسانات دو ناحیه زیاد باشد، بهتر است هر دو PSS بکار گرفته شوند تا میرایی مدهای نوسانی مربوط به ناحیه خودشان را بهبود ببخشند. هرچند ممکن است کمی به میرایی ناحیه دیگر لطمه وارد کنند. طبق قواعد تعیین شده، عملکرد سیستم فازی پس پردازش کننده به این صورت است که به روش فازی، فعال بودن همزمان FPSS هایی که با هم تداخل دارند را حذف یا کاهش می دهد.

### ۷- ارزیابی عملکرد کنترل فازی با قابلیت حذف تداخل

در این بخش کنترل کننده جامع فازی با قابلیت حذف تداخل در سیستم استاندارد دو ناحیه ای مورد آزمایش بکار گرفته شده و نتایج حاصل در شرایط کاری مختلف سیستم مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده در میراسازی نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت، یک اختلال خطای اتصال کوتاه متقارن روی خط L5 بین شین های ۳ و ۱۰۱، در لحظه  $t = 0.1 \text{ sec}$  ایجاد و در لحظه  $t = 0.15 \text{ sec}$  پاک می شود (شکل (۳)). به دنبال این خطا، متغیرهای سیستم با فرکانس مدهای محلی و بین ناحیه ای شروع به نوسان می کنند. میرا کردن سریع نوسانات با بکارگیری پایدارسازهای سیستم قدرت می تواند به معنی بهبود پایداری سیگنال کوچک در نظر گرفته شود. پایدارسازهایی که با رویکردهای متفاوتی طراحی شده اند در درجات مختلفی از میرایی را به سیستم تزریق کرده و از این نظر با هم قابل مقایسه اند. عملکرد پایدارسازهای مختلف CPSS، FPSS های جداگانه و در ادامه کنترل جامع فازی با قابلیت حذف تداخل (CFPSS)، در سه حالت مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد. شبیه سازی رفتار سیستم برای سه حالت ذکر شده، در محیط متلب و روی سیستم مطالعه چهار ماشینه شکل (۳) انجام شده است. بار ۱ و بار ۲ مطابق شکل (۳) به ترتیب به شین ۳ و ۱۳ شبکه متصل بوده و بارها از نوع امپدانس ثابت هستند. جدول ۸ بارهای شبکه برای سه شرایط مختلف بارگذاری سیستم را نشان می دهد.

در حالت ۱ سیستم، به دلیل اینکه ژنراتورها در توانی کمتر از توان نامی خود کار می کنند، میرایی کل سیستم مطالعه نسبت به سایر حالت ها بیشتر خواهد بود، و در نتیجه تداخل

کمی تداخل دارند، و طبق قواعد مشخص شده در بالا، قوانین فازی پس پردازشگر فازی، که مربوط به این دو FPSS می شود، به صورت جدول ۷ تدوین می شوند:

به عنوان مثال دو قانون اول فازی طبق جدول ۷ به صورت زیر نگاشته می شود.

If (input 2 is LP) and (input 4 is LP) then (output 2 is LP), (output 4 is LP) (۱)

If (input 2 is LP) and (input 4 is MP) then (output 2 is LP), (output 4 is MP) (۲)

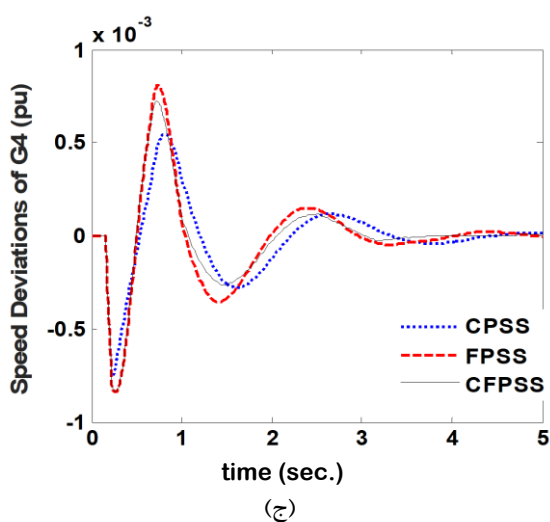
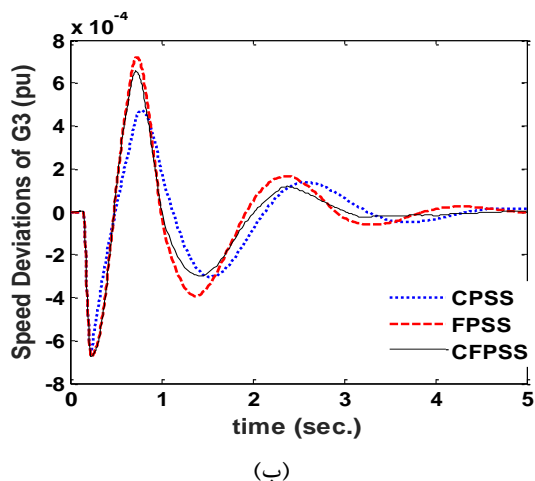
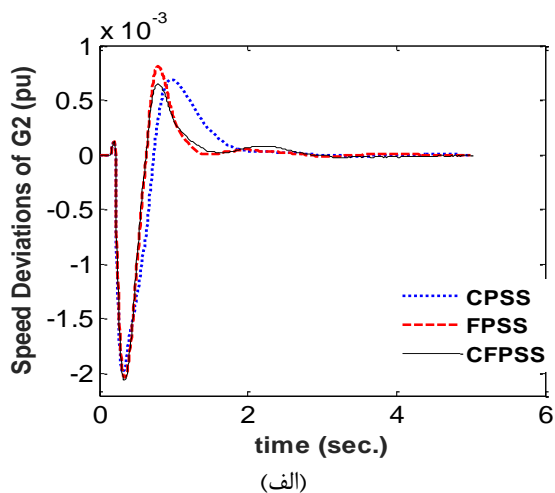
جدول ۷: قوانین فازی برای دو ورودی ۲ و ۴ و خروجی های ۲ و ۴

Input 2	Input4							Outputs
	LP	MP	SP	Z	SN	MN	LN	
LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	2
	LP	MP	Z	Z	Z	MN	LN	4
MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	2
	LP	MP	Z	Z	Z	MN	LN	4
SP	Z	Z	SP	SP	SP	Z	Z	2
	LP	MP	SP	Z	SN	MN	LN	4
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	2
	LP	MP	SP	Z	SN	MN	LN	4
SN	Z	Z	SN	SN	SN	Z	Z	2
	LP	MP	SP	Z	SN	MN	LN	4
MN	MN	MN	MN	MN	MN	MN	MN	2
	LP	MP	Z	Z	Z	MN	LN	4
LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	2
	LP	MP	Z	Z	Z	MN	LN	4

همواره باید دقت داشت که میزان تداخل بسیار پر اهمیت بوده، یعنی اگر تداخل به قدری زیاد باشد که کار همزمان دو PSS، میرایی کل سیستم را در همه فرکانس ها نسبت به حالت کاری مجزای FPSS ها کاهش دهد، باید قوانین طوری وضع شوند که از کار همزمان این دو FPSS جلوگیری شود.

به عنوان مثال در شبکه مطالعه در صورت بکارگیری هم زمان PSS ماشین ۲ و ۴، کمی تداخل وجود دارد، و این به معنی اینست که PSS ماشین ۴ میرایی مد نوسانی مربوط به ناحیه خودش (ناحیه ۲) را بسیار بهبود می بخشد و در طرف دیگر میرایی مد نوسانی مربوط به ناحیه اول را کمی کاهش می دهد. بنابراین اگر نوسانات در یک سمت، مثلاً ناحیه اول (ماشین ۲)، زیاد باشد و در ناحیه دوم

تداخل، نسبت به CPSS و FPSS سریع‌تر بوده و در هر سه حالت عملکرد مناسب‌تری نسبت به دو پایدارساز دیگر ارائه می‌دهد.



شکل ۱۴: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۲ (p.u.)؛ ب- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۳ (p.u.)؛ ج- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۴ (p.u.) در حالت کم‌باری

بین ناحیه‌ها نیز کمتر خواهد بود. بنابراین انتظار نمی‌رود که عملکرد سه نوع پایدارساز مورد بررسی چندان تفاوتی با یکدیگر داشته باشند. که این موضوع در شکل (۱۴) (الف و ب) مشخص شده است.

جدول ۸: میزان بارهای سیستم در حالات مختلف بارگذاری

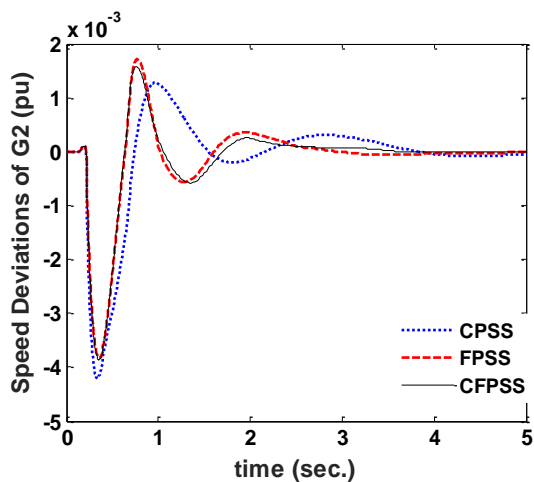
Loads	Load 1 (pu)	Load 2 (pu)
Low-Load	۴	۴
Mid-Load	۱۲	۸
High-Load	۱۸	۱۰

برای ترسیم منحنی تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین‌ها، سرعت زاویه‌ای ماشین ۱ به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و این منحنی‌ها برای ماشین‌های ۲ و ۳ و ۴ نسبت به ماشین ۱ رسم شده‌اند.

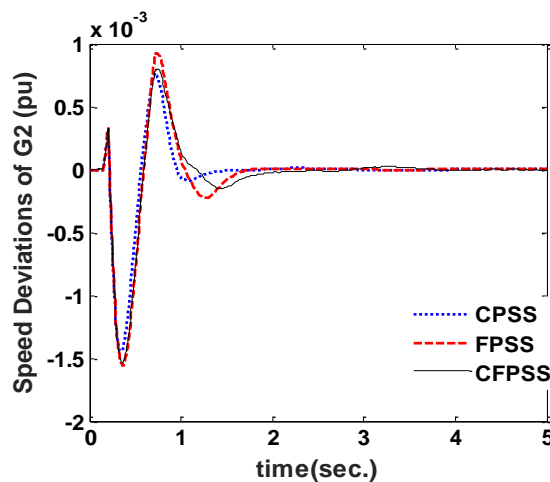
در حالت ۲، به دلیل توزیع نامساوی بارها و با توجه به غیر یکسان بودن خطوط انتقال منتهی به ژنراتورها ممکن است یکی از ژنراتورها به توان نامی خود نزدیک باشد در صورتی که سایر ژنراتورها توانی کمتر از توان نامی خود ارائه دهند، در این حالت با توجه به افزایش بار کل سیستم، میرایی نسبت به حالت قبل کمتر خواهد بود، بنابراین پایدارسازها در میراسازی نوسانات نقش مهمتری داشته و در نتیجه تداخل پایدارسازها بیشتر بروز می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این حالت میان باری در شکل (۱۵) (الف و ج) نشان داده شده است. در حالت بکارگیری PSS جامع فازی با قابلیت حذف تداخل، با توجه به اینکه از تداخل پایدارسازها جلوگیری شده است، نوسانات سریع‌تر میرا شده، که نشانگر عملکرد بهتر نسبت به دو نوع دیگر است.

در حالت ۳، با توجه به نامساوی بودن بارها، ژنراتورهای ناحیه دوم برای تامین بار ناحیه اول توان کامل خود را ارائه می‌دهند که این امر سبب افزایش تداخل بین ناحیه‌ها می‌شود، و در نتیجه در صورت بروز نوسانات PSS های این دو ناحیه دچار تداخل عملکردی با یکدیگر می‌شوند. در این حالت CFPSS که برای کاهش تداخل بین پایدارسازها به پس پردازش‌کننده فازی مجهز شده است، باید عملکرد مناسب‌تری را در میراسازی نوسانات فرکانس پایین ارائه دهد. نتایج بررسی سیستم مطالعه در این حالت در شکل (۱۶) (الف و ج) آورده شده است.

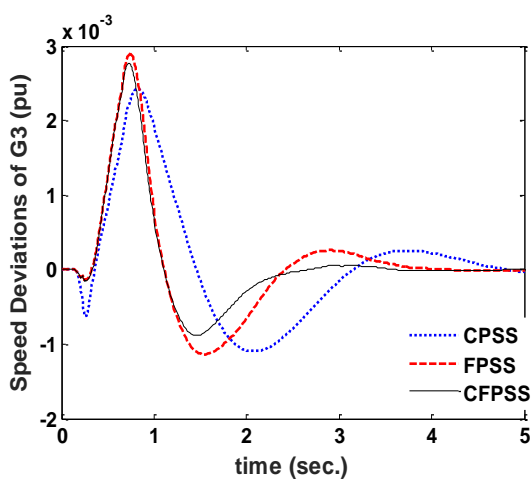
از نمودارهای تغییرات زمانی سرعت زاویه‌ای در سه حالت بررسی شده، به وضوح مشخص است که میرا شدن نوسانات در حالت استفاده از پایدارساز جامع فازی با قابلیت حذف



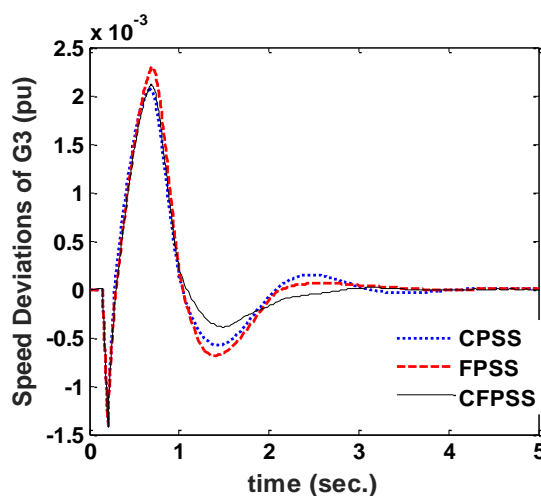
(الف)



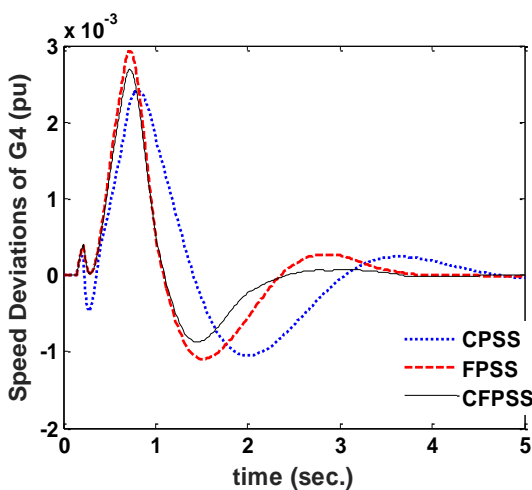
(الف)



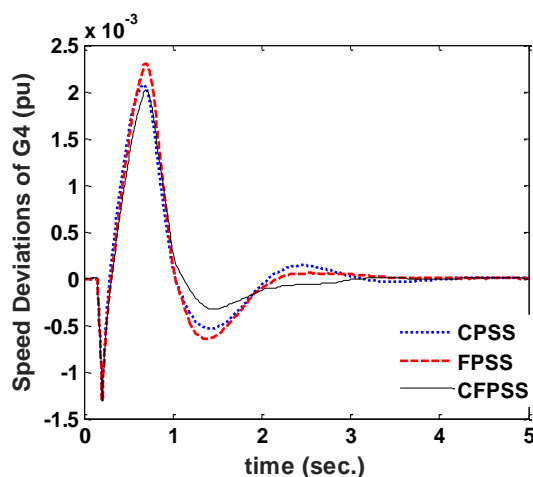
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۶: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۲ (p.u)؛ ب- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۳ (p.u)؛ ج- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۴ (p.u) در حالت پرباری

شکل ۱۵: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۲ (p.u)؛ ب- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۳ (p.u)؛ ج- تغییرات سرعت زاویه‌ای ماشین ۴ (p.u) در حالت میان‌باری

هر یک از کنترل‌های CPSS، FPSS و CFPSS در جدول ۹ ارائه شده است. به منظور مقایسه مناسب‌تر کارایی کنترل‌کننده‌ها از دیدگاه معیارهای فوق، نتایج بدست آمده بر مبنای هریک از معیارها و بر حسب بزرگترین مقدار نرمال شده‌اند.

جدول ۹: نتایج خروجی کنترل‌کننده‌ها بر اساس معیارهای مختلف

		ISE	IAE	ITAE	ITSE
Low-load	CPSS	0.1378	0.3198	0.2430	0.1003
	FPSS	0.1506	0.3540	0.2439	0.1092
	CFPSS	0.1400	0.3181	0.2159	0.0944
Mid-load	CPSS	0.3639	0.5300	0.3660	0.3202
	FPSS	0.4278	0.5774	0.3955	0.3923
	CFPSS	0.3522	0.5717	0.3430	0.3092
High-load	CPSS	1	1	1	1
	FPSS	0.9286	0.8893	0.7477	0.8838
	CFPSS	0.8571	0.7914	0.5885	0.7262

بررسی دقیق مقادیر جدول ۹ مجدداً مؤید آن است که در شرایط بار کم تفاوت معناداری بین کارکرد سه کنترل‌کننده وجود نداشته اما با افزایش سطح بارگذاری، کنترل جامع فازی پیشنهادی به طور رضایت‌بخشی توانسته است در حداقل‌سازی معیارهای یادشده موفق‌تر عمل کند. به خصوص در شرایط پرباری که پایدارسازهای سیستم قدرت به طور معمول بر اساس آن سیستم طراحی می‌شوند.

## ۸- نتیجه‌گیری

پایدارسازهای سیستم قدرت به طور معمول بر مبنای اطلاعات محلی طراحی می‌شوند. لذا در طراحی آنها دینامیک بخش‌های دیگر سیستم نادیده گرفته می‌شود. این موضوع می‌تواند کیفیت عملکردی این پایدارسازها را موقعی که به طور همزمان در سیستم قدرت کار می‌کنند، کاهش داده و بنابراین لزوم بکارگیری سیستم‌های هماهنگ‌کننده که بتواند از حداکثر ظرفیت میراکنندگی هریک از پایدارسازها استفاده نماید را بیش از پیش نمایان می‌سازد. این مقاله در حقیقت تلاشی برای برطرف کردن هم‌زمان دو مشکل ۱- حساس بودن CPSS ها به متغیر بودن نقطه کار سیستم، ۲- حذف و یا به حداقل رساندن تداخل بین پایدارسازها در سیستم‌های قدرت چند ماشینه، و در نتیجه بهبود پایداری سیگنال کوچک است. برای حل مشکل اول،

در حالات ۱ و ۲ پایدارساز پیشنهادی کمی بهتر از FPSS و CPSS عمل می‌کند. همان‌طور هم که انتظار می‌رفت در حالات تفاوت بین پایدارساز پیشنهادی و FPSS چندان نیست، چرا که بار کل سیستم در حالت ۱ کم بوده و در نتیجه میرایی سیستم بالا خواهد بود و در حالت ۲، چون CPSS برای این حالت طراحی شده عملکردی خوبی را ارائه داد، ولی در حالت ۳ چون سیستم در نقطه کار نامی نیست، CPSS با داشتن پارامترهای ثابت عملکردی مناسبی ندارد، ولی FPSS و CFPSS به دلیل انعطاف‌پذیری سیستم‌های فازی عملکرد مناسب‌تری داشته و از طریق سیگنال ولتاژ خود، گشتاور تحریک‌کننده دقیق‌تری برای میراسازی نوسانات، به روتور ژنراتور مربوطه اعمال می‌کنند. در نتیجه میرایی بهتری در تغییرات سرعت ماشین‌ها فراهم می‌کنند. از شکل (۱۶) (الف و ج) به راحتی می‌توان دریافت که CFPSS میرایی بیشتری را برای سیستم به ارمغان می‌آورد، که نتیجه مجهز شدن PSS های فازی آن به پس پردازشگر فازی به منظور حذف تداخل است. از آنجایی که وجود تداخل تنش اضافی به سیستم وارد می‌کند و حتی ممکن است موجب تشدید نوسانات فرکانس شده و سیستم را به ناپایداری بکشاند، حذف تداخل سبب موثرتر شدن سیگنال ولتاژ PSS ها و در نتیجه، گشتاور تحریک‌کننده خواهد شد، که نتیجه آن افزایش پایداری سیگنال کوچک سیستم است.

از طرف دیگر عملکرد کنترل‌های طراحی شده می‌تواند با توجه به معیارهای شناخته شده مبتنی بر انتگرال زمان - خطا مجدداً مورد ارزیابی قرار گیرد تا از کارایی برتر کنترل CFPSS اطمینان حاصل شود. برای این منظور معیارهای زیر معرفی و بکار گرفته می‌شوند:

$$ISE = \int_0^t (\Delta\omega_2^2 + \Delta\omega_3^2 + \Delta\omega_4^2) dt$$

$$IAE = \int_0^t (|\Delta\omega_2| + |\Delta\omega_3| + |\Delta\omega_4|) dt$$

$$ITAE = \int_0^t t (|\Delta\omega_2| + |\Delta\omega_3| + |\Delta\omega_4|) dt$$

$$ITSE = \int_0^t t (\Delta\omega_2^2 + \Delta\omega_3^2 + \Delta\omega_4^2) dt$$

نتایج خروجی حاصل از شبیه‌سازی‌های ارائه شده در شکل های (۱۴) تا (۱۶) برای شرایط مختلف بارگذاری و نیز بازی



و برای جلوگیری از بروز تداخل، به صورت فازی از عملکرد همزمان آنها در شرایط خاصی جلوگیری می‌کند. این شرایط خاص را میزان و نحوه برهم‌کنش خود پایدارسازها تعیین می‌کند. در صورتی که تداخل منفی بین دو پایدارساز مربوط به دو ناحیه مشاهده شود از عملکرد همزمان دو پایدارساز جلوگیری شده و بسته به نوسانات سیستم، هر لحظه یکی از پایدارسازها دارای سیگنال کنترلی خواهد بود. در نتیجه هم از حداکثر توان میراسازی پایدارسازها استفاده شده و هم از تداخل پایدارسازها جلوگیری می‌شود و پایداری کل سیستم بهبود پیدا می‌کند.

به جای CPSS ها، PSS های فازی (FPSS) پیشنهاد شده است، و برای برطرف کردن مشکل دوم، یک پس پردازشگر فازی پیشنهاد شده تا نسبت به تغییرات نقطه کار سیستم حساسیت کمتری داشته باشد. طراحی پس پردازشگر فازی نیازمند داشتن اطلاعات صحیح و کاملی از نحوه برهم‌کنش و تداخل PSS ها است. در این مقاله روشی با استفاده از ماتریس DRGA معرفی شده که اطلاعات بسیار مفیدی در مورد تداخل بین پایدارسازها ارائه می‌دهد. این پس پردازشگر با استفاده از اطلاعات ماتریس DRGA، پایدارسازهایی را که دارای تداخل هستند، شناسایی کرده

## ۹- مراجع

- [1] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics and Control", John Wiley, 1996.
- [2] N. Martins, "Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, NO. 1, February 1986, pp. 217 – 224.
- [3] M. Klein, G. J. Rogers, and P. Kundur, "A fundamental study of inter-area oscillations in power systems", IEEE Transactions on power systems, Vol. 6, NO. 3, August 1991, pp. 914 – 921.
- [4] N. Sumathi, M. P. Selvan, and N. Kumaresan, "A Hybrid Genetic Algorithm based Power System Stabilizer", International Conference on Intelligent and Advanced Systems, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2007, pp. 876 – 881.
- [5] P. Jiang, W. Yan, and W. Gu, "PSS Parameter Optimization with Genetic algorithm", In Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT, Nanjing China, April 2008, pp. 900 – 903.
- [6] A. Sil, T. K. Gangopadhyay, S. Paul, and A. K. Maitra, "Design of robust Power System Stabilizer using  $H_{\infty}$  mixed sensitivity technique", Third Intl, Conf, on Power Systems, Kharagpur, India, December 2009, pp. 1 – 4.
- [7] M. J. Gibbard, "Robust design of fixed-parameter stabilizers over a wide range of operating conditions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, NO. 2, May 1991, pp. 794 – 800.
- [8] P. V. Etingov, and N. I. Voropai, "Application of Fuzzy Logic PSS to Enhance Transient Stability in Large Power Systems", International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial, New Delhi, December 2006, pp. 1 – 9.
- [9] M. Cloughley, K. M. Muttaqi, and H. Du, "Damping of low-inertia machine oscillations using Takagi-Sugeno fuzzy stabiliser tuned by genetic algorithm optimisation to improve system stability", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 8, NO. 2, February 2014, pp. 339 – 352.
- [10] A. Gholipour, H. Lesani, and M. K. Zadeh, "Performance of a ANFIS based PSS with tie line active power deviation feedback", 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), IEEE, Vol. 2, December 2009, pp. 267 – 273.
- [11] M. Kushwaha, and R. Khare, "Dynamic stability enhancement of power system using fuzzy logic based power system stabilizer", International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), IEEE, February 2013, pp. 213 – 219.
- [12] M. J. Gibbard, "Coordinated design of multi machine power system stabilizers based on damping torque concepts", In IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 135, NO. 4, July 1988, pp. 276 – 284.
- [13] G. J. Dudgeon, W. E. Leithead, A. Dysko, J. O'Reilly, and J. R. McDonald, "The effective role of AVR and PSS in power systems: Frequency response analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, NO. 4, November 2007, pp. 1986 – 1994.
- [14] A. Dysko, W. E. Leithead, and J. O'Reilly, "Enhanced Power System Stability by Coordinated PSS Design",

- IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, NO. 1, February 2010, pp. 413 – 422.
- [15] T. Hussein, and A. Shamekh, "Adaptive rule-base fuzzy power system stabilizer for a multi-machine system", In Control & Automation (MED), 21st Mediterranean Conference on, June 2013, pp. 1514 – 1519.
- [16] M. Dubey, and N. E. Mastorakis, "Design of Genetic Algorithm Based Fuzzy Logic Power System Stabilizers in Multimachine Power System", system, Vol. 6, October 2013, pp. 8 – 18.
- [17] K. Krishnan, and L. Ponnusamy, "Optimal design of power system stabilizer in a multi-machine system using GSO approach", In Electrical Energy Systems (ICEES), 2nd International Conference on IEEE, January 2014, pp. 38 – 43.
- [18] M. J. Gibbard, D. J. Vowles, and P. Pourbeik, "Interactions between, and effectiveness of power system stabilizers and FACTS device stabilizers in multimachine systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, NO. 2, May 2000, pp. 748 – 755.
- [19] E. Bristol, "On a new measure of interaction for multivariable process control", IEEE transactions on automatic control, Vol. 11, NO. 1, January 1996, pp. 133 – 134.
- [20] M. F. Witcher, "Interacting control systems: steady state and dynamic measurement of interaction", ISA Trans, Vol. 16, 1977, pp. 35 – 41.
- [21] M. C. Arranz, and W. Birk, "New Approach to the Dynamic RGA Analysis of Uncertain Systems", IEEE Multi-conference on Systems and Control, San Antonio, Texas, USA, September 2008, pp. 365 – 370.
- [22] J. E. Rijnsdorp, "Interaction in two-variable control systems for distillation columns - i and ii", Automatica, Vol. 3, NO. 1, October 1965, pp. 15 – 28.
- [23] D. Chen, and D. E. Seborg, "Relative gain array analysis for uncertain process models", AIChE journal, Vol. 48, NO. 2, February 2002, pp. 302 – 310.
- [24] A. Mahabuba, and M. A. Khan, "Optimal Location of Power System Stabilizers in Multi Machine Power System Using Relative Gain Array (RGA) and Genetic Algorithm (GA)", International Journal of Electrical and Power Engineering, Vol. 2, NO. 1, 2008, pp. 19 – 27.
- [25] A. Dysko, W. E. Leithead, and J. O'Reilly, "Enhanced power system stability by coordinated pss design", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, NO. 1, February 2010, pp. 413 – 422.
- [26] Z. Barton, "Robust control in a multimachine power system using adaptive neuro-fuzzy stabilizers", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 151, NO. 2, March 2004, pp. 261 – 267.
- [27] M. M. Linda, and N. K. Nair, "Dynamic stability enhancement with fuzzy based power system stabilizer tuned by hottest non-traditional optimization technique", International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), IEEE, July 2010, pp. 1 – 5.
- [28] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, "Power System Stability and Control", New York: McGraw-hill, January 1994.