

## یک پایدارساز فازی خودتنظیم جدید با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی برای

### سیستم‌های قدرت چند ماشینه

جلال رضوی مقدم<sup>۱</sup>، امین خدابخشیان<sup>۲</sup> و رحمت الله هوشمند<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

J.razavi62@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- اصفهان - اصفهان- ایران

Aminkh@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- اصفهان - اصفهان- ایران

Hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله روشی جدید برای طراحی یک پایدارساز مقاوم در سیستم‌های قدرت با استفاده از تکنیک فازی خودتنظیم مرکب با الگوریتم تکامل تفاضلی (DEA) ارائه شده است. در این پایدارساز ضریب مقیاس بندی کنترلر با توجه به روند پروسه و به صورت در حال کار توسط فاکتور بروزرسانی ( $\alpha$ ) تغییر می کند. DEA به صورت خارج خط برای تنظیم پارامترهای این کنترلر استفاده شده است. شبیه سازی‌ها در سیستم قدرت چند ماشینه انجام شده است و نتایج، کارایی بهتر پایدارساز فازی خودتنظیم (SFLPSS) را در بهبود عملکرد دینامیکی سیستم، در مقایسه با پایدارساز فازی معمولی (FLPSS) طراحی شده با الگوریتم DEA، پایدارساز پسفاز- پیشفاز طراحی شده توسط DEA (DELLPSS) و پایدارساز کلاسیک (CPSS) نشان می دهند.

**واژه‌های کلیدی:** پایدارساز سیستم قدرت، پایدارساز منطق فازی، ساختار فازی خودتنظیم، الگوریتم تکامل تفاضلی

### ۱- مقدمه

با ساختار کلاسیک صنعتی (CPSS) به صورت گسترده استفاده شده‌اند [۱]. این پایدارسازها با پارامترهای ثابت و بر اساس مدل خطی شده سیستم حول نقطه کار نامی و با استفاده از روش‌هایی، همانند: روت لوکاس، نایکوئیست، دیاگرام بد و روش جبران فاز طراحی می‌شوند [۲]. با توجه به اینکه نقطه کار سیستم قدرت دائما در حال تغییر است، این PSSها ممکن است عملکرد مناسبی از خود نشان ندهند [۳]. ثانیاً سیستم قدرت سیستمی پیچیده و با نامعینی‌های بسیار است که مدل کردن آن را مشکل می‌سازد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی دیجیتال، طراحی و به کارگیری پایدارسازهای جدید بر مبنای روش‌های کنترلی جدید همانند: کنترل مدرن و بهینه [۴، ۵]، مقاوم [۶]، تطبیقی [۷، ۸] و کنترل هوشمند [۹، ۱۰، ۱۱] امکان پذیر شده است. تعیین

با گسترش و پیچیدگی سیستم‌های قدرت مدرن، احتمال گسترش نوسان‌های سیستم در ناحیه وسیع و در ادامه، خاموشی در یک منطقه گسترده، افزایش یافته است. به همین علت، میرایی نوسان‌های الکترومکانیکی سیستم‌های قدرت نقش مهمی در بهبود پایداری این سیستم‌ها ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر در سیستم‌های قدرت مدرن برای میرایی این نوسان‌ها، پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS) (PSS)

۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۸/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۵/۴

نام نویسنده مسئول: جلال رضوی مقدم

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان -

خیابان هزار جریب - دانشگاه اصفهان - دانشکده برق

در بین کنترلرهای روی خط هوشمند، استفاده از کنترلرهای منطق فازی (FLC) با توجه به اینکه نیازی به مدل ریاضی سیستم تحت کنترل ندارد، مورد توجه بسیار است و در صورتی که سیستم تحت کنترل، سیستمی پیچیده و غیر خطی باشد و مدل کردن آن دشوار باشد، استفاده از کنترلرهای منطق فازی برای این سیستم می‌تواند بسیار مؤثر باشد. انواع مختلفی از پایدارسازهای فازی (FLPSS) در تحقیقات پیشنهاد شده است [۱۵]، اما سیستم‌های قدرت واقعی که دارای چندین ماشین هستند، سیستم‌هایی از درجه بالا و غیرخطی هستند. همچنین، پارامترهای آنها ممکن است با توجه به شرایط محیطی و زمان تغییر کند. بنابراین برای داشتن عملکرد کنترلی مناسب، سیگنال کنترلی باید یک تابع غیر خطی باشد. در FLPSSها این خاصیت غیر خطی به وسیله تعداد محدودی از قوانین اگر و آنگاه اعمال می‌شود که ممکن است همیشه برای ایجاد سیگنال کنترلی مناسب، کافی نباشد. برای غلبه بر این محدودیت تحقیقات زیادی بر روی تنظیم FLCها انجام شده است [۲۲، ۱۷-۲۰]. یکی از ایده‌ها برای حل این مسأله، استفاده از ضرایب مقیاس بندی تطبیقی است [۲۰، ۲۲]. نتایج نشان داده است که این ایده می‌تواند عملکرد FLCها را بهبود بخشد. در [۲۱] به کارگیری مجموعه‌ای از ضرایب مقیاس بندی قابل سوئیچ پیشنهاد شده است، اما تنها در سیستم‌های مرتبه اول ساده عملکرد خوبی حاصل شده است. در این مقاله یک ساختار فازی خودتنظیم برای غلبه بر این مسأله پیشنهاد شده است.

مسأله دیگر در مورد FLCها، چگونگی تنظیم پارامترهای این کنترلرها در حالت دائمی است که با به کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری بهینه‌سازی، معمولاً به صورت یک مسأله بهینه‌سازی فرموله می‌شود [۱۹] به این گونه روش‌ها که شامل به کارگیری روش‌های خارج خط به همراه روش‌های روی خط برای طراحی پایدارسازهاست، روش‌های ترکیبی هوشمند اطلاق می‌گردد [۱۴، ۳، ۹].

در پژوهش ارائه شده در مرجع [۲۵]، کارایی DEA در تنظیم پارامترهای پایدارساز فازی معمولی بررسی شده است. در آن پژوهش نشان داده شده است که پایدارساز طراحی شده با روش فوق دارای عملکرد بهتری نسبت به

قطب‌های سیستم با استفاده از فیدبک خروجی، از جمله روش‌های کنترل مدرن است که در تحقیقات زیادی مورد توجه بوده است [۴]. روش دیگر که در آن هم از فیدبک خروجی استفاده می‌شود، کنترل بهینه است [۵]. این دو روش دارای مشکلاتی هستند، که عبارتند از:

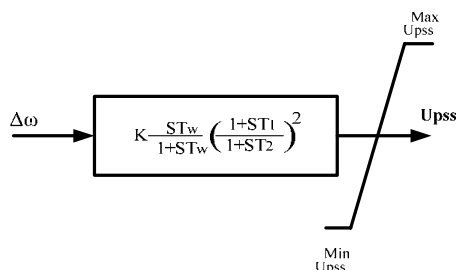
گرفتن فیدبک استاتیکی از خروجی و جایابی قطب‌ها به شدت توسط تعداد معین قطب‌های حلقه بسته و ناتوانی آنها در ایجاد پایداری مناسب محدود می‌شود. فیدبک دینامیکی از خروجی بر مشکل قبلی فائق می‌آید، ولی مرتبه این کنترلرها بالا می‌رود، و حتی با مرتبه سیستم تحت مطالعه قابل مقایسه است. کنترل بهینه فیدبک خروجی می‌تواند پایداری را به صورت مقاومی بهبود بخشد، اما تشکیل و تنظیم ماتریس وزنی Q و R مشکل بوده و هیچ روش مدونی برای تعیین پارامترهای آنها ارائه نشده است. از طرفی، برای داشتن فیدبک حالت نیازمند به کارگیری رویت‌گرها در سیستم است. این موضوع افزایش هزینه و کاهش قابلیت اطمینان سیستم کنترل را در پی دارد [۱۹]. ثوری کنترل تطبیقی به کنترلرهایی با ساختار بسیار پیچیده در مقایسه با کنترلرهای کلاسیک می‌انجامد. همچنین، کنترل تطبیقی نیازمند تعیین مدل سیستم در زمان واقعی است که ممکن است مشکل‌ساز باشد [۱۹].

روش‌های کنترل هوشمند شامل روش‌های خارج خط، روش‌های روی خط و روش‌های ترکیبی هستند که به صورت وسیعی در دهه‌های اخیر برای طراحی PSS استفاده شده‌اند. روش‌های خارج خط شامل تکنیک‌های بهینه‌سازی ابتکاری مثل الگوریتم ژنتیک (GA) [۹]، بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) [۱۰، ۱۱] و الگوریتم جستجوی باکتریایی (BFA) [۱۲] در طراحی پارامترهای CPSS به کار گرفته شده‌اند. الگوریتم تکامل تفاضلی (DEA) نیز در [۱۳] برای تنظیم پارامترهای CPSS پیشنهاد شده است، اما در این روش‌ها نیز از مدل خطی شده سیستم استفاده می‌شود که با تغییر نقطه کار سیستم می‌تواند مشکل‌ساز باشد.

روش‌های روی خط هوشمند شامل به کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی [۹، ۱۴] و ثوری منطق فازی [۱۹-۳، ۱۵] در طراحی پایدارساز است.

## ۲-۲- ساختار CPSS و DELLPSS

شکل (۱) ساختار این پایدارسازها را نشان می‌دهد. در یک سیستم چند ماشینه هر ماشینه به این کنترلرها تجهیز شده است.



شکل (۱): ساختار CPSS و DELLPSS

این نوع پایدارسازها شامل یک بلوک حذف اثر دائمی و یک جبران‌ساز دینامیکی است. سیگنال ورودی تغییرات سرعت رتور در نظر گرفته شده است. سیگنال خروجی (Upps)، به سیستم تحریک ژنراتور اعمال می‌شود. بردار پارامترهای کلیدی برای  $i$  امین CPSS یا DELLPSS در سیستم قدرت چند ماشینه را می‌توان مطابق رابطه (۳) تعریف کرد.

$$\theta_i = [T_1^i, T_2^i, K^i] \quad (3)$$

این بردار کلیدی در CPSS توسط روش جبران فاز و در DELLPSS توسط DEA طراحی شده است.

## ۲-۳- پایدارساز فازی سیستم قدرت (FLPSS)

در این مقاله از ساختار کنترلر فازی ارائه شده در [۱۵] به عنوان پایدارساز استفاده شده است. ساختار پایه کنترل کننده منطق فازی نوع ممدانی شامل چهار قسمت اصلی است: فازی کننده، پایگاه قوانین، موتور استنتاج و غیر فازی کننده. نمای کلی FLPSS مطابق شکل (۲) است. از تغییرات سرعت و مشتق تغییرات سرعت به عنوان ورودی‌های کنترلر استفاده شده است. ضرائب  $kin1$  و  $kin2$  وظیفه قرار دادن سیگنال‌های ورودی در محدوده مجاز را بر عهده دارند به این ضرائب، ضرائب مقیاس بندی ورودی گفته می‌شود. ضریب  $Kout$  ضریب مقیاس بندی خروجی نام دارد. که کار تبدیل مقیاس خروجی از مقدار محاسبه شده به وسیله کنترلر فازی به مقدار واقعی را که

پایدارسازهای معمولی است. با توجه به مشکلاتی که قبلاً در مورد پایدارساز فازی معمولی عنوان گردیده است، در این مقاله از یک روش ترکیبی هوشمند برای طراحی PSS استفاده شده است. در ابتدا یک ساختار فازی خودتنظیم به عنوان PSS (SFLPSS)، برای غلبه بر محدودیت‌های FLC‌های معمولی پیشنهاد و سپس پارامترهای این پایدارساز توسط DEA تنظیم گردیده است. نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت چند ماشینه نشان می‌دهد که پایدارساز پیشنهادی عملکرد بهتری در مقایسه با پایدارساز فازی معمولی (FLPSS) که پارامترهای آن توسط DEA طراحی شده است، پایدارساز پسفاز- پیشفاز طراحی شده با DEA (DELLPSS) و پایدارساز کلاسیک (CPSS) نشان می‌دهد.

## ۲- مدل سازی

### ۲-۱- مدل سازی سیستم قدرت

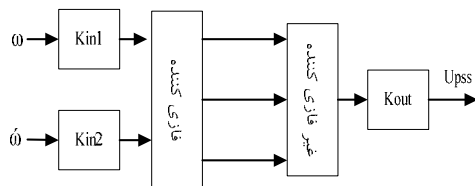
مدل یک سیستم قدرت را می‌توان به وسیله مدل کردن ژنراتورها، بارها و دیگر وسایل مثل تجهیزات کنترلی سیستم و ارتباط دادن آنها با معادلات جبری مناسب شبکه، با یک سری معادلات جبری دیفرانسیلی نشان داد. این معادلات جبری دیفرانسیلی به صورت رابطه (۱) قابل بیان هستند.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x(t), z, u(t)) \\ 0 &= g(x(t), z, u(t)) \\ y(t) &= h(x(t), z) \end{aligned} \quad (1)$$

که  $x$  بردار متغیرهای حالت،  $z$  بردار متغیرهای جبری،  $u$  بردار ورودی،  $y$  بردار خروجی و  $f, g, h$  توابع غیر خطی هستند. اگر کنترلرهای غیر خطی مثل کنترلرهای فازی (FLC) در سیستم قدرت موجود باشند، مدل سیستم قدرت خیلی پیچیده می‌شود. با فرض وجود  $n$  تعداد FLPSS در سیستم، محدودیت زیر باید به رابطه (۱) اضافه شود.

$$\begin{aligned} u &= m(\theta, z, x(t)) \\ \theta &= [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n] \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\theta$  برداری است که پارامترهای کلیدی تعداد FLPSS را نشان می‌دهد و  $m$  تابعی غیر خطی از FLPSS‌هاست.



شکل (۲): ساختار پایه FLPSS

باید به سیستم اعمال شود، بر عهده دارد. سیگنال کنترلی تولیدی توسط FLPSS به عنوان سیگنال کمکی پایدار کننده به تنظیم کننده خودتنظیم ولتاژ ژنراتور اعمال می‌شود. تجربیات قبلی در دینامیک سیستم‌های کنترل شده و بررسی شکل موج ورودی و خروجی پایدارساز کلاسیک، معمولاً در طراحی قوانین مبنا در کنترلر فازی استفاده می‌شود. در جدول (۱) قوانین پایدارساز فازی ارائه شده است [۳].

جدول (۱): پایگاه قوانین FLPSS

$\Delta \dot{\omega} \rightarrow$ $\Delta \omega \downarrow$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PM	PB	PB

یک FLPSS دو گین ورودی و یک گین خروجی دارد. با ثابت در نظر گیری توابع عضویت این گین‌ها را می‌توان به گونه‌ای تنظیم کرد که FLPSS عملکرد بهینه‌ای از خود بروز دهد [۳]. بنابراین، ضرایب مقیاس بندی ورودی و خروجی کنترلر فازی به عنوان پارامترهای کلیدی برای طراحی انتخاب می‌شوند. با توجه به رابطه (۴) بردار زیر را می‌توان به  $i$  امین FLPSS در یک سیستم قدرت چند ماشینه ربط داد:

$$\theta_i = [K_{in1}^i, K_{in2}^i, K_{out}^i] \quad (4)$$

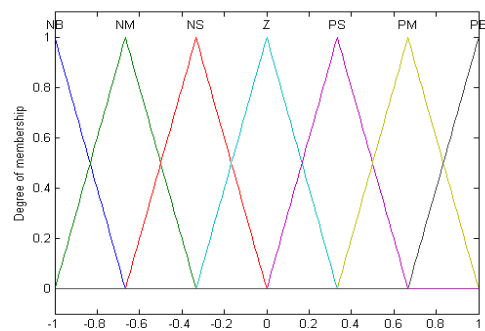
منظور از طراحی FLPSS بردار  $\theta$  یا طراحی ضرایب مقیاس بندی است.

### ۳- پایدارساز فازی خودتنظیم (SFLPSS)

#### پیشنهادی

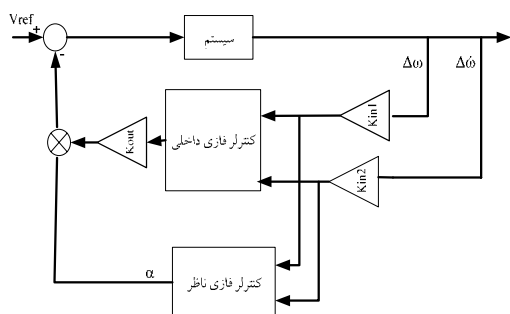
بلوک دیاگرام SFLPSS پیشنهادی در شکل (۴) نمایش یافته است. این ساختار شامل دو کنترلر فازی داخلی و کنترلر فازی ناظر است. کنترلر فازی ناظر با اعمال یک ضریب غیر خطی ( $\alpha$ ) به ضریب مقیاس بندی خروجی

توابع عضویت مربوط به سیگنال‌های ورودی و خروجی در هفت قسمت به صورت: منفی بزرگ (NB)، نسبتاً منفی (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZE)، مثبت کوچک (PS)، نسبتاً مثبت (PM) و مثبت بزرگ (PB) و به صورت مثلثی، متقارن و با ۵۰٪ همپوشانی در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۳) توابع عضویت در نظر گرفته شده برای سیگنال‌های ورودی و خروجی را نشان می‌دهد. محدوده مجاز ورودی اول [۱ -۱]، ورودی دوم [۱ -۱] و برای خروجی نیز [۱ -۱] انتخاب گردیده است. شیوه استنتاج از نوع ممدانی و شیوه غیر فازی‌سازی از نوع مرکز ثقل انتخاب شده است.

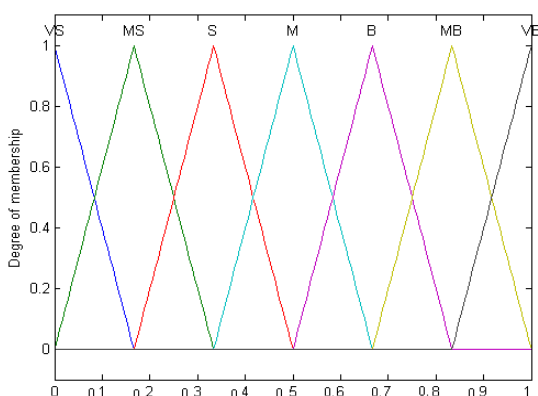


شکل (۳): توابع عضویت سیگنال‌های ورودی و خروجی

FLPSS



شکل (۴): ساختار SFLPSS پیشنهادی



شکل (۵): توابع عضویت مربوط به سیگنال خروجی کنترلر ناظر (α)

جدول (۲): پایگاه قوانین کنترلر فازی ناظر

$\Delta\dot{\omega}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	O11	O12	O13	O14	O15	O16	O17
NM	O21	O22	O23	O24	O25	O26	O27
NS	O31	O32	O33	O34	O35	O36	O37
ZE	O41	O42	O43	O44	O45	O46	O47
PS	O51	O52	O53	O54	O55	O56	O57
PM	O61	O62	O63	O64	O65	O66	O67
PB	O71	O72	O73	O74	O75	O76	O77

در سیستم قدرت چند ماشینه پایگاه قوانین برای کلیه پایدارسازها یکسان در نظر گرفته شده است.

#### ۴- الگوریتم تکامل تفاضلی (DEA)

الگوریتم جستجوی DEA یکی از روش‌های مؤثر بر مبنای جستجوست [۲۳]. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم با ایجاد یک جمعیت اولیه شروع به کار

کنترلر فازی داخلی، این کنترلر را به صورت روی خط تنظیم می‌کند. به علت تاثیر زیاد ضریب مقیاس بندی خروجی بر روی عملکرد و پایداری سیستم، تنظیم این ضریب مورد توجه قرار گرفته است. توابع عضویت تمامی متغیرهای ورودی دو کنترلر و تابع عضویت متغیر خروجی کنترلر داخلی در بازه نرمالیزه [۰ ۱] - تعریف شده‌اند، در حالی که تابع عضویت مربوط به  $\alpha$ ؛ یعنی خروجی کنترلر فازی ناظر در بازه نرمالیزه [۰ ۱] در نظر گرفته شده است. توابع عضویت مربوط به سیگنال‌های ورودی دو کنترلر و سیگنال خروجی کنترلر داخلی در هفت قسمت همانند شکل (۳) در نظر گرفته شده‌اند. توابع عضویت مربوط به سیگنال خروجی کنترلر ناظر مطابق با شکل (۵) در هفت قسمت به صورت: خیلی بزرگ (VB)، بزرگ متوسط (MB)، بزرگ (B)، متوسط (M)، کوچک (S)، کوچک متوسط (MS) خیلی کوچک (VS) و به صورت مثلثی، مقارن و با ۵۰٪ همپوشانی در نظر گرفته شده‌اند. قوانین کنترلر فازی داخلی مطابق با جدول (۱) و قوانین کنترلر ناظر به صورت جدول (۲) نمایش یافته است.

ضرایب مقیاس بندی کنترلر فازی داخلی و قوانین پایگاه قوانین کنترلر فازی ناظر به عنوان پارامترهای کلیدی SFLPSS انتخاب شده‌اند. بنابراین، بردار پارامترهای کلیدی آمین SFLPSS در سیستم قدرت به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\theta_i = [K_{in1}^i, K_{in2}^i, K_{out}^i, O_{11}, O_{12}, \dots, O_{77}] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } u \leq CR \text{ or } j = k \\ \text{then } & Z_{i,j} = x_{r1,j} + F(x_{r3,j} - x_{r2,j}) \\ & \text{else} \\ & Z_{i,j} = x_{i,j} \end{aligned} \quad (8)$$

که  $Z$  شماره هر متغیر از  $\lambda$ مین عضو جمعیت است. همچنین عدد CR ثابت همبری است و عددی بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود.

#### ۴-۳- مرحله تخمین و انتخاب

در این مرحله، نوزادها و والد‌ها با توجه به تابع هدف، ارزش دهی می‌شوند و در صورتی که نوزاد، ارزشی بیش از والد داشته باشد، جایگزین والد می‌گردد. در غیر این صورت، والد خود به همراه نسل بعدی به مرحله بعد می‌رود.

$$z_{i,g+1} = \operatorname{argmax}(f(z_i, g), f(z_i, g+1)) \quad (9)$$

در این رابطه، اندیس  $g$  نشان دهنده نسل است،  $Z_{i,g+1}$  جمعیت نسل جدید (نوزادها) و  $Z_{i,g}$  جمعیت نسل قبل (والدها) هستند. تابع  $f$  همان تابع هدف مسأله مطابق با رابطه (۳) است.

#### ۴-۴- تکرار

انجام مراحل ۳ و ۲ تا رسیدن به ماکزیمم تکرار یا همگرایی کل جمعیت.

#### ۵- تنظیم پارامترهای PSS توسط DEA

شکل (۶) دیاگرام تک خطی یک ماشین در یک سیستم قدرت چند ماشینه است. برای حفظ تراز ولتاژ در محدوده مطلوب، ماشین به رگولاتور اتوماتیک ولتاژ مجهز شده است. انواع مختلفی از پایدارسازهایی که معرفی شد برای شبیه‌سازی و مقایسه نتایج مطابق شکل (۶) بر روی ژنراتورهای سیستم نصب شده است.

می‌کند. سپس با اعمال عملگرهایی شامل ترکیب، جهش و تقاطع، نسل نوزاد تشکیل شده و در مرحله بعد که مرحله انتخاب نام دارد، نسل نوزاد با نسل والد از برای میزان شایستگی که توسط تابع هدف سنجیده می‌شود، مقایسه می‌گردد. سپس بهترین اعضا به عنوان نسل بعدی وارد مرحله بعد می‌گردند. این عمل تا رسیدن به نتایج مطلوب ادامه می‌یابد. در این قسمت، به ترتیب مراحل عملکرد این الگوریتم بیان شده است.

#### ۴-۱- ایجاد جمعیت اولیه

تعداد متغیرهای مسأله در این الگوریتم با  $D$  نشان داده می‌شود. هر یک از این متغیرها دارای یک حد بالا و یک حد پایین هستند. جمعیت اولیه در اندازه NP در  $D$  به صورت تصادفی مطابق رابطه (۶) تشکیل می‌شود.

$$X_{i0} = X_i \min + \operatorname{round}(\delta_i \cdot (X_i \max - X_i \min)) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, Np$$

که  $\delta_i$  عددی تصادفی در بازه  $[0, 1]$ ،  $X_i \max$  و  $X_i \min$  حدود بالا و پایین متغیرهای مسأله و  $Np$  تعداد اعضا هستند.

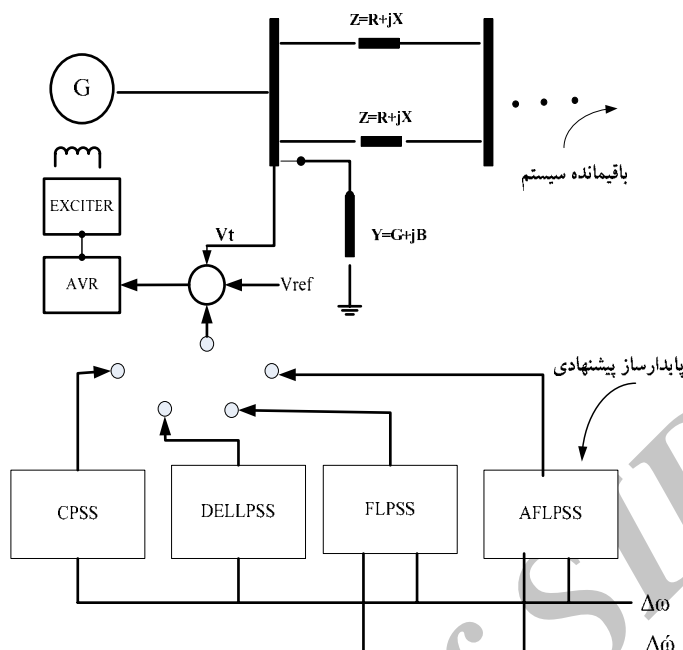
#### ۴-۲- جهش<sup>۱۱</sup> و همبری<sup>۱۲</sup>

در این الگوریتم از پنج استراتژی برای ترکیب و تولید نوزاد می‌توان بهره جست [۲۳]. در این مقاله از استراتژی شخص بهترین- شخص رندوم- شخص رندوم<sup>۱۳</sup> برای انجام جهش به صورت زیر استفاده شده است.

$$z_{i,G} = X_{best,G} + F \cdot (X_{r1,G} - X_{r2,G} + X_{r3,G} - X_{r4,G}) \quad (7)$$

که در این رابطه،  $F$  فاکتور معیار نامیده می‌شود.  $X_r$  ها اعضای انتخابی به صورت تصادفی هستند. همچنین  $X_{best}$  بهترین عضو جمعیت حاضر است.

برای هر متغیر از هر عضو جمعیت یک عدد رندوم  $K$  در بازه  $[1; D]$  و یک عدد تصادفی  $u$  در بازه  $[0; 1]$  انتخاب شده، همبری مطابق با رابطه زیر انجام می‌گیرد:



شکل (۶): نمای یک ماشین در سیستم چند ماشینه به همراه انواع پایدارساز و AVR

خروجی حد پایین و بالا بترتیب ۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است [۳]. محدوده تغییرات پارامترهای DELLPSS در جدول (۳) [۱۳] و پارامترهای DEA در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۳): حدود پارامترهای DELLPSS

Ks	T1	T2	
1	0.001	0.001	حد پایین
50	2	2	حد بالا

جدول (۴): پارامترهای DEA

ITERmax	F	PC	NP
30	1.2	0.5	50

بهترین بردار پارامترهای کلیدی (روابط ۳.۴ و ۵) مطابق با شکل (۷) توسط الگوریتم بهینه‌سازی DEA محاسبه می‌گردد. هر عضو جمعیت از جمعیت والد اولیه، بیانگر برداری از پارامترهای کلیدی پایدارسازهاست. با پخش باری که از سیستم صورت می‌گیرد، میزان تابع هدف با توجه به رابطه (۱۰)، برای این عضو جمعیت محاسبه می‌گردد. این عملیات برای کلیه اعضای والد حاضر در جمعیت اولیه انجام می‌پذیرد. پس از طی این مرحله، عملگرهای الگوریتم

برای به کارگیری DEA برای طراحی بردار پارامترهای کلیدی پایدارسازها، به تابع هدف مناسبی برای اعمال به الگوریتم نیاز است. از آنجا که هدف از به کارگیری پایدارساز در سیستم کاهش نوسان‌های الکترومکانیکی است، بنابراین، از معیار ITAE<sup>۱۴</sup> مطابق با رابطه (۱۰) که برابر با مجموع انتگرال زمانی خطای سرعت ماشین‌های سیستم است، استفاده می‌شود. از طرف دیگر، در الگوریتم DEA مطابق با معادله (۹)، تابع  $f$  که همان تابع هدف مسأله است، باید ماکزیمم گردد. از این رو، تابع هدف DEA به صورت رابطه (۱۱) انتخاب گردیده است.

$$ITAE = \int t |e_1(t)| + \int t |e_2(t)| + \dots + \int t |e_n(t)| \quad (10)$$

$$OF = \frac{1}{\int t |e_1(t)| + \int t |e_2(t)| + \dots + \int t |e_n(t)|} \quad (11)$$

جایی که  $e$  خطای تغییرات سرعت ماشین،  $t$  زمان شبیه‌سازی و  $n$  تعداد ماشین‌های سیستم است. محدودیت زیر نیز باید به هنگام بهینه‌سازی  $OF$  در نظر گرفته شود:

$$\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max} \quad (12)$$

حد بالا و پایین ضرایب مقیاس بندی ورودی بترتیب ۰ و ۱۰۰۰ انتخاب شده است و برای ضریب مقیاس بندی

جمعیت متناظر در جمعیت نوزاد مقایسه می‌گردد و بهترین عضو جمعیت طبق رابطه (۹) به عنوان جمعیت والد نسل بعدی انتخاب می‌گردد. عملیات بالا تا رسیدن به معیار همگرایی، که در این مقاله رسیدن به تعداد تکرار معین است، ادامه می‌یابد. در نهایت، پس از توقف الگوریتم، بهترین بردار شامل پارامترهای پایدارساز استخراج می‌گردد.

همانند جهش و همبری به ترتیب طبق روابط (۷) و (۸) بر روی جمعیت والد اولیه اعمال می‌گردد و بدین ترتیب، جمعیت نوزاد شکل می‌گیرد. برای هر عضو جمعیت از این جمعیت جدید نیز پخش بار انجام شده، میزان شایستگی یا همان تابع هدف برای آنها تعیین می‌گردد. در این قسمت، شایستگی هر عضو در جمعیت والد با شایستگی عضو



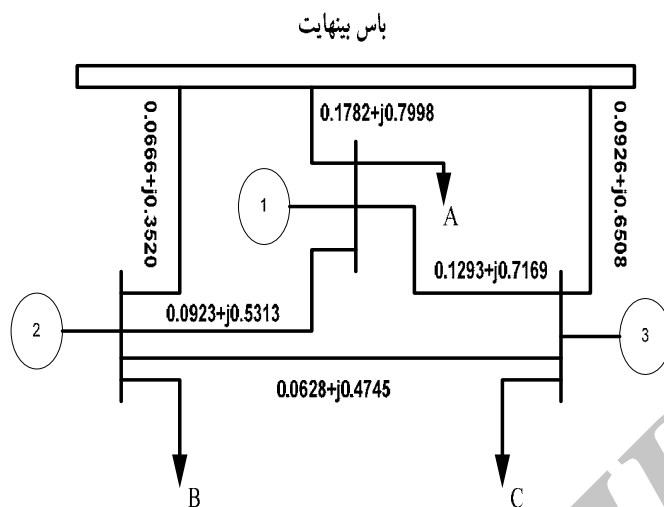
شکل (۷): فلوچارت حل مسأله با استفاده از الگوریتم DEA

DELLPSS و FLPSS، SFLPSS برای ماشین‌های سیستم توسط DEA طراحی شده است و عملکرد این پایدارسازها با CPSS مقایسه شده است.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

یک سیستم سه ماشینه متصل به شین بینهایت در شکل (۸) نمایش یافته است. اطلاعات سیستم به همراه پارامترهای CPSS در [۲۴] ارائه شده است. طراحی





شکل (۸): سیستم سه ماشینه متصل به شین بینهایت

سیستم را با حضور SFLPSS یا FLPSS نشان می‌دهند و عملکرد بهتر و مناسبتر SFLPSS پیشنهادی در میرایی سریع نوسان‌های سیستم بخوبی قابل مشاهده است.

جدول (۵): ضرایب مقیاس بندی بهینه شده SFLPSS

ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	
۴/۵	۵	۵	Kin1
۹/۴	۷/۹	۲/۲	Kin2
۳/۶	۸	۷/۶	Kout

جدول (۶): ضرایب مقیاس بندی بهینه شده FLPSS

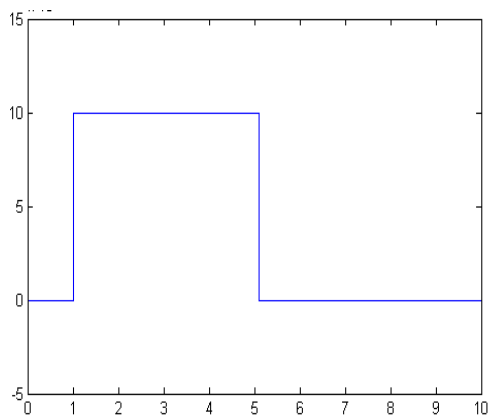
ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	
۲۸/۸	۸۸/۵	۹۶/۷	Kin1
۴۹	۶۶/۹۷	۹۶/۴	Kin2
۰/۲۹	۰/۴۵	۰/۹۷	Kout

جدول (۷): پارامترهای بهینه‌سازی شده DELLPSS توسط

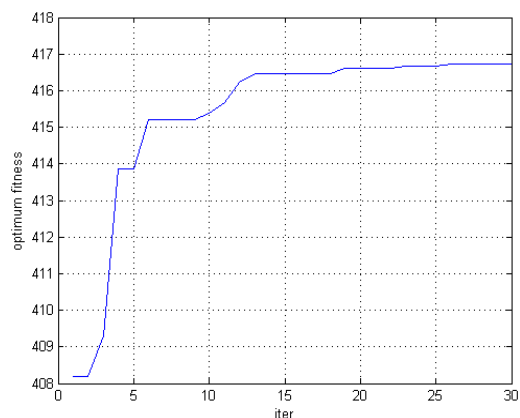
## الگوریتم DE

ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	
۰/۹۷	۱/۹۴	۱/۳۶	T1
۰/۹۲	۱/۷	۰/۹۲	T2
۴۸	۲۱	۱۰	Ks

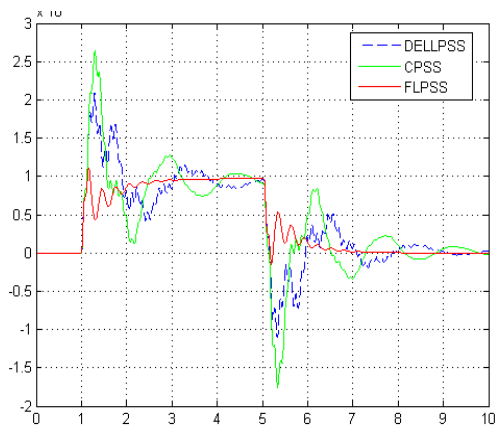
ضرایب مقیاس بندی طراحی شده SFLPSSها و FLPSSها بترتیب در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است. پارامترهای طراحی شده DELLPSS در جدول (۷) آورده شده است. نمودارهای همگرایی DEA برای تنظیم پارامترهای SFLPSS، FLPSS و DELLPSS بترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۱) قابل مشاهده است. همان گونه که مشخص است، برای تنظیم SFLPSS همگرایی DEA در سطح بالاتری از تابع هدف رخ داده است و این خود تایید کننده کارایی بهتر این پایدارساز است. برای اطمینان از این موضوع، با ایجاد تغییر در گشتاور مکانیکی ورودی ماشین ۱ مطابق شکل (۱۲)، تغییرات زاویه رتور ماشین‌ها بررسی شده است. شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) منحنی تغییرات زاویه رتور ماشینها را در حالت‌هایی که از CPSS یا DELLPSS و یا FLPSS بر روی ماشین‌های سیستم استفاده شده، نشان می‌دهند. همان گونه که مشخص است، FLPSS عملکرد بهتری نسبت به دو نوع پایدارساز دیگر نشان داده است. با بکارگیری DELLPSS به جای CPSS، میزان اورشوت و زمان نشست سیگنال تغییرات زاویه رتور ماشین‌های سیستم کاهش یافته است و این پارامترها با به کارگیری FLPSS به جای DELLPSS بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده‌اند. در مرحله بعد SFLPSS پیشنهادی استفاده شده و برای نتیجه گیری، عملکرد آن با FLPSS مقایسه شده است. شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) تغییرات زاویه رتور ماشین‌های



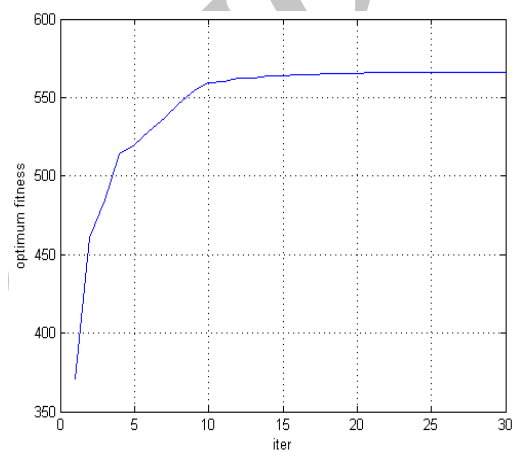
شکل (۱۲): تغییرات گشتاور مکانیکی ماشین یک



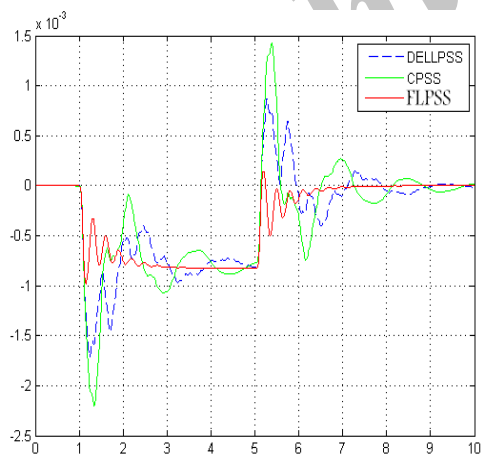
شکل (۹): نمودار همگرایی DE در طراحی DELLPSS



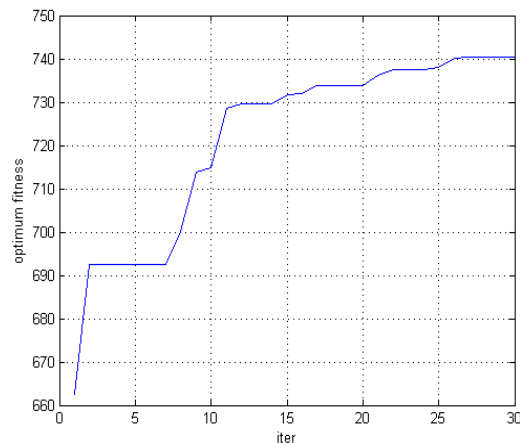
شکل (۱۳): تغییرات زاویه رتور ماشین یک



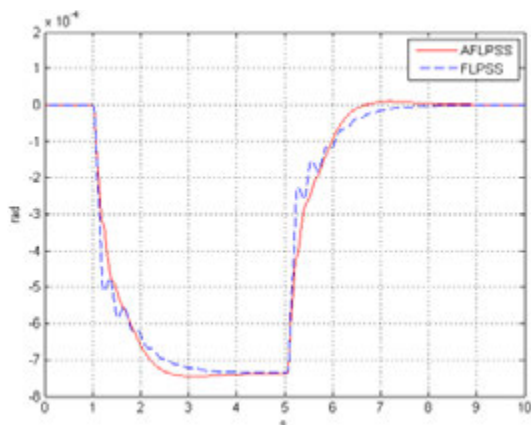
شکل (۱۰): نمودار همگرایی DE در طراحی FLPSS



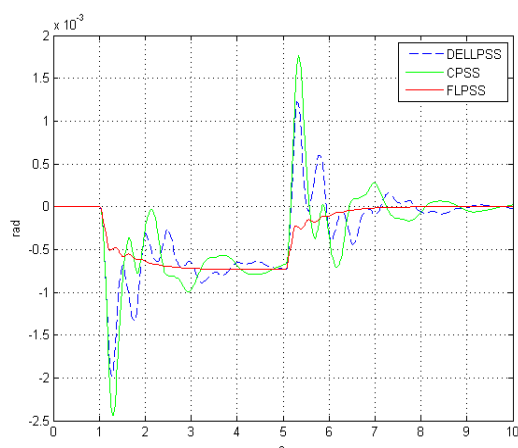
شکل (۱۴): تغییرات زاویه رتور ماشین دو



شکل (۱۱): نمودار همگرایی DE در طراحی SFLPSS



شکل (۱۸): تغییرات زاویه رتور ماشین سه

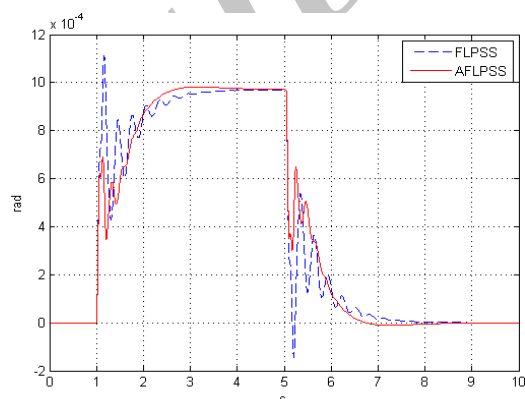


شکل (۱۵): تغییرات زاویه رتور ماشین سه

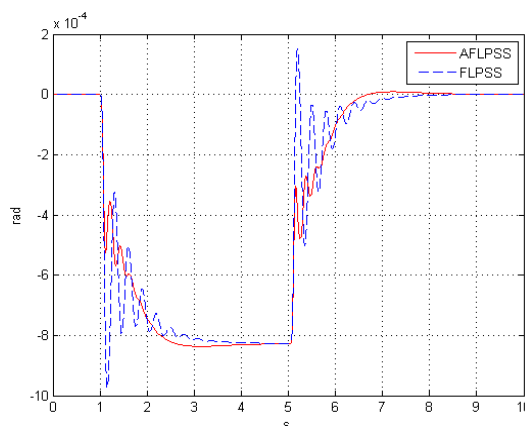
همان گونه که از شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) مشخص است، SFLPSS پیشنهادی عملکرد بهتر و مناسبتری در مقایسه با FLPSS از خود نشان داده است و نوسان‌های زاویه رتور ماشین‌های سیستم بلافاصله پس از ایجاد اغتشاش، میرا شده است. میزان بالادگی کمتر و همچنین، زمان نشست کمتر مؤید این مطلب است.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک پایدارساز فازی خودتنظیم در ترکیب با الگوریتم تکامل تفاضلی برای میرایی نوسان‌های سیستم‌های قدرت چند ماشینه، ارائه شده است. پایدارساز پیشنهادی شامل یک کنترلر فازی داخلی و یک کنترلر فازی ناظر است. کنترلر فازی ناظر وظیفه تنظیم ضریب مقیاس بندی خروجی کنترلر داخلی را با توجه شرایط عملکرد سیستم بر عهده دارد. الگوریتم تکامل تفاضلی در حالت خارج خط برای تنظیم پارامترهای پایدارساز استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در یک سیستم قدرت چند ماشینه، کارایی بهتر پایدارساز پیشنهادی را در مقایسه با انواع دیگر پایدارساز، شامل پایدارساز فازی معمولی، پایدارساز پسفاز- پیشفاز طراحی شده با DEA و پایدارساز کلاسیک نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): تغییرات زاویه رتور ماشین یک



شکل (۱۷): تغییرات زاویه رتور ماشین دو

## ۸- پیوست

## اطلاعات مربوط به سیستم سه ماشینه

Machine	$x_d$	$x_q$	$x'_d$	$T_{do}'$	$H$	$K_A$	$T_A$	Base quantities	
1	1.68	1.66	0.32	4.0	2.31	40	0.05	360 MVA	13.8 kV
2	0.88	0.53	0.33	8.0	3.4	45	0.05	503 MVA	13.8 kV
3	1.02	0.57	0.20	7.76	4.63	50	0.05	1673 MVA	13.8 kV

Busbar power flow				
Busbar	$P_0$ (MW)	$Q_0$ (MVar)	$V_{10}$ (p.u.)	$\delta_0$
1	26.5	37.0	1.03	10.0
2	518.0	-31.5	1.025	32.52
3	1582.0	-69.9	1.03	45.82
4	410.0	49.1	1.06	20.69

A =

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.147 & -0.139 & -0.013 & 0 & 0.022 & 0.004 & 0 & 0 & 0.046 & 0.02 & 0.003 & 0 \\ -0.266 & -3.393 & -0.922 & 1 & -0.087 & 0.754 & 0.024 & 0 & -0.25 & 1.31 & 0.072 & 0 \\ -30.1 & -309.14 & 60.943 & -20 & -24.599 & -91.99 & -3.501 & 0 & 62.051 & -1675 & -10.194 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.004 & -0.034 & -0.00645 & 0 & -0.149 & 0.032 & -0.008 & 0 & 0.079 & -0.028 & 0 & 0 \\ 0.121 & 1.131 & 0.021 & 0 & -1.6 & -1.885 & -0.21 & 1 & 0.46 & 0.754 & 0.06 & 0 \\ -18.48 & -64.47 & -12.55 & 0 & 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 & 16.99 & -171.91 & -11.41 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0.001 & -0.017 & -0.003 & 0 & 0.017 & -0.01 & 0 & 0 & -0.056 & -0.017 & -0.009 & 0 \\ 0.083 & 0 & -0.002 & 0 & 0.22 & 0 & 0.011 & 0 & -1.2 & -1.131 & -0.197 & 1 \\ 10.1 & -33.93 & -6.78 & 0 & 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 & 70.1 & -893.49 & -54.4 & -20 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 900 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 \end{bmatrix}^T$$

## مراجع

- machine system", IEEE Trans. Power Appar. System, Vol. 5, pp. 353-358, 1990.
- [5] R.J. Fleming, J. Sun, "An optimal multivariable stabilizer for a multimachine plant", IEEE Trans. Energy Conv., Vol. 5, pp.15-22, 1990.
- [6] P. S. Rao and E. S. Boje, "A quantitative design approach to PSS tuning," Electric Power Systems Research, Vol. 73, pp. 249-256, 2005.
- [7] Y. M. Park and W. Kim, "Discrete-time adaptive sliding mode power system stabilizer with only input/output measurements," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18,
- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [2] K. E. Bollinger, A. Laha, R. Hamilton, and T. Harras, "Power system stabilizer design using root locus methods," IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-94, pp. 1484-1488, 1975.
- [3] A. M. El-Zonkoly, A. A. Khalil, and N. M. hmied, "Optimal tuning of lead-lag and fuzzy logic power system stabilizers using particle swarm optimization," Expert Systems with Applications, Vol. 36, pp. 2097-2106, 2009.
- [4] Y.N. Yu, Q.H. Li, "Pole-placement power system stabilisers design of an unstable nine-

- partitions," *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, pp. 1229-1217, 2008.
- [17] T.Hussein, M.S. Saad, A.L. Elshafei, A. Bahgat, "Damping inter-area modes of oscillation using an adaptive fuzzy power system stabilizer," *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, pp. 1428-1436, 2010.
- [18] T. Hussein, M.S. Saad, A.L. Elshafei, A. Bahgat, "Robust adaptive fuzzy logic power system stabilizer," *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 12104-12112, 2009.
- [19] G.-H. Hwanga, D.-W.Kimb, J.-H.Lee, and Young-Joo, "Design of fuzzy power system stabilizer using adaptive evolutionary algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Vol. 21, pp. 86-96, 2008.
- [20] H. X. Li, H. B. Gatland, and A. W. Green, "Fuzzy Variable Structure Control," *IEEE Trans. on Sys. Man and Cybernetics*, Vol. 27, 1997.
- [21] S.S. Mortazavi and "Design & Tuning of Fuzzy Logic Control System," PHD Thesis, Indian Institute of Technology Dehli, January 1999.
- [22] R. K. Mudi and N. R. Pal, "A self-tuning fuzzy PI controller," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 115, pp. 327-338, 2000.
- [23] K. V. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen, "Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization", (Kindle Edition). Springer, 2005.
- [24] C. L. Chen and Yuan Yih Hsu, "Coordinated Synthesis of Multimachine Power System Stabilizer Using an Efficient Decentralized Modal Control (DMC) Algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 543-550, 1987.
- [۲۵] جلال رضوی مقدم، امین خدابخشیان "یک پایدارساز فازی جدید با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی برای سیستم‌های قدرت چند ماشینه" کنفرانس سیستم‌های قدرت، پژوهشکده نیرو، تهران، ۱۳۸۸.
- pp. 509-517, 1996.
- [8] A. G. Loukianov, "Nonlinear block control with sliding mode," *Selfmation Remote Control*, Vol. 59, pp. 916-933, 1998.
- [9] E. A. Talaat, A. Abdenmour, A. Al-Sulaiman, "Design and experimental investigation of a decentralized GA-optimized neuro-fuzzy power system stabilizer," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, pp. 751-759, 2010.
- [10] H. Shayeghi, A. Safari, and H. A. Shayanfar, "Multimachine Power System Stabilizers Design Using PSO Algorithm," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 4, pp. 226-233, 2009.
- [11] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, A. Safari, R. Aghmasheh, "A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 696-702, 2010.
- [12] S. Mishra, M. Tripathy, and J. Nanda, "Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, pp. 1595-1607, 2007.
- [13] S. K. Wang, J. P. Chiou, and C. W. Liu, "Parameters tuning of power system stabilizers using improved ant direction hybrid differential evolution," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 31, pp. 34-42, 2009.
- [14] S.Kamalasadan, G.D Swann, "A Novel System-Centric Intelligent Adaptive Control Architecture for Damping Interarea Mode Oscillations in Power System" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 3, pp. 1487-1497, 2011.
- [15] M. Soliman, A. Elshafei, F. Bendary, and W. Mansour, "LMI static output-feedback design of fuzzy power system stabilizers," *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 6817-6825, 2009.
- [16] D. E. Kvasov, D. Menniti, A. Pinnarelli, Y. D. Sergeyev, and N. Sorrentino, " Tuning fuzzy power-system stabilizers in multi-machine systems by global optimization algorithms based on efficient domain

زیرنویس‌ها

- 
- 1 - Differential Evolution Algorithm
  - 2 - Auto Tuning Fuzzy Logic Power System Stabilizer
  - 3 - Fuzzy Logic Power System Stabilizer
  - 4 - Differential Evolution Lead- Lag Pss
  - 5 - Conventional Pss
  - 6 - Power System Stabilizer
  - 7 - Genetic Algorithm
  - 8 - Particle Swarm Optimization
  - 9 - Bacteria Foraging Algorithm
  - 10 - Fuzzy Logic Controller
  - 11- Mutation
  - 12- Crossover
  - 13- Best- Rand- Rand
  - 14- Integral of Time Absolute Error

Archive of SID