

## طراحی چندمنظوره پایدارسازهای سیستم قدرت چندماشینه با الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

سعید جلیل زاده<sup>۱</sup>، حسین شایقی<sup>۲</sup>، حیدرعلی شایانفر<sup>۳</sup>، خلیل ولی‌پور<sup>۲</sup>، امین صفری<sup>۱</sup>، علی شایقی<sup>۲</sup>

۱. دانشکده فنی دانشگاه زنجان

۲. دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی

۳. قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری از سیستم قدرت، دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده: در این مقاله، طراحی چندمنظوره پایدارسازهای سیستم قدرت چندماشینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات ارائه شده است. پارامترهای پایدارسازها به طور همزمان طوری تنظیم می‌شوند که مدهای الکترومکانیکی ناپایدار و با میرایی ضعیف را به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط انتقال دهند. مساله چندمنظوره به صورت مجموعه‌ای از توابع هدف مبتنی بر ضریب میرایی و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی ناپایدار و با میرایی ضعیف فرمول‌بندی شده و آنگاه تنظیم پارامترهای پایدارسازها با بهینه‌سازی توابع هدف براساس مقادیر ویژه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات حل می‌شود. عملکرد پایدارسازهای طراحی شده روی یک سیستم قدرت چندماشینه تحت شرایط کاری مختلف بر اساس معیارهای عملکردی معرفی شده و تحلیل مقادیر ویژه مورد تست قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از موثر بودن پایدارسازهای طراحی شده بر اساس تابع هدف چندمنظوره دارد. واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، بهینه‌سازی چندمنظوره، پایداری دینامیکی سیستم قدرت، طراحی PSS.

### ۱. مقدمه

پایداری سیستم‌های قدرت یکی از جنبه‌های مهم در عملکرد سیستم‌های الکتریکی بوده و بایستی سیستم کنترلی اندازه فرکانس و ولتاژ را تحت هر اغتشاشی در سطوح ثابتی حفظ کنند [۱]. توسعه سیستم‌های قدرت بزرگ و اتصال آنها به هم باعث ایجاد نوساناتی با فرکانس خیلی پایین در محدوده ۰/۲ تا ۳ هرتز می‌شود. این نوسانات به مدت طولانی در سیستم ادامه داشته و در بسیاری از موارد اگر میرایی کافی ایجاد نشود دامنه این نوسانات افزایش یافته و باعث جداسازی و ناپایداری سیستم شده و در نتیجه باعث محدود شدن ظرفیت توان انتقالی می‌شوند. برای میرا کردن این نوسانات ژنراتورها مجهز به پایدارساز سیستم قدرت هستند تا سیگنال پایدارکننده مکملی را برای سیستم تحریک فراهم کنند [۲]. در بسیاری از مقالات برای طراحی PSS از تحلیل حساسیت مقادیر ویژه تحت شرایط کاری سیستم استفاده شده است [۳]. یک روش جدید برای طراحی غیر متمرکز بهینه PSS با پس‌خور خروجی در

مرجع [۴] بررسی شده است. اگر پایدارسازها با طرح کنترلی پس‌خور حالت وفق داده شوند نیاز به تخمین زنده‌ها و کنترل‌کننده‌های متمرکز بوده تا متغیرهای حالت که در دسترس نیستند اندازه گرفته شوند. در نتیجه این عوامل باعث افزایش هزینه سخت‌افزاری و کاهش قابلیت اطمینان سیستم کنترل می‌شوند. روش‌های طراحی کنترل هوشمند مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی [۵و۶] نیز برای طراحی PSS استفاده شده است. برخلاف روش‌های کنترلی کلاسیک، کنترل‌کننده‌های فازی و عصبی کنترل‌کننده‌هایی با مدل آزاد بوده و نیازی به مدل ریاضی دقیقی از سیستم کنترل شده ندارند. بنابراین سرعت و استقامت بالاتری نسبت به سایر روش‌های کلاسیک دارند.

با وجود توانایی روش‌های کنترل پیشرفته با ساختارهای مختلف، هنوز پایدارساز پیش‌فاز-پس‌فاز کلاسیک<sup>۱</sup> (CPSS) ترجیح داده می‌شود. برای این‌که این نوع پایدارسازها به راحتی تنظیم شده و اطمینان لازم از پایداری

<sup>1</sup> Classical Power System Stabilizer

PSO در میرا کردن نوسانات در شرایط بارگذاری مختلف است.

## ۲. تئوری مساله

### ۲-۱. مدل سیستم قدرت

مدل غیرخطی سیستم قدرت بزرگ بهم پیوسته  $n$ -ماشینه با مجموعه‌ای از معادلات جبری-دیفرانسیلی توصیف شده که ناشی از مدل‌های ژنراتورها، بارها و سایر ادوات همچون سیستم‌های کنترل که از طریق معادلات جبری شبکه بهم اتصال داده می‌شوند، است. در این مقاله ژنراتورهای سیستم قدرت با مدل هفرون-فیلپس بیان شده و تئوری مساله طراحی کردن پارامترهای PSS می‌باشد. مدل دو محوری [۲] که معادلات آن در [۱۰] داده شده، برای شبیه‌سازی در حوزه زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲-۲. ساختار PSS

عملکرد اصلی PSS تولید گشتاور مناسب روی روتور ماشین بوده بطوری که وضعیت پس‌فازی میان ورودی تحریک و گشتاور الکتریکی جبران شود. سیگنال خروجی پایدارساز متناسب با سرعت روتور است [۲]. تابع تبدیل PSS ماشین نام به صورت زیر است:

$$U_i = K_i \frac{sT_w}{1+sT_w} \left[ \frac{(1+sT_{1i})(1+sT_{3i})}{(1+sT_{2i})(1+sT_{4i})} \right] \Delta\omega_i(s) \quad (1)$$

$\Delta\omega$  انحراف سرعت از سرعت سنکرون است. این پایدارساز شامل یک فیلتر صافی و یک جبرانگر دینامیکی است. سیگنال خروجی پایدارساز،  $U_i$ ، به عنوان ورودی مکمل تغذیه‌کننده سیستم تحریک می‌باشد. در ساختار فوق فیلتر صافی، یک فیلتر بالاگذر است و مقدار ثابت زمانی آن در محدوده  $0.5$  تا  $20$  ثانیه می‌باشد. در این مقاله مقدار  $T_w$  برابر با  $10$  ثانیه در نظر گرفته شده است. جبرانگر دینامیکی نیز دارای دو بلوک پس‌فاز-پیش‌فاز و یک بهره‌تناسبی است. پارامترهای قابل تنظیم بهره PSS،  $K_i$ ، و ثابت‌های زمانی  $T_{1i} - T_{4i}$  است. بلوک پس‌فاز-پیش‌فاز در ساختار فوق مقدار فاز لازم را برای جبران کردن اختلاف فاز میان ورودی تحریک و گشتاور الکتریکی فراهم می‌کند حتی اگر ثابت زمانی‌های مخرج  $T_{2i}$  و  $T_{4i}$  ثابت باشند این مقدار پیش‌فازی توسط PSS جبران خواهد شد. بنابراین برای کاهش بار محاسباتی مقادیر  $T_{2i}$  و  $T_{4i}$  برابر با  $0.5$  ثانیه در

سیستم حاصل می‌شود [۷و۱]. روش گرادیان برای بهینه‌سازی پارامترهای CPSS در شرایط عملکرد مختلف در مرجع [۸] ارائه شده است. متأسفانه، فرایند بهینه‌سازی نیاز به محاسبه عوامل حساسیت بردارهای ویژه در هر تکرار دارد و این باعث افزایش بار محاسباتی و کاهش سرعت همگرایی می‌شود. بنابراین روش‌های بهینه‌سازی معمولی که از مشتق و گرادیان استفاده می‌کنند قادر به شناسایی جواب بهینه جهانی نبوده و می‌توان از روش‌های هوشمند برای مسایل بهینه‌سازی استفاده کرد. اخیراً روش‌های بهینه‌سازی جهانی مثل الگوریتم ژنتیک، برنامه‌نویسی تکاملی، فرایند آبکاری فولاد [۹-۱۱] برای بهینه‌سازی پارامترهای PSS به کار گرفته شده است. الگوریتم‌های تکاملی روش‌هایی براساس جمعیت هوشمند بوده که دارای تغییر تصادفی و عملگرهای انتخابی هستند. اگر چه این الگوریتم‌ها روش‌های مناسبی برای مساله بهینه‌سازی هستند. ولی اگر تعداد پارامترهای بهینه‌سازی بیشتر باشد بازده آنها کاهش و زمان محاسبات افزایش می‌یابند. روش PSO در مسایل بهینه‌سازی که غیرخطی و مشتق‌ناپذیر و یا دارای ابعاد زیادی هستند توانمند بوده و بسیاری از مشکلات الگوریتم ژنتیک را ندارد. در مرجع [۱۴] از الگوریتم PSO برای طراحی PSS استفاده شده است. در این الگوریتم وزن اینرسی با مقدار اولیه یک و دارای رابطه خطی با شیب  $0.98$  می‌باشد به طوری که اشاره‌ای به مقدار مینیمم  $\omega$  نشده است. در این مقاله برای غلبه بر این مشکلات، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با وزن اینرسی نزولی که بطور خطی از مقدار  $0.9$  تا  $0.4$  در طول اجرا برنامه تغییر می‌کند، برای طراحی PSS پیشنهاد شده است.

در این مقاله طراحی PSS مقاوم بعنوان یک مساله بهینه‌سازی چندمنظوره فرمول‌بندی شده و با استفاده از الگوریتم PSO حل می‌شود. مساله چندمنظوره به صورت ترکیبی از توابع هدف براساس ضریب میرایی و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی ناپایدار و با میرایی ضعیف بیان می‌شود. PSS طراحی شده با PSO روی سیستم سه-ماشینه نه شینه تحت شرایط کاری مختلف آزمایش شده و نتایج شبیه‌سازی با تحلیل مقادیر ویژه و شاخص‌های عملکردی ارزیابی می‌شود که نشان‌دهنده برتری عملکرد PSS طراحی شده براساس تابع هدف چندمنظوره بوسیله

در روش پیشنهادی از الگوریتم PSO برای حل مساله بهینه‌سازی استفاده شده و مجموعه جواب‌های بهینه برای پارامترهای PSS تعیین می‌شود.

نظر گرفته شده است و فقط پارامترهای  $T_{li}$  و  $T_{3i}$  و  $K_i$  برای جبران‌سازی فاز تنظیم می‌شوند.

### ۳-۲. تابع هدف

(۱) در این نوع تابع معیار تک‌منظوره مقادیر ویژه حلقه بسته در سمت چپ خط عمودی مطابق با یک ضریب میرایی مشخص انتقال داده می‌شوند. پارامترهای PSS طوری انتخاب می‌شوند که تابع معیار زیر حداقل شود [۱۱]:

$$J_1 = \sum_{\sigma_i \geq \sigma_0} (\sigma_0 - \sigma_i)^2 \quad (2)$$

که در آن  $\sigma_i$  قسمت حقیقی مقدار ویژه  $\lambda_m$  و  $\sigma_0$  مقدار ضریب میرایی مشخص می‌باشد. مقدار  $\sigma_0$  سطح مطلوبی از میرایی سیستم را نشان می‌دهد. این سطح با انتقال دادن مقادیر ویژه غالب به سمت چپ خط  $s = \sigma_0$  در صفحه مختلط حاصل شده که این کار باعث تامین پایداری نسبی در سیستم می‌شود.

(۲) برای محدود کردن حداکثر فرجهش، پارامترهای PSS طوری طراحی می‌شود که تابع هدف زیر حداقل شود [۹]:

$$J_2 = \sum_{\zeta_i \leq \zeta_0} (\zeta_0 - \zeta_i)^2 \quad (3)$$

که در آن  $\zeta_i$  نسبت میرایی مقدار ویژه  $\lambda_m$  و  $\zeta_0$  نسبت میرایی مطلوب است. این تابع هدف مقادیر ویژه حلقه بسته را در ناحیه مشخص  $\zeta_i \geq \zeta_0$  از صفحه مختلط جایگزین می‌کند.

(۳) پارامترهای PSS با لحاظ کردن قیود طوری انتخاب می‌شود که تابع معیار چندمنظوره زیر بهینه شود [۹]:

$$J_3 = J_1 + aJ_2 \quad (4)$$

تابع هدف  $J_3$  مقادیر ویژه حلقه بسته را در ناحیه کانتوری D شکل مشخص شده با  $\sigma_i \geq \sigma_0$  و  $\zeta_i \geq \zeta_0$  در صفحه مختلط قرار می‌دهد. اگر قطب‌های حلقه بسته در سمت چپ کانتور D شکل قرار داده شود قیودهای ضریب میرایی و نسبت میرایی مقادیر ویژه ارضاء شده و باعث بهبود عملکرد دینامیکی سیستم می‌شود. تنظیم پارامترهای PSS‌ها به صورت مساله بهینه‌سازی زیر بیان می‌شود:

Minimize  $J_i$  subject to

$$K_i^{\min} \leq K_i \leq K_i^{\max} \quad (5)$$

$$T_{li}^{\min} \leq T_{li} \leq T_{li}^{\max}$$

$$T_{3i}^{\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i}^{\max}$$

### ۳. الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر قوانین احتمال است که به علت قابلیت بالا در حل مسایل پیچیده و توابع عددی مختلف رواج روزافزونی یافته است. این الگوریتم بجای الهام گرفتن از مکانیزم‌های تکاملی، از رفتار اجتماعی جانداران، مانند دسته‌های پرندگان و ماهیان متأثر بوده است [۱۲]. بطور کلی مشخصه اصلی ذرات هوشمند سازگاری، تنوع در پاسخ، نزدیکی، کیفیت و پایداری هستند. در هر مرحله از حرکت دسته مکان هر ذره یا فرد با دو مقدار بهترین مشخص می‌شود. اولین مقدار بهترین جواب از لحاظ برازندگی است که تاکنون برای هر ذره بطور مجزا بدست آمده و دیگری بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذرات در میان کل ذرات بدست آمده است. همچنین در مراجع [۱۲ و ۱۳] بیان شده که در مسایل بهینه‌سازی که غیرخطی و مشتق‌ناپذیر و یا دارای ابعاد زیادی هستند PSO توانمند بوده و بسیاری از مشکلات الگوریتم ژنتیک را ندارد. زیرا در PSO اطلاعات بین تمامی ذرات به اشتراک گذاشته می‌شود و نرخ همگرایی سریعتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

روش PSO با یک جمعیت تصادفی از ذرات در فضای D بعدی شروع می‌شود. ذره  $\lambda_m$  با بردار  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  نمایش داده می‌شود. مقدار ارزیابی تابع معیار برای هر ذره (pbest) در بردار  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  ذخیره می‌شود. بهترین مقدار گروه (gbest) توسط یک ذره در جمعیت حاصل می‌شود. در PSO سرعت هر ذره در هر مرحله متناسب با مقدار pbest و gbest مطابق معادله (۶) تغییر می‌کند. سرعت ذره  $\lambda_m$  با بردار  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  نمایش داده می‌شود. موقعیت ذره  $\lambda_m$  مطابق با معادله (۷) مقداردهی می‌شود [۱۲].

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{id} - x_{id}) + c_2 \times \text{rand}() \times (P_{gd} - x_{id}) \quad (6)$$

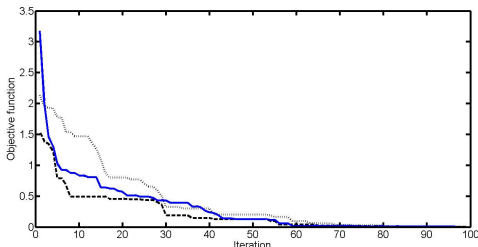
$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (7)$$

شکل ۲. سیستم قدرت سه ماشینه نه شینه

#### ۴-۱. طراحی PSS با PSO

در این مقاله فرض بر این است که PSS به همه ماشین‌ها در سیستم نمونه متصل شده است. در روش پیشنهادی، پارامترهای PSS برای بهتر کردن عملکرد پایداری دینامیکی سیستم تنظیم می‌شود. با استفاده از الگوریتم PSO مجموعه جواب بهینه بر اساس معادله (۵) و با توابع معیار داده شده با معادلات ۲ تا ۴ مشخص می‌شوند. هر PSS شامل سه پارامتر مجهول است که در کل نه پارامتر یعنی  $T_{1i}$ ،  $T_{3i}$  و  $K_i$  با  $i = 1, 2, 3$  PSO به طور همزمان تعیین می‌شوند.

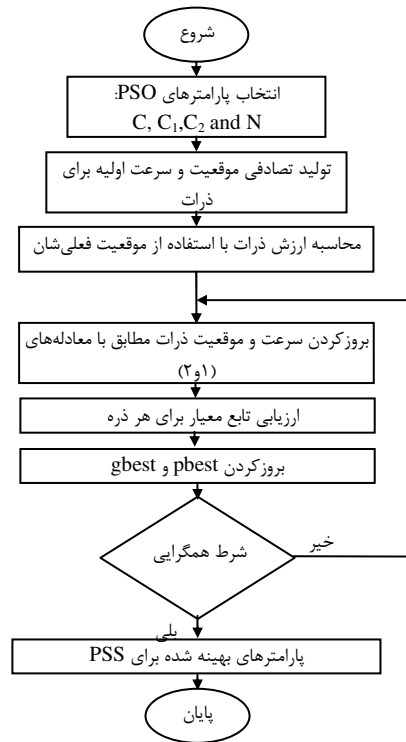
در این مطالعه، مقادیر  $\sigma_0$ ،  $\zeta_0$  و  $a$  به ترتیب برابر با  $1/5$ ،  $0.2$  و  $10$  در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن عملکرد بهتر، تعداد جمعیت، اندازه ذرات، تعداد تکرار،  $C_1$  و  $C_2$  برابر با  $30$ ،  $9$ ،  $100$ ،  $2$  و  $2$  است. قابل ذکر است که PSO چندین بار اجرا شده در نهایت مجموعه جواب بهینه انتخاب شده است. نرخ همگرایی برای توابع هدف مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای بهینه شده با توابع هدف داده شده است. مقادیر ویژه سیستم با توابع معیار تک منظوره  $J_1$  و  $J_2$  و چندمنظوره  $J_3$  در شکل ۴ نشان داده شده است. زمانی که سیستم فاقد PSS است دارای تعدادی مدهای ناپایدار و با میرایی ضعیف است که با طراحی PSS مشاهده می‌شود که مقایر ویژه سیستم به سمت چپ محور موهومی انتقال داده شده و میرایی سیستم با روش پیشنهادی افزایش یافته است.



شکل ۳. تغییرات توابع هدف: خط یکپارچه ( $J_3$ )، خط تیره ( $J_2$ ) و خط نقطه دار ( $J_1$ ).

#### ۴-۲. پاسخ به اغتشاشات کوچک

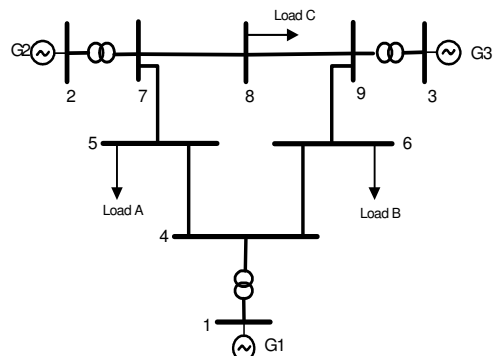
در رابطه بالا  $P_{id}$  و  $P_{gd}$  به ترتیب مقدار  $pbest$  و  $gbest$  و نشانگر وزن اینرسی برای سرعت گیری ذرات بوده و بطور خطی از مقدار  $0.9$  تا  $0.4$  در طول اجرا تغییر می‌کند. روند-نمای الگوریتم پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای PSS در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. روندنمای الگوریتم PSO پیشنهادی

#### ۴. سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، سیستم قدرت سه‌ماشینه نه شینه نشان داده شده در شکل ۲ مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای سیستم در مرجع [۲] داده شده است. برای شناسایی تاثیر و توانایی روش پیشنهادی در محدوده وسیع از شرایط بارگذاری، شرایط کار نامی، سنگین و سبک [۱۰] در نظر گرفته شده است.

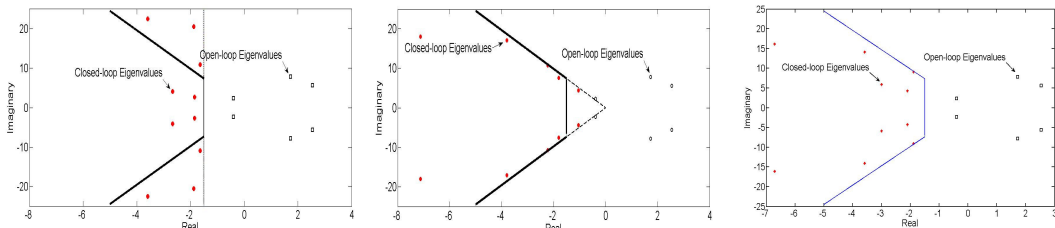


سنگین و سبک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که PSSs طراحی شده با  $J_3$  عملکرد بهتری نسبت به PSSs طراحی شده با  $J_1$  و  $J_2$  دارد و باعث افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت می‌شود. همچنین PSSs پیشنهادی در ناحیه وسیعی از شرایط بارگذاری عملکرد مقاوم داشته و باعث میرایی نوسانات فرکانس پایین در سیستم می‌شود.

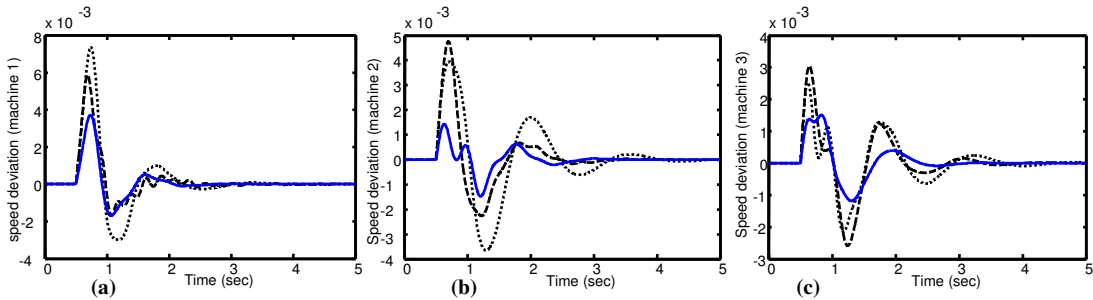
برای ارزیابی پایداری سیستم‌های پیشنهادی، یک اغتشاش  $0.2$  پرینیت گشتاور ورودی در لحظه  $t = 0.5s$  به همه ماشین‌ها وارد می‌شود. ارزیابی در سه شرایط کار مختلف با PSSs تنظیم شده با  $J_1$ ،  $J_2$  و  $J_3$  صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۵-۷ نشان داده شده است. شکل‌های ۵-۷ پاسخ دینامیکی سیستم را به ترتیب در بارگذاری نامی،

جدول ۱. پارامترهای بهینه PSSs با توابع هدف

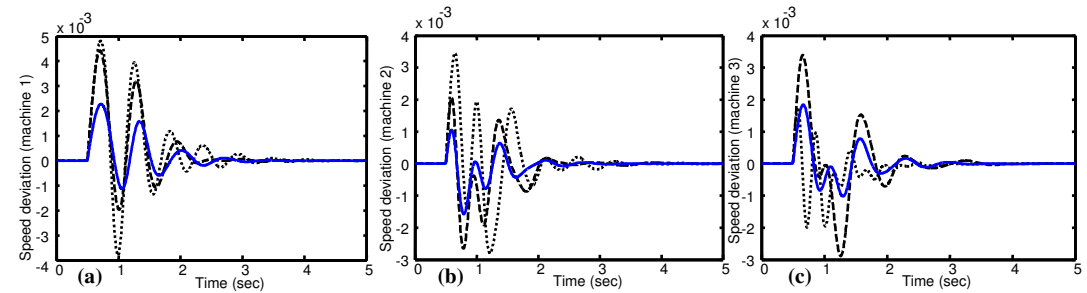
$J_3$			$J_2$			$J_1$			ژنراتور
$T_3$	$T_1$	K	$T_3$	$T_1$	K	$T_3$	$T_1$	K	
۰/۰۷۱	۰/۱۲۰۲	۵۰/۵۱	۰/۱۲۵۱	۰/۰۸۰	۵۹/۶۵	۰/۰۹۱	۰/۰۸۴۸	۷۸/۳۴	ماشین ۱
۰/۰۸۳	۰/۲۱۲۲	۱۶/۲۱	۰/۱۵۰۳	۰/۱۷۴۳	۱۴/۱۵	۰/۱۰۵۶	۰/۱۸۲۱	۱۹/۵۸	ماشین ۲
۰/۱۹۰۷	۰/۱۶۰۲	۲۹/۶۷	۰/۱۱۸۷	۰/۱۷۹۱	۲۵/۸۷	۰/۱۸۷۱	۰/۱۵۱۴	۳۶/۲	ماشین ۳



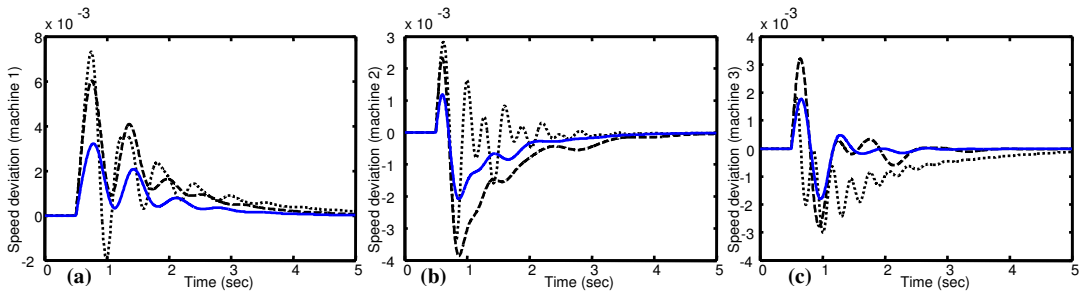
شکل ۴. مقادیر ویژه وابسته به توابع هدف  $J_1$ ،  $J_2$  و  $J_3$



شکل ۵. پاسخ‌های دینامیکی در شرایط بارگذاری نامی (a) ماشین ۱ (b) ماشین ۲ (c) ماشین ۳: خط یکپارچه ( $J_3$ )، خط تیره ( $J_2$ ) و خط نقطه‌دار ( $J_1$ ).



شکل ۶. پاسخ‌های دینامیکی در شرایط بارگذاری سنگین (a) ماشین ۱ (b) ماشین ۲ (c) ماشین ۳: خط یکپارچه ( $J_3$ )، خط تیره ( $J_2$ ) و خط نقطه‌دار ( $J_1$ ).



شکل ۷. پاسخ‌های دینامیکی در شرایط بارگذاری سبک (a) ماشین ۱ (b) ماشین ۲ (c) ماشین ۳: خط یکپارچه ( $J_3$ )، خط تیره ( $J_2$ ) و خط نقطه‌دار ( $J_1$ ).

شده با تابع چندمنظوره  $J_3$  در مقایسه با توابع هدف دیگر است.

### مراجع

- [1] E. Larsen and D. Swann, "Applying power system stabilizers", IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-100, pp. 3017-3046, 1981.
- [2] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, Ames, IA: Iowa State Univ. Press, 1977.
- [3] C. Y. Chung, K. W. Wang, C. T. Tse, X. Y. Bian, and A. K. David, "Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp.1439 - 1445, 2003.
- [4] S. Lee, "Optimal decentralised design for output-feedback power system stabilizers", IEE Proc. Generation. Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 4, pp. 494-502, 2005.
- [5] J. Fraile-Ardanuy and P.J. Zufiria, "Design and comparison of adaptive power system stabilizers based on neural fuzzy networks and genetic algorithms", Neurocomputing, Vol. 70, pp. 2902-2912, 2007.
- [6] R. Segal, A. Sharma and M.L. Kothari, "A self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network", Electric. Power Energy Systems, Vol. 26, pp. 423-430, 2004.
- [7] G. T. Tse and S. K. Tso, "Refinement of conventional PSS design in multimachine system by modal analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, pp. 598-605, 1993.
- [8] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, and M. S. Zywno, "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PAS-108, pp. 614-626, 1989.
- [9] Y. L. Abdel-Magid and M. A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1125 -1132, 2003.
- [10] M. A. Abido, "Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15, No. 3, pp. 297-304, 2003.
- [11] M. A. Abido and Y. L. Abdel-Magid, "Optimal design of power system stabilizers using evolutionary programming", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, pp. 429-436, 2002.
- [12] J. Kennedy, R. Eberhart and Y. Shi, "Swarm intelligence", Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2001.

برای تشریح عملکرد روش پیشنهادی از دو شاخص عملکرد ITAE و FD با روابط زیر استفاده شده است:

$$ITAE = 100 \int_0^5 t (|\Delta \omega_1| + |\Delta \omega_2| + |\Delta \omega_3|) dt \quad (9)$$

$$FD = (1000 \times OS)^2 + (1000 \times US)^2 + T_s^2 \quad (10)$$

بطوری که حداکثر فراجهش (OS)، حداکثر زیر جهش (UN) و زمان نشست ( $T_s$ ) انحراف زاویه روتور ماشین  $G_1$  برای ارزیابی FD در نظر گرفته شده است. نتایج عددی شاخص‌های عملکرد برای همه شرایط کار در جدول ۲ داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر شاخص‌های عملکردی با PSSs تنظیم شده با  $J_3$  در مقایسه با  $J_1$  و  $J_2$  کوچک هستند. این نشان دهنده این مطلب است که فراجهش، زیرجهش، زمان نشست و انحراف سرعت همه ماشین‌ها با بکارگیری PSSs تنظیم شده با  $J_3$  به مقدار زیادی کاهش یافته است.

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های عملکرد

تابع هدف	FD			ITAE		
	سبک	سنگین	نامی	سبک	سنگین	نامی
$J_1$	۲۵۹/۴۵	۱۱۴/۳۷	۱۳۸/۵۸	۶/۵۶	۵/۴۴	۵/۲۸
$J_2$	۲۰۴/۱۳	۱۱۷/۱۳	۱۳۱/۱۵	۶/۴۰	۵/۱۴	۴/۹۶
$J_3$	۲۰۲/۳۰	۹۹/۸۹	۹۸/۹۶	۶/۲۴	۵/۰۱	۴/۵۸

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی چندمنظوره بهینه برای پایدارسازی سیستم قدرت چندماشینه با الگوریتم PSO پیشنهاد شده است. پایدارسازی طوری تنظیم شدند که مقادیر ویژه ناپایدار و با میرایی ضعیف را در ناحیه مشخص شده در صفحه مختلط انتقال دهند. مساله چندمنظوره ترکیبی از توابع هدف براساس ضریب میرایی و نسبت میرایی مدهایی با میرایی مثبت و ضعیف فرمول‌بندی و انتخاب پارامترهای PSSs به یک مساله بهینه‌سازی تبدیل شده و با الگوریتم PSO حل گردیده است. نتایج تحلیل مقادیر ویژه نشان دهنده میرایی مطلوب مدهای فرکانس پایین سیستم با PSSs تنظیم شده با تابع چندمنظوره  $J_3$  است. شبیه‌سازی در حوزه زمان هم نشان می‌دهد که نوسانات ماشین در ناحیه وسیع از شرایط بارگذاری با روش پیشنهادی به سرعت میرا می‌شود. مشخصه‌های عملکرد سیستم بر حسب شاخص‌های ITAE و FD نشان دهنده برتری PSSs طراحی



- [13] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space", IEEE Trans. on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 1, pp. 58-73, 2002.
- [14] M. A. Abido, "Particle swarm optimization for multi-machine power system stabilizers design", Proceedings of the 2001 IEEE conference, pp.1346-1351.