



دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سالانه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۴- شماره های ۱ و ۲

تابستان و زمستان ۱۳۹۶

صفحه ۴۷ الی ۶۲

ISSN: 2322-3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

# طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پرنده فاخته (COA)

امین صفری<sup>۱</sup> و محمد اسماعیل جنگجو<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار مهندسی برق- قدرت، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران،

safari@azaruniv.edu

<sup>۲</sup> دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان قزوین، قزوین، ایران، esmail.jangjoo@gmail.com

(تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۴/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۹/۲۲)

## چکیده

میرایی نوسانات الکترومکانیکی برای تضمین عملکرد قابل قبول سیستم امری ضروری است. حال هنگامی که در سیستم انتقال خطایی رخ دهد، توان انتقالی در خطوط و ولتاژ شین‌ها دچار نوسان شدیدی می‌شود. برای از بین بردن این نوسانات پایدارساز سیستم قدرت (PSS) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بهینه کردن عملکرد کلی سیستم، مسئله طراحی پارامترهای PSS به یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف پیشنهادی غیرخطی تبدیل شده و با به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی فاخته (COA) و الگوریتم جستجوی فاخته (CS) مسئله بهینه‌سازی حل می‌شود. پایدارسازها طوری تنظیم می‌شوند که نوسانات توان اکتیو در سیستم انتقال به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. طراحی پارامترهای PSS در سیستم قدرت چهار ماشینه استاندارد تحت شرایط کاری مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین تحلیل عملکرد سیستم چندماشینه، برتری PSS طراحی شده با COA در مقایسه با PSS طراحی شده با CS را نشان می‌دهد.

## واژه های کلیدی

پایدارساز سیستم قدرت (PSS)،

الگوریتم بهینه‌سازی پرنده فاخته (COA)،

الگوریتم جستجوی فاخته (CS)،

سیستم قدرت چهار ماشینه.



Sahand University  
of Technology

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.4, No.1 and 2,  
Summer and Winter 1396

ISSN: 2322 – 3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

## Optimal Design of Power System Stabilizer Using Cuckoo Optimization Algorithm (COA)

Amin Safari<sup>1</sup> and Mohammad Esmaeil Jangjoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>**Corresponding Author**, Assistant Prof., Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, [safari@azaruniv.edu](mailto:safari@azaruniv.edu)

<sup>2</sup>Qazvin Electric Power Distribution Company, Qazvin, Iran, [esmail.jangjoo@gmail.com](mailto:esmail.jangjoo@gmail.com)

### ABSTRACT

#### Keywords

Power system stabilizer (PSS),

Cuckoo optimization algorithm (COA),

Cuckoo search algorithm (CS),

Four-machine power system.

Damping of electromechanical oscillation ensures the improvement of power system operation. The occurrence of a fault in the transmission system impacts the transmitted power and buses voltages. To mitigate or eliminate these fluctuations, power system stabilizer (PSS) is generally exploited. To optimize the overall system performance the pss parameters design is solved as an optimization problem with nonlinear objective function using cuckoo optimization algorithm (COA). For comparison of the results, the problem is also solved by using cuckoo search (CS). The optimal stabilizer leads to reduce significantly the active power oscillations. The designed PSS is tested and analyzed on the two-area four-machine power system under different operating conditions. Moreover, the multi-machine system performance analysis shows that the COA based PSS is superior to the CS based PSS.

## ۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت همواره تحت تأثیر نوسانات فرکانس پایین است. که این نوسانات باعث می‌شود که نتوان از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال استفاده کرد. این موضوع به یکی از مهم‌ترین مباحث در کارکرد بهینه سیستم‌های قدرت امروزی تبدیل شده است.

برخی از این نوسانات فرکانس پایین زمانی مشاهده می‌شوند که سیستم بزرگ به خطوط انتقال نسبتاً ضعیف متصل است، این مودهای فرکانس پایین مربوط به نوسانات گروهی از ژنراتورها در یک ناحیه در مقابل گروه دیگری از ژنراتورها در ناحیه دیگر می‌باشد که عموماً در بازه ۰/۱ تا ۳ هرتز هستند. اما مودهایی که در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۰/۸ هرتز است از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. معمولاً این نوسانات در هنگام و یا بعد از اغتشاشات در سیستم اتفاق می‌افتد و اثر آنها در متغیرهای شبکه دیده می‌شود.

این نوسانات به شدت عملکرد سیستم را محدود می‌سازند و انتقال توان از یک ناحیه به ناحیه دیگر را دچار مشکل می‌کنند. در نتیجه لازم است که از روش‌های کنترلی مناسب برای میرا سازی این نوسانات استفاده نمود و پایداری سیستم را افزایش داد. در طول سال‌ها از پایدارساز سیستم قدرت<sup>۱</sup> (PSS) برای میرا سازی نوسانات فرکانس پایین در سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته شده است. معمولاً پارامترهای PSSها با استفاده از روش‌های کنترلی مرسوم همچون مکان هندسی ریشه‌ها، روش‌های تصحیح فاز و... برای شرایط کاری خاصی طراحی می‌شوند [۱].

اغلب به این قبیل پایدارسازها، پایدارسازهای کلاسیک گفته می‌شوند اگرچه این دسته از پایدارسازها برای شرایط نامی مناسب می‌باشند و می‌توانند میرایی کافی را ایجاد نمایند اما با تغییر شرایط کاری سیستم دچار مشکل می‌شوند یعنی عملکرد پایدارساز کلاسیک با تغییر شرایط کار دستخوش تغییرات می‌شود [۲،۱].

پایدارسازهایی که در این مقاله طراحی شده است دارای ورودی سیگنال‌های تغییر توان است که با طراحی بهینه پارامترها می‌توان به پایدارسازی دست یافت که می‌تواند میرایی مناسب را در شرایط کاری متفاوت ایجاد کند. در نتیجه پارامترهای PSS تأثیر بسیار زیادی در عملکرد پایدارسازها در افزایش پایداری کلی سیستم دارد و مشکل پایدارساز کلاسیک را ایجاد نمی‌کند.

یک سیستم قدرت، سیستمی کاملاً غیرخطی می‌باشد که در صورت استفاده از روش‌های خطی برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای پایدارسازها، دقت محاسبات به شدت پایین خواهد آمد. در نتیجه باید از روش‌های غیرخطی برای محاسبه مقادیر بهینه پایدارسازها استفاده کرد. در این مقاله با ارائه روش شبیه سازی در حوزه زمان و استفاده از تابع هدف غیر خطی جدید مبتنی بر سیگنال توان عبوری سعی شده است پیچیدگی مسئله را کاهش نموده و نوسانات فرکانس پایین را به سرعت به مقادیر بهینه تحلیل داد. بر این اساس جهت یافتن پارامترهای پایدارسازها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پرنده فاخته<sup>۲</sup> (COA) و جستجوی پرندگان<sup>۳</sup> (CS)، استفاده شده است.

در این مقاله با اعمال خطای سه فاز با مدت ۲۰۰ ms در یکی از خطوط بین دو ناحیه و در سه وضعیت کاری مختلف، عملکرد پایدارسازهای طراحی شده مورد آزمایش قرار گرفته است که در نهایت پاسخ‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی COA و CS با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج عددی شبیه سازی ها نشان‌دهنده برتری PSS طراحی شده با الگوریتم COA می‌باشد [۲،۱].

<sup>1</sup> Power System Stabilizer

<sup>2</sup> Cuckoo Optimization Algorithm

<sup>3</sup> Cuckoo Search

## ۲- مدل‌سازی شبکه چهارماشینه دو ناحیه‌ای و پایدارساز سیستم قدرت

### ۲-۱- مدل‌سازی سیستم قدرت چند ماشینه

مدل غیرخطی سیستم قدرت چندماشینه با مجموعه‌ای از معادلات جبری-دیفرانسیلی توصیف می‌شود که ناشی از مدل‌های ژنراتورها، بارها و سایر ادوات همچون سیستم‌های کنترل که از طریق معادلات جبری شبکه به هم اتصال داده می‌شوند، است. در این مقاله ژنراتور سیستم قدرت با مدل و معادلات حالت (۱)-(۵) برای مطالعات دینامیکی، جهت شبیه‌سازی در حوزه‌های زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (P_{mi} - P_{ei}) \quad (2)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T_{doi}} (-E'_{qi} - I_{di} (X_{di} - X'_{di}) + E_{fdi}) \quad (3)$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = \frac{1}{T_{qoi}} (-E'_{di} - I_{qi} (X_{qi} - X'_{qi})) \quad (4)$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = \frac{1}{T_{ai}} (-E_{fdi} + k_{ai} (X_{Refi} - X_{ti})) \quad (5)$$

که در روابط بالا:

$\delta_i$ : زاویه ماشین

$\omega_s$ : سرعت سنکرون.

$P_{mi}$ : توان مکانیکی ماشین.

$\omega_i$ : سرعت ماشین در لحظه نام.

$H$ : ثابت زمانی اینرسی ماشین.

$P_{ei}$ : توان الکتریکی ماشین.

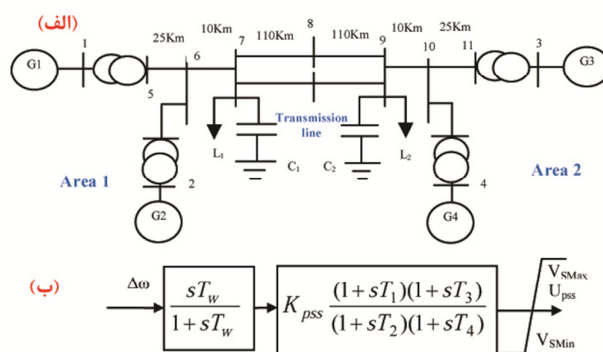
### ۲-۲- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، سیستم قدرت چهارماشینه دو ناحیه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم قدرت دو ناحیه‌ای که در شکل ۱-الف نمایش داده شده، متشکل از دو ژنراتور در هر ناحیه است که توسط دو خط انتقال به طول ۲۲۰ کیلومتر به یکدیگر متصل شده‌اند. ژنراتورهای موجود در هر ناحیه مجهز به گاورنر و توربین، استاتیک نوع اول IEEE و پایدارساز است. این شبکه قدرت، مخصوصاً جهت مطالعه نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پایین طراحی شده است. این شبکه برخلاف اندازه کوچکش رفتار کاملاً مشابه با سیستم‌های واقعی در مطالعات دینامیکی دارد [۳]. در این سیستم سه مود الکترومکانیکی مشاهده می‌شود که دو مود آن محلی که یک مود برای هر ناحیه و مود سوم بین ناحیه‌ای است. معادله (۶) مدل PSS را نشان می‌دهد که معمولاً ورودی این پایدارساز سیگنال تغییرات سرعت زاویه‌ای است ولی در این مقاله برخلاف روش

معمول از سیگنال تغییرات توان انتقالی که به صورت غیرخطی به دست می‌آید به عنوان ورودی و خروجی PSS ولتاژ ورودی به سیم‌پیچی تحریک به روی روتور می‌باشد. با توجه به شاخص استاندارد پایدارساز سیستم قدرت به دودسته تقسیم می‌شود:

- پایدارساز تک‌ورودی
- پایدارساز دو ورودی

پایدارساز مورد استفاده در این مقاله نوع تک‌ورودی است که در شکل ۱-ب نشان داده شده است [۴]، و هدف بدست آوردن پارامترهای  $T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, K_{pss}$  است به گونه‌ای که خروجی را بهبود ببخشد. در این رابطه  $T_{\omega}$  مقدار ثابت در حدود ۱۰ است.



شکل ۱- سیستم قدرت چهار ماشینه

پایدارساز سیستم قدرت را می‌توان به طور کلی، مشخصه‌ای از سیستم دانست که آن را قادر می‌سازد تا تحت وضعیت عادی در حالت تعادل باقی بماند. در صورتی که تحت تأثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجدداً حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به اشکال مختلف بروز کند. قصد داریم در این مقاله پارامترهای کنترل کننده پایدارساز سیستم قدرت در ماشین اول و سوم را که متغیرهای بهره و ثابت‌های زمانی است توسط الگوریتم بهینه‌سازی به دست بیاوریم [۲]:

$$H_{pss}(s) = K_i \frac{sT_w(1+sT_{i1})(1+sT_{i3})}{(1+sT_w)(1+sT_{i2})(1+sT_{i4})} \quad (6)$$

### ۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

توسعه علم بهینه‌سازی، بر خواسته از آرزوی انسان برای رسیدن به کمال است. انسان می‌خواهد بهترین را تجسم کرده و به آن دست یابد، اما از آنجایی که می‌داند قادر نیست تمام شرایط حاکم بر بهترین را به خوبی بشناسد، در بیشترین موارد بجای بهترین جواب یا بهینه مطلق، به یک جواب رضایت‌بخش بسنده می‌نماید. به همین علت، چندین رویکرد برای طراحی جواب‌های باکیفیت قابل پذیرش پیشنهاد شده است. بر همین اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی به ۴ دسته تقسیم می‌شود:

الف- الگوریتم‌های تقریبی ب- الگوریتم‌های احتمالی ج- الگوریتم‌های ابتکاری د- الگوریتم‌های فرا ابتکاری

الگوریتم‌های بهینه‌سازی COA و CS زیرشاخه الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که در ادامه به تشریح عملکرد آنها پرداخته خواهد شد.

### ۳-۱- الگوریتم جستجوی پرنده فاخته (CS)

جستجوی فاخته، یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که در سال ۲۰۰۹ توسط Xin-She Yang و Deb توسعه یافته است. CS بر اساس زندگی برخی از گونه‌های فاخته است. این الگوریتم توسط پرواز levy که یک نوع گام زدن تصادفی است به جای پیاده‌روی ایزوتروپیک تصادفی ساده توسعه یافته است. برای سادگی در توصیف جستجوی فاخته، در حال حاضر از سه قانون ایده‌آل زیر استفاده شده است:

۱- هر فاخته در یک زمان یک عدد تخم می‌گذارد و تخم خود را در لانه‌ای که به صورت تصادفی انتخاب شده است، قرار می‌دهد.

۲- بهترین لانه با تخم‌های با کیفیت بالا به نسل بعد منتقل خواهد شد.

۳- تعداد لانه‌های میزبان در دسترس ثابت است و تخم‌های گذاشته شده توسط فاخته در لانه با احتمال توسط میزبان کشف می‌شود. در این مورد، پرنده میزبان یا می‌تواند از شر تخم خلاص شود و یا به سادگی لانه را رها کرده و یک لانه کاملاً جدید می‌سازد.

برای استفاده از الگوریتم CS در مسائل بهینه‌سازی، مقدار برازش یک جواب می‌تواند متناسب با مقدار حاصل از تابع ارزیابی باشد. برای انواع دیگر مسئله، تابع برازش می‌تواند مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی جمعیت مینا مانند الگوریتم ژنتیک و یا بهینه‌سازی تجمع ذرات در نظر گرفته شود. در این الگوریتم مرتباً جواب‌های جاری با جواب‌های جدید و بهتر جایگزین می‌شوند. در الگوریتم CS، برای هر دو نوع جستجوی سراسری و محلی از پرواز لوی استفاده می‌شود. پرواز لوی یک نوع گام زدن تصادفی که خصوصیت یک دنباله با پرش ناگهانی انتخاب شده از توزیع قانونی توانی با دنباله سنگین است.

$$levy \sim u = t^{-\lambda} \quad (1 < \lambda < 3) \quad (7)$$

در تکرار  $t$ ام از الگوریتم CS، اولین فاخته که به صورت  $X(t+1)$  نمایش داده می‌شود، با رابطه (۸) پاسخ جدیدی را به وجود می‌آورد:

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + \alpha \oplus levy(\lambda) \quad (8)$$

که در اینجا  $\alpha > 0$  نشان‌دهنده اندازه گام است که وابسته به مسئله است. به‌طور کلی  $\alpha$  برابر یک در نظر گرفته می‌شود. شبه کد الگوریتم جستجو فاخته به‌طور مختصر در زیر آورده شده است [۵].

شروع الگوریتم:

گام ۱. تولید  $p$  لانه اولیه با ابعاد  $n$

گام ۲. تا زمانی که شرایط پایانی برقرار نشده است، گام‌های ۳ تا ۹ اجرا شود. در غیر اینصورت الگوریتم به پایان می‌رسد.

گام ۳. به‌صورت تصادفی یک فاخته با پرواز لوی حرکت داده شود.

گام ۴. مقدار برانزنگی  $f$  محاسبه شود.

گام ۵. بطور تصادفی  $g$  امین لانه در بین لانه‌های جاری انتخاب شود.

گام ۶. اگر شرط  $F > F_g$  برقرار بود، آنگاه

$$\begin{aligned} X_g &\longrightarrow X \\ F_g &\longrightarrow F \end{aligned}$$

گام ۷. پایان دستورات شرط

گام ۸.  $P_a$  لانه با کمترین برانزنگی حذف و به همین تعداد، با پرواز لوی لانه‌های جدید تولید شود.

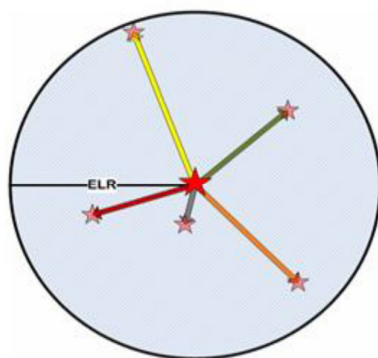
گام ۹. بهترین لانه ذخیره شود.

گام ۱۰. به گام ۲ برگشته شود.

پایان الگوریتم.

### ۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی پرنده فاخته (COA)

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) یک روش جدید جستجوی آگاهانه سراسری است که از زندگی پرنده‌ای موسوم به فاخته الهام گرفته است. همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، COA هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند. جمعیتی که متشکل از فاخته‌ها است. این جمعیت از فاخته‌ها تعدادی تخم دارند که آن‌ها را در لانه تعدادی پرنده می‌زبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرنده می‌زبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها توسط پرنده می‌زبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هرچه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند، به همان اندازه سود (تمایل) بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌یابد. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که COA قصد بهینه‌سازی آن را دارد. فاخته‌ها برای پیشینه کردن نجات تخم‌های خود دنبال بهترین منطقه می‌گردند. هر فاخته به صورت تصادفی تخم‌هایی را در لانه پرندگان می‌زبان که در محدوده تخم‌گذاری یا  $ELR^1$  خود قرار دارد، می‌گذارد. شکل ۲ نحوه تعیین  $ELR$  را نشان می‌دهد.



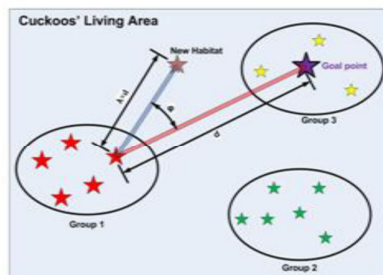
شکل ۲- نمایش نحوه تعیین  $ELR$

<sup>1</sup> Egg Laying Radius

رابطه ELR برای هر فاخته به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Number of Current Cuckoo's Eggs}}{\text{Total Number of Eggs}} \times (Var_{hi} - Var_{low}) \quad (9)$$

وقتی تمام فاخته‌ها تخم‌های خود را گذاشتند برخی از تخم‌ها که کمتر شبیه تخم‌های پرنده میزبان هستند شناسایی شده و از لانه بیرون انداخته می‌شوند. بنابراین بعد از هر تخم‌گذاری  $p\%$  از تمام تخم‌ها (معمولاً  $10\%$ ) که مقدار تابع سود آن‌ها کمتر است نابود می‌شوند. بقیه جوجه‌ها در لانه‌های میزبان تغذیه شده و رشد می‌کنند. نکته جالب دیگر در مورد جوجه فاخته‌ها این است که فقط یک تخم در هر لانه امکان رشد دارد. چرا که وقتی جوجه‌های فاخته از تخم در می‌آیند تخم‌های خود پرنده میزبان را از لانه بیرون پرت می‌کنند و اگر جوجه‌های پرنده میزبان زودتر از تخم خارج شده باشند جوجه فاخته بیشترین مقدار غذا را که پرنده میزبان می‌آورد خورده (جثه‌ی ۳ برابر بزرگتری که دارد بقیه جوجه‌ها را کنار می‌زند) و پس از چند روز جوجه‌های خود پرنده میزبان از گرسنگی می‌میرند و فقط جوجه فاخته زنده می‌ماند. وقتی جوجه فاخته‌ها رشد کردند و بالغ شدند مدتی در محیط‌ها با هم گروهی‌های خودشان زندگی می‌کنند ولی وقتی زمان تخم‌گذاری نزدیک می‌شود به محله‌ای با سکونت یا habitatهای بهتر که در آنجا شانس زنده ماندن تخم‌ها بیشتر است مهاجرت می‌کنند. پس از تشکیل گروه‌های فاخته در کل مناطق مختلف زیست (فضای جستجوی مسئله)، گروه دارای بهترین موقعیت به عنوان نقطه هدف برای سایر فاخته‌ها جهت مهاجرت انتخاب می‌شود. وقتی فاخته‌های بالغ در اقصی نقاط محیط زیست زندگی می‌کنند تشخیص اینکه هر فاخته به کدام گروه تعلق دارد کار سختی است. برای حل این مشکل، گروه‌بندی فاخته‌ها توسط روش کلاس‌بندی K-means انجام می‌شود (یک k بین ۳ تا ۵ معمولاً کفایت می‌کند). حال که گروه‌های فاخته تشکیل شدند سود میانگین گروه محاسبه می‌شود تا بهینگی نسبی محل زیست آن گروه به دست آید. سپس گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط سود (بهینگی) است، به عنوان گروه هدف انتخاب شده و گروه‌های دیگر به سمت آن مهاجرت می‌کنند. هنگام مهاجرت به سمت نقطه هدف، فاخته‌ها تمام مسیر را به سمت محل هدف طی نمی‌کنند. آن‌ها فقط قسمتی از مسیر را طی کرده و در آن مسیر هم انحرافی دارند. این نحوه حرکت را در شکل ۳ به وضوح مشاهده می‌کنید. همان‌طور که از شکل فوق معلوم است هر فاخته فقط  $\lambda\%$  از کل مسیر را به سمت هدف ایده‌آل فعلی طی می‌کند و یک انحراف  $\varphi$  رادیان نیز دارد. این دو پارامتر به فاخته‌ها کمک می‌کند تا محیط بیشتری را جستجو کنند.



شکل ۳- نمایش نحوه مهاجرت پرندگان

$\lambda$  عددی تصادفی بین ۰ و ۱ و  $\varphi$  عددی بین  $\pi/6$  و  $-\pi/6$  است. وقتی تمام فاخته‌ها به سمت نقطه هدف مهاجرت کردند و نقاط سکونت جدید هر کدام مشخص شد، هر فاخته صاحب تعدادی تخم می‌شود. با توجه به تعداد تخم هر فاخته، یک ELR برای آن مشخص می‌شود و سپس تخم‌گذاری شروع می‌گردد. با توجه به این واقعیت که همیشه تعادلی بین جمعیت پرندگان در طبیعت وجود دارد، عددی مثل  $N_{max}$  حداکثر تعداد فاخته‌هایی را که می‌توانند در یک محیط زندگی کنند، کنترل و محدود می‌کند. این تعادل به دلیل محدودیت‌های غذایی، شکار شدن توسط شکارچیان و نیز عدم امکان پیدا کردن لانه‌های مناسب برای تخم‌ها وجود



دارد. پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهند رفت. همگرایی بیش از ۹۵٪ تمام فاخته‌ها به سمت یک نقطه، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) را به انتهای خود می‌رساند. فرمول عملگر مهاجرت در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در معادله (۱۰) نشان داده شده است:

$$X_{NextHabitat} = X_{CurrentHabitat} + F \times (X_{GoalPoint} - X_{CurrentHabitat}) \quad (10)$$

که F پارامتری است که باعث انحراف می‌شود. برای درک بهتر مراحل الگوریتم COA، در زیر مراحل کد گذاری الگوریتم فاخته نمایش داده شده است [۶].

شروع

- گام ۱. مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها را به صورت تصادفی مشخص نمایید.
  - گام ۲. تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص دهید.
  - گام ۳. شعاع تخم‌گذاری هر فاخته را تعیین نمایید.
  - گام ۴. فاخته‌ها در لانه‌هایی میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.
  - گام ۵. تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.
  - گام ۶. تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشده‌اند پرورش می‌یابند.
  - گام ۷. محل سکونت فاخته‌هایی جدید را ارزیابی نمایید.
  - گام ۸. ماکزیمم تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آن‌هایی را که در مکان‌های نامناسب هستند از بین ببرید.
  - گام ۹. فاخته‌ها را با استفاده از روش k-means خوشه‌بندی و بهترین گروه فاخته را به عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید.
  - گام ۱۰. جمعیت جدید فاخته‌ها به سمت مکان هدف حرکت می‌کند.
  - گام ۱۱. اگر شرط توقف برقرار گردیده توقف، در غیر این صورت به گام ۲ برگشته و الگوریتم را ادامه دهید.
- پایان.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

یکی از ابتدایی‌ترین اصول در مطالعات دینامیکی، پایداری است. هدف در سیستم قدرت تأمین توان حقیقی و راکتیو لازم مصرف‌کننده در ولتاژ و فرکانس مطلوب است؛ بنابراین بایستی نوسانات پس از اغتشاشات سریعاً میرا شوند و سیستم پایدار باشد [۷-۱۰]. در این بخش به بیان الگوی بکار گرفته برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی اختصاص داده شده است. طراحی و تعیین بهینه

پارامترهای کنترل‌کننده‌های پیشنهادی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل گشته و از الگوریتم جستجوی فاخته به حل آن پرداخته شده است. به منظور دستیابی به حداکثر توانایی جستجوی محلی و نهایی، در الگوریتم پیشنهادی تعداد ۳۰ فاخته، بیشترین مقدار تخم ۵ عدد و تعداد تکرار برنامه ۱۰۰ در نظر گرفته است. این پارامترها با توجه به سایر مقالات در زمینه بهینه‌سازی و اجزای مختلف در توابع آزمون استاندارد و سیستم قدرت به دست آمده است. تابع مورد استفاده در این مقاله به صورت زیر قابل بیان است:

$$J = \sum_{I=1}^{N_p} \int_0^{T_{sim}} (F(t) - P_N)^2 dt$$

$$s.t. F(T_{end}) = 413 MW$$

$$P_N = 413 MW$$
(۱۱)

که در این رابطه  $T_{sim}$  مدت زمان شبیه‌سازی و  $N_p$  تعداد نقاط کار است. با توجه به ضرایب مشارکت فقط ۲ پایدار ساز سیستم قدرت، ژنراتور شماره یک واقع در ناحیه اول، و ژنراتور سوم واقع در ناحیه دوم، نصب شده که با استفاده از تابع هدف (۱۱) و توسط الگوریتم‌های COA و CS پایداری سیستم را تضمین می‌کند. تابع هدف مورد نظر که برای این سیستم قدرت در نظر گرفته شده، به صورت غیرخطی و با استفاده از  $F(t)$  که سیگنال خروجی توان انتقالی از خط انتقال است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس ابتدا نمودارهای توان انتقالی را از مقدار توان نامی یعنی  $P_N = 413$  مگاوات کم کرده تا این نمودارهای انتقالی که دارای نوسان هستند، نوسانشان حول نقطه نامی ۴۱۳ مگاوات باشد. سپس عبارت تفاضل به توان ۲ رسانده می‌شود. با توجه به اینکه تفاضل سیگنال توان انتقالی با توان نامی، باید مثبت باشد و مقدارش منفی نگردد [۹]. در نهایت، مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر قابل بیان است [۱۱-۱۳]:

$$\text{Minimize } [J]$$

$$\text{Subject to :}$$

$$K_{PSS}^{\min} \leq K_{PSS} \leq K_{PSS}^{\max}$$

$$T_1^{\min} \leq T_1 \leq T_1^{\max}$$

$$T_2^{\min} \leq T_2 \leq T_2^{\max}$$

$$T_3^{\min} \leq T_3 \leq T_3^{\max}$$

$$T_4^{\min} \leq T_4 \leq T_4^{\max}$$
(۱۲)

مقدار محدوده برای ضریب بهره بین ۰ الی ۵۰ و برای ثابت‌های زمانی بین ۰ تا ۲ می‌باشد. زمان شبیه‌سازی در این مقاله ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. جزئیات نقاط بهره برداری در جدول ۱ آورده شده است که تنها تغییرات بار مصرفی را در ناحیه اول سیستم قدرت چهار ماشین نمایش می‌دهد [۱۴]. روش پیشنهادی برای طراحی پایدار ساز سیستم قدرت شامل دو بخش است. در بخش اول پارامترهای PSS با حل مساله بهینه‌سازی قیوددار داده شده در رابطه (۱۲) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بدست می‌آید. در بخش دوم پارامترهای بدست آمده به لحاظ داشتن پایداری مقاوم برای نقاط وسیعی از شرایط بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به طور خلاصه روند تنظیم پارامترهای پایدار ساز عبارتند از:

۱- پارامترهای الگوریتم و نقاط بهره‌برداری اولیه مناسبی برای سیستم انتخاب کنید (برای پایدار ساز با سیگنال ورودی تغییرات سرعت بار گذاری سنگین مناسب است).

۲- مساله بهینه‌سازی قیوددار داده شده در رابطه (۱۲) را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل نموده و پارامترهای پایدار ساز را بدست آورید.

۳- پارامترهای بدست آمده در گام ۲ را به لحاظ داشتن پایداری مقاوم مورد ارزیابی قرار دهید. بدین منظور مجموعه‌ای از شرایط بارگذاری و بهره‌برداری سیستم را ایجاد نمایید.

۴- برای هر شرط بهره‌برداری مقدار تابع معیار  $J$  را به دست آورید و با مقدار تابع معیار به‌دست آمده از تکرار قبل مقایسه نموده و کوچک‌ترین مقدار را انتخاب نمایید. سپس مراحل ۲ به بعد را برای کلیه نقاط کار تکرار نمایید.

با اجرای مراحل مختلف الگوریتم مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترل‌کننده میرایی را با توجه به تابع هدف  $J$  به ترتیب در جداول ۲ و ۳ مشاهده خواهید کرد. به منظور ارزیابی استقامت طراحی انجام شده، سیستم مورد مطالعه تحت شرایط سخت وقوع خطا، در قالب دو سناریو مختلف، قرار می‌گیرد و شبیه‌سازی حوزه زمان و مقایسه نتایج دو الگوریتم COA و CS با توجه به آن‌ها بررسی می‌گردد.

سناریو اول: در این سناریو فرض می‌شود در زمان  $T=200$  میلی ثانیه خطای سه‌فاز در وسط یکی از خطوط انتقال در سیستم قدرت مفروض در شکل ۱ رخ می‌دهد. پیکربندی سیستم طی این خطا، حفظ می‌شود و سیستم پس از رفع خطا به وضعیت عادی برمی‌گردد.

سناریو دوم: این سناریو نیز عیناً مثل سناریو اول است تنها با این تفاوت که خطای سه‌فاز در شکل ۱ در زمان  $T=500ms$  میلی ثانیه رخ می‌دهد [۱۵].

حال با توجه به دو سناریوی که ذکر شد قصد داریم تغییرات توان انتقالی از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ و تغییرات سرعت خروجی ژنراتورها در حالت مودهای محلی و مودهای بین ناحیه‌ای سیستم را در حالتی که سیستم قدرت چهار ماشینه، فاقد پایدار ساز است و در حالتی که PSS توسط الگوریتم‌های COA و CS طراحی شده است در نقاط کاری متفاوت مورد استفاده قرار دهیم. برای اطمینان از بهینه بودن طراحی انجام شده، تغییرات توان انتقالی از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ و تغییرات سرعت خروجی ژنراتورها در حالت مودهای محلی و مودهای بین ناحیه‌ای سیستم در سناریوهای مفروض و در نقاط کاری متفاوت در شکل‌های ۴ الی ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱- شرایط بهره‌برداری از سیستم قدرت چهارماشینه

نقاط کاری	شرایط بهره‌برداری	میزان بار مصرفی در ناحیه اول به مگاوات
۱	حالت اول: بار نامی	۹۶۷
۲	حالت دوم: بار سبک	۷۶۷
۳	حالت سوم: بار سنگین	۱۱۶۷

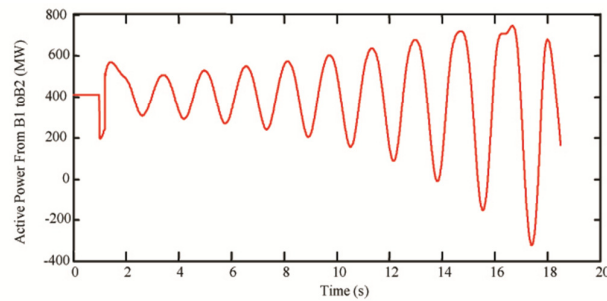
جدول ۲- مقادیر بهینه‌شده پارامترهای PSS، ژنراتورهای ۱ و ۳، توسط الگوریتم COA

$T_{1-1}$	$T_{1-2}$	$T_{1-3}$	$T_{1-4}$	$K_{1-1}$
-۵۰۰	۴۱/۶۱۰۳	-۳۴/۱۲۱	-۵۰۰	۳۴/۱۲۱
$T_{3-1}$	$T_{3-2}$	$T_{3-3}$	$T_{3-4}$	$K_{3-1}$
۵۰۰	-۵۰۰	-۵۰۰	۵۰۰	۵۱/۵۸۰۷

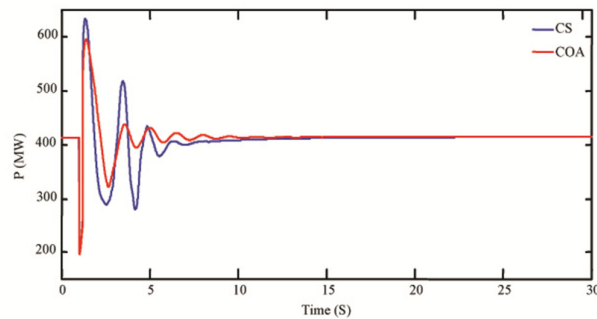
جدول ۳- مقادیر بهینه‌شده پارامترهای PSS، ژنراتورهای ۱ و ۳، توسط الگوریتم CS

$K_{1-1}$	$T_{1-1}$	$T_{1-2}$	$T_{1-3}$	$T_{1-4}$
۵۰۰	۶۲/۹۷۷	-۲۶۹/۱۱	۳۵۵,۲۳-	۵۰۰
$K_{3-1}$	$T_{3-1}$	$T_{3-2}$	$T_{3-3}$	$T_{3-4}$
۲۷۳/۴۹۲	۱۰/۴۷۲	۴۱۴/۹۷۶	۲۰۲/۰۹۸	۲۷۴/۵۴۶

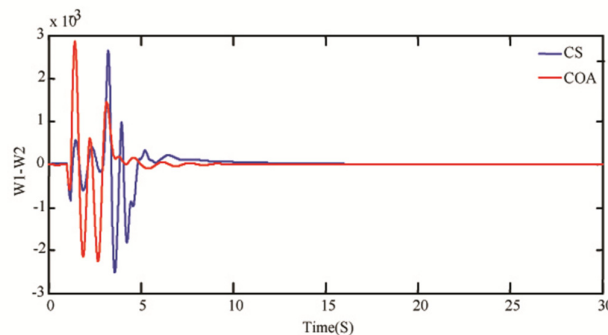
در این مقاله تمامی شرایط عملکرد در نقاط کاری متفاوت و در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، حال به دلیل زیاد بودن نمودارها، سعی می‌شود تنها شرایط بار نامی مورد بررسی قرار گیرد.



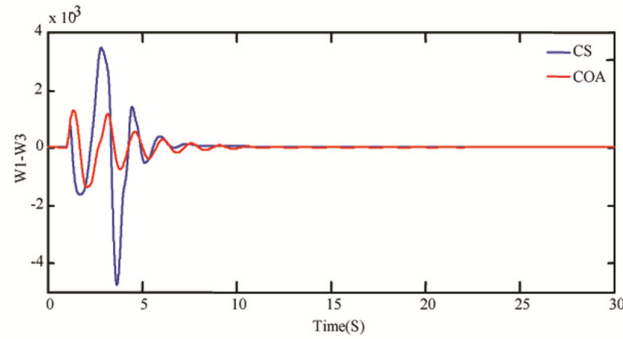
شکل ۴- توان انتقالی در شرایط بدون استفاده از PSS در سناریوی اول



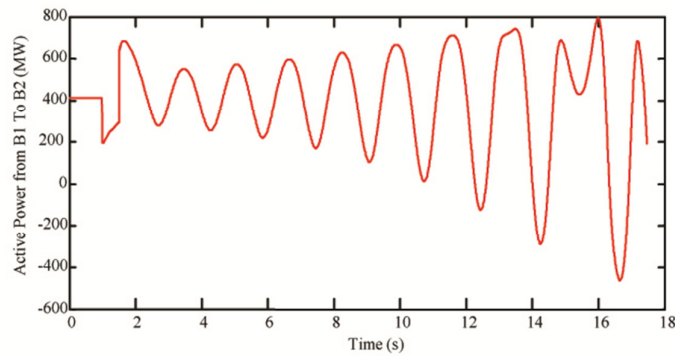
شکل ۵- توان انتقالی در شرایط استفاده از PSS بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های CS و COA در سناریوی اول



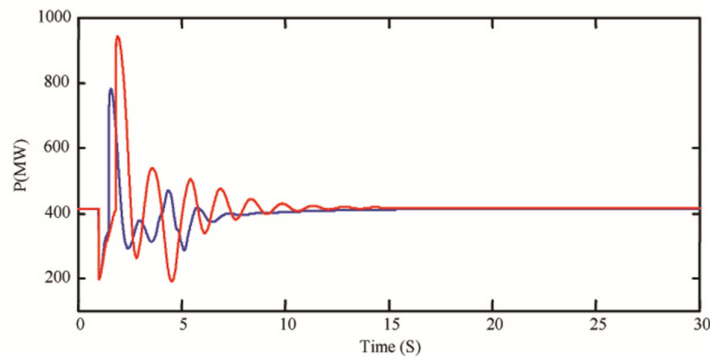
شکل ۶- مود محلی ناحیه اول  $W_1-W_2$  در شرایط استفاده از PSS بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های CS و COA در سناریوی اول



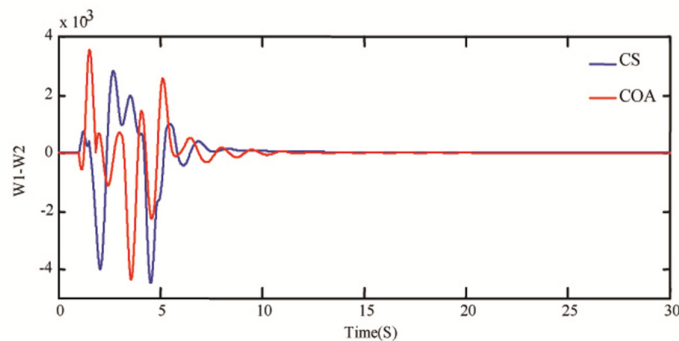
شکل ۷-مود بین ناحیه‌ایی  $W_1-W_3$  در شرایط استفاده از PSS بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های COA و CS در سناریوی اول



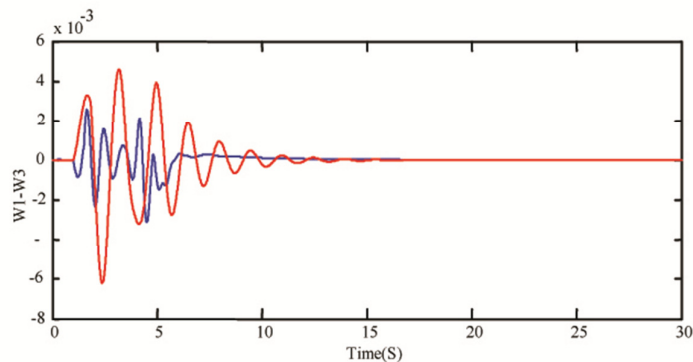
شکل ۸-توان انتقالی در شرایط بدون استفاده از PSS در سناریوی دوم



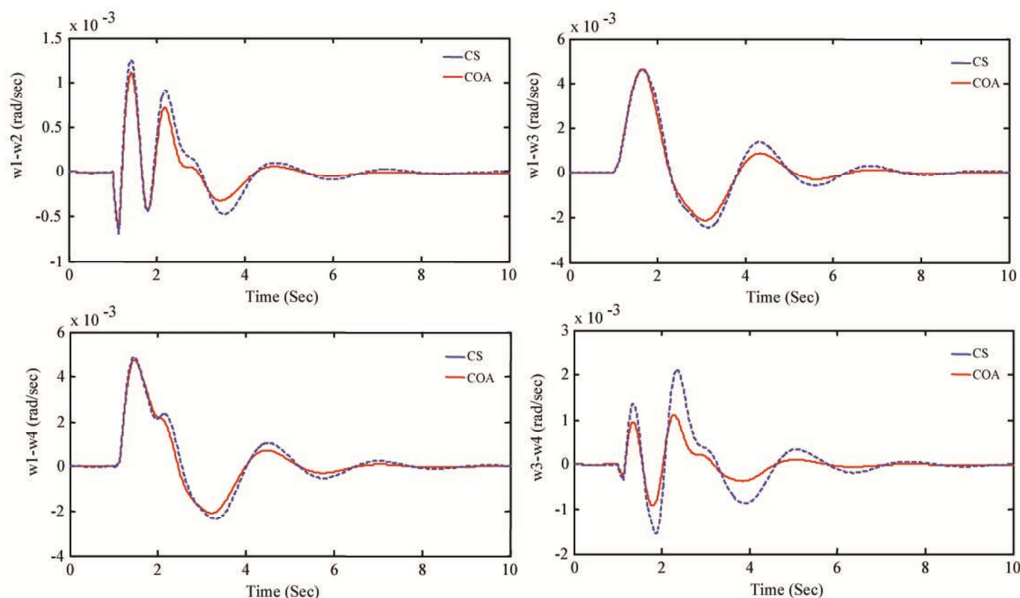
شکل ۹-توان انتقالی در شرایط استفاده از PSS بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های COA و CS در سناریوی دوم



شکل ۱۰-مود محلی ناحیه اول  $W_1-W_2$  در شرایط استفاده از PSS بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های COA و CS در سناریوی دوم



شکل ۱۱- مود بین ناحیه ایی  $W_1-W_3$  در شرایط استفاده از PSS بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های COA و CS در سناریوی دوم سناریو سوم؛ در این سناریو خطای سه فاز ۶ سیکل در زمان ۱/۰ ثانیه به اندازه ۰/۰۱ در نزدیکی باس ۷ و بین خط ۵-۷ اعمال می‌شود در این حالت خط در مدار باقی می‌ماند.

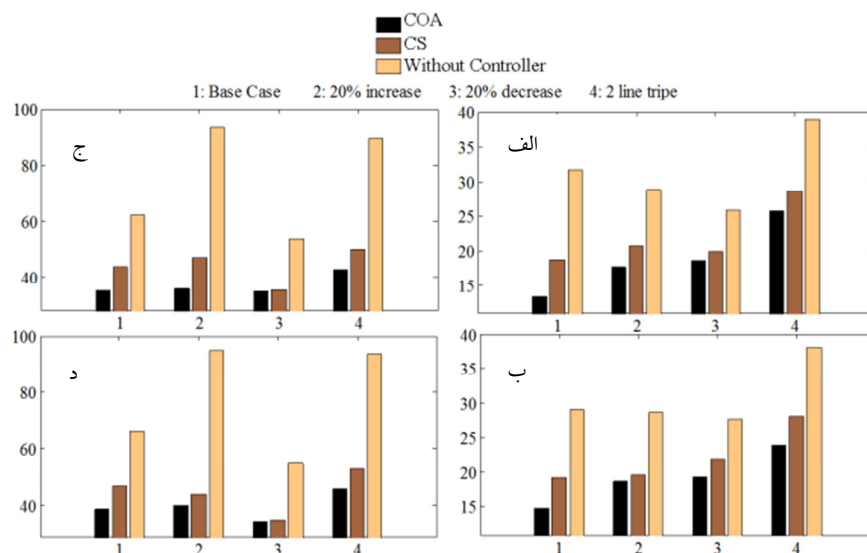


شکل ۱۲- تغییرات سرعت در حالت بار سنگین را نشان می‌دهد.

به منظور نشان دادن کارایی روش کنترلی پیشنهاد شده از معیارهای روابط (۱۳) و (۱۴) استفاده شده است. قابل ذکر است، مقدار کمتر به دست آمده نشان از میرایی بهتر سیستم در برابر اغتشاشات است. معیارهای معرفی شده در سناریوهای مختلف از جمله افزایش بار، کاهش بار، خروج خط انتقالی و حالت نرمال محاسبه شده‌اند. نتایج به دست آمده از معیارهای معرفی شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همچنین برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی از دو معیار معرفی شده در روابط زیر استفاده شده است.

$$ITAE = \sum_{i=1}^{N_G} \int_0^{t_{sim}} t \cdot (|\Delta\omega_i|) dt \quad (13)$$

$$FD = \frac{\sum_{i=1}^{N_G} ((600 \times OS_i)^2 + (8000 \times US_i)^2)}{N_G} \quad (14)$$



شکل ۱۳- معیارهای به دست آمده برای الف) ITAE سناریو اول، ب) ITAE سناریو دوم، ج) FD سناریو اول و د) FD سناریو دوم

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله هدف اصلی بهینه ساختن پارامترهای پایدارسازهای سیستم قدرت چهار ماشینه استاندارد دو ناحیه‌ای توسط الگوریتم بهینه‌سازی COA و الگوریتم CS بود تا بتوان توانی ثابت و بدون نوسان از سیستم انتقال داده شود؛ بنابراین برای تحقق این امر تابع هدف غیرخطی مبتنی بر توان انتقالی عبوری از خط انتقال در نظر گرفته شد. همین امر سبب شد تا نتایج به دست آمده از توان انتقالی بر روی خط انتقال توسط بهینه ساختن پارامترهای PSS با این روش سریع‌تر، بهتر، با نوسان کمتر از حالت قبلی صورت گیرد. شبیه‌سازی در حوزه زمان هم نشان می‌دهد که نوسانات ماشین‌ها در ناحیه وسیع از شرایط بارگذاری با روش پیشنهادی به سرعت میرا می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] 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.
- [2] E. Larsen and D. Swann, Applying power system stabilizers, IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-100, pp. 3017-3046, 1981.
- [3] N. Bigdeli, E. Ghanbaryan, K. Afshar, Low frequency oscillations suppression via CPSO based damping controller, Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 22-23, 2013.
- [4] H. Kazemi Kargar, R. Aghmasheh, A. Safari, G. R. Govar, Multiagent based particle swarm optimization approach for PSS designing in multimachine power systems, IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Johor Baharu, Malaysia, pp. 73-78, 2008. 10.1109/PECON.2008.4762448.
- [5] X. S. Yang, S. Deb. Cuckoo search via L'evy flights, Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, pp 210-214, 2009.

- [6] R. Rajabioun, Cuckoo Optimization Algorithm, Applied Soft Computing., Vol.1, PP.5508-551, 2011.
- [7] A. Ghasemi, H. Shayeghi, H. Alkhatib, Robust design of multimachine power system stabilizers using fuzzy gravitational search algorithm, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume ۵۱, pp. 190–200, 2013.
- [8] J. M. Ramirez, E. Rosa, C. Diana, A strategy to simultaneously tune power system stabilizers”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 43, Issue 1 pp. 818–829, 2012.
- [9] Y. L. Abdel-Magid, M. Abido, Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms., IEEE Trans Power Syst, pages 1125–32, 2003.
- [10] S. Mishra, M. Tripathy, J. Nanda, Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging”. Electr Power Syst Res; pages 1595–1607, 2007.
- [11] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, A. Safari, R. Aghmasheh, A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment”. Energy Convers Manage; pages 696–702, 2010.
- [12] A. Ghasemi, O. Abedinia, H. A. Shayanfar, S. Naderi, PSO-TVAC algorithm for multi-objective PSS design in multi-machine power system”. In: Proceeding of international on artificial intelligent, Los Vegas, USA, 2011.
- [13] M. Tofighi, M. Alizadeh, S. Ganjefar, M. Alizadeh, Direct adaptive power system stabilizer design using fuzzy wavelet neural network with self-recurrent consequent part, Applied Soft Computing, Volume 28, Pages 514-526, March 2015.
- [14] K. Ellithy, S. Said, O. Kahlout, Design of power system stabilizers based on  $\mu$ -controller for power system stability enhancement, International Journal of Electrical power & Energy Systems, Volume 63, Pages 933-939, December 2014.
- [15] E.S. Ali, Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm, International Journal of Electrical power & Energy Systems, Volume 61, Pages 683-690, October 2014