

## طراحی همزمان پایدارساز سیستم قدرت و پارامترهای کنترل‌کننده STATCOM با استفاده از الگوریتم ترکیبی BF-NM

محمد جواد مرشد<sup>۱</sup>، امین خدابخشیان، محمد عطائی<sup>۲</sup>، معین پرستگاری<sup>۳</sup>

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

mj.morshed@gmail.com

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

aminkh@eng.ui.ac.ir, ataei@eng.ui.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان - اصفهان- ایران

parastegari@eng.ui.ac.ir

**چکیده:** همگام با گسترش شبکه‌های قدرت و افزایش روز افزون استفاده از ادوات FACTS، فعل و انفعالات پیچیده و پیش‌بینی نشده در سیستم قدرت افزایش یافته است. با توجه به غیرخطی بودن سیستم قدرت، تغییرات نقطه کار و عکس‌العمل میان سیستم قدرت و ادوات FACTS استفاده از روش‌های خطی برای طراحی کنترل‌کننده‌ها مناسب نیست. در این راستا، مدل غیرخطی سیستم قدرت برای طراحی همزمان پایدارساز سیستم قدرت (PSS) و جبرانگر استاتیکی سنکرون (STATCOM) در نظر گرفته شده است. همچنین، در این مقاله طراحی همزمان پارامترهای STATCOM و PSS با استفاده از روش جدید و ترکیبی باکتریبایی با قدرت جست و جوی مناسب و نلدر-مید با سرعت همگرایی بالا ارائه می‌گردد. مقایسه این روش با روش‌های دیگر هوشمند در سیستم چهار ماشینه کندور، قابلیت برتر روش ارائه شده را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم BF-NM، جبرانگر استاتیکی سنکرون، پایدارساز سیستم قدرت، هماهنگی PSS و STATCOM

### ۱- مقدمه

با این تغییرات که به عنوان اغتشاش شناخته می‌شوند، پایداری و سنکرونیسم خود را حفظ کند. از این رو در دهه‌های اخیر به روش‌های مختلفی جهت طراحی پایدارساز مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به افزایش روز افزون استفاده از ادوات FACTS<sup>[۱]</sup> و تاثیر آنها در بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت، هماهنگ‌سازی عملکرد این کنترل‌کننده‌ها با پایدارساز سیستم قدرت<sup>[۱]</sup> (PSS) لازم است [۲]. از آنجا که سیستم قدرت یک سیستم غیرخطی است، روش‌های طراحی پارامترهای پایدارساز و کنترل‌کننده ادوات FACTS باید برای مدل غیرخطی طراحی گردد. در این راستا، در سال‌های اخیر،

یکی از مهمترین مسائل در بهره‌برداری صحیح از سیستم قدرت، پایداری سیستم قدرت است. با توجه به اینکه بار شبکه متغیر است، لازم است سیستم در رویارویی

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۴/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد جواد مرشد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اصفهان - خیابان هزار

جریب - دانشگاه اصفهان - دانشکده برق

## ۲- مدلسازی سیستم

### ۲-۱- مدلسازی ماشین سنکرون

سیستم قدرت با  $n$  ژنراتور را در نظر بگیرید. مدل دینامیکی ماشین  $i$  ام بر حسب معادلات دیفرانسیلی مرتبه ۵ در روابط (۱) تا (۵) نمایش داده شده است [۱۳]

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

$$\frac{d\omega_i}{dt} = -\frac{1}{2 H_i} [P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i] \quad (2)$$

$$\frac{de'_{di}}{dt} = [-e'_{di} - (x_{qi} - x'_{di}) I_{qi}] \frac{1}{T'_{qoi}} \quad (3)$$

$$\frac{de'_{qi}}{dt} = [E_{fdi} - e'_{qi} - (x_{di} - x'_{di}) I_{di}] \frac{1}{T'_{doi}} \quad (4)$$

$$\frac{dE_{FD}}{dt} = -\frac{1}{T_{Ai}} (E_{fdi} - E_{fd0}) - \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} (V_{ii} - V_{ii0}) \quad (5)$$

که در آن  $\delta$ ،  $\omega$ ،  $H$ ،  $P_m$ ،  $P_e$ ،  $D$ ،  $e'_d$ ،  $e'_q$ ،  $x_d$ ،  $x'_d$ ،  $I_d$ ،  $E_{fd}$ ،  $T'_{do}$ ،  $K_A$ ،  $T_A$ ،  $V_t$  زاویه، سرعت زاویه‌ای روتور، ثابت اینرسی، توان مکانیکی ورودی، توان الکتریکی خروجی، ضریب میرایی، ولتاژ داخلی محورهای  $d$  و  $q$ ، راکتانس سنکرون و گذرای محور  $d$  و  $q$ ، جریان محورهای  $d$  و  $q$  آرمیچر، ولتاژ تحریک، ثابت زمانی گذرای محور  $d$ ، بهره و ثابت زمانی تحریک و ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون است.

جریان محورهای  $d$  و  $q$  آرمیچر ژنراتور سنکرون به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_{di} = \sum_{j=1}^n e'_{qi} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^n e'_{di} (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (7)$$

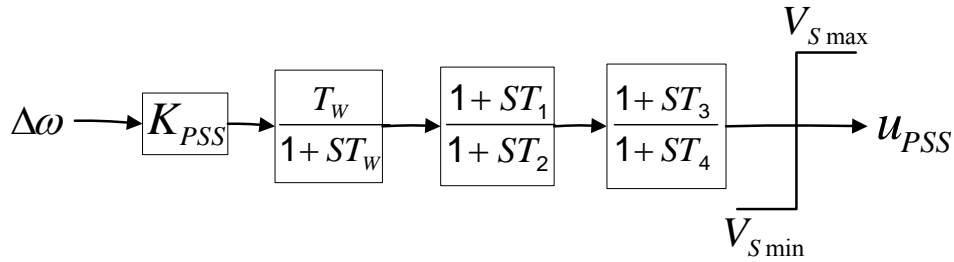
که در آن  $G_{ij}$  و  $B_{ij}$ : قسمت حقیقی و موهومی عنصر  $(i, j)$  ماتریس ادmittانس است.

پایدارساز سیستم قدرت کلاسیک دارای ساختار lead-lag بوده که در شکل (۱) نشان داده شده و تحریک از نوع DC-type1 است.

استفاده از الگوریتم‌های تکاملی جهت حل مسائل بهینه سازی مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم‌های هوشمند از قبیل الگوریتم ژنتیک [۳]، جست و جوی ذرات (PSO) [۴]، بازیخت فلزات [۵]، جهت طراحی و تنظیم پارامترهای PSS استفاده شده‌اند. همچنین، در [۶] طراحی PSS با استفاده از الگوریتم جست و جوی باکتریایی (BFA) و PSO انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

طراحی هماهنگ PSS و TCSC در [۷-۸] مطالعه شده است. به این منظور، طراحی هماهنگ PSS و TCSC<sup>ii</sup> با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی غیرخطی در [۷] و با استفاده از الگوریتم PSO در [۸] انجام پذیرفته است. در [۹] طراحی همزمان PSS و SSSC<sup>v</sup> با استفاده از Multi-Objective Evolutionary Programming از بررسی شده است. طراحی هماهنگ PSS و SVC<sup>v</sup> با استفاده از تئوری Probabilistic در [۱۰] پیشنهاد شده و در مرجع [۱۱] از الگوریتم PSO برای هماهنگ‌سازی پارامترهای STATCOM و PSS، استفاده شده است. هرچند این روش دارای سرعت خوبی است، ولی دقت آن نسبت به روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی پایین است [۱۲]. به منظور افزایش دقت فرایند بهینه‌سازی می‌توان الگوریتم جست و جوی باکتریایی (BF) و Nelder-Mead (NM) را ترکیب نمود. نتیجه این ترکیب الگوریتم BF-NM نام دارد.

در این مقاله، طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و STATCOM<sup>vi</sup> با در نظر گرفتن مدل غیرخطی سیستم قدرت، در سیستم چهار ماشینه مورد توجه قرار گرفته است. برای تنظیم هماهنگ پارامترهای PSS و STATCOM برای سیستم چهار ماشینه از سه روش، الگوریتم ترکیبی BF-NM و الگوریتم‌های BF-PSO و PSO استفاده و نتایج حاصل از سه روش، با نتایج طراحی جداگانه (هماهنگ نشده) PSS و STATCOM، مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی توانایی الگوریتم BF-NM برای هماهنگ سازی STATCOM و PSS جهت بهبود پایداری سیستم را نشان می‌دهد.

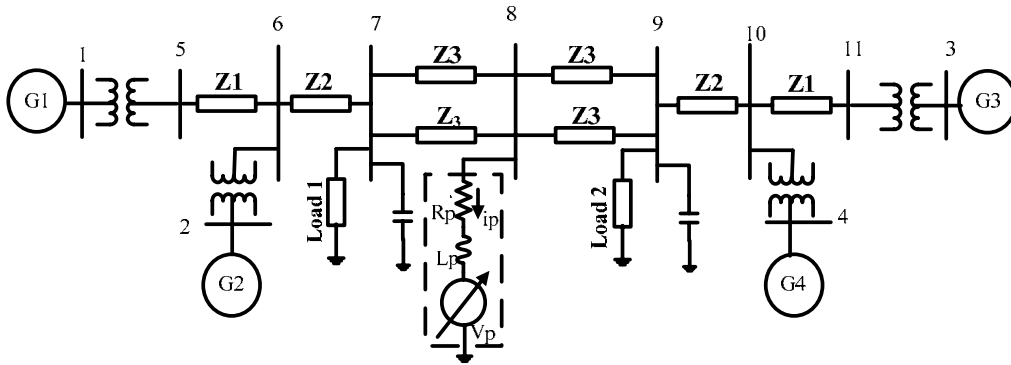


شکل (۱): ساختار lag-lead پایدارساز سیستم قدرت

### ۲-۲- مدل سازی STATCOM

مقاومت ترستورهای STATCOM در حالت روشن و مقاومت پراکندگی ترانسفورماتور و  $L_p$ ، اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتور هستند.

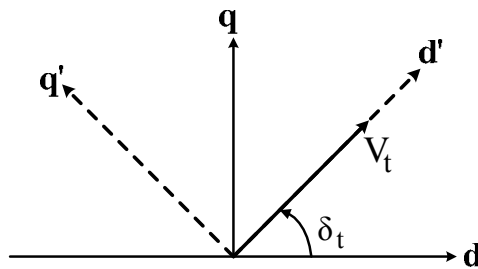
در شکل (۲) سیستم چهار ماشینه همراه با STATCOM نشان داده شده است، که در آن  $R_p$  مجموع



شکل (۲): سیستم دو ناحیه، چهار ماشینه کندور همراه با STATCOM

معادلات STATCOM در قاب مرجع  $d$  و  $q$  آورده شده است، اما با توجه به اینکه مرجع جریان رکتیو توسط ولتاژ باس ac مشخص می گردد، قاب  $d'$  و  $q'$  انتخاب می گردد؛ طوری که محور  $d'$  مماس با ولتاژ باس ac است. دیاگرام برداری قاب مرجع  $d$  و  $q$  و قاب  $d'$  و  $q'$  در شکل (۳) نشان داده شده است.

در STATCOM، برای کنترل توان رکتیو تزریقی، از یک اینورتر منبع ولتاژ با ولتاژ  $V_p$  استفاده می شود. در حالت ماندگار ولتاژ باس dc ثابت است و در این حالت ولتاژ باس ac،  $V_s$ ، همفاز با مؤلفه اصلی  $V_p$  است. اگر  $|V_s| > |V_p|$  باشد، STATCOM از ولتاژ باس ac توان رکتیو جذب می کند و برعکس [۱۴]. در مرجع [۱۴] ابتدا



شکل (۳): دیاگرام برداری قاب مرجع  $d$  و  $q$  و قاب  $d'$  و  $q'$

$$\frac{di_{pd'}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pd'} + \omega i_{pq'} + \frac{1}{L_p} (V_s - V_{pd'}) \quad (\text{A})$$

معادلات دینامیکی جریان مؤلفه های  $d'$  و  $q'$ ،

در ادامه آورده شده است [۱۴].

$$\frac{di_{pd'}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pd'} + u_{d'} \quad (15)$$

$$\frac{di_{pq'}}{dt} = -\frac{R_p}{L_p} i_{pq'} + u_{q'} \quad (16)$$

که در آن  $u_{d'}$  و  $u_{q'}$ ، سیگنال‌های کنترلی هستند که توسط کنترل‌کننده‌های PI به دست می‌آیند:

همچنین معادله دینامیکی ولتاژ باس dc به صورت زیر است [۱۴]:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2CV_{dc}} [V_s i_{pd'} - (i_{pd'}^2 + i_{pq'}^2) R_p] - \frac{V_{dc}}{CR_{dc}} \quad (17)$$

که در آن  $V_{dc}$  ولتاژ خازن dc،  $C$  مقدار خازن dc و  $R_{dc}$  مقاومت موازی با خازن dc که معادل تلفات سوئیچینگ STATCOM است. معادلات (۱۵) تا (۱۷) سه معادله دینامیکی STATCOM است.

در شکل (۴) ساختار کنترل‌کننده STATCOM نشان داده شده است. در این ساختار، دو حلقه کنترلی، حلقه کنترل ولتاژ ac و حلقه کنترل dc، وجود دارد [۱۴].

$$\frac{di_{pq'}}{dt} = -\omega i_{pd'} - \frac{R_p}{L_p} i_{pq'} + \frac{1}{L_p} (-V_{pq'}) \quad (9)$$

که در آن  $V_{pd'}$ ،  $V_{pq'}$  ولتاژ مولفه‌های  $d'$  و  $q'$  منبع ولتاژ  $V_p$  است. ولتاژهای  $V_{pd'}$  و  $V_{pq'}$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$V_{pq'} = V_{pq} \cos \delta_t - V_{pd} \sin \delta_t \quad (10)$$

$$V_{pd'} = V_{pd} \cos \delta_t + V_{pq} \sin \delta_t \quad (11)$$

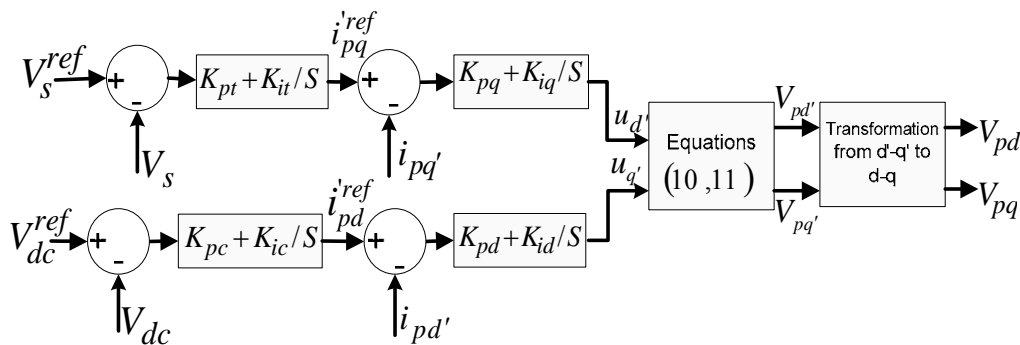
$$\omega = \omega_o + \frac{d\delta_t}{dt} \quad (12)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای ولتاژ STATCOM است. ولتاژهای  $V_{pd'}$  و  $V_{pq'}$  نیز از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$V_{pq'} = -(\omega L_p i_{pd'} + L_p u_{q'}) \quad (13)$$

$$V_{pd'} = \omega L_p i_{pq'} + V_s - L_p u_{d'} \quad (14)$$

با جایگذاری معادلات (۱۳-۱۴) در معادلات (۸-۹)، معادلات دیفرانسیل STATCOM به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل (۴): ساختار کنترل‌کننده STATCOM

### روش جستجوی باکتریایی

فرآیند جستجوی غذای باکتری E.Coli توسط چهار عملکرد حرکت به سمت ماده غذایی، حرکت دسته جمعی، تولید مثل و حذف و پراکندگی در حل مسائل بهینه‌سازی مدل می‌شود [۱۵].

### ۳- الگوریتم بهینه‌سازی BF-NM

الگوریتم جستجوی باکتریایی وابسته به مسیرهای تصادفی بوده که باعث کند شدن فرآیند جستجوی جواب بهینه می‌گردد. در این راستا می‌توان روش جستجوی باکتریایی و روش محاسباتی Nelder-Mead را با یکدیگر ترکیب کرد [۱۶]. لذا در این بخش، روش جستجوی باکتریایی و روش Nelder-Mead معرفی می‌گردد.

### ۳-۱-۱- حرکت به سمت ماده غذایی (شنا)

در BFA حرکت به سمت ماده غذایی، شامل یک

شنا و یک غلتیدن است، مطابق رابطه زیر:

$$P(j, k, l) = \{\theta^i(j, k, l) \mid i = 1, 2, \dots, S\} \quad (18)$$

که در آن  $P(j, k, l)$  بیانگر موقعیت هر یک از اعضای باکتری (تعداد اعضا  $S$ ) در مرحله حرکت  $j$  ام و تولید مثل  $k$  ام و حذف و پراکندگی  $l$  ام است. مقدار تابع هدف را در موقعیت باکتری  $i$  ام مشخص می کند. همچنین شنا کردن و غلتدن برای موقعیت باکتری  $i$  ام  $\theta^i(j, k, l)$  بترتیب با روابط (۲۰) و (۲۱) مشخص می شوند.

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta(i)^T \Delta(i)}} \quad (19)$$

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta(i)^T \Delta(i)}} \quad (20)$$

### ۳-۱-۲- حرکت دسته جمعی

بین برخی باکتری ها از طریق مواد جذب کننده با همدیگر تبادل سیگنال وجود دارد. لذا برای هر باکتری، حرکت دسته جمعی به صورت زیر تعریف می شود:

$$J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S J_{cc}^i(\theta, \theta^i(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S [-d_{attract} \exp(-\omega_{attract} \sum_{m=1}^P (\theta_m - \theta_m^i)^2)] + \sum_{i=1}^S [h_{repellant} \exp(-\omega_{repellant} \sum_{m=1}^P (\theta_m - \theta_m^i)^2)] \quad (21)$$

که در آن  $h_{repellant}$  ارتفاع (دامنه) سیگنال دفعی و  $w_{repellant}$  پهنای ماده دفع کننده است.  $J_{cc}(\theta, P(j, k, l))$  ترکیب آثار جذب و دفع سلول به سلول و  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_p]^T$  یکی از نقاط حوزه بهینه سازی است. همچنین  $\theta_m^i$ ، امین مؤلفه موقعیت باکتری  $i$  ام ( $\theta^i$ ) و  $\theta_m$ ، امین مؤلفه باکتری مورد نظر است.  $d_{attract}$  عمق ماده جذب کننده و  $w_{attract}$  میزان پهنای

سیگنال جذب کننده است. همچنین

$$h_{repellant} = d_{attract} \text{ است.}$$

### ۳-۱-۳- تولید مثل

پس از تعداد  $Nc$  گام حرکت، یک تولید مثل اتفاق می افتد. اگر  $S$  تعداد باکتری ها و  $S_r = S/2$  تعداد اعضای از جمعیت دارای مواد غذایی کافی باشد،  $S_r$  باکتری بدون هیچ جهشی تولید مثل می کنند و  $S_r$  باکتری باقی مانده از بین می روند تا همواره تعداد باکتری ها ( $S$ ) ثابت باقی بماند.

### ۳-۱-۴- حذف و پراکندگی

در جستجوی باکتریایی بعد از تعداد معینی از فرآیند تولید نسل پیشامد پراکندگی اتفاق می افتد. برای هر باکتری  $P_{ed}$  به عنوان احتمال حذف و پراکندگی آن باکتری تعریف می شود.  $N_{ed}$  تعداد پدیده حذف و پراکندگی است.

### ۳-۲- روش Nelder-Mead (NM)

یک روش ساده برای یافتن یک مینیمم محلی از یک تابع چند متغیره توسط Nelder و Mead ابداع شده است [۱۲]. برای نمونه روش جستجوی مستقیم NM برای مینیمم سازی یک تابع غیرخطی در فضای دو بعدی در شکل (۵) نشان داده شده است. در این روش با حرکت به سوی نقطه مینیمم، اندازه مثلث، کوچک و کوچکتر می شود. در ادامه، فرایند روش جستجوی مستقیم NM در فضای دو بعدی بیان شده است.

### ۳-۲-۱- تعیین مثلث اولیه

در روش بهینه سازی NM، الگوریتم با سه نقطه اولیه  $(B, G, W)$  آغاز می گردد. این سه نقطه، یک مثلث را تشکیل می دهند. مقدار تابع  $Z_k = f(x_k, y_k); k = 1, 2, 3$  در هر سه نقطه به دست می آید. اکنون اگر  $Z_1 < Z_2 < Z_3$  باشد، آنگاه (Best)  $B = (x_1, y_1)$  و

حالت، دو نقطه میانی  $C_1$  و  $C_2$  به عنوان کاندید جدید در الگوریتم NM در نظر گرفته می‌شود. و مقدار تابع در این دو نقطه به دست می‌آید:

$$C_1, C_2 = M \pm k(M - W) \quad (25)$$

که  $k$  ضریب انقباض با مقداری کوچکتر از یک است. هر یک از نقاط  $C_1$  و  $C_2$  که تابع هدف در این نقاط مقدار کمتری داشته باشد، آن نقطه  $C$  نامگذاری می‌شود.

### ۳-۲-۳-۶- حرکت به سمت کوچک شدن (انقباض)

اگر  $f(x_C, y_C) > f(x_W, y_W)$ ، نقاط  $W$  و  $G$  باید نسبت به نقطه  $B$  کوچک شوند. بنابراین، نقطه  $G$  با نقطه  $M$  و نقطه  $W$  با نقطه  $S$  جایگزین می‌شود:

$$S = \left( \frac{B+W}{2} \right) = \left( \frac{x_1+x_3}{2}, \frac{y_1+y_3}{2} \right) \quad (26)$$

### ۳-۳- الگوریتم BF همراه با Nelder-Mead

فلوچارت این روش در شکل (۶) نمایش داده شده است. در این فلوچارت در ابتدا در الگوریتم BF اجرای حلقه‌های دفع و پراکندگی، تولیدمثل و حرکت به سمت ماده غذایی آغاز می‌شود. سپس اعمال شنا و غلتیدن انجام می‌گردد. در ادامه الگوریتم NM فراخوانی می‌شود و بهترین مقدار به دست آمده از الگوریتم BF با جواب به دست آمده از الگوریتم NM مقایسه می‌شوند. اگر مقدار به دست آمده از الگوریتم NM از مقدار به دست آمده از الگوریتم BF کمتر باشد، مقدار بدست آمده از الگوریتم NM به عنوان بهترین مقدار ذخیره می‌گردد. پس از آن، در صورتی که حلقه حرکت به سمت ماده غذایی تمام شده باشد، وارد حلقه تولیدمثل می‌شود. در غیر این صورت، حلقه حرکت به سمت ماده غذایی ادامه پیدا می‌کند. پس از اتمام حلقه‌های حرکت به سمت ماده غذایی و تولیدمثل، حلقه دفع و پراکندگی اجرا می‌شود که آخرین حلقه از الگوریتم ترکیبی است.

(Good)  $G = (x_2, y_2)$  و (Woest)  $W = (x_3, y_3)$  نام‌گذاری می‌گردد.

### ۳-۲-۲- تعیین نقطه میانی ناحیه مناسب

در این قسمت، نقطه میانی  $M$  از پاره‌خط واصل بین  $G$  و  $B$  به دست می‌آید که:

$$M = \left( \frac{B+G}{2} \right) = \left( \frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2} \right) \quad (22)$$

### ۳-۲-۳- عمل بازتاب با استفاده از نقطه R

نقطه  $R$  با استفاده از عمل بازتاب بر روی ضلع  $\overline{BG}$  طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

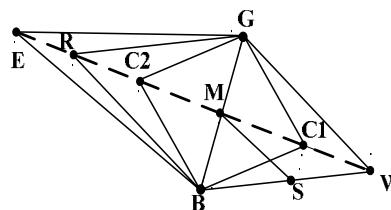
$$R = M + (M - W) = 2M - W \quad (23)$$

### ۳-۲-۴- عمل انبساط با استفاده از نقطه E

اگر  $f(x_R, y_R) < f(x_W, y_W)$ ، جهت صحیحی برای مینیمم کردن به دست آمده است. در این حالت از مثلث انبساط یافته  $BGE$  استفاده می‌شود و نقطه  $E$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = M + \eta(M - W) \quad (24)$$

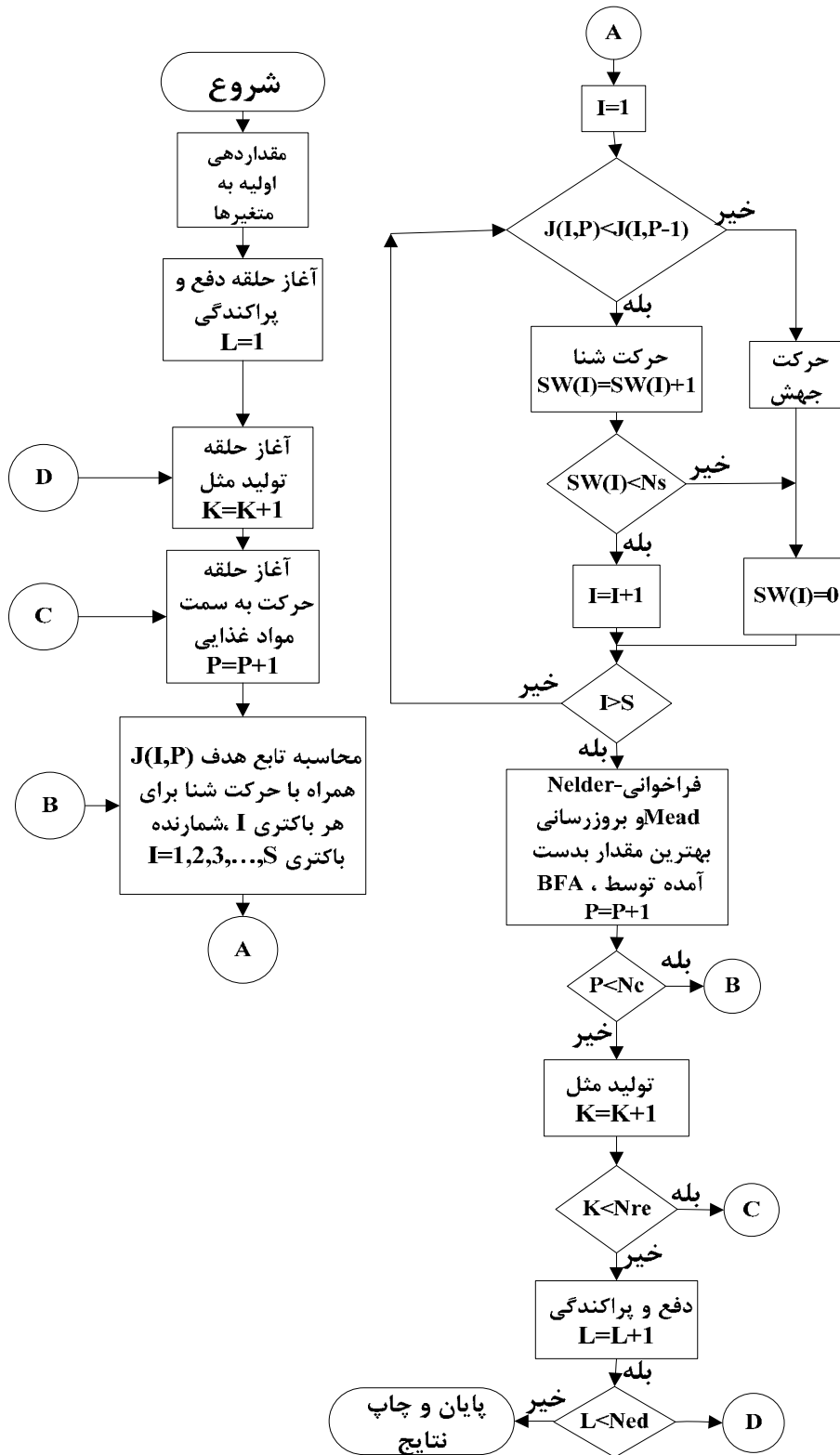
که  $\eta$  ضریب انبساط بوده، دارای مقداری بزرگتر از یک است. اگر مقدار تابع در نقطه  $E$ ، کمتر از مقدار تابع در نقطه  $R$  باشد، آنگاه نقطه بهتری نسبت به نقطه  $R$  پیدا شده است.



شکل (۵): الگوریتم Nelder-Mead در فضای دو بعدی

### ۳-۲-۵- عمل انقباض با استفاده از نقطه C

اگر  $f(x_R, y_R) = f(x_W, y_W)$  باشد، باید نقطه دیگری را برای الگوریتم NM به دست آورد. در این



شکل (۶): الگوریتم ترکیبی BF-NM

### ۳-۴- تابع هدف پیشنهادی

برای طراحی همزمان پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و STATCOM از تابع هدف زیر استفاده می شود [۱۶]:

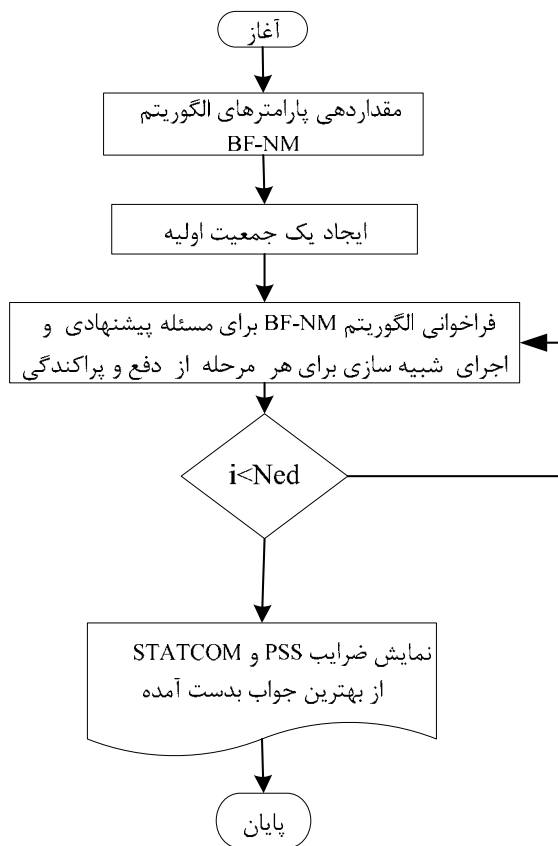
$$of = \sum_{i=1}^n (o_{sh,i} \times 10^6)^2 + (u_{sh,i} \times 10^6)^2 + (t_{st,i} \times 10^3)^2 + \left( \frac{d}{dt} (\Delta\omega_{r,i}) \times 10^6 \right)^2$$

subject to:

$$\begin{aligned} K_{PSS,i}^{\min} \leq K_{PSS,i} \leq K_{PSS,i}^{\max}, T_{1,i}^{\min} \leq T_{1,i} \leq T_{1,i}^{\max} \\ T_{2,i}^{\min} \leq T_{2,i} \leq T_{2,i}^{\max}, T_{3,i}^{\min} \leq T_{3,i} \leq T_{3,i}^{\max} \quad (27) \\ T_{4,i}^{\min} \leq T_{4,i} \leq T_{4,i}^{\max}, K_{pt}^{\min} \leq K_{pt} \leq K_{pt}^{\max} \\ K_{it}^{\min} \leq K_{it} \leq K_{it}^{\max}, K_{pc}^{\min} \leq K_{pc} \leq K_{pc}^{\max} \\ K_{ic}^{\min} \leq K_{ic} \leq K_{ic}^{\max} \end{aligned}$$

که در آن  $t_{st,i}$  و  $u_{sh,i}$ ،  $o_{sh,i}$  به ترتیب فرجهش فوجش و زمان نشست سرعت ژنراتور سنکرون  $i$  ام است.

در طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و STATCOM، بهره  $K_{PSS}$  و ضرایب  $T_1$  تا  $T_4$ ، PSS، و ضرایب PI حلقه ولتاژ ac و dc،  $K_{pt}$  و  $K_{it}$  و  $K_{pc}$  و  $K_{ic}$  مربوط به STATCOM به دست می آید. فلوجارت طراحی هماهنگ PSS و STATCOM با استفاده از روش BF-NM در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین پارامترهای الگوریتم BF-NM در جدول (۱) نشان داده شده است [۱۲]. با توجه به شکل (۷)، پارامترهای الگوریتم BF-NM مقداردهی می گردد. سپس یک جمعیت اولیه تشکیل می گردد. براساس این جمعیت اولیه، الگوریتم BF-NM فراخوانی می شود. عملکرد این الگوریتم در شکل (۶) توضیح داده شده است. پس از پایان تعداد تکرار، ضرایب PSS و STATCOM مربوط به بهترین جواب به دست آمده مشخص می گردد.



شکل (۷): فلوجارت مسأله هماهنگی PSS و STATCOM



جدول (۱): پارامترهای الگوریتم BF-NM

پارامترها	مقدار	پارامترها	مقدار
S	۵۰	$\omega_{attract}$	۰/۴
$N_c$	۵	$h_{repellent}$	۰/۰۱
$N_s$	۴	$\omega_{repellent}$	۰/۴۲
$N_{re}$	۵	k	۰/۵
$N_{ed}$	۳	$\eta$	۲
$d_{attract}$	۰/۰۱		

روش‌ها مقدار فروجهش کمتری دارند. همچنین، زمان نشست سرعت ماشین‌ها با استفاده از الگوریتم BF-NM مقدار کمتری دارد. در نهایت، سرعت ماشین‌ها در حالت طراحی هماهنگ PSS و STATCOM با استفاده از الگوریتم BF-NM دارای مشخصه پایداری بهتری است. شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) سرعت ماشین سنکرون به ازای ۵۰ MW کاهش بار در زمان  $t=1$  و افزایش ۵۰ MW بار در  $t=3$  را نشان می‌دهد. در این اشکال الگوریتم BF-PSO عملکرد نامطلوبی نسبت به دیگر روش‌های هوشمند را نشان می‌دهد. عملکرد سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم‌های PSO و BF-PSO تقریباً دارای رفتار یکسانی هستند. با توجه به اشکال (۸) تا (۱۵) می‌توان به خوبی دریافت که سرعت ماشین‌ها با استفاده از الگوریتم BF-NM دارای عملکرد به مراتب بهتری نسبت به دیگر روش‌های هوشمند است. کارایی طراحی هماهنگ PSS و STATCOM را نشان می‌دهد. به هر حال، این شکل‌ها عملکرد مطلوب طراحی هماهنگ PSS و STATCOM با استفاده از الگوریتم BF-NM را نشان می‌دهد. همچنین، پارامترهای سیستم چند ماشینه با استفاده از الگوریتم BF-NM در جدول (۲) نشان داده شده است.

نمودار همگرایی تابع هدف برای الگوریتم‌های مختلف در سیستم چند ماشینه در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، سرعت الگوریتم BF-NM در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها بهتر است.

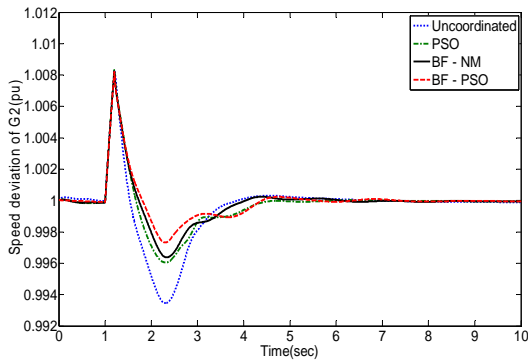
#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم چهار ماشینه نشان داده شده در شکل (۲) بررسی شده است. در این راستا، پارامترهای PSS و STATCOM با استفاده از الگوریتم BF-NM به دست آمده است. در ساختار STATCOM، چهارکنترل‌کننده PI وجود دارد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقدار توان STATCOM نصب شده برای سیستم چهار ماشینه ۱۰۰ MVAR [۱۱] است. اطلاعات سیستم تحریک و STATCOM در ضمیمه الف آورده شده است. محدوده تغییرات ضرایب مربوط به PSS با استفاده از مرجع [۱۰] در نظر گرفته شده است. همچنین، محدوده تغییرات ضرایب STATCOM،  $1 < K_{pt} < 50$ ، برای ضرایب PI حلقه ac ولتاژ و  $10^3 < K_{it} < 5 \times 10^4$  و  $0.01 < K_{pc} < 2$  و  $0.01 < K_{ic} < 20$  برای ضرایب PI حلقه dc ولتاژ است [۱۷].

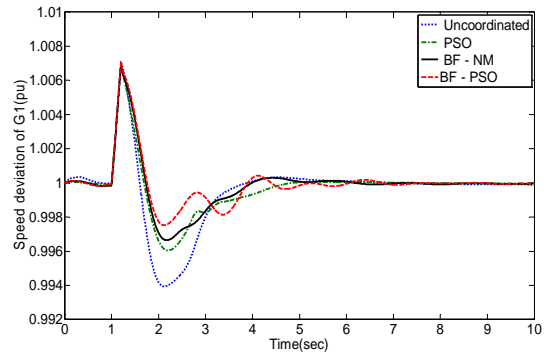
پس از یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۲۰۰ میلی ثانیه نزدیک شین ۸ سرعت، ماشین اول تا چهارم برای چهار حالت ۱- طراحی جداگانه PSS [۱۸] و STATCOM [۱۴] (Uncoordinated) با استفاده از روش‌های کلاسیک غیر هماهنگ، ۲- BF-PSO، ۳- PSO، ۴- BF-NM به ترتیب در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این اشکال، سرعت ماشین‌های دوم و سوم مشخصه میرایی مشابهی دارند. سرعت ماشین‌ها با استفاده از الگوریتم BF-PSO نسبت به سایر

جدول (۲): پارامترهای سیستم چند ماشینه با استفاده از الگوریتم BF-NM

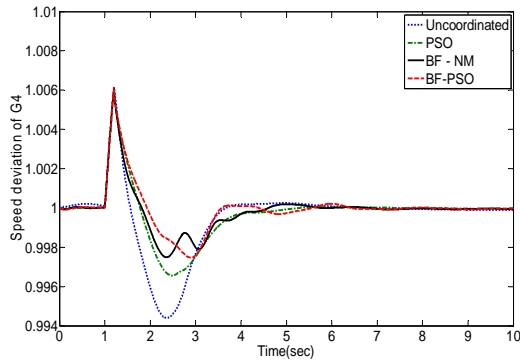
PSS ضرایب	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$K_{pss}$
ماشین ۱	۰/۸۷۹	۰/۴۱۶	۴/۱۴۰	۶/۸۳۶	۸/۶۷۸
ماشین ۲	۰/۹۸۴	۰/۷۳۴	۱/۶۷۰	۲/۲۰۴	۹/۰۶۱
ماشین ۳	۰/۳۱۹	۰/۳۰۳	۲/۶۵۱	۱۰/۳۹۶	۶/۰۶۰
ماشین ۴	۰/۳۱۳	۰/۴۳۷	۴/۰۵۹	۳/۱۵۲	۱۷/۸۰۴
STATCOM ضرایب	$K_{pt}$	$K_{it}$	$K_{pc}$	$K_{ic}$	
	۲/۳۰۹	۱۷۴۰/۷۰۶	۱/۹۱	۱۴/۴۳	



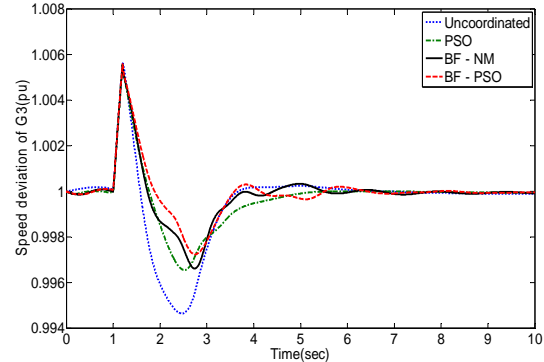
شکل (۹): سرعت ماشین دوم برای ۲۰۰ میلی ثانیه خطا



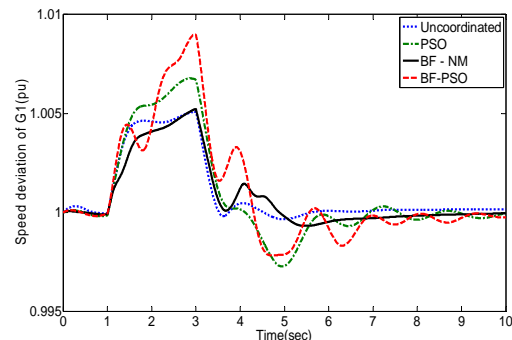
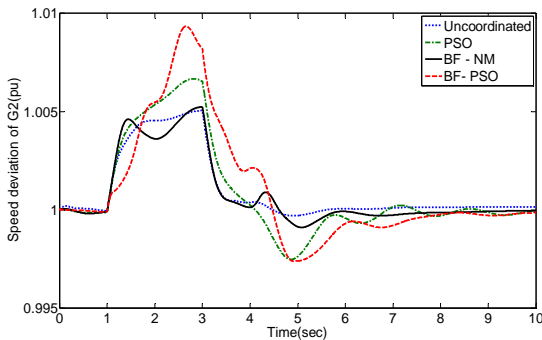
شکل (۸): سرعت ماشین اول برای ۲۰۰ میلی ثانیه خطا



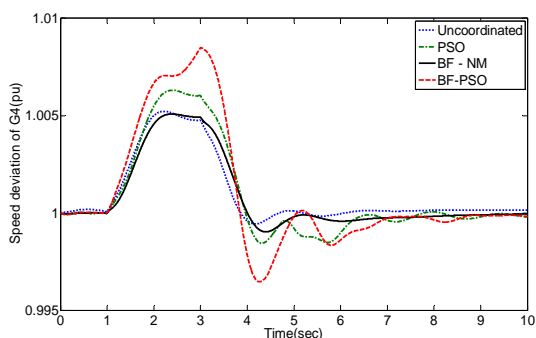
شکل (۱۱): سرعت ماشین چهارم برای ۲۰۰ میلی ثانیه خطا



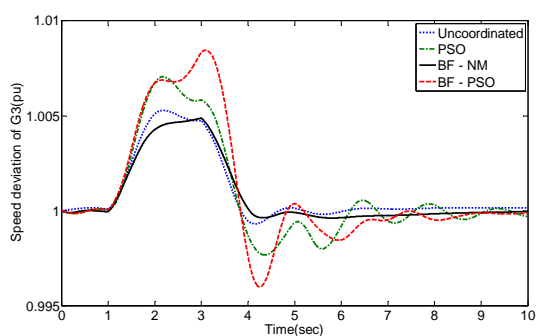
شکل (۱۰): سرعت ماشین سوم برای ۲۰۰ میلی ثانیه خطا



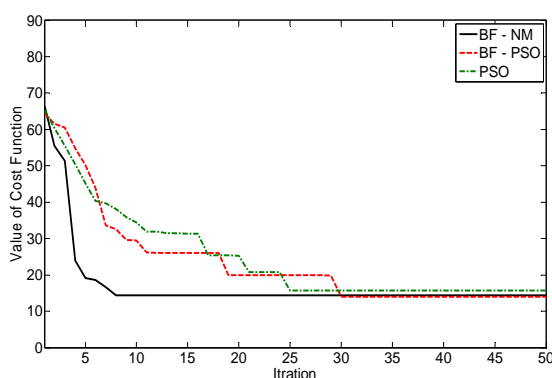
شکل (۱۳): سرعت ماشین دوم برای تغییرات بار



شکل (۱۲): سرعت ماشین اول برای تغییرات بار



شکل (۱۵): سرعت ماشین چهارم برای تغییرات بار



شکل (۱۴): سرعت ماشین سوم برای تغییرات بار

شکل (۱۶): نمودار همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی

## ۶- مراجع

- [1] Hingorani, N. G., Gyugyi, L., Understanding FACTS-Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, 2000.
- [2] Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [3] Bomfim, A. L. B., Taranto, G. N., "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms", IEEE Trans. on Power Syst., Vol. 15, No. 1, pp. 163-169, 2000.
- [4] Shayeghi H, Shayanfar H. A, Safari A, Aghmasheh R., "A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment", Energy Convers. Manage., Vol. 51, No. 4, pp. 696-702, 2010.
- [5] Abido, M. A., "Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 15, No. 3, pp. 297-304, 2000.
- [6] Das, T. K., Venayagamoorthy, G. K., Aliyu, U. O., "Bio-Inspired Algorithms for the Design of Multiple Optimal Power System Stabilizers: SPPSO and BFA", IEEE Trans. Industry Appl., Vol. 44, No. 5, pp. 1445-1457, 2008.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و STATCOM برای افزایش میرایی با استفاده از الگوریتم BF-NM انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی، با نتایج حاصل از طراحی جداگانه PSS و STATCOM، هماهنگ شده با استفاده از الگوریتم‌های PSO و BF-PSO مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی بیانگر بهبود پایداری سیستم قدرت در صورت استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌های هوشمند است. ضمناً با توجه به عملکرد مطلوب کنترل کننده طراحی شده در مقابل تغییرات سیستم، بهبود دقت و سرعت فرایند جستجوی تعیین بهینه پارامترهای سیستم نیز به اثبات رسیده است.

- [13] Faisal, S. F., Rahim, A. H. M. A., Bakhshwain, J. M., "Robust STATCOM Controller for a Multi-Machine Power System Using Particle Swarm Optimization and Loop-shaping", *Int. Journal Electr. Computer Syst. Eng.*, Vol. 1, No. 1, pp. 64-70, 2007.
- [14] Sahoo, N. C., Panigrahi, B. K., Dash, P. K., Panda, G., "Application of a multivariable feedback linearization scheme for STATCOM control", *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 62, No. 2, pp. 81-91, 2002.
- [15] Passino, K. M., "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control", *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 22, No. 3, pp. 52-67, 2002.
- [16] Ghoshal, S. P., Chatterjee, A., Mukherjee, V., "Bio-inspired fuzzy logic based tuning of power system stabilizer", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 36, No. 5, pp. 9281-9292, 2009.
- [17] Bamasak, S. M., Abido, M. A., "Robust coordination design of PSS & STATCOM controller for damping power system oscillation", 15th PSCC conference, 2005.
- [18] Yu, Y. N., *Electric Power System Dynamic Stability*, Academic press, 1983.
- [7] Cai, L. J., Erlich, I., "Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 1, pp. 294-300, 2005.
- [8] Shayeghi H, Safari A, Shayanfar H. A., "PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system", *Energy Convers. Manage.*, Vol. 51, No. 12, pp. 2930-2937, 2010.
- [9] Jyothsna, T. R., Vaisakh, K., "MOEP Based Design of PSS and FACTS for Transient Stability Improvement under Symmetrical and Unsymmetrical Fault Conditions", *IEEE Region 10 Conference*, pp. 1-6, 2008.
- [10] Bian, X. Y., Tse, C. T., Zhang, J. F., Wang, K. W., "Coordinated design of probabilistic PSS and SVC damping controllers", *Int. Journal Electr. Power Energy Syst.*, online available (2010).
- [11] Panda, S., Padhy, N. P., "Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO", *Journal Franklin Ins.*, Vol. 345, No. 2, pp. 166-181, 2008.
- [12] Panigrahi, B. K., Pandi, V. R., "Bacterial foraging optimisation: Nelder-Mead hybrid algorithm for economic load dispatch", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 2, No. 4, pp. 556-565, 2008.

## ضمیمه الف

### اطلاعات STATCOM

500 KV,  $R_p = 0/071$ ,  $L_p = 0/022$ ,  $V_{DC} = 40KV$ ,  $C_{DC} = 3757$  Micro-F,  $V_{ref} = 1/0$  pu

اطلاعات ماشین سنکرون

$X_d = 1.305$ ,  $X'_d = 0.296$ ,  $M = 6.4$ ,  $T'_{do} = 7.76$ ,  $D = 0$ ,  $V = 13.8$  KV,  $S = 1000$  MVA,

سیستم تحریک

$T_A = 0/05$ ,  $K_A = 200$ .

$V_{Smax} = 0/15$  pu,  $V_{Smin} = -0/15$  pu,

sensor time constant = 0/015

زیر نویس‌ها

<sup>i</sup> Flexible AC Transmission System

<sup>ii</sup> Power System Stabilizer

<sup>iii</sup> Thyristor Controlled Series Capacitor

<sup>iv</sup> Static Synchronous Series Compensator

<sup>v</sup> Static VAR Compensator

<sup>vi</sup> Static Synchronous Compensator