

بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با به کارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO

سعید اباذری^۱، استادیار؛ امید مرادی^{۲،۳}، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - abazari-s@eng.sku.ac.ir

۲- مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی استان اصفهان - اصفهان - ایران - moradi@jdeihe.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

چکیده: در این مقاله، یک روش جدید جهت بهبود پایداری سیستم قدرت با به کارگیری UPFC ارائه شده است. در این روش یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر مبنی ضرایب جدید شتاب (NAC-PSO) برای حل مسئله بهینه‌سازی و تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیشنهاد شده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌ها مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده لیپانوفی طراحی شده با NAC-PSO عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده‌های طراحی شده با سایر روش‌ها دارد. این روش، سیستم قدرت را نسبت به تغییر پارامترها و تغییر توپولوژی نیز گارانتی می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی اثربخشی روش پیشنهادی را تحت شرایط سیگنال کوچک برای سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و سیستم قدرت چند ماشینه (۹ باسه IEEE) نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایداری دینامیکی، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، ضرایب جدید شتاب (NAC)، کنترل کننده یکپارچه عبور توان (UPFC).

Improvement Damping Power System by using UPFC and Tuning Controller Parameter base on a New PSO Algorithm

Saeed Abazari¹, Assistant Professor; Omid Moradi^{2,3}, PhD Student

1- Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran, Email: abazari-s@eng.sku.ac.ir

2- ACECR Institute of Higher Education, Isfahan, Iran, Email: moradi@jdeihe.ac.ir

3- Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Abstract: In this paper, a new method is presented to improve the dynamic stability of the power systems using unified power flow controller (UPFC). In this method, an adaptive particle swarm optimization (PSO) algorithm based on new acceleration coefficients (NAC-PSO) is proposed for solving optimization problems and tuning the controller parameters. The performance of the proposed algorithm is compared with other methods. The simulation results show that the Lyapunov controllers designed using NAC-PSO performed better than controllers designed by other methods. This method guarantees the stability of the power system against the parameters and topology changes. Simulation results for a single-machine infinite-bus (SMIB) and multi-machine power system (IEEE 9-bus) show the effectiveness of the proposed method under small-signal conditions.

Keywords: Dynamic stability, Particle swarm optimization algorithm (PSO), New acceleration coefficients (NAC-PSO), Unified power flow Controller (UPFC).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۵ و ۱۳۹۴/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۴

نام نویسنده مسئول: سعید اباذری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - بلوار رهبر - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

بنابراین با تغییر شرایط سیستم به غیرخطی در مواردی اختلال شدید بوده و پارامترهای کنترل معتبر نیستند [۷].

مسئله طراحی کنترل‌کننده یک مسئله بهینه‌سازی با وجود مینیمم‌های محلی است. از این‌رو مطالعات زیادی برای استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف انجام شده است. عده‌ای بر مبنی الگوریتم‌های جستجوی تصادفی رقابتی که در سال‌های اخیر در محاسبات هوشمند بسیار رایج است مانند الگوریتم ژنتیک [۸-۹]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۱۰]، فرضیه تکاملی تفاضلی [۱۱] و الگوریتم جستجوی گرانشی [۱۲]، برای حل مسائل ساده و پیچیده عمل نمودند. بیشتر این‌ها از سیر تکامل در طبیعت بر اساس روش‌های جستجو الهام گرفته‌اند. PSO الگوریتمی بر اساس جمعیتی تصادفی است که توسط رفتار جمعی برخی جانوران موجب می‌شود. مهم‌ترین مزایای PSO سادگی اجرا و پارامترهای کم برای تنظیم است.

در این مقاله، یک الگوریتم جدید PSO برای طراحی UPFC مبتنی بر یک روش کنترل غیرخطی بر مبنای تابع انرژی لیاپانوفی پیشنهاد می‌شود. برای سادگی عملکرد و برای ایجاد تعادل خوب بین جستجوی سراسری و محلی، الگوریتم PSO با ضرایب شتاب جدید (NAC²-PSO) ارائه شده است. ۱۰ مسئله بهینه‌سازی اساسی معروف برای تصدیق عملکرد NAC-PSO و برای راحتی مقایسه با روش‌های مشابه استفاده شده است. آزمایش‌های عددی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی به یک راه‌حل نهایی بسیار دقیق برای توابع تست اساسی سوق پیدا می‌کند. در مجموع کنترل‌کننده غیرخطی پیشنهادی بهینه‌شده با الگوریتم جدید به تغییر شرایط عملیاتی تأثیرپذیر است. این باعث می‌شود که سیستم بتواند حتی با تغییر توپولوژی یا تغییر محل خطا نیز به خوبی عمل نماید. در این مقاله کارایی روش پیشنهادی در سیستم قدرت تک‌ماشینه و چندماشینه بررسی می‌شود.

۲- ارائه تکنیک NAC-PSO

الگوریتم PSO یک تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که توسط Kennedy و Eberhart [۱۳] برای حل مسائل بهینه‌سازی معرفی شده است. در یک سیستم PSO چندین راه‌حل کاندید شده همزمان ارائه می‌شود. هر راه‌حل، یک ذره نامیده می‌شود. در این الگوریتم دسته‌ای از ذرات (به‌عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند که بر طبق رفتار هجومی ذرات، بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند، در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر است. در الگوریتم PSO اطلاعات مربوط به سرعت و موقعیت ذرات بررسی می‌شود و سپس اندازه‌گیری محدوده موقعیت در هر چرخه تکرار می‌شود که برخی بار محاسباتی اضافی را تحمیل می‌کند. موقعیت و سرعت جدید هر ذره بر طبق معادله زیر به‌روز خواهد شد [۱۴].

با گسترش جوامع بشری نیاز به تولید و انتقال انرژی الکتریکی و ایجاد خطوط ارتباطی جدید در سیستم‌های قدرت افزایش یافته است. یکی از نتایج این مسئله، خطر از دست رفتن پایداری به‌دنبال بروز یک اغتشاش است. بنابراین در چنین شرایطی یک سیستم قدرت با بهره‌گیری از روش‌های کنترلی مناسب باید قادر باشد که پایداری خود را حفظ نماید.

در بهبود پایداری دینامیکی معمولاً از پایدارسازهای سیستم قدرت^۱ (PSS) استفاده می‌شود. پایدارساز سیستم قدرت از سیگنال سرعت فیدبک گرفته و آن را تبدیل به ولتاژ معادل توسط کنترل‌کننده Lead-Lag می‌نماید و این ولتاژ را به مرجع اضافه می‌نماید. در سیستم‌های قدرت، تنها با استفاده از PSS معمولی ممکن است میرایی نوسانات درون ناحیه‌ای با اندازه کافی بهبود داده نشود. همچنین در این روش ما نیاز به تنظیم پارامترها و هماهنگی بین عناصر داریم [۱-۵].

با پیدایش سیستم‌های انتقال توان انعطاف‌پذیر^۲ (FACTS) تغییرات شگرفی در شبکه انتقال از حیث بهره‌برداری بهتر از سیستم‌های موجود بدون از بین رفتن حاشیه پایداری مطلوب اتفاق افتاد. امروزه انواع مختلفی از ادوات FACTS موجود است که برخی به‌صورت سری و برخی موازی در شبکه قرار می‌گیرند. یکی از تأثیرگذارترین آن‌ها کنترل‌کننده یکپارچه عبور توان^۳ (UPFC) است که با توانایی تنظیم سیلان توان در خطوط انتقال توسط مبدل سری و ولتاژ ورودی مبدل موازی کاربرد وسیعی دارد [۶].

UPFC با کنترل پارامترهای مختلف شبکه، قابلیت‌های SSSC^۴ و STATCOM^۵ را ترکیب و به‌عنوان ابزاری چندمنظوره مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. بخش‌های سری و موازی در UPFC مشترکاً با یک خازن DC تغذیه می‌شوند. از لحاظ توانمندی UPFC کلیه اعمال جبران‌سازی سری و موازی را با هم انجام می‌دهد و می‌تواند به‌طور پیوسته زاویه فاز، امپدانس و دامنه ولتاژ را کنترل کند و بنابراین توان حقیقی و راکتیو خط انتقال را مستقلاً کنترل کند. بخش‌های سری و موازی در UPFC عملکرد مستقل دارند. از دیدگاهی UPFC را می‌توان با PST مقایسه نمود با این تفاوت که ولتاژ سری تزریق با هر فاز و دامنه (در محدوده تعریف‌شده) قابل دستیابی است.

به‌طور کلی UPFC با اتصال در سیستم‌های قدرت میرایی قابل توجهی فراهم می‌کند و به‌همین دلیل پارامترهای کنترلی ثابت برای طراحی UPFC مطمئناً مناسب نیستند و به یک کنترل‌کننده انعطاف‌پذیر نیاز است. روش‌های زیادی برای طراحی کنترل‌کننده ارائه شده است، از جمله می‌توان به مکان هندسی ریشه‌ها، تحلیل حساسیت و کنترل مقاوم اشاره کرد. این تکنیک‌ها چندین اشکال دارند از جمله این‌که قانون کنترل تا وقتی که پارامترهای کنترل برای تعیین شرایط عملکرد اسمی تعیین شوند به یک مدل خطی ماشین وابسته است.

جدول ۱: توابع استاندارد

Function name	Test function	n	S	f _{opt}
Sphere	$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	۳۰	$[-۱۰۰,۱۰۰]^n$	0
Schwefel	$F_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	۳۰	$[-۱۰,۱۰]^n$	0
Rotated hyper-ellipsoid	$F_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	۳۰	$[-۱۰۰,۱۰۰]^n$	0
Schwefel	$F_4(x) = \max \{ x_i , 1 \leq i \leq n \}$	۳۰	$[-۱۰۰,۱۰۰]^n$	0
Rosenbrock	$F_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i)^2 + (x_i - 1)^2]$	۳۰	$[-۳۰,۳۰]^n$	0
Step	$F_6(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	۳۰	$[-۱۰۰,۱۰۰]^n$	0
Noisy quadric	$F_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1)$	۳۰	$[-۱,۲۸,۱,۲۸]^n$	0
Ackiy	$F_8(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i\right) + 20 + e$	۳۰	$[-۳۲,۳۲]^n$	0
Griewank	$F_9(x) = \frac{1}{400} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	۳۰	$[-۶۰,۶۰]^n$	0
penalized	$F_{10}(x) = \frac{\pi}{n} \left\{ 10 \sin^2(\pi y_1) + \sum_{i=1}^n (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(3\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4}$	۳۰	$[-۵,۵۰]^n$	0

به طوری که C_{1i} و C_{2i} به ترتیب مقادیر اولیه ضرایب شتاب C_1 و C_2 هستند. همین طور C_{1f} و C_{2f} به ترتیب مقادیر نهایی ضرایب شتاب C_1 و C_2 هستند. در ضمن در این الگوریتم وزن جبری W مطابق رابطه زیر کاهش می‌یابد.

$$W = W_{\max} - \frac{(W_{\max} - W_{\min})}{k_{\max}} \times k \quad (۴)$$

که W_{\max} و W_{\min} به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی وزن هستند. k_{\max} ماکزیمم تعداد تکرارها است. معادله سرعت را می‌توان مطابق ضرایب فوق به صورت زیر بیان نمود:

$$V_i[k+1] = w \times V_i[k] + ((c_{1i} - c_{1f}) \times \exp[-4k/k_{\max}])^2 + c_{1f} \times r_1 \times (pbest_i[k] - X_i[k]) + ((c_{2i} - c_{2f}) \times \exp[-(4k/k_{\max})^2] + c_{2f}) \times r_2 \times (gbest[k] - X_i[k]) \quad (۵)$$

برای اثبات، مقایسه و تحلیل ضرایب و عملکرد روش ارائه شده NAC-PSO. الگوریتم برای ۱۰ تابع استاندارد تست می‌شود. این توابع برای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در بسیاری از جاها استفاده می‌شوند. جدول ۱ توابع، بعد (n) ، بازه قابل قبول متغیرها ($S \subseteq R^n$) و مقدار بهینه تابع (f_{opt}) را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود تمام توابع با روش ارائه شده حداقل شده‌اند.

$$V_i[k+1] = w \times V_i[k] + c_1 \times r_1 \times (pbest_i[k] - X_i[k]) + c_2 \times r_2 \times (gbest[k] - X_i[k]), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$X_i[k+1] = X_i[k] + V_i[k+1] \quad (۱)$$

به طوری که N تعداد ذرات در ازدحام، k تعداد تکرار جاری، w یک وزن جبری، r_1 و r_2 متغیرهای تصادفی بین ۰ و ۱ و C_1 و C_2 ضرایب شتاب هستند. V_i و X_i به ترتیب سرعت و موقعیت نامین ذره هستند. $pbest$ بهترین موقعیت محلی نامین ذره را نشان می‌دهد. $gbest$ بهترین موقعیت سراسری تمام ذرات را نشان می‌دهد. اخیراً ضرایب شتاب متغیر با زمان PSO (NTVAC-PSO) در [۷] به صورت رابطه (۲) ارائه شده است.

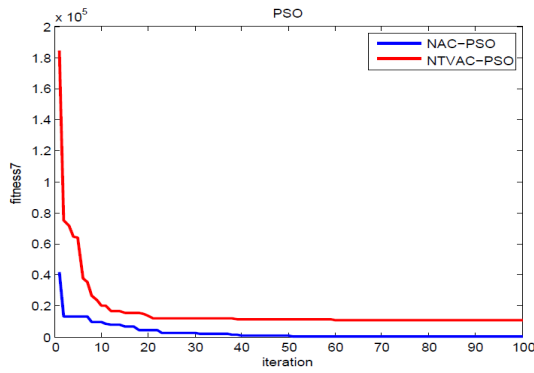
$$c_1 = (c_{1i} - c_{1f}) \times \exp[-(4k/k_{\max})^2] + c_{1f}$$

$$c_2 = (c_{2i} - c_{2f}) \times \exp[-(4k/k_{\max})^2] + c_{2f} \quad (۲)$$

در این مقاله ضرایب جدید شتاب (NAC-PSO) ارائه شده است، این ضرایب بر اساس معادلات زیر تغییر می‌کنند.

$$c_1 = (c_{1i} - c_{1f}) \times \exp[-(k)^2] + c_{1f}$$

$$c_2 = (c_{2i} - c_{2f}) \times \exp[-(k)^2] + c_{2f} \quad (۳)$$



شکل ۴: مقایسه NAC-PSO و NTVAC-PSO برای تابع F7

۳- مدل ریاضی سیستم قدرت با UPFC

شکل ۵ یک سیستم قدرت تک‌ماشینه ترکیب‌شده با UPFC را نشان می‌دهد. پارامترهای ماشین در جدول ۲ (مراجعه شود به بخش ضمایم) آورده شده است. در این شکل \bar{V}_T و \bar{V}_I به ترتیب ولتاژ ترمینال ژنراتور و ولتاژ باس بی‌نهایت می‌باشد. UPFC شامل یک ترانسفورمر سری با راکتانس X_{SH} ، یک ترانسفورمر موازی با راکتانس X_{SR} ، دو مبدل منبع ولتاژ GTO سه‌فاز و یک لینک خازن DC می‌باشد. C_{dc} و v_{dc} به ترتیب ظرفیت و ولتاژ لینک DC هستند. چهار سیگنال کنترلی UPFC شامل φ_{SH} ، φ_{SR} و m_{SR} می‌باشند که m_{SH} شاخص مدولاسیون دامنه تحریک، m_{SR} شاخص مدولاسیون دامنه تزریق، φ_{SH} زاویه فاز تحریک و φ_{SR} زاویه فاز تزریق هستند. این‌ها پارامترهای کنترلی UPFC برای جبران‌سازی توان سنکرون‌کننده در یک خط سری بدون منبع ولتاژ خارجی هستند.

۳-۱- مدل غیرخطی سیستم قدرت با UPFC

با اعمال تبدیل پارک و با در نظر نگرفتن اثرات گذرای ترانسفورمرهای سری و موازی، UPFC به صورت زیر مدل می‌شود [۱۶-۱۵].

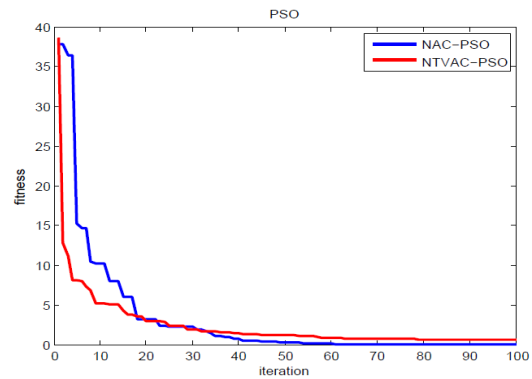
$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3m_{SH}}{4C_{dc}} [\cos\varphi_{SH} \sin\varphi_{SH}] \begin{bmatrix} I_{SHd} \\ I_{SHq} \end{bmatrix} + \frac{3m_{SR}}{4C_{dc}} [\cos\varphi_{SR} \sin\varphi_{SR}] \begin{bmatrix} I_{SRd} \\ I_{SRq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} V_{SHd} \\ V_{SHq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_{SH} \\ X_{SH} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SHd} \\ I_{SHq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_{SH} \cos \varphi_{SH} V_{dc}}{2} \\ \frac{m_{SH} \sin \varphi_{SH} V_{dc}}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

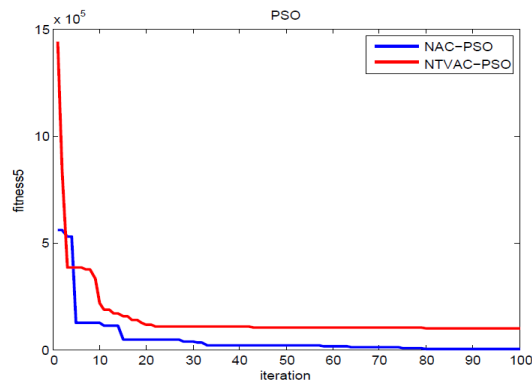
$$\begin{bmatrix} V_{SRd} \\ V_{SRq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_{SR} \\ X_{SR} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SRd} \\ I_{SRq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_{SR} \cos \varphi_{SR} V_{dc}}{2} \\ \frac{m_{SR} \sin \varphi_{SR} V_{dc}}{2} \end{bmatrix}$$

روش ارائه‌شده برای مینیمم‌سازی توابع استاندارد اعمال شده و نتایج با NTVAC-PSO مقایسه می‌شوند. برای روش ارائه‌شده مقادیر C_{1i} و C_{2f} را برابر ۲/۵، C_{1f} و C_{2i} برابر ۰/۵ و فاکتور جبری (w) به‌طور خطی از ۱ تا ۰/۴ کاهش می‌یابد. در تمام موارد اندازه جمعیت برابر ۵۰ در نظر گرفته می‌شود.

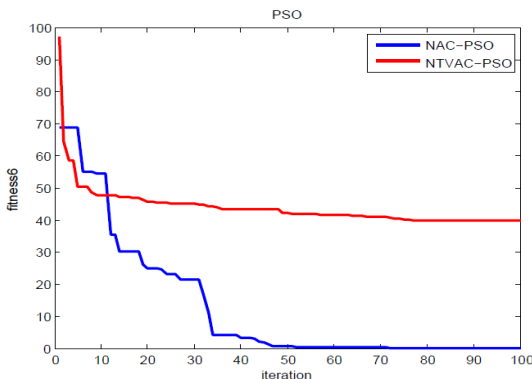
شکل‌های ۱ تا ۴ مقایسه نرخ همگرایی روش ارائه‌شده و روش NTVAC-PSO را به‌طور مثال برای توابع F_1 ، F_5 ، F_6 و F_7 نشان می‌دهند. به‌وضوح مشخص است که همگرایی روش ارائه‌شده سریع‌تر از روش TVAC-PSO ارائه‌شده در [۷] است.



شکل ۱: مقایسه NAC-PSO و NTVAC-PSO برای تابع F1



شکل ۲: مقایسه NAC-PSO و NTVAC-PSO برای تابع F5



شکل ۳: مقایسه NAC-PSO و NTVAC-PSO برای تابع F6

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_d}{\partial t} &= \frac{\partial I_d}{\partial \delta} \dot{\delta} + \frac{\partial I_d}{\partial E'_q} \dot{E}'_q + \frac{\partial I_d}{\partial V_{dc}} \dot{V}_{dc} + \frac{\partial I_d}{\partial m_{SH}} \dot{m}_{SH} \\ &+ \frac{\partial I_d}{\partial \varphi_{SH}} \dot{\varphi}_{SH} + \frac{\partial I_d}{\partial m_{SR}} \dot{m}_{SR} + \frac{\partial I_d}{\partial \varphi_{SR}} \dot{\varphi}_{SR} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_q}{\partial t} &= \frac{\partial I_q}{\partial \delta} \dot{\delta} + \frac{\partial I_q}{\partial E'_q} \dot{E}'_q + \frac{\partial I_q}{\partial V_{dc}} \dot{V}_{dc} + \frac{\partial I_q}{\partial m_{SH}} \dot{m}_{SH} \\ &+ \frac{\partial I_q}{\partial \varphi_{SH}} \dot{\varphi}_{SH} + \frac{\partial I_q}{\partial m_{SR}} \dot{m}_{SR} + \frac{\partial I_q}{\partial \varphi_{SR}} \dot{\varphi}_{SR} \end{aligned}$$

با حل معادلات (۱۰) یک سری معادلات دینامیکی جدید به دست

می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{E}'_q \\ \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_{SH} \\ \dot{\varphi}_{SH} \\ \dot{m}_{SR} \\ \dot{\varphi}_{SR} \end{bmatrix} \quad (11)$$

پارامترهای $a_{11} \dots a_{23}$ و $b_{11} \dots b_{24}$ در ضمیمه آورده شده است. عبارات i_d و i_q بدین گونه به دست آمده که یک مدل دینامیکی غیرخطی مناسب از سیستم قدرت تک‌ماشینه را بیان می‌کند که ورودی‌های آن مشتق پارامترهای کنترلی UPFC، φ_{SR} ، φ_{SH} ، m_{SH} و m_{SR} می‌باشند. استفاده از این مدل در طراحی کنترل کننده برای UPFC بسیار مفید است. هنگامی که ورودی‌های کنترلی معادلات بالا محاسبه شوند، پارامترهای کنترل UPFC می‌توانند از طریق انتگرال‌گیری از ورودی‌های کنترل به دست آیند. با جانشین کردن مقادیر \dot{V}_{dc} ، $\dot{\delta}$ و \dot{E}'_q از معادلات (۶) و (۸) در معادله (۱۱) معادله زیر حاصل می‌شود:

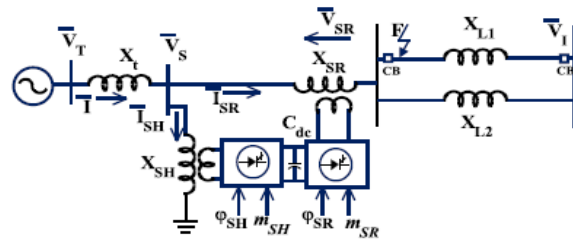
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1(x) \\ C_1(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

بر اساس معادله (۱۲) چهار انتخاب برای سیگنال‌های کنترل ورودی وجود دارد. از آن جایی که مبدل ۲ تابع اصلی UPFC با تزریق ولتاژ V_{SR} با دامنه و زاویه فاز قابل کنترل است، سیگنال‌های کنترلی φ_{SH} و m_{SH} کنترل کننده شنت چندان مهم نمی‌باشند. در این مقاله برای طراحی کنترل کننده زاویه فاز سری ثابت و دامنه ولتاژ سری متغیر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، معادله (۱۲) به صورت زیر تغییر می‌کند:

V_{SRq} ، V_{SRd} ، V_{SHq} ، V_{SHd} مؤلفه‌های $d-q$ ولتاژ تزریقی توسط مبدل‌های شنت و سری (\bar{V}_{SR} و \bar{V}_{SH}) UPFC هستند. مدل غیرخطی مرتبط با سیستم تک‌ماشینه شکل ۵ را می‌توان توسط دسته معادلات زیر نشان داد [۱۷].

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = (P_m - P_e - D(\omega - \omega_0)) / M \\ \dot{E}'_q = (-E_q + E_{fd}) / T'_{d0} \end{cases} \quad (8)$$

که در آن δ ، ω ، P_m ، D ، M و T'_{d0} به ترتیب زاویه روتور، سرعت زاویه‌ای، قدرت مکانیکی ورودی، ضریب میرایی، لختی ژنراتور و ثابت زمانی محور مستقیم مدار باز ژنراتور است و داریم:



شکل ۵: سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با UPFC

$$\begin{aligned} P_e &= V_{Td} I_d + V_{Tq} I_q \quad (9) \\ V_{Td} &= X_q I_q, V_{Tq} = E'_q - X'_d I_d \\ V_T &= V_{Td} + jV_{Tq}, E_q = E'_q + (X_q - X'_d) I_d \\ I_d &= I_{SHd} + I_{SRd}, I_q = I_{SHq} + I_{SRq} \end{aligned}$$

که I_d و I_q مؤلفه‌های $d-q$ جریان ترمینال ژنراتور \bar{I} هستند. I_{SHd} ، I_{SRd} ، I_{SHq} ، I_{SRq} مؤلفه‌های $d-q$ جریان‌های شنت و سری (\bar{I}_{SR} ، \bar{I}_{SH}) UPFC هستند که در پیوست ۱ آورده شده است.

معادلات (۷) و (۹) معادلات جبری هستند، در حالی که معادلات (۶) و (۸) معادلات دیفرانسیل هستند. ترکیب آن‌ها با همدیگر مدل تقریبی از سیستم قدرت را تشکیل می‌دهد. اما طراحی کنترل کننده در این محیط دشوار است. بنابراین، بهتر است از یک مجموعه معادلات مناسب به جای مجموعه معادلات جبری استفاده شود. برای این منظور، از معادلات جریان ترمینال ژنراتور $I_d = I_{SHd} + I_{SRd}$ و $I_q = I_{SHq} + I_{SRq}$ برای به دست آوردن \dot{I}_d و \dot{I}_q مشتق گرفته که روشی برای داشتن مدل دینامیکی شبکه است [۱۹-۱۸].

است. به همین منظور مطابق تابع انرژی لیاپانوف داریم:

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M (\omega - \omega_0)^2 + [-P_m(\delta - \delta_0) - P_{\max}(\cos \delta - \cos \delta_0)] \quad (17)$$

که در آن جمله اول معرف انرژی جنبشی سیستم و دومین جمله بیانگر انرژی پتانسیل سیستم نسبت به نقطه تعادل δ_0 است. طبق رابطه (۱۷) مقدار تابع انرژی لیاپانوف، در نقطه تعادل δ_0 برابر صفر است. بعد از ایجاد خطا در سیستم مقدار تابع انرژی سیستم شروع به افزایش می‌کند. برای بهبود پایداری سیستم، بایستی مقدار تابع انرژی سیستم به سرعت به صفر میل کند، چرا که به صفر رساندن تابع انرژی لیاپانوف در حقیقت نشانگر رسیدن سیستم به وضع تعادل است. حال با مشتق‌گیری از (۱۷) و جایگذاری متغیرهای (۱۴) در آن داریم:

$$\dot{V}(x) = Mx_3x_2 - P_mx_2 + P_{\max} \sin(x_1 + \delta_0)x_2 \quad (18)$$

وقتی سیستم در نزدیکی نقطه تعادل پایدار مجانبی است که $\dot{V}(x)$ معین منفی باشد. این مسئله با فرض زیر به دست می‌آید.

$$x_3 = \frac{1}{M} [-k_d x_2 + P_m - P_{\max} \sin(x_1 + \delta_0)] \quad (19)$$

ثابت طراحی k_d به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مقادیر ویژه سیستم خطی سمت چپ محور موهومی قرار گیرد. ورودی کنترلی u_3 با استفاده از مشتق‌گیری (۱۹) و جایگذاری آن در (۱۶) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u_3 = \frac{1}{g_T} \left[\frac{1}{M} (-k_d x_3 - P_{\max} x_2 \cos(x_1 + \delta_0)) - f_T \right] \quad (20)$$

برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی کنترل‌کننده در سیستم قدرت تک‌ماشینه و چندماشینه از الگوریتم NAC-PSO استفاده شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله، با ارائه نمودارها تحقق پایداری سیستم قدرت از طریق جبران‌سازی با UPFC کنترل‌شده ارائه می‌گردد. به همین منظور عملکرد کنترل‌کننده در میرایی نوسانات زاویه روتور سیستم قدرت در سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و سیستم قدرت چندماشینه (۹ باسه IEEE) با استفاده از برنامه‌نویسی MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده بهینه‌شده با NAC-PSO که در این مقاله ارائه شده است با نتایج کنترل‌کننده بهینه‌شده با NVAC-PSO مقایسه گردیده است.

$$\begin{cases} \dot{I}_d = C_1(x) + b_{13}u_3 \\ \dot{I}_q = C_2(x) + b_{23}u_3 \end{cases} \quad (13)$$

۴- طراحی کنترل‌کننده بهینه

بررسی مسئله بهبود پایداری دینامیکی UPFC با یک هدف طراحی شده که آن هم کنترل دو کمیت ژنراتور، زاویه بار δ و سرعت ω نسبت به مقادیر آن‌ها قبل از خطا یعنی δ_0 و ω_0 است. در اولین قدم از طراحی کنترل‌کننده، متغیرهای حالت جدید را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \omega - \omega_0 \\ x_3 = (P_m - P_e) / M \end{cases} \quad (14)$$

از طرفی با توجه به این‌که $P_m = E'_q I_q$ است [۲۰]. معادلات جدید سیستم به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 - \frac{D}{M\omega_0} x_2 \\ \dot{x}_3 = f_T + g_T u_3 \end{cases} \quad (15)$$

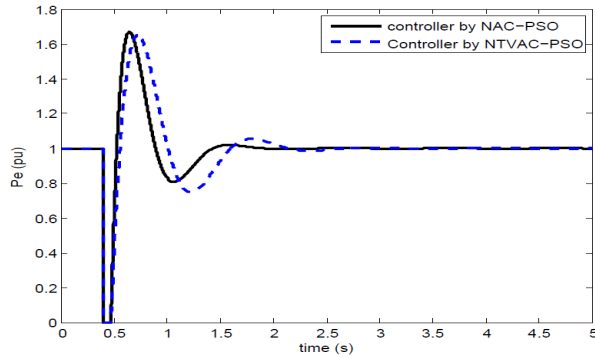
که در آن:

$$f_T = \frac{1}{M} \left[\frac{I_q E_{fd}}{T'_{d0}} - \frac{I_q E'_q}{T'_{d0}} - E'_q C_2(x) \right] + \frac{I_d I_q}{MT'_{d0}} (X_d - X'_d) \quad g_T = -\frac{E'_q b_{2i}}{M}$$

در بررسی پایداری دینامیکی بدترین حالت ممکن آن است که مقدار ضریب میرایی D ژنراتور برابر صفر باشد. به عبارتی اگر سیستم در این حالت پایدار شود، به طور قطعی در حالت‌های دیگر نیز پایدار خواهد ماند. به همین منظور در معادلات (۱۵) مقدار این ضریب را صفر در نظر می‌گیریم، بنابراین داریم:

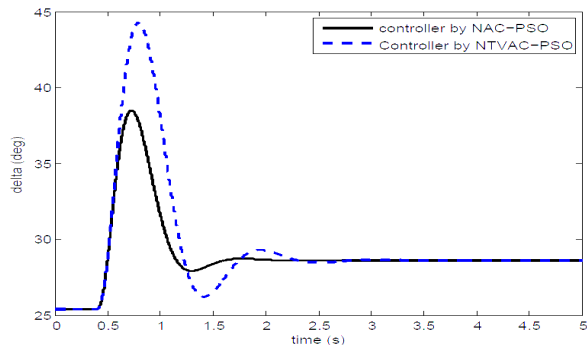
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f_T + g_T u_3 \end{cases} \quad (16)$$

سیستم قدرت با UPFC یک سیستم غیرخطی است، بنابراین به منظور دستیابی به اثربخشی کنترلی بهتر، قانون کنترلی‌ای برای شاخص مدولاسیون m_{SR} با یک روش کنترل غیرخطی طراحی شده

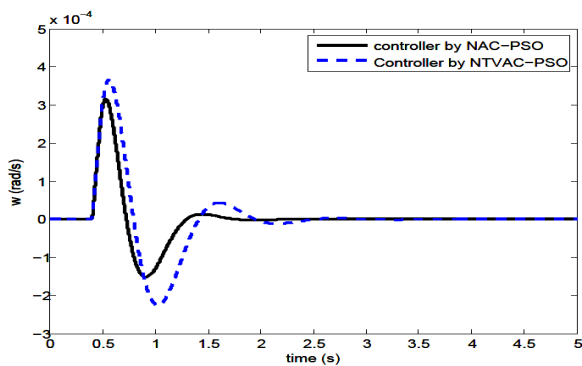


شکل ۸: توان اکتیو انتقالی از ژنراتور P_e

کنترل کننده غیرخطی پیشنهادی به تغییر شرایط عملیاتی تأثیرپذیر است. برای اثبات این موضوع در سیستم قدرت تکماشینه شکل ۵ پس از رفع خطا یک تغییر توپولوژی با خارج نمودن خط L_2 با راکتانس X_{L2} ایجاد می‌کنیم. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که سیستم قدرت می‌تواند حتی با تغییر توپولوژی نیز به خوبی عمل نماید و رفتار مناسبی در جهت میرایی نوسانات سیستم قدرت داشته باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت روش پیشنهادی عملکرد بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۹: زاویه روتور ژنراتور δ با تغییر توپولوژی



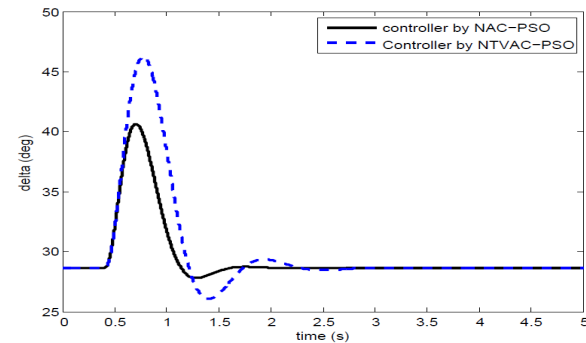
شکل ۱۰: سرعت زاویه‌ای ژنراتور ω با تغییر توپولوژی

۵-۱- سیستم قدرت تکماشینه متصل به شین بی‌نهایت با UPFC

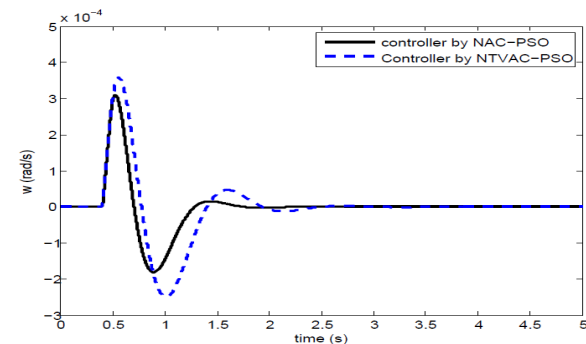
در این بخش برای بررسی کارایی UPFC، از سیستم قدرت تکماشینه متصل به شین بی‌نهایت نشان داده شده در شکل ۵ که پارامترهای آن در ضمیمه آمده است استفاده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود یک خطای سه‌فاز با علامت F در یکی از خطوط اتفاق افتاده است. برای انجام شبیه‌سازی ابتدا به مدت ۰/۵ ثانیه شبیه‌سازی سیستم بدون هیچ‌گونه خطایی اجرا می‌شود سپس خطای سه‌فاز نشان داده شده به مدت ۷۰ میلی‌ثانیه اعمال می‌شود.

در روش ارائه شده، از NAC-PSO برای حل مسئله بهینه‌سازی و جستجوی پارامترهای بهینه کنترل کننده استفاده شده است. این پروسه یک پایداری مقاوم دارد و در گستره وسیعی عملکرد رضایت‌بخشی دارد. الگوریتم NAC-PSO چندین بار قبل از انتخاب پارامترهای کنترل کننده اجرا می‌شود.

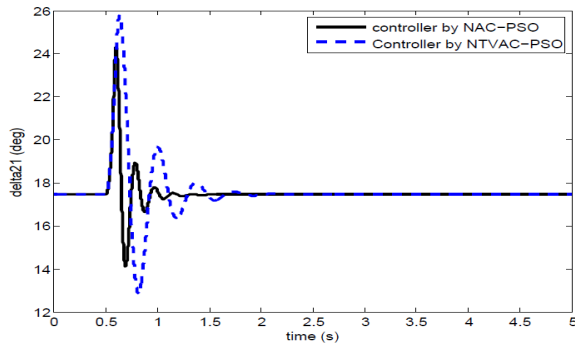
شکل ۶ زاویه روتور ژنراتور را نشان می‌دهد که با توجه به آن نوسانات سیستم بعد از وقوع خطا زیاد است و سیستم ناپایدار می‌شود. اما با استفاده از کنترل کننده بهینه پیشنهادی، نوسانات بسیار کاهش پیدا می‌کنند. در شکل‌های ۶ تا ۸ توانایی کنترل کننده پیشنهادی در بهبود نوسانات سیستم قدرت را مشاهده می‌کنید و نتایج شبیه‌سازی کنترل کننده بهینه شده با NAC-PSO، با نتایج کنترل کننده بهینه شده با NTVAC-PSO مقایسه گردیده است.



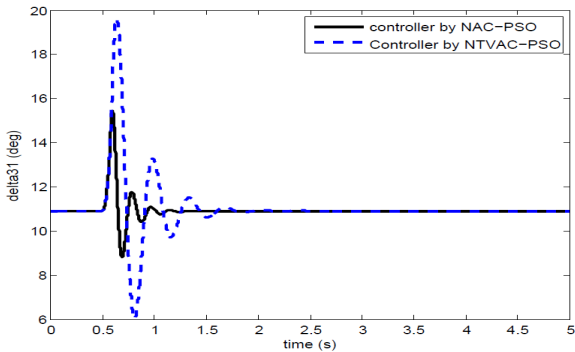
شکل ۶: زاویه روتور ژنراتور δ



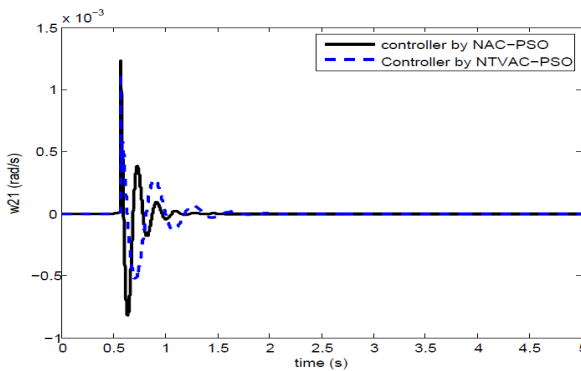
شکل ۷: سرعت زاویه‌ای ژنراتور ω



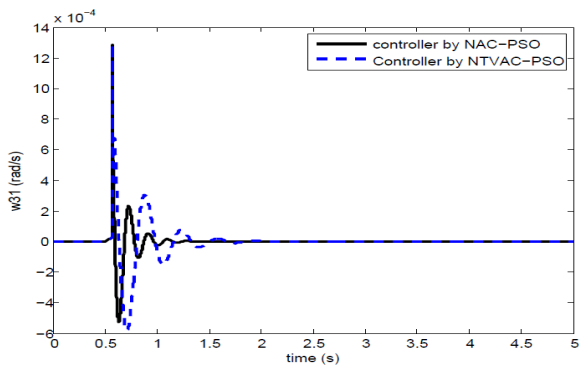
شکل ۱۲: زاویه روتور (δ_{21})



شکل ۱۳: زاویه روتور (δ_{31})



شکل ۱۴: سرعت زاویه‌ای (ω_{21})



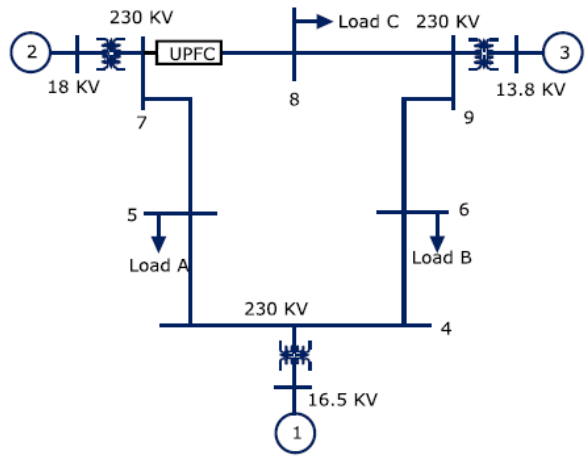
شکل ۱۵: سرعت زاویه‌ای (ω_{31})

۲-۵- سیستم قدرت چندماشینه با UPFC

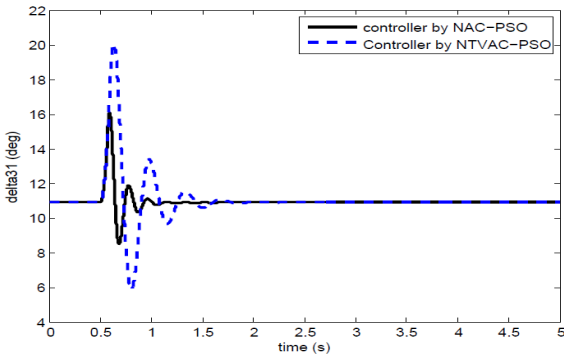
سیستم قدرت چند ماشینه انتخابی، سیستم ۹ باس، ۳ ماشین IEEE است که در شکل ۱۱ نمایش و پارامترهای آن نیز در جدول ۳ (مراجعه شود به بخش ضمیمه) آورده شده است [۲۱]. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، UPFC بین باس‌های ۷ و ۸ می‌باشد. مکان UPFC در سیستم قدرت بر اساس عملکرد استاتیکی و یا دینامیکی به دست می‌آید. روش‌های متعددی برای یافتن محل UPFC در سیستم‌های قدرت وجود دارد. انتخاب مکان‌های مناسب برای UPFC باید به‌صورتی باشد که باعث بهبود عملکرد سیستم با استفاده از همه مزایای شبکه قدرت شود. بنابراین یک محل برای UPFC بر اساس بهترین عملکرد سیستم قدرت انتخاب می‌شود.

مزیت اصلی قرار گرفتن UPFC بین باس‌های ۷ و ۸، کنترل ژنراتور (G_2) با بار سنگین می‌باشد. نوسانات بین ناحیه‌ای می‌تواند به‌راحتی با UPFC ای که بین خطوط انتقال قرار می‌گیرد میرا شوند.

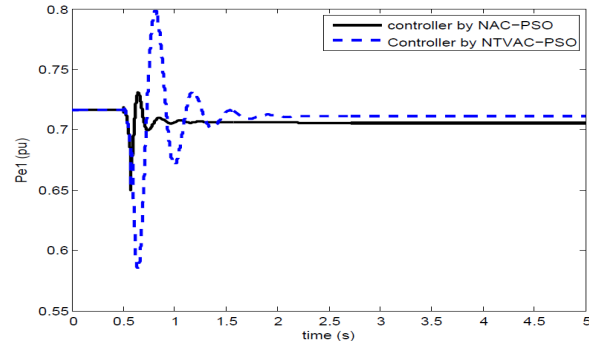
برای بررسی کارایی روش به‌کاررفته، ۲ سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول یک خطای سه‌فاز به زمین در نزدیکی باس ۵ در نظر گرفته شده که پس از ۷۰ میلی‌ثانیه پاک می‌شود و در سناریوی دوم با تغییر محل خطا از باس ۵ به باس ۶ عملکرد کنترل‌کننده بررسی می‌شود. با اجرای سناریوی ۱ تغییرات زاویه بار، سرعت زاویه‌ای و توان حقیقی ژنراتور ۲ و ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور ۱ در شکل‌های ۱۲ تا ۱۸ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌ها به‌وضوح مشخص است که کنترل‌کننده بهینه‌شده با روش پیشنهادی NAC-PSO توانایی قابل ملاحظه‌ای در بهبود نوسانات سیستم قدرت را دارد.



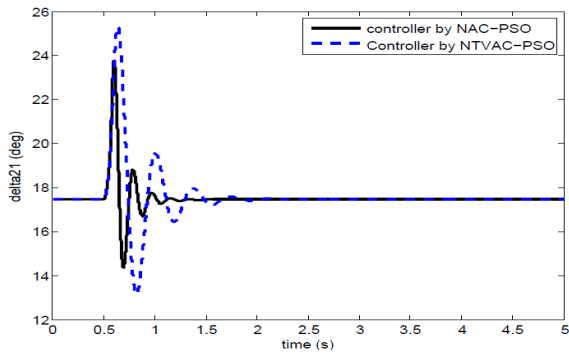
شکل ۱۱: سیستم ۹ شینه و ۳ ماشین IEEE



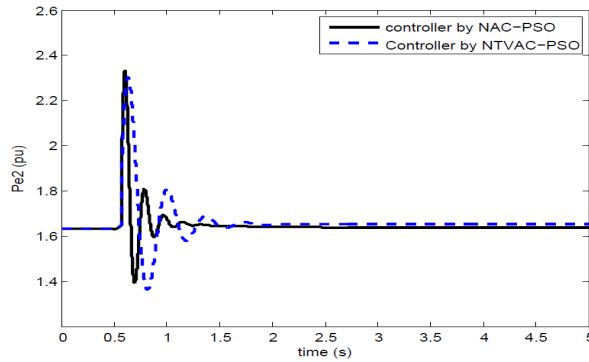
شکل ۱۹: زاویه روتور (δ_{21}) در سناریوی ۲



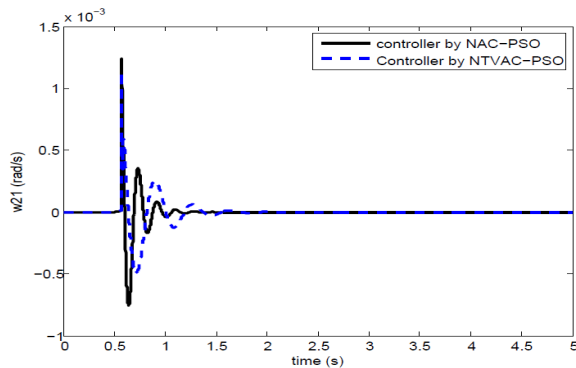
شکل ۱۶: توان اکتیو (P_{e1})



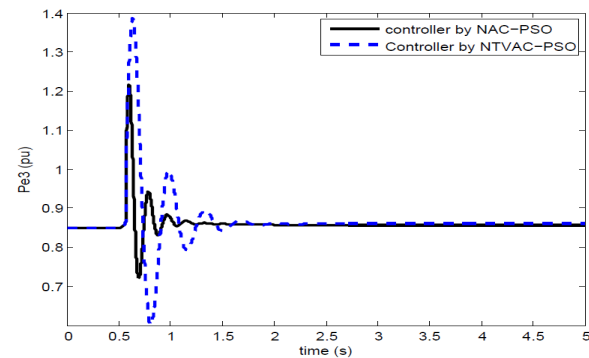
شکل ۲۰: زاویه روتور (δ_{31}) در سناریوی ۲



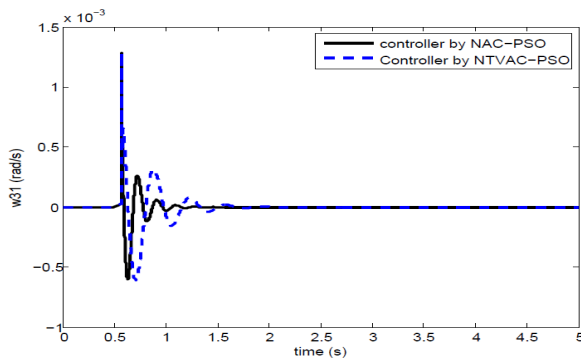
شکل ۱۷: توان اکتیو (P_{e2})



شکل ۲۱: سرعت زاویه‌ای (ω_{21}) در سناریوی ۲



شکل ۱۸: توان اکتیو (P_{e3})



شکل ۲۲: سرعت زاویه‌ای (ω_{31}) در سناریوی ۲

روش پیشنهادی مانند روش ارائه شده NTVAC در [۷] عدم وابستگی به محل خطا دارد که با اجرای سناریوی دوم قابل اثبات است.

شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ تغییرات زاویه بار و سرعت زاویه‌ای ژنراتور ۲ و ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور ۱ را با اجرای سناریوی ۲ نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رفت روش پیشنهادی عملکرد بهتری از نظر سرعت میرایی و دامنه نوسانات، از خود نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم جدید PSO بر اساس ضرایب جدید شتاب (NAC-PSO) ارائه شده است. این روش بدون محاسبات پیچیده ریاضی قابل اجراست و تعادل خوبی بین جستجوی سراسری و محلی الگوریتم اصلی ایجاد می‌کند. عملکرد این روش توسط ۱۰ مسئله بهینه‌سازی اساسی ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی برای تمام مسائل به یک راه‌حل نهایی بسیار دقیق دست پیدا می‌کند. در این مطالعه یک مدل دینامیکی از شبکه قدرت با ژنراتور مدل درجه سوم و UPFC به‌عنوان عنصر پایدارساز استفاده شده است. پس از تعیین فرم استاندارد، یک کنترل‌کننده تابع انرژی لیاپانوفی برای کاهش نوسان ژنراتور ارائه شده است. کنترل‌کننده لیاپانوفی بهینه‌شده با NAC-PSO بر روی سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و سیستم چندماشینه (۹ باسه IEEE) پیاده‌سازی گردید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی علاوه بر تأثیر قابل ملاحظه‌ای که در کاهش دامنه نوسانات سیستم قدرت نسبت به الگوریتم NTVAC-PSO داشت، همچنین نسبت به تغییر توپولوژی یا تغییر محل خطا نیز مقاوم بود.

پیوست‌ها

$$X_{SRL} = X_{SR} + X_L; X_{DT} = X_{TSHd} X_{SRL} + X_{SH} X_{Td}$$

$$X_{QT} = X_{TSHq} X_{SRL} + X_{SH} X_{Tq}$$

$$X_{SRLTd} = X_{SR} + X_L + X_t + X'_d$$

$$X_{SRLTq} = X_{SR} + X_L + X_t + X_q$$

$$X_{TSHd} = X_t + X_{SH} + X'_d; X_{Td} = X_t + X'_d$$

$$X_{TSHq} = X_t + X_{SH} + X_q; X_{Tq} = X_t + X_q$$

$$a_{11} = \frac{X_{SH} V_t \sin(\delta)}{X_{DT}}; a_{12} = \frac{X_{SRL} + X_{SH}}{X_{DT}}$$

$$a_{13} = -\frac{X_{SRL} m_{SH} \sin(\varphi_{SH}) + X_{SH} m_{SR} \sin(\varphi_{SR})}{2X_{DT}}$$

$$a_{21} = \frac{X_{SH} V_t \cos(\delta)}{X_{QT}}; a_{22} = 0$$

$$a_{23} = \frac{X_{SRL} m_{SH} \cos(\varphi_{SH}) + X_{SH} m_{SR} \cos(\varphi_{SR})}{2X_{QT}}$$

$$b_{11} = -\frac{X_{SRL} V_{dc} \sin(\varphi_{SH})}{2X_{DT}}$$

$$b_{12} = -\frac{X_{SRL} m_{SH} V_{dc} \cos(\varphi_{SH})}{2X_{DT}}$$

$$b_{13} = -\frac{X_{SH} V_{dc} \sin(\varphi_{SR})}{2X_{DT}}$$

$$b_{14} = -\frac{X_{SH} m_{SR} V_{dc} \cos(\varphi_{SR})}{2X_{DT}}$$

$$b_{21} = -\frac{X_{SRL} V_{dc} \cos(\varphi_{SH})}{2X_{QT}}$$

$$b_{22} = -\frac{X_{SRL} m_{SH} V_{dc} \sin(\varphi_{SH})}{2X_{QT}}$$

$$b_{23} = -\frac{X_{SH} V_{dc} \cos(\varphi_{SR})}{2X_{QT}}$$

$$b_{24} = -\frac{X_{SH} m_{SR} V_{dc} \sin(\varphi_{SR})}{2X_{QT}}$$

جدول ۲: پارامترهای سیستم تک ماشینه

H	۴
X _d (p.u)	۱
X' _d	۰/۳
X _q	۰/۶
X' _q	۰/۲۵
T' _{do}	۵/۰۴۴
X _T	۰/۱

جدول ۳: پارامترهای سیستم چند ماشینه

Generator	۱	۲	۳
Type	Hybro	Steam	Steam
Rated MVA	۲۴۷/۵	۱۹۲	۱۲۸
Rated KV	۱۶/۵	۱۸	۱۳/۸
Power factor	۱	۰/۸۵	۰/۸۵
Speed (r/min)	۱۸۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰
H	۲۳/۶۴	۶/۴	۳/۰۱
X _d (p.u)	۰/۱۴۶۰	۰/۸۹۵۸	۰/۳۱۲۵
X' _d (p.u)	۰/۰۶۰۸	۰/۱۱۹۸	۰/۱۸۱۳
X _q (p.u)	۰/۰۹۶۹	۰/۸۶۴۵	۱/۲۵۷۸
X' _q (p.u)	۰/۰۹۶۹	۰/۱۹۶۹	۰/۲۵
T' _{do} (sec)	۸/۹۶	۶	۵/۸۹
T' _{qo} (sec)	۰	۰/۵۳۵	۰/۶
X _i (p.u)	۰/۰۳۳۶	۰/۰۵۲۱	۰/۰۷۴۲

مراجع

[۱] س. اباذری و ص. قاندى، «بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم‌های قدرت چند ماشینه با کاربرد

- [11] Y.S. Chuang, C.J. Wu, S.C. Wang, and P.H. Huang, "Pole placement design of decentralized output feedback power system stabilizers using hybrid differential evolution," *J Marine Sci Technol*, pp. 339–350, 2007.
- [12] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed, and M. Khajehzadeh, "Gravitational search algorithm for coordinated design of PSS and TCSC as damping controller," *J Cent South Univ Technol*, vol. 19, no. 4, pp. 923–932, 2012.
- [13] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks, Piscataway: IEEE*, pp. 1942–1948, 1995.
- [14] Y. Shi, and R. Eberhart, "Modified particle swarm optimizer," *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings..Anchorage, AK, USA IEEE*, pp. 69–73, 1998.
- [15] H.F. Wang, "A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations – Part III: unified power flow controller," *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 15, no. 3, pp. 978–983, 2000.
- [16] H.F. Wang, "Damping function of unified power flow controller," *IEEE Proc Gen Transm Distrib*, vol. 146, no. 1, pp. 81–87, 1999.
- [17] K. Prabhashankar, and J. Janischewsy, "Digital simulation of multi-machine power systems for stability studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 87, no. 1, pp. 73-80, 1968.
- [18] J.P. Therattil, and P.C. Panda, "Modeling and control of a multi-machine power system with FACTS controller," *International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*, pp. 1–6, 2011.
- [19] S. Mehraeen, S. Jagannathan, and M.L. Crow, "Novel dynamic representation and control of power systems with FACTS devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1542-1554, 2010.
- [20] K. Wang, H. Xin, D. Gan, and Y. Ni, "Non-linear robust adaptive excitation controller design in power systems based on a new back-stepping method," *IET Control Theory Appl.*, vol. 4, no. 12, pp. 2947–2957, 2010.
- [21] P.M. Anderson, and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, USA, 1977.
- [2] د. فاتح، ع.الف. مطیع بیرجندی و ر. ابراهیم پور، «افزایش میرایی نوسانات سیستم قدرت با جایابی UPFC بر اساس ضریب مانده و مدهای بحرانی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۳، صفحه ۳۱–۲۳، ۱۳۹۳.
- [3] J.M. Ramirez, and I. Castillo, "PSS and FDS simultaneous tuning," *Electr Power Syst Res*, vol. 68, no. 1, pp. 33–40, 2004.
- [4] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, and M. El-Hawary, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York, Wiley-IEEE Press, 2000.
- [5] G. Li, T. Lie, G. Shrestha, and K. Lo, "Implementation of coordinated multiple facts controllers for damping oscillations," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 22, no. 2, pp. 79–92, 2000.
- [6] L. Gyugyi, C. Schauder, S. Williams, T. Rietman, D. Torgerson, and A. Edris, "The unified power flow controller: a new approach to power transmission control," *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 10, no. 2, pp. 1085–1097, 1995.
- [7] M. Eslami, H. Shareef, M. Raihan Taha, and M. Khajehzadeh, "Adaptive particle swarm optimization for simultaneous design of UPFC damping controllers," *Elsevier Ltd*, vol. 57, pp. 116-128, 2014.
- [8] M. Abido, "Parameter optimization of multimachine power system stabilizers using genetic local search," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 23, no. 8, pp. 785–794, 2001.
- [9] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed, and M. Khajehzadeh, "Damping of power system oscillations using genetic lgorithm and particle swarm optimization," *Int Rev Electr Eng*, vol. 5, no. 6, pp. 2745–2753, 2010.
- [10] M. Eslami, H. Shareef, and A. Mohamed, "Optimization and coordination of damping controls for optimal oscillations damping in multi-machine power system," *Int Rev Electr Eng*, vol. 6, no. 4, pp. 1984–1993, 2011.

زیرنویس‌ها

⁵ Static Synchronous Compensators

⁶ Particle Swarm Optimization

⁷ New Acceleration Coefficient

⁸ Nonlinear Time-Varying Acceleration Coefficients

¹ Power System Stabilizer

² Flexible AC Transmission Systems

³ Unified Power Flow Controller

⁴ Static Synchronous Series Compensator