

طراحی کنترل کننده STATCOM با استفاده از الگوریتم پسگام مقاوم بهبود یافته مبتنی بر PSO جهت کاهش اغتشاشات سیگنال بزرگ در سیستم‌های قدرت

علیرضا حق شناس^(۱) - فریبرز حقیقت دار فشارکی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۹

خلاصه: در این مقاله به منظور تضعیف اغتشاش در سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت یک جبران کننده سنکرون استاتیکی توسط الگوریتم پسگام مقاوم بهبود یافته مبتنی بر رویکرد بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهاد شده است. در رویکرد پیشنهادی از روش پسگام تطبیقی برای ایجاد تابع ذخیره‌سازی جهت تضعیف اغتشاش داخلی و خارجی استفاده می‌گردد. همچنین یک کنترل کننده غیرخطی با ویژگی حذف تداخل و بروزرسانی قانون جایگزینی پارامترهای غیرخطی به طور همزمان به کار گرفته می‌شود. در این مقاله، به منظور حفظ ویژگی غیرخطی، تخمین بلادرنگ پارامترهای نامعین، حصول اطمینان از مقاوم بودن و عدم حساسیت کنترل کننده نسبت به اغتشاش سیگنال بزرگ در سیستم STATCOM، روش کنترل مد لغزشی پسگام تطبیقی در بخش طراحی جبران‌ساز خطا اعمال شده است. لازم به ذکر است که کنترل کننده پیشنهادی دارای تعداد زیادی پارامترهای طراحی است که بر روی کارایی و عملکرد آن تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین، در اینجا رویکرد بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور تعیین پارامترهای طراحی براساس تابع هزینه انتگرال قدرمطلق خطا استفاده شده است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار MATLAB، مؤید کارایی بهتر روش کنترل مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه پیشنهادی از نظر سرعت انطباق پذیری و پاسخ سیستم STATCOM نسبت به رویکرد پسگام تطبیقی متداول و کنترل مد لغزشی پسگام تطبیقی معمولی است.

کلمات کلیدی: اغتشاش سیگنال بزرگ، سیستم قدرت تک ماشینه، جبران کننده سنکرون استاتیکی، الگوریتم پسگام تطبیقی مقاوم، کنترل مد لغزشی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

STATCOM Controller Design Using Improved Robust Back-Stepping Algorithm Based on PSO to Reduce Large Signal Disturbances in Power systems

Alireza Haghshenas⁽¹⁾ - Fariborz Haghghatdar Fesharaki⁽²⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
ali110web@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
fr_haghghat@yahoo.com

Abstract: In this paper, in order to reduce disturbance attenuation in the single-machine infinite-bus system a STATCOM is proposed by an improved robust back-stepping algorithm based on a particle swarm optimization approach. In the proposed approach, the adaptive back-stepping method is used to construct the storage function to reduce internal and external disturbances. Also, a nonlinear controller with interference rejection feature and update of the nonlinear parameter substitution law are applied simultaneously. In this research, in order to maintain non-linearities feature, the real-time estimation of uncertain parameters, ensure robustness and insensitivity to large disturbances of the STATCOM system, the adaptive back-stepping sliding mode control method is applied in terms of error compensation design. It should be noted that the proposed controller has a large number of design parameters which affect its efficiency and performance. So, here the particle swarm optimization approach is used to determine the design parameters based on the cost function of the integral of the magnitude of the error. Finally, the simulation results performed by MATLAB software, confirmed the better performance of the proposed optimal back-stepping sliding mode control method compared to traditional adaptive back-stepping in terms of the speed of adaptation and the response of the STATCOM system.

Index Terms: Large signal disturbance, single-machine power system, static synchronous compensator, adaptive back-stepping algorithm, sliding mode control, particle swarm optimization algorithm.

نویسنده مسئول: فریبرز حقیقت‌دار فشارکی، استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۱- مقدمه

امروزه به دلیل افزایش مداوم اغتشاشات و مصرف برق، پایداری سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت توجه محققان زیادی را در زمینه‌های مختلف جلب نموده است. تحقیقات نشان می‌دهد که با توسعه سریع ساختار شبکه، کنترل سیستم‌های قدرت پیچیده‌تر و بهره‌برداری از آن‌ها دارای مشکلات بیشتری همچون قطعی خارج از برنامه برق و تلفات بیشتر خواهد بود [۱]. بنابراین بکارگیری رویکردهای کنترل غیرخطی برای پایداری سیستم‌های قدرت اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. از دستاوردهای بکارگیری رویکرد کنترل غیرخطی می‌توان به سیستم انتقال جریان متناوب اعطاف‌پذیر^۱ (FACTS) شامل جبران‌ساز راکتیو استاتیکی، جبران‌ساز سری ترستور کنترل‌شده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی^۲ (STATCOM) اشاره نمود. STATCOM به عنوان یکی از کنترل کننده‌های کلیدی ادوات FACTS جهت جبران توان راکتیو و بهبود عملکرد حالت گذرا در سیستم قدرت بکار گرفته شده است [۲]. اخیراً، الگوریتم‌های پسگام به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت کنترل غیرخطی به منظور ایجاد خاصیت ضد اغتشاش در سیستم‌های قدرت بکار گرفته می‌شود [۳-۶]. در مرجع [۴] الگوریتم پسگام تطبیقی با بکارگیری کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر کنترل کننده فازی، جهت جلوگیری از نوسانات در کلیدزنی سریع سیستم قدرت دارای تأخیر زمانی، توسعه‌یافته است. برای حل مشکل اغتشاش خارجی یک کنترل کننده تضعیف اغتشاش در سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت برای اولین بار در مرجع [۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از آن نیز یک قانون کنترل با استفاده از روش پسگام بهبودیافته برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با ذخیره انرژی مغناطیسی ابررسانایی طراحی گردیده است [۸]. در ادامه این تحقیقات کنترل منفعل ساختار متغیر جهت تضمین پایداری جانبی فراگیر خطاهای ردیابی و حفظ ولتاژ ترمینال ژنراتور در مرزهای مشخص شده پیشنهاد شده است [۹، ۱۰].

به تازگی، روش‌های پسگام تطبیقی توسعه‌یافته به منظور مقابله با تأثیر عدم قطعیت پارامتری مانند ضریب دمایی بطور فزاینده‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۱۱، ۱۲]. در مرجع [۱۳] یک کنترل کننده مبتنی بر روش پسگام بهبودیافته برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با پارامترهای نامعین ارائه شده است. ژائو و همکارانش در مرجع [۱۴] کنترل کننده تطبیقی غیرخطی برای سیستم‌های قدرت پیشنهاد نمودند. در رویکرد پیشنهادی آنها کارایی گذرای سیستم با استفاده از تضمین پایداری فراگیر افزایش یافته است. همچنین جهت مقابله با اغتشاشات نامعین یک رویکرد تضعیف اغتشاش در مرجع [۱۵] مطرح شده است. در مرجع [۱۶] اولین روزنه‌های امید به منظور حل مساله عدم قطعیت پارامتری با بکارگیری روش کنترل پسگام تطبیقی مبتنی بر جبران‌ساز خطا^۳ (EC) ظهور یافته است. با توجه به مطالعات فوق، روش کنترل پسگام تطبیقی مبتنی بر جبران‌ساز خطا به منظور طراحی کنترل کننده STATCOM در این مقاله بهبود می‌یابد.

در مرجع [۱۷]، یک کنترل کننده پایداری مقاوم برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با جبران‌ساز توان راکتیو استاتیکی و عدم قطعیت در ولتاژ شین بی‌نهایت ارائه شده است. همچنین در مرجع [۱۸]، یک کنترل کننده پسگام مبتنی بر جبران‌ساز خطا برای سیستم آشوبناک نامعین پیشنهاد شده است. در این تحقیق براساس قضیه لیاپانوف، کرانه‌دار بودن یکنواخت تمامی سیگنال‌های سیستم آشوبناک کنترل شده تضمین شده است.

هدف از این تحقیق طراحی کنترل کننده پسگام مد لغزشی تطبیقی بهبودیافته با استفاده از STATCOM غیرخطی جهت تضمین پایداری مجانبی و تضعیف اغتشاش است. با بهره‌گیری از ایده جبران‌ساز خطا برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت، مزایای کنترل مد لغزشی بهبودیافته و جبران‌ساز خطا در کنترل کننده پیشنهادی گنجانده خواهد شد. سهم عمده این تحقیق به شرح زیر است:

- کنترل کننده STATCOM مد لغزشی نه تنها باعث کاهش محافظه‌کاری اغتشاش نمی‌شود، بلکه عدم حساسیت سیستم نسبت به اغتشاشات بزرگ را تضمین می‌کند.

- در مقایسه با کار قبلی در مرجع [۱۷]، افزودن جبران‌ساز خطا موجب افزایش سرعت شناسایی پارامترها، حذف اثر چترینگ ایجاد شده توسط کنترل ساختار متغیر مد لغزشی متداول و جبران طبیعت پویای خطای نامعین می‌شود. از همه این موارد مهمتر، ردیابی مجانبی دقیق با مقدار نهایی پایدار با استفاده از روش کنترل بهبودیافته است.

- تحقیق ارائه شده در مرجع [۱۸] با یک سیستم آشوبناک نامعین الهام‌بخش این مطالعه است. در این تحقیق کنترل ساختار متغیر مد لغزشی متداول با جبران‌ساز خطا در STATCOM برای مقابله با اغتشاشات نامعین و پارامترهای خارجی همچون ورودی‌های توان مکانیکی ناشناخته طراحی شده است.

- کنترل کننده پسگام مد لغزشی تطبیقی پیشنهادی پارامترهای طراحی متعددی دارد که باید مقادیر مناسب برای آنها انتخاب گردد، بطوریکه مقادیر انتخابی قیود اعمالی به سیستم را نیز برآورده کنند. از این رو در این مقاله به منظور انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای کنترل و همچنین برآورده نمودن محدودیت‌های موجود، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ (PSO) مقید پیشنهاد گردیده است.

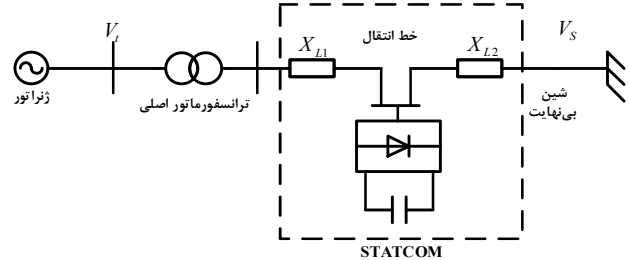
ساختار این مقاله بدین شرح می‌باشد: در بخش ۲، مفاهیم اولیه همچون دینامیک مدل سیستم قدرت و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات معرفی می‌گردد. بخش ۳ رویکرد پسگام تطبیقی متداول برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با STATCOM را ارائه می‌دهد. رویکرد کنترل ساختار متغیر مد لغزشی تطبیقی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم PSO مبتنی بر جبران‌ساز خطا در بخش ۴ مورد بحث قرار گرفته است. در بخش ۵، رویکردهای پسگام تطبیقی متداول و پیشنهادی پیاده‌سازی می‌شوند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل و مقایسه می‌گردند. در نهایت، نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ آورده شده است.

۲- مفاهیم اولیه

۲-۱- مدل دینامیکی سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین

بی‌نهایت با STATCOM

یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با STATCOM در میانه خط انتقال در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۰].



شکل (۱): سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با کنترل‌کننده STATCOM [۲].

Fig. (1): The single-machine infinite-bus system with STATCOM controller [2].

روابط ریاضی مدل دینامیکی سیستم STATCOM به صورت زیر بیان می‌شود [۲]:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= \left[-\frac{E'_q V_s \sin \delta}{X_1 + X_2} \left(1 + \frac{X_1 X_2 I_q}{\sqrt{(X_2 E'_q)^2 + (X_1 V_s)^2 + 2 X_1 X_2 V_s \cos \delta}} \right) - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) + P_m \right] \frac{\omega_0}{H} + w_1 \end{aligned} \quad (1)$$

که δ زاویه توان ژنراتور، ω سرعت زاویه ژنراتور، P_m توان مکانیکی ژنراتور، H اینرسی لحظه‌ای روتور ژنراتور، D ضریب میرایی ژنراتور، E'_q پتانسیل الکتریکی گذرا برای ژنراتور، V_s ولتاژ شین بی‌نهایت، T_q ثابت زمانی معادل سیستم کنترل STATCOM، I_q جریان راکتیو سیستم قدرت، I_{q0} جریان اولیه پایدار، X_{L1} ، X_T و X_q' و $X_1 = X_q' + X_T + X_{L1}$ و $X_2 = X_{L2}$ است. اغتشاش $w = [w_1, w_2]^T$ که w_1 و w_2 توابع ناشناخته متعلق به فضای L_2 هستند. u ورودی STATCOM و $(\delta_0, \omega_0, I_{q0})$ نقاط کار فضای حالت هستند.

برای ساده‌سازی طراحی، متغیرهای حالت سیستم (۱) به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \omega - \omega_0 \\ x_3 = I_q - I_{q0} \end{cases} \quad (2)$$

مدل (۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \theta x_2 + a_0 - k \sin(x_1 + \delta_0) [1 + f(x_1)(x_3 + I_{q0})] + w_1 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{T_q} (x_3 - u) + w_2 \\ z &= \begin{bmatrix} q_1 x_1 \\ q_2 x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

که

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\omega_0}{H} P_m, \quad k = \frac{\omega_0 E'_q V_s}{H}, \quad \theta = -\frac{D}{H} \\ f(x_1) &= \frac{x_1 x_2}{\sqrt{(X_2 E'_q)^2 + (X_1 V_s)^2 + 2 X_1 X_2 V_s \cos \delta}} \end{aligned} \quad (4)$$

ضریب میرایی D در سیستم STATCOM را نمی‌توان دقیقاً اندازه‌گیری نمود و اینرسی H یک مقدار ثابت است. بنابراین پارامتر θ نامعین است.

هدف از طراحی کنترل‌کننده STATCOM تضمین کران‌دار بودن متغیرهای حالت و همگرایی آن‌ها به نقطه کار مطلوب است. این بدان معنی است که زاویه روتور ژنراتور، سرعت زاویه روتور ژنراتور و جریان راکتیو STATCOM می‌تواند به تعادل در زمان محدود برسد.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

روش PSO یک روش سراسری بهینه‌سازی به منظور دستیابی به پاسخ مسأله عددی جواب در فضای n بعدی است. در این فضا، با در نظر گرفتن یک سرعت اولیه برای هر کدام از ذرات، آنها در فضای پاسخ حرکت می‌کنند. حال پس از هر بازه زمانی، «ملاک شایستگی» محاسبه شده و در ادامه، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بیشتری هستند، متمایل می‌گردند. مزیت اصلی این رویکرد نسبت به الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر، فراوانی تعداد ذرات به منظور فرار از پاسخ بهینه محلی است.

هر ذره دارای یک موقعیت است که با نماد $x_i(t)$ مشخص می‌گردد و موقعیت ذره i در زمان t ام را نشان می‌دهد. همچنین $v_i(t)$ سرعت ذره i ام در زمان t ام را به منظور حرکتش در فضا تعریف می‌نماید. با توجه به سرعت ذره در طول زمان، موقعیت آن تغییر می‌کند. معادله تغییر موقعیت ذره به صورت زیر می‌باشد [۱۹].

$$\begin{aligned} x(t+1) &= x_i(t) + v_i(t+1) \\ x_i(t) &\sim U(x_{\min}, x_{\max}) \end{aligned} \quad (5)$$

معیار ارزیابی مناسب بودن موقعیت یک ذره در فضای جستجو با استفاده از یک تابع برازندگی به دست می‌آید.

ذرات می‌توانند مناسب‌ترین موقعیتشان در طول حیات خود یعنی $y_i(t)$ را در حافظه خود نگه‌دارند (در بعضی از الگوریتم‌ها $y_i(t)$ به عنوان $pbest$ نیز نام‌گذاری شده است). همچنین ذرات بهترین موقعیت کل گروه $\hat{y}_i(t)$ را نیز می‌دانند (در بعضی از الگوریتم‌ها $\hat{y}_i(t)$ به عنوان $gbest$ نیز نام‌گذاری شده است). بنابراین هر ذره دو مؤلفه را جهت حرکت در فضای جستجو مد نظر قرار می‌دهد:

شین بی‌نهایت، در مرجع [۲] ارایه شده است. در ادامه، این روش به طور خلاصه بیان می‌گردد.

برای هر $\gamma > 0$ یک سیستم با سیگنال اغتشاش خارجی بزرگ و نامعین در نظر بگیرید. اکنون کنترل کننده فیدبک حالت $u = \alpha(x_1, x_2, x_3, \hat{\theta})$ را می‌توان به گونه‌ای طراحی نمود که نامعادله اتلافی زیر برای هر زمان $T > 0$ برقرار باشد:

$$V((x(t)) - V(x(0))) \leq \int_0^t (\gamma^2 \|w\|^2 - \|z\|^2) dt \quad (10)$$

و همچنین نقاط تعادل سیستم نیز پایدار باشند. بهره ناشی از اغتشاش خروجی سیستم کوچکتر از γ است و γ ثابت میرایی اغتشاش است.

به منظور طراحی کنترل کننده پسگام و مینیمم ماکزیمم، برای سیستم (۳)، x_2 را به عنوان کنترل مجازی به صورت زیر در نظر بگیرید [۲]:

$$\dot{x}_2^* = -c_1 x_1 \quad (11)$$

که $c_1 > 0$ ثابت طراحی است و فرض کنید $x_2^* = x_2 - x_1$ ، $e_1 = x_1$ ، $e_2 = x_2 - x_2^*$ همچنین کنترل مجازی x_3^* به صورت $e_3 = x_3 - x_3^*$ تعریف می‌شود.

حال با توجه به تعاریف فوق، کنترل فیدبک پسگام به صورت زیر انتخاب می‌گردد [۲]:

$$u = x_3 + T_q \left[R \left(h_1 x_1 + h_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m + c_2 e_2 \right) + \frac{1}{n_1 f(x_1)} \left[(h_1 + c_1 c_2) x_2 + P \tilde{M} + \hat{\theta} x_2 + \frac{e_2}{\gamma^2} \right] - k_3 n_1 f(x_1) - \left(c_3 + \frac{1}{2\gamma^2} \right) e_3 \right] \quad (12)$$

که

$$\tilde{M} = \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m + \frac{x_2 + c_1 x_1}{\gamma^2} - n_1 \left[1 + f(x_1)(x_3 + I_{q0}) \right] \quad (13)$$

$$\hat{\theta} = \rho \left[e_2 - \frac{e_3}{n_1 f(x_1)} (h_2 + \hat{\theta} + c_2) \right] x_2$$

و سایر متغیرهای ظاهر شده در رابطه (۱۲) به صورت زیر تعریف می‌گردند [۲]:

$$R = \frac{n_2 x_2}{n_1^2 f(x_1)} + k_3 f(x_1), \quad P = h_2 + \hat{\theta} + c_2, \quad M = \theta x_2 + k_1 P_m - n_1 \left[1 + f(x_1)(x_3 + I_{q0}) \right] + \frac{x_2 + c_1 x_1}{\gamma^2} \quad (14)$$

$$\alpha = \sigma c_1 - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 c_1^2 > 0$$

$$h_1 = \sigma + \frac{1}{2\gamma^2} c_1 - \frac{1}{2} q_2^2 c_1$$

$$h_2 = \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2} q_2^2 + c_1$$

$$n_2 = k_2 \cos \delta \quad \text{و} \quad n_1 = k_1 \sin \delta \quad \text{و} \quad k_3 = \frac{X_1 + X_2}{k_1 X_1 X_2}$$

اثبات روابط و جزئیات طراحی در مرجع [۲] ارائه شده است.

مؤلفه شناختی^۵: $y_i(t) - x_i(t)$ با توجه به بهترین پاسخی که ذره به آن دسترسی پیدا کرده است.

مؤلفه اجتماعی^۶: $\hat{y}_i(t) - x_i(t)$ با توجه به بهترین پاسخی که توسط کل گروه به دست آمده است.

بنابراین موقعیت هر ذره با استفاده از رابطه زیر ارزیابی می‌شود [۱۹].

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{if } f(x_i(t+1)) \leq f(y_i(t)) \end{cases} \quad (6)$$

که f تابع برازندگی می‌باشد.

بردار $\hat{y}_i(t)$ (بهترین موقعیت کل ذرات) به صورت فرمول (۷) محاسبه می‌گردد [۱۹].

$$\hat{y}_i \in \{y_0, y_1, \dots, y_s\} = \min \{f(y_0(t)), f(y_1(t)), \dots, f(y_s(t))\} \quad (7)$$

که S تعداد کل ذرات گروه است.

سرعت، یک بردار N_d بعدی است که v_{ij} مولفه‌ی i ام از بردار سرعت ذره i ام را نمایش می‌دهد. از این رو سرعت ذره i توسط رابطه زیر به‌روزرسانی می‌گردد [۱۹].

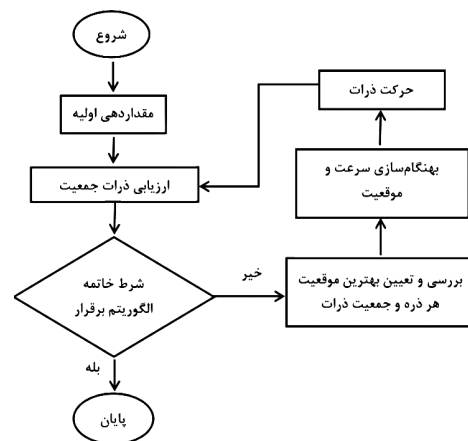
$$v_{i,j}(t+1) = w v_{i,j}(t) + c_1 r_{1,j}(t) (y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2 r_{2,j}(t) (\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t)) \quad (8)$$

که w وزن اینرسی و c_1, c_2 ثابت‌ها و همچنین $r_{1,j}, r_{2,j}$ عددی بین صفر و یک است.

موقعیت ذره i توسط رابطه (۹) به‌نگام می‌گردد [۱۹]:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (9)$$

تا زمانی که شرایط توقف برآورده گردد، سرعت و موقعیت هر ذره توسط معادلات فوق، در یک حلقه تکرار شونده به‌روزرسانی می‌شود. روندنمای الگوریتم PSO در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): روندنمای الگوریتم PSO استاندارد.

Fig. (2): Flowchart of the standard PSO Algorithm.

۳- طراحی کنترل کننده پسگام تطبیقی معمولی

روش طراحی کنترل کننده پسگام تطبیقی معمولی به منظور تضعیف سیگنال اغتشاش غیرخطی برای یک سیستم تک ماشین متصل به

$$\begin{aligned}
 H_1 = & \left(-k_1 b + \frac{1}{2} q_1^2 + \frac{1}{2} q_2^2 k_1 \right) e_1^2 - \left(\frac{e_2^2}{(1-p_1)\gamma} - \frac{\gamma}{2} \omega_1 \right)^2 \\
 & + \frac{e_2}{1-p_1} \left\{ -\frac{1}{2} q_2^2 (1-p_1)^2 k_1 e_1 \right. \\
 & + \frac{k_1}{(1-p_1)^2 \gamma^2} e_1 + b(1-p_1)^2 e_1 \\
 & + \left[\frac{1}{2} q_2^2 (1-p_1)^2 + \frac{1}{(1-p_1)^2 \gamma^2} + k_1 \right] x_2 + \theta x_2 \\
 & \left. - \frac{\gamma^2}{4} w_1 + a_0 - k \sin \delta [1 + f(x_1)(x_3 + I_{q0})] \right\}
 \end{aligned} \quad (22)$$

حال فرض کنید:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= k_1 b - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 k_1 \\
 g_1 &= -\frac{1}{2} q_2^2 (1-p_1)^2 k_1 + \frac{k_1}{(1-p_1)^2 \gamma^2} + b
 \end{aligned} \quad (23)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} q_2^2 (1-p_1)^2 + \frac{1}{(1-p_1)^2 \gamma^2} + k_1$$

که $\alpha > 0$. براساس رابطه (۳) و $e_3 = x_3 - x_3^*$ تابع پایدارساز مجازی به صورت زیر انتخاب می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 x_3^* &= \frac{g_1 e_1 + g_2 e_2 + \hat{\theta} x_2 + a_0 + k_2 e_2}{k \sin \delta f(x_1)} \\
 & - \frac{1}{f(x_1)} - I_{q0} - p_2 e_3
 \end{aligned} \quad (24)$$

که $p_2 e_3$ به ترم جبران‌ساز خطا اشاره دارد و $\hat{\theta}$ تخمین θ است. همچنین خطای تخمین زده شده برابر است با $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$. بنابراین محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= -\alpha e_1^2 - \left(\frac{e_2^2}{(1-p_1)\gamma} - \frac{\gamma}{2} w_1 \right)^2 - \frac{\gamma^2}{4} w_1 - \frac{k_2 e_2^2}{1-p_1} \\
 & + \frac{e_2}{1-p_1} [\tilde{\theta} x_2 - k \sin \delta f(x_1)(1-p_2)e_3]
 \end{aligned} \quad (25)$$

گام سوم: تابع ذخیره‌ساز سوم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\rho} \tilde{\theta}^2 \quad (26)$$

با توجه به رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{x}_3^* \\
 &= \frac{1}{1-p_2} \left\{ -\frac{1}{T_q} x_3 + w_2 - \frac{\left(g_1 + \hat{\theta} + \frac{k_1 k_2}{1-p_1} \right) x_2}{k \sin \delta f(x_1)} \right. \\
 & - \frac{\left(\hat{\theta} + g_2 + \frac{k_2}{1-p_1} \right) \mu + w_2}{k \sin \delta f(x_1)} - \frac{\dot{f}(x_1) x_2}{f^2(x_1)} + \frac{1}{T_q} u \\
 & \left. + \frac{\left(g_1 e_1 + g_2 e_2 + \hat{\theta} x_2 + a_0 + k_1 x_2 + k_2 x_2 \right) \varepsilon x_2}{k (\sin \delta f(x_1))^2} \right\}
 \end{aligned} \quad (27)$$

۴- طراحی کنترل کننده پیشنهادی مد لغزشی پسگام تطبیقی بهبودیافته توسط PSO براساس جبران‌ساز خطا

در این قسمت کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله در دو گام ارائه می‌گردد. به این منظور در بخش (۴-۱) به طراحی کنترل کننده پرداخته شده و در بخش (۴-۲) پارامترهای ظاهر شده در آن، توسط الگوریتم PSO بهینه می‌گردد.

۴-۱ طراحی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی براساس جبران‌ساز خطا

مراحل طراحی کنترل کننده پیشنهادی به شرح زیر است:
گام اول: ابتدا یک تابع جبران‌گر خطا و پایدارساز مجازی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$x_2^* = -k_1 e_1 - p_1 e_2 \quad (15)$$

که $p_1 e_2$ یک جبران‌گر خطا برای جبران اثر دینامیک خطای نامعین در فرآیند پایدارساز است. براساس رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 = x_2 \\ e_2 = x_2 - x_2^* \end{cases} \quad (16)$$

$\dot{e}_1 = -k_1 e_1 + (1-p_1)e_2$
تابع ذخیره‌ساز اول برای سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت به صورت زیر انتخاب می‌گردد:

$$V_1 = \frac{b}{2} e_1^2 \quad (17)$$

بنابراین مشتق V_1 در طول مسیر به صورت زیر است:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = -b k_1 e_1^2 + b(1-p_1) e_1 e_2 \quad (18)$$

گام دوم: تابع ذخیره‌ساز دوم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (19)$$

بطور همزمان تابع زیر تعریف می‌شود:

$$H_1 = \dot{V}_2 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2) \quad (20)$$

$$= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \left[(q_1 x_1)^2 + (q_2 x_2)^2 - \gamma^2 w_1^2 \right]$$

باید توجه داشت که:

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* \\
 &= \theta x_2 + a_0 + w_1 + k_1 x_2 + p_1 \dot{e}_2 \\
 & - k \sin \delta [1 + f(x_1)(x_3 + I_{q0})]
 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{1-p_1} (\theta x_2 + a_0 \\
 & - k \sin \delta [1 + f(x_1)(x_3 + I_{q0}) + w_1 + k_1 x_2])
 \end{aligned}$$

بنابراین:

$$u = -T_q \left\{ \frac{s \left(g_2 + \hat{\theta} + k_2 - \frac{d_2}{1-p_2} k f(x_1) \sin \delta \right)}{\gamma k \sin \delta f(x_1)} \right\}^2$$

$$\begin{aligned} & \times (1-p_2) s - \frac{1}{T_q} x_3 + \beta s + d_1 x_2 (1-p_2) \\ & - \frac{(1-p_2)^2}{1-p_1} k e_2 \sin \delta f(x_1) + \frac{d_2 k_1 x_2 (1-p_2)}{1-p_1} \\ & - \frac{\left(g_1 + \hat{\theta} + \frac{k_1 k_2}{1-p_1} \right) x_2}{k \sin \delta f(x_1)} - \frac{f(x_1) x_2}{f^2(x_1)} + \frac{s}{2\gamma^2 (1-p_2)} \\ & - \frac{\left(\hat{\theta} + g_2 + k_2 - \frac{(1-p_2) d_2 k f(x_1) \sin \delta}{1-p_1} \right)}{k \sin \delta f(x_1)} \mu \\ & + \frac{\left(g_1 e_1 + g_2 e_2 + \hat{\theta} x_2 + a_0 + k_1 x_2 + k_2 e_2 \right) \varepsilon x_2}{k (f(x_1) \sin \delta)^2} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \rho \left[\frac{e_2}{1-p_1} + \frac{s d_2}{1-p_1} - \frac{s \left(\hat{\theta} + k_1 + \frac{k_2}{1-p_1} \right)}{(1-p_2) k \sin \delta f(x_1)} \right] x_2 \quad (33)$$

سیستم حلقه بسته تحت تأثیر ورودی کنترل (۳۲) و قانون بروزرسانی پارامترهای (۳۳) خطای سیستم پایدار مجانبی است. اثبات: براساس رابطه (۳۱) می‌دانیم که $V(t) \leq V(0)$ و مقادیر $\Omega = -\dot{V}$ محدود هستند. بنابراین x_1, x_2, s, e_1, e_2 محدود و $V(t)$ کاهشی و محدود است، بنابراین $\int_0^t \Omega(\tau) d\tau = V(0) - V(t)$ چون $V(0)$ محدود و $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau < \infty$ بلاوه می‌توان نتیجه گرفت که $\dot{\Omega}$ محدود است در نتیجه براساس لم باربالات داریم $\lim_{t \rightarrow \infty} \Omega = 0$ اگر $t \rightarrow \infty$ باشد خواهیم داشت $e_2 \rightarrow 0, e_1 \rightarrow 0, x_1 \rightarrow 0, x_2 \rightarrow 0$ بنابراین براساس تعریف x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_3 می‌دانیم که $e_3 \rightarrow 0$ و نیز کرانه‌دار است.

۲-۴- نحوه‌ی انتخاب بهینه پارامترهای طراحی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی براساس جبران‌ساز خطا توسط الگوریتم PSO
شرایط انتخاب پارامترهای طراحی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی براساس جبران‌ساز خطا با توجه به قضیه ۱ به شرح زیر است:
- پارامترهای d_i و p_i به ازای $i = 1, 2$ به ترتیب برای طراحی سطح لغزشی و تشکیل جبرانگر خطا بکار گرفته می‌شوند که معمولاً صفر یا یک انتخاب می‌گردند.

که

$$\mu = \hat{\theta} x_2 + a_0 - k \sin \delta \left[1 + f(x_1) (x_3 + I_{q0}) \right] \quad (28)$$

$$\varepsilon = \dot{f}(x_1) \sin \delta + f(x_1) \cos \delta$$

تابع انرژی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$H_2 = \dot{V}_3 + \frac{1}{2} \left(\|z\|^2 - \gamma^2 \|w\|^2 \right) \quad (29)$$

اگر سطح لغزش به صورت $S = d_1 e_1 + d_2 e_2 + e_3$ تعریف گردد، محاسبه می‌شود:

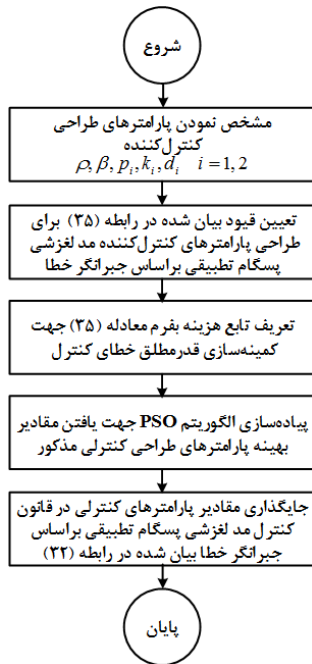
$$\begin{aligned} H_2 &= \dot{V}_2 + s \dot{s} + \frac{1}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{2} \left(\|z\|^2 - \gamma^2 \|w\|^2 \right) \\ &= H_1 - \frac{1}{2} \gamma^2 w_2^2 + s \dot{s} + \frac{1}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} + e_2 \dot{e}_2 \\ &= H_1 - \frac{1}{2} \gamma^2 w_2^2 + s (d_1 \dot{e}_1 + d_2 \dot{e}_2 + \dot{e}_3) \\ &\quad - \frac{1}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} + e_2 \dot{e}_2 \end{aligned} \quad (30)$$

براساس روابط (۱۶)، (۱۷)، (۲۴) و (۲۷) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} H_2 &= - \left(\alpha - d_1^2 \right) e_1^2 - \left(\frac{e_2^2}{\gamma} - \frac{\gamma}{2} w_1 \right)^2 \\ &\quad - \beta s^2 - \left[d_1 e_1 - \frac{k \sin \delta f(x_1) e_2 (1-p_1)}{2(1-p_1)} \right]^2 \\ &\quad - \left[\frac{k_2}{1-p_1} - \frac{(1-p_2)^2}{4(1-p_1)^2} k^2 \sin^2 \delta f^2(x_1) \right. \\ &\quad \left. - \frac{k \sin \delta f(x_1) d_2}{1-p_2} \right] e_2^2 - \frac{1}{2} \left(\gamma w_2 - \frac{s}{\gamma} \right)^2 \\ &\quad - \left[\frac{\gamma}{2} w_1 + \frac{s \left(g_2 + \hat{\theta} + k_2 - \frac{d_2}{1-p_2} k f(x_1) \sin \delta \right)}{\gamma k \sin \delta f(x_1)} \right]^2 \end{aligned} \quad (31)$$

گام چهارم: طبق رابطه (۳۱) به وضوح مشاهده می‌گردد که $H_2 < 0$.
قضیه ۱: سیستم (۳) را در نظر بگیرید. به طوری که با انتخاب مناسب پارامترهای $c_i, d_i, p_i, i = 1, 2$ شرایط $\alpha - d_i^2 > 0$ و $\frac{k_2}{1-p_1} - \frac{(1-p_2)^2}{4(1-p_1)^2} k^2 \sin^2 \delta f^2(x_1) - \frac{k \sin \delta f(x_1)}{1-p_2} > 0$ و $\beta > 0$ برآورده می‌گردند. ضرایب بهره مد لغزشی و دیگر پارامترهای طراحی باید به گونه‌ای مناسب براساس نیاز کنترل کننده حقیقی انتخاب گردد.

قانون کنترلی u و قانون جایگزینی پارامترها $\hat{\theta}$ براساس کنترل کننده ساختار متغیر مد لغزشی تطبیقی پسگام برای سیستم غیر خطی به صورت زیر خواهد بود:



شکل (۳): روندنمای طراحی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی

بهبودیافته توسط الگوریتم PSO براساس جبران ساز خطا.

Fig. (3): Flowchart of improved backstepping adaptive sliding mode controller design by PSO algorithm based on error compensation.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، تحلیل نتایج شبیه‌سازی کنترل کننده کاهش سیگنال اغتشاش بزرگ پیشنهادی با در نظر گرفتن سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت با STATCOM ارائه می‌گردد. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های پیشنهادی سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است. در سناریوی نخست یک سیگنال اغتشاش خارجی در خط انتقال اعمال می‌شود. سپس در سناریوی دوم پاسخ دینامیکی سیستم با وجود اغتشاش توان مکانیکی تحلیل می‌گردد. در نهایت پاسخ در حضور خطای اتصال کوتاه در خط انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای فیزیکی مربوط به سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت با STATCOM با توجه به معادلات (۱) به صورت جدول (۱) انتخاب می‌گردد [۲].

مقادیر ضرایب بهره تطبیقی و ضریب سطح کاهش اثر تداخل با بهره L_2 برای کنترل کننده تطبیقی متداول در زیر آمده است [۲].

$$c_1 = 2, c_2 = 1, c_3 = 1, \rho = 2, \sigma = 0.5, \gamma = 0.5$$

شکل (۴) روند کاهش تابع هزینه تعریف شده در رابطه (۳۸) متأثر از اجرای الگوریتم PSO مقید را نمایش می‌دهد. می‌توان دید که بعد از ۱۰ تکرار با اندازه جمعیت ۱۰۰، تابع هزینه به کمترین مقدار خود همگرا شده است.

- پارامترهای q_1 و q_2 ضرایب وزنی غیرمنفی هستند که نشان‌دهنده‌ی نسبت وزنی متغیرهای حالت x_1 و x_2 در خروجی سیستم هستند و توسط طراحان در بازه‌ای بین صفر و یک تعیین می‌گردند.

- پارامتر β نشان‌دهنده بهره مد لغزشی ثابت است که باید مثبت باشد. پارامتر ρ برای تنظیم پارامتر تطبیقی بکار گرفته می‌شود. این پارامتر نیز باید مثبت باشد.

- پارامترهای k_1 و k_2 برای اطمینان از پایداری معادلات اول و دوم سیستم (۳) با اعمال کنترل کننده‌های مجازی x_1^* و x_2^* مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پارامترها تنها باید مثبت باشند. با این وجود، به منظور برآورده شدن شرط رابطه (۳۱)، پارامترهای k_1 و k_2 باید به گونه‌ای انتخاب گردند که شرایط زیر را برآورده سازند:

$$\alpha - d_1^2 > 0$$

$$k_1 b - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 k_1 > 0 \quad (34)$$

$$\frac{k_2}{1-p_1} - \frac{(1-p_2)^2}{4(1-p_1)} k^2 \sin^2 \delta f(x_1)^2 - \frac{k \sin \delta f(x_1) d_2}{1-p_2} > 0$$

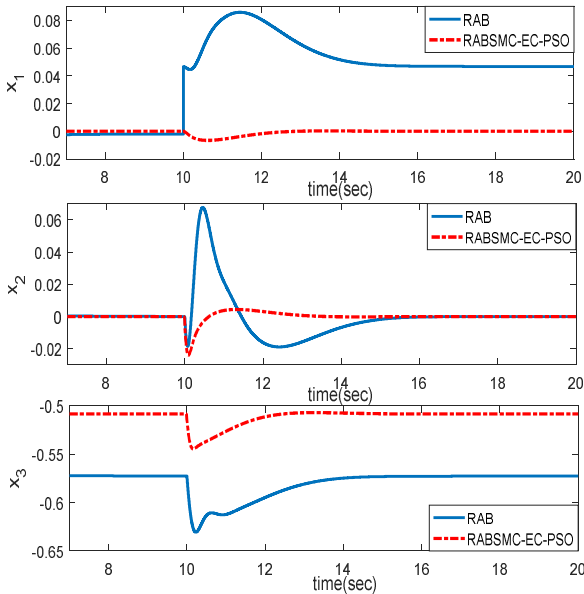
به وضوح مشاهده می‌گردد که یافتن پارامترهایی که بتواند شرایط فوق را برآورده سازد و همچنین بتواند بهترین عملکرد کنترل کننده را تضمین نماید، کار ساده‌ای نیست.

از این رو در این مقاله به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترل یک تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\min_{\rho, \gamma, \beta, b, p_1, p_2, k_1, k_2, d_1, d_2} \int_{t=T_0}^{T_f} |e_1(t) + e_2(t) + e_3(t)| dt$$

$$s.t. \begin{cases} 0 \leq (p_i, d_i) \leq 1, & i = 1, 2 \\ \beta, > 0, \rho > 0, \\ q_i \geq 0, k_i > 0, & i = 1, 2 \\ \alpha - d_1^2 > 0 \\ k_1 b - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 k_1 > 0, \\ \frac{k_2}{1-p_1} - \frac{(1-p_2)^2}{4(1-p_1)} k^2 \sin^2 \delta f(x_1)^2 > \frac{k \sin \delta f(x_1) d_2}{1-p_2} \end{cases} \quad (35)$$

همچنین در اینجا الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای کمینه‌سازی تابع هدف (۳۵) پیشنهاد می‌گردد. بنابراین در این تحقیق ابتدا توسط کمینه‌سازی تابع هدف فوق، مقادیر پارامترهای کنترلی (p_i و d_i) به ازای $q_1, q_2, \rho, \beta, k_1, k_2$ به صورت بهینه تعیین می‌گردند. پس از آن کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی براساس جبرانگر خطا به منظور کنترل سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت با STATCOM اجرا می‌شود. روندنمای طراحی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی پیشنهادی براساس جبرانگر خطا در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۵): منحنی‌های پاسخ گذرا سیستم حلقه بسته هنگامی که اغتشاش $\sin(t)e^{-t+10}$ رخ می‌دهد.

Fig. (5): The transient responding curves of the closed-loop system when $\sin(t)e^{-t+10}$ disturbance occurs.

۵-۲- اغتشاش در توان مکانیکی

در این بخش یک اغتشاش تقریباً ۵۰٪ به توان مکانیکی سیستم بفرم معادله (۳۸) وارد می‌گردد.

$$P_m = P_{m0} + \Delta P_m \quad (37)$$

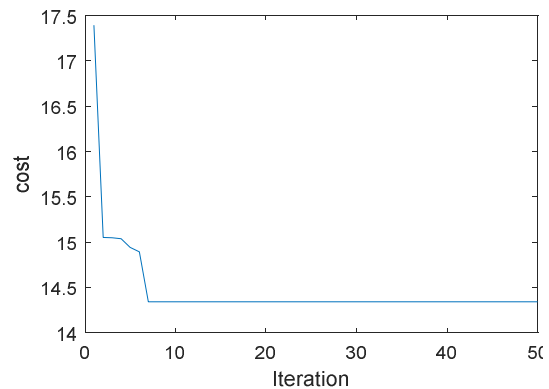
$$\Delta P_m = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 10s \\ 0.5 & 10s \leq t \leq 10.1s \\ 0 & t > 10.1s \end{cases}$$

شکل (۶) پاسخ حلقه بسته سیستم متأثر از دو کنترل کننده فوق را نشان می‌دهد. در این شکل نیز همانند سناریوی اول می‌توان دید که کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه دارای کارایی بهتری نسبت به نسخه معمولی آن خصوصاً در پاسخ به حالت اول سیستم است. زیرا همانگونه که در شکل دیده می‌شود، هنگامی که یک اغتشاش در توان مکانیکی رخ می‌دهد، در پاسخ سیستم حلقه بسته خطا ایجاد می‌گردد. کنترل کننده پسگام تطبیقی معمولی موفق به حذف این خطا نشده است. از این رو پاسخ سیستم حلقه بسته ناشی از این کنترل کننده دارای خطای حالت ماندگار است. ولی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه‌سازی شده توانسته با بهره‌مندی از جبران‌ساز خطا در ساختار خود این خطا را میرا نماید و پاسخ سیستم حلقه بسته ناشی از این کنترل کننده همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌گردد، بدون خطای حالت ماندگار می‌باشد.

Table (1): Physical parameters related to a single-machine infinite-bus system with STATCOM

جدول (۱): پارامترهای فیزیکی مربوط به سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت با STATCOM

متغیر	مقدار (واحد اندازه‌گیری)	متغیر	مقدار (واحد اندازه‌گیری)
H	$7(kg.m^2)$	X_1	$0.95(pu)$
V_s	$0.995(pu)$	X_2	$0.5(pu)$
T_q	$0.03(s)$	q_1	0.4
E'	$1.7007(pu)$	q_2	0.6
ω_0	$314.159(rad/s)$	δ_0	$1.1998(deg)$
$I_{q,0}$	$0(pu)$	P_{m0}	$0.9(pu)$
D	$5(N.s/m)$		



شکل (۴): روند کاهش تابع هزینه تعریف شده در رابطه (۳۵).

Fig. (4): The process of reducing the cost function defined in equation (35).

مقادیر پارامترهای کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه‌سازی شده توسط PSO براساس جبران‌ساز خطا بدین صورت می‌باشد:

$$\rho = 0.1, \gamma = 0.4, \beta = 1, b = 1, d_1 = 0.1, d_2 = 0.1,$$

$$P_1 = 0.01, P_2 = 0.5, k_1 = 5, k_2 = 10$$

۵-۱- اعمال سیگنال اغتشاش خارجی در خط انتقال

در این بخش یک اغتشاش خارجی بفرم زیر به خط انتقال اعمال می‌کنیم:

$$w_1 = w_2 = \sin(t)e^{-t+10} \quad (36)$$

شکل (۵) منحنی‌های پاسخ گذرای کنترل کننده پسگام تطبیقی متداول و کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی براساس جبران‌سازی خطای بهینه شده توسط PSO را نشان می‌دهد. در این شکل به وضوح مشاهده می‌شود که کنترل کننده پسگام تطبیقی متداول موفق به حذف اثر اغتشاش نشده است و پاسخ سیستم ناشی از این کنترل کننده دارای خطای حالت ماندگار در x_1, x_3 است. اما پاسخ سیستم حلقه بسته ناشی از کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه نه تنها دارای همگرایی سریع‌تر نسبت به کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی معمولی است، بلکه خطای حالت ماندگار نیز ندارد.

با توجه به این شکل می توان گفت که کنترل کننده های مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه با سرعت میرایی بالایی توانسته اثر خطای اتصال کوتاه را رفع نماید و سیستم را به نقطه تعادل خود همگرا کند. همچنین این شکل حاکی از عملکرد عالی کنترل کننده مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه است.

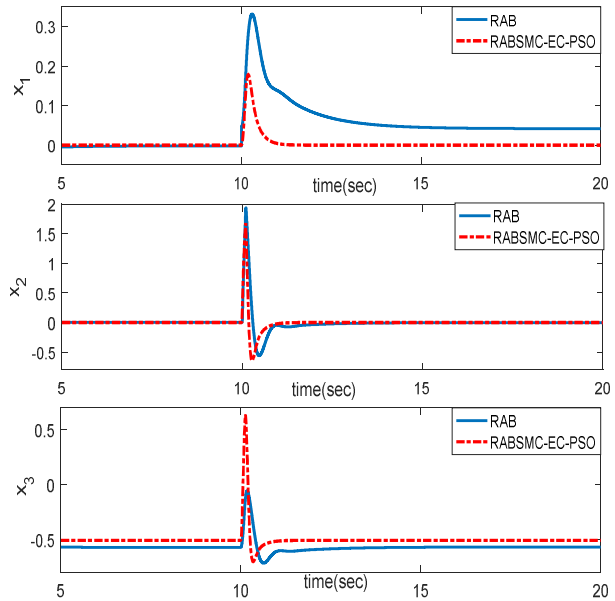
۶- نتیجه گیری

هدف اصلی از این مقاله ارایه الگوریتم مد لغزشی پسگام تطبیقی بهبود یافته توسط الگوریتم PSO برای جبران کننده سنکرون استاتیکی جهت تضعیف اغتشاش در سیستم قدرت تک ماشین متصل به شین بی نهایت است. بدین منظور ابتدا روابط الگوریتم پسگام تطبیقی سنتی جهت طراحی تابع ذخیره ساز و کنترل کننده غیر خطی با ویژگی حذف تداخل و بهنگام نمودن قانون جایگزینی پارامترهای غیر خطی بطور همزمان پیاده سازی شد. در ادامه برای توسعه الگوریتم مذکور روش کنترل مد لغزشی پسگام تطبیقی، به منظور حصول اطمینان از مقاوم بودن و عدم حساسیت نسبت به اغتشاش، همچنین حفظ ویژگی غیر خطی و تخمین بلادرنگ پارامترهای روش پیشنهادی ارائه گردید. تضمین پایداری الگوریتم پیشنهادی توسط بکارگیری جبران ساز خطا و رویکردهای کنترلی ساختار متغیر مد لغزشی صورت گرفت. همانگونه که در روابط مشاهده شد، رویکرد کنترل مد لغزشی پسگام تطبیقی مبتنی بر جبران ساز خطا دارای تعداد زیادی پارامترهای طراحی است که انتخاب نامناسب این پارامترها کارایی سیستم حلقه بسته را کاهش می دهد. از این رو در این تحقیق جهت انتخاب مناسب پارامترهای طراحی، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات مبتنی بر تابع هزینه انتگرال قدر مطلق خطا ارائه شد.

در نهایت، پاسخ دینامیکی سیستم حلقه بسته مبتنی بر دو نوع کنترل کننده پسگام تطبیقی معمولی، کنترل کننده های مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه در حضور خطای اتصال کوتاه و اغتشاش توان مکانیکی ژنراتور به عنوان اغتشاش ناگهانی ارزیابی گردید. نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده های مذکور نشان داد که بر اثر اغتشاش توان مکانیکی ژنراتور یا تغییر خطای اتصال کوتاه پاسخ دینامیکی سیستم نه تنها به سرعت به نقطه کار پایدار همگرا می شود، بلکه به طور مؤثر مانع از اغتشاشات خارجی می گردد. همچنین نتایج شبیه سازی مؤید کارایی بهتر روش کنترل مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه پیشنهادی از نظر سرعت انطباق پذیری و پاسخ سیستم STATCOM نسبت به رویکرد پسگام تطبیقی متداول است.

پی نوشت:

1. Flexible Alternate Current Transmission System
2. Static Synchronous Compensator
3. Error Compensation
4. Particle Swarm Optimization
5. Cognitive Component
6. Social Component

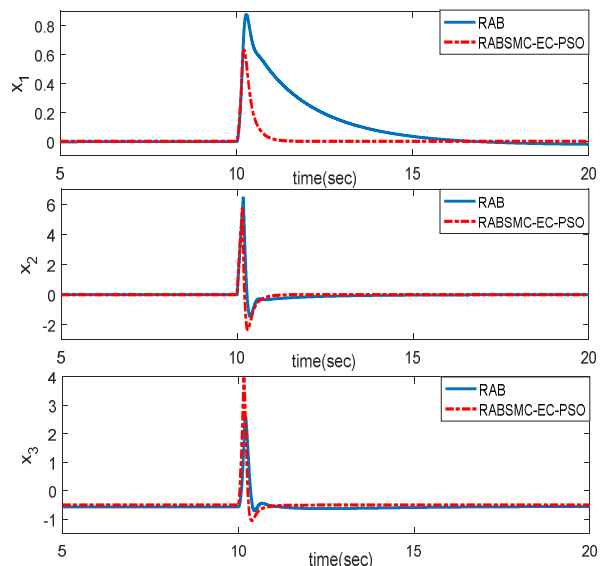


شکل (۶): منحنی های پاسخ گذرا سیستم حلقه بسته هنگامی که اغتشاش ۵۰ درصد به توان مکانیکی وارد می شود.

Fig. (6): The transient responding curves of the closed-loop system when approximately 50% disturbance occurs in the mechanical power.

۵-۳- خطای اتصال کوتاه در خط انتقال

در این سناریو فرض می شود که در انتهای خط انتقال سه فاز در ثانیه دهم اتصال کوتاه گذرا رخ می دهد و که ۰/۱۵ ثانیه بعد خطا برطرف می گردد. شکل (۷) پاسخ دینامیکی سیستم حلقه بسته متأثر از کنترل کننده های مد لغزشی پسگام تطبیقی بهینه و معمولی را نشان می دهد.



شکل (۷): منحنی های پاسخ گذرا سیستم حلقه بسته هنگامی که خطای اتصال کوتاه موقت رخ می دهد.

Fig. (7): The transient responding curves of the closed-loop system when a transmission line occurs in the recoverability of the short-circuit fault.

References

- [1] Q. Lu, S.W. Mei, "Vital basic research on modern power systems geared to 21st century", *Progress in Nature Science*, Vol.10, No.8, pp.585-593, Aug. 2000.
- [2] N. Jiang, S. Li, T. Liu, X. Dong, "Nonlinear large disturbance attenuation controller design for the power systems with STATCOM", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.219, No. 20, pp.10378–10386, June2013.
- [3] J. Fu, R. Ma, T. Chai, "Global finite-time stabilization of a class of switched nonlinear systems with the powers of positive odd rational numbers", *Automatica*, Vol.54, pp.360–373, April2015.
- [4] B. Niu, L. Liu, Y. Liu, "Adaptive backstepping-based fuzzy tracking control scheme for output-constrained nonlinear switched lower triangular systems with time-delays", *Neurocomputing*, Vol.175, pp.759–767, Jan. 2016.
- [5] Y. Li, S. Tong, T. Li, "Hybrid fuzzy adaptive output feedback control design for uncertain MIMO nonlinear systems with time-varying delays and input saturation", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol.24, pp.841–853, Aug.2016.
- [6] Y. Li, S. Tong, T. Li, "Composite adaptive fuzzy output feedback control design for uncertain nonlinear strict-feedback systems with input saturation", *IEEE Trans. on Cybernetics*, Vol.45, pp.2299–2308, Oct. 2015.
- [7] L.Y. Sun, J. Zhao, "Adaptive coordinated passivation control for generator excitation and thyristor controlled series compensation system", *Control Engineering Practice*, Vol.17, No. 7, pp.766–772, July 2009.
- [8] Y. Wan, J. Zhao, "Extended backstepping method for single-machine infinite-bus power systems with SMES", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.21, No. 3, pp.915–923, May 2013.
- [9] W.L. Li, S. Liu, G. Jiang, G.M Dimirovski, "Adaptive robust backstepping design for nonlinear steam valve controller", *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp.7439-7443, 21-23 June 2006.
- [10] L.Y. Sun, S. Tong, Y. Liu, "Adaptive backstepping sliding mode H_∞ control of static var compensator", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.19, No. 5, pp. 1178–1185, Sep. 2011.
- [11] J. Xie, J. Zhao, "Model reference adaptive control for switched LPV systems and its application", *IET Control Theory and Applications*, Vol.10, No. 17, pp.2204–2212, Nov. 2016.
- [12] B. Niu, X. Zhao, X. Fan, Y. Cheng, "A new control method for state-constrained nonlinear switched systems with application to chemical process", *International Journal of Control*, Vol. 88, pp.1693–1701, Jan. 2015.
- [13] Y. Wan, J. Zhao, G.M. Dimirovski, "Nonlinear adaptive control for multi-machine power systems with boiler-turbine-generator unit", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol.25, No. 5, pp.859–875, May 2015.
- [14] J. Faiz, G. Shahgholian, M. Eshan, "Modeling and simulation of the single phasor voltage source UPS Inverter with fourth order output filter", *Journal of Intellingence procedures in Electricql Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 58-63, 2011.
- [15] R. Ma, J. Zhao, "Backstepping design for global stabilization of switched nonlinear systems in lower triangular form under arbitrary switchings", *Automatica*, Vol. 46, No. 11, pp.1819–1823, Nov. 2010.
- [16] Q.Y. Su, W.Z. Quan, G.W. Cai, J. Li "An improved adaptive backstepping sliding mode control for generator steam valves of nonlinear power systems", *IET Control Theory and Applications*, Vol.11, No. 9, pp.1414–1419, May 2017.
- [17] Y. Wan, J. Zhao, G.M. Dimirovski, "Robust adaptive control for a single-machine infinite-bus power system with an SVC", *Control Engineering Practice*, Vol.30, pp.132–139, Sep.2014.
- [18] Q. Chen, X.M. Ren, N.A. Jing, "Adaptive backstepping control of chaotic system with uncertain parameters", *Transactions of Beijing Institute of Technology*, Vol. 31, No. 31, pp.158–162, Feb 2011.
- [19] R.C. Eberhart, Y. Shi. "Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization", *International Conference on Evolutionary Programming*, *Evolutionary Programming*, pp.611-616, 1998.