

طراحی کنترل کننده UPFC برای میرا کردن نوسانات سیستم قدرت با الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

حسین شایقی^۱، حیدرعلی شایانفر^۲، شهرام جمالی^۱، امین صفری^۳

۱. دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی

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

۳. دانشکده فنی دانشگاه زنجان

چکیده- در این مقاله روشی جدید برای انتخاب بهترین سیگنال کنترلی ورودی کنترل کننده پخش بار یکپارچه (UPFC) و طراحی پارامترهای کنترل کننده میرایی آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) برای افزایش میرایی نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت ارائه شده است. پارامترهای کنترل کننده طوری تنظیم می‌شوند که مدهای الکترومکانیکی ناپایدار را به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط بر اساس تابع هدف چندمنظوره انتقال دهند. مساله چندمنظوره به صورت مجموعه‌ای از توابع هدف مبتنی بر ضریب میرایی و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی ناپایدار و با میرایی ضعیف فرمول‌بندی شده و آنگاه تنظیم پارامترهای کنترل کننده با بهینه‌سازی توابع هدف بر اساس مقادیر ویژه با استفاده از روش PSO انجام می‌پذیرد. برای تضمین مقاومت کنترل کننده پیشنهادی، فرایند طراحی در ناحیه وسیعی از شرایط عملکرد و تنظیمات سیستم صورت گرفته است. کارایی کنترل کننده پیشنهادی از طریق تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی غیرخطی زمانی ارزیابی شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده طراحی شده با تابع هدف چندمنظوره در مقایسه با توابع هدف تک‌منظوره در میرا کردن نوسانات فرکانس پایین عملکرد بهتری داشته و پایداری دینامیکی سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین تحلیل عملکرد سیستم تحت شرایط کاری مختلف نشان‌دهنده برتری کنترل کننده با سیگنال ورودی δ_E بر کنترل کننده با سیگنال ورودی m_B است.

کلید واژه- UPFC، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، بهینه‌سازی چندمنظوره، پایداری دینامیکی سیستم قدرت.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با پیشرفت سریع در حوزه الکترونیک قدرت و ایجاد فرصت جدید برای کاربرد ادوات FACTS بعنوان روشی موثر موجب شده است که عملکرد سیستم قدرت و محدودیت توان انتقالی بهبود یابد [۱-۴]. به خاطر واکنش کنترلی سریع عملکرد ادوات FACTS، آنها برای بهره‌برداری در افزایش میرایی سیستم و بهبود پروفیل ولتاژ که مزیت آنها نسبت به PSS بوده، مناسب می‌باشند.

کنترل کننده پخش بار یکپارچه (UPFC) به‌عنوان یکی از ادوات FACTS [۵، ۶]، توانایی کنترل پخش بار در خطوط انتقال، بهبود پایداری گذرا، میرا کردن نوسانات فرکانس پایین و بهبود پروفیل ولتاژ دارد. چندین روش در مقالات برای مدل دینامیکی UPFC به منظور طراحی کنترل کننده-های مناسب برای پخش بار، حالت گذرا و میرایی نوسانات سیستم ارائه شده است. نبوی نیایی و ایروانی [۸] مدل حالت پایدار، مدل دینامیکی خطی شده سیگنال کوچک و مدل سیگنال بزرگ فضای حالت UPFC را تشریح کرده است. وانگ [۹] مدل خطی شده هفرون - فیلیپس سیستم قدرت مجهز به UPFC را نشان داده است. در آن مقاله روش سیستماتیک برای طراحی کنترل کننده میرایی ارائه نشده

پایداری سیستم‌های قدرت یکی از جنبه‌های مهم در عملکرد سیستم‌های الکتریکی بوده و بایستی سیستم‌های کنترلی اندازه فرکانس و ولتاژ را تحت هر اغتشاشی از قبیل افزایش ناگهانی بار، خارج شدن یک ژنراتور از مدار یا قطع شدن یک خط انتقال در سطوح ثابتی حفظ کنند [۱-۲]. توسعه سیستم‌های قدرت بزرگ و اتصال آنها به هم باعث ایجاد نوساناتی با فرکانس خیلی پایین در محدوده ۰/۲ تا ۳ هرتز می‌شود. این نوسانات به مدت طولانی در سیستم ادامه داشته و در بسیاری از موارد اگر میرایی کافی ایجاد نشود دامنه آنها افزایش یافته و باعث جداسازی و ناپایداری سیستم می‌شوند. برای میرا کردن این نوسانات و افزایش پایداری سیستم از پایدارساز سیستم قدرت (PSS) که از لحاظ فنی و اقتصادی مناسب بوده، استفاده می‌کنند. با وجود این، اشکال اساسی PSSs در ایجاد تغییرات شدید در پروفیل ولتاژ و منجر به پیش‌فاز شدن ضریب قدرت و از دست دادن پایداری سیستم تحت اغتشاشات بزرگ به ویژه خطای سه فاز در ترمینال‌های ژنراتور می‌باشد [۳].

ذرات در میان کل ذرات بدست آمده است. تخصیص جواب-ها میان بهترین مقادیر فردی و گروهی تامین‌کننده تنوع در پاسخ می‌باشد. همچنین در مراجع [۱۲ و ۱۳] بیان شده که در مسایل بهینه‌سازی که غیرخطی و مشتق‌ناپذیر و یا دارای ابعاد زیادی هستند PSO توانمند بوده و بسیاری از مشکلات الگوریتم ژنتیک را ندارد. زیرا در PSO اطلاعات بین تمامی ذرات به اشتراک گذاشته می‌شود و نرخ همگرایی سریعتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. از مزایای این الگوریتم می‌توان به محاسبات ساده، سریع و کدینگ آسان اشاره کرد. علاوه بر آن ذخیره‌سازی اطلاعات به حافظه کمتری نیاز دارد. بنابراین این روش مزیت‌های زیر را در مقایسه با الگوریتم‌های تکاملی و ژنتیک دارد:

- روش PSO دارای حافظه است یعنی هر ذره بهترین مقدار خود (local best) و بهترین مقدار گروه (global best) را به خاطر دارد.
- در PSO جمعیت اولیه حفظ شده و نیازی به عملگرهای انتخابی جمعیت که باعث افزایش زمان و حافظه ذخیره‌سازی می‌شوند، نیست.
- روش PSO پایه‌اش همکاری سازنده میان ذرات است در حالی که ژنتیک مبتنی بر بقاء جمعیت است.

روش PSO با یک جمعیت تصادفی از ذرات در فضای D بعدی شروع می‌شود. ذره i ام با بردار $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ نمایش داده می‌شود. مقدار ارزیابی تابع معیار برای هر ذره (pbest) در بردار $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ذخیره می‌شود. بهترین مقدار گروه (gbest) توسط یک ذره در جمعیت حاصل می‌شود. در PSO سرعت هر ذره در هر مرحله متناسب با مقدار pbest و gbest مطابق معادله (۱) تغییر می‌کند. سرعت ذره i ام با بردار $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ نمایش داده می‌شود. موقعیت ذره i ام مطابق با معادله (۲) مقداردهی می‌شود [۱۲].

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 \times rand() \times (P_{id} - x_{id}) + c_2 \times rand() \times (P_{gd} - x_{id}) \quad (1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2)$$

در رابطه بالا P_{gd} به ترتیب مقدار pbest و gbest و w نشانگر وزن اینرسی برای سرعت‌گیری ذرات بوده و بطور خطی از مقدار ۰/۹ تا ۰/۴ در طول اجرا تغییر می‌کند.

است. تعدادی از مولفان روش‌های شبکه‌های عصبی [۱۰] و کنترل مقاوم [۷-۱۱] را برای غلبه بر عدم قطعیت سیستم و افزایش میرایی با UPFC پیشنهاد داده‌اند. باوجود این، پارامترهای قابل تنظیم این کنترل‌کننده‌ها مبتنی بر روش سعی و خطا هستند. اگرچه روش‌های کنترل مقاوم عدم قطعیت معرفی شده را تا اندازه‌ای بهبود می‌دهند اما برای سیستم قدرت بزرگ کنترل‌کننده منتهجه خیلی بزرگتر خواهد بود که این کار از نظر عملی شدنی نیست.

در این مقاله طراحی کنترل‌کننده UPFC بعنوان یک مساله بهینه‌سازی چندمنظوره فرمول‌بندی شده و با استفاده از الگوریتم PSO حل می‌شود. مساله چندمنظوره به صورت ترکیبی از توابع هدف براساس ضریب میرایی و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی ناپایدار و با میرایی ضعیف بیان می‌شود. پارامترهای کنترل‌کننده طوری تنظیم می‌شود تا مدهای الکترومکانیکی ناپایدار به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط انتقال داده شده تا پایداری نسبی سیستم تضمین شود. کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی از طریق تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی زمانی غیرخطی در شرایط کاری مختلف تشریح شده است. نتایج ارزیابی نشان‌دهنده برتری عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده براساس تابع هدف چند منظوره بوسیله PSO در میرا کردن نوسانات در شرایط بارگذاری مختلف است.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر قوانین احتمال است که به علت قابلیت بالا در حل مسایل پیچیده و توابع عددی مختلف رواج روزافزونی یافته است. این الگوریتم بجای الهام گرفتن از مکانیزم‌های تکاملی، از رفتار اجتماعی جانداران، مانند دسته‌های پرندگان و ماهیان متأثر بوده است [۱۲]. در الگوریتم PSO مانند الگوریتم‌های تکاملی یک تابع معیار در نظر گرفته شده و مجموعه جواب‌های کاندید برای مساله برحسب ذرات یا افراد بیان می‌شود و هر کدام از آنها پرواز خود را براساس پرواز سایر افراد گروه تنظیم می‌کنند. در هر مرحله از حرکت دسته مکان هر ذره یا فرد با دو مقدار بهترین مشخص می‌شود. اولین مقدار بهترین جواب از لحاظ برازندگی است که تاکنون برای هر ذره بطور مجزا بدست آمده و دیگری بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام

۱-۳- مدل غیر خطی سیستم قدرت با UPFC

برای افزایش پایداری سیگنال بزرگ و کوچک سیستم قدرت و بررسی تاثیر آن بایستی از مدل دینامیکی UPFC استفاده شود. با بکارگیری تبدیل پارک و چشم‌پوشی از مقاومت و گذرای ترانسفورماتورهای تحریک و تقویت‌کننده، UPFC بصورت زیر مدل‌بندی می‌شود [۹]:

$$\begin{bmatrix} v_{Ed} \\ v_{Eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_E \\ x_E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ed} \\ i_{Eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_E \cos \delta_E v_{dc}}{2} \\ \frac{m_E \sin \delta_E v_{dc}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_{Bd} \\ v_{Bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_B \\ x_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_B \cos \delta_B v_{dc}}{2} \\ \frac{m_B \sin \delta_B v_{dc}}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\dot{v}_{dc} = \frac{3m_E}{4C_{dc}} [\cos \delta_E \quad \sin \delta_E] \begin{bmatrix} i_{Ed} \\ i_{Eq} \end{bmatrix} + \frac{3m_B}{4C_{dc}} [\cos \delta_B \quad \sin \delta_B] \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

در معادلات فوق v_{Et} , i_E , v_{Bt} و i_B به ترتیب ولتاژ تحریک، جریان تحریک، ولتاژ تقویتی و جریان تقویت‌کننده هستند. C_{dc} و v_{dc} ظرفیت و ولتاژ خازن dc هستند. مدل غیرخطی سیستم SMIB نشان‌داده‌شده در شکل ۲ بصورت زیر توصیف می‌شود [۱]:

$$\delta = \omega_0(\omega - 1) \quad (6)$$

$$\omega = (P_m - P_e - D\Delta\omega) / M \quad (7)$$

$$E'_q = (-E_q + E_{fd}) / T'_{do} \quad (8)$$

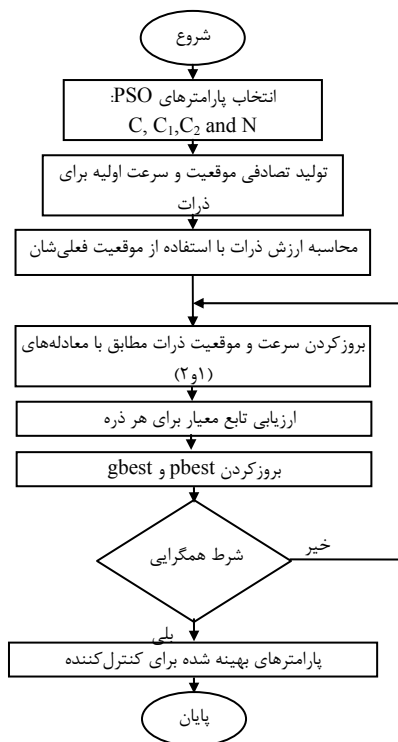
$$E'_{fd} = (-E_{fd} + K_a(V_{ref} - V_t)) / T_a \quad (9)$$

مدل دینامیکی خطی با خطی‌سازی مدل غیرخطی حول یک نقطه کار حاصل می‌شود. مدل خطی‌شده و نمایش بلوکی سیستم قدرت نشان داده شده در شکل ۲ در [۴ و ۱] تشریح شده است.

۲-۳- کنترل‌کننده میرایی UPFC

کنترل‌کننده میرایی برای فراهم کردن گشتاور الکتریکی هم فاز با انحراف سرعت موتور به روش جبران‌سازی فاز طراحی می‌شود. در این مقاله، از پارامترهای کنترلی δ_E و m_B برای طراحی کنترل‌کننده میرایی UPFC استفاده می‌شود. انحراف سرعت $(\Delta\omega)$ بعنوان ورودی کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

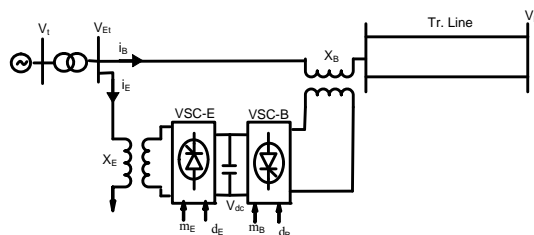
روندنامی الگوریتم پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده در شکل ۱- نشان داده شده است.



شکل ۱. روندنامی الگوریتم PSO پیشنهادی

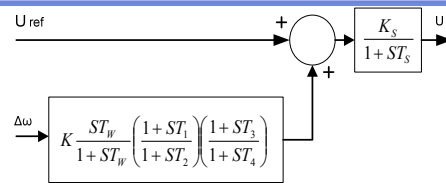
۳- سیستم مورد مطالعه

سیستم قدرت تک ماشینه با شین بی‌نهایت مجهز به UPFC در شکل ۲- نشان داده شده است. اطلاعات سیستم و پارامترهای UPFC در ضمیمه داده شده است. UPFC شامل ترانسفورماتور تحریک، ترانسفورماتور تقویت‌کننده، دومبدل منبع ولتاژ تریستوری سه فاز و یک منبع dc خازنی است. چهار سیگنال ورودی به UPFC عبارتند از: m_E ، m_B ، δ_E و δ_B بطوریکه m_E اندازه نسبت مدولاسیون تحریک، m_B اندازه نسبت مدولاسیون تقویتی، δ_E زاویه فاز تحریک و δ_B زاویه فاز تقویتی است.



شکل ۲. سیستم قدرت مجهز به UPFC

پارامترهای کنترل کننده UPFC با ارزیابی تابع هدف چندمنظوره داده شده در معادله (۱۱) در شرایط عملکرد مختلف صورت می گیرد. شرایط عملکرد مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۳. ساختار کنترلی UPFC

جدول ۱ شرایط عملکرد برحسب پریونیت

شرایط عملکرد	P	Q	X _L
حالت اول	۰/۸	۰/۱۱۴	۰/۳
حالت دوم	۰/۲	۰/۰۱	۰/۳
حالت سوم	۱/۲	۰/۴	۰/۳
حالت چهارم	۰/۸	۰/۱۱۴	۰/۶
حالت پنجم	۱/۲	۰/۴	۰/۶

در این مقاله مقادیر σ_0 و ζ_0 به ترتیب برابر با ۲- و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای عملکرد بهتر PSO، تعداد ذرات، اندازه ذره، تعداد تکرار، C_1 ، C_2 و C به ترتیب برابر با ۳۰، ۵، ۵۰، ۲، ۱ و ۱ انتخاب می شوند. در فرایند بهینه سازی الگوریتم PSO چندین بار اجرا شده سپس مجموعه مقادیر بهینه انتخاب می شوند. مقادیر نهایی پارامترهای بهینه شده با توابع تک منظوره J_1 و J_2 و تابع هدف چند منظوره J_3 در جدول ۲ داده شده است. مدهای الکترومکانیکی و نسبت میرایی آنها برای همه شرایط عملکرد با و بدون فقط کنترل کننده δ_E در جدول ۳ نشان شده است. از تحلیل مقادیر ویژه مشاهده می شود که کنترل کننده طراحی شده با J_3 عملکرد بهتری نسبت به J_1 و J_2 دارد. همچنین شاخص کنترل کننده مد الکترومکانیکی با سیگنال کنترلی δ_E بالاتر از ورودی m_B است.

۴- شبیه سازی غیر خطی زمانی

یکی از خطوط انتقال بررسی شده است. خطا با قطع کردن خط معیوب رفع شده و عملکرد کنترل کننده ها از نظر اینکه با تابع چند منظوره J_3 یا با توابع تک منظوره J_1 و J_2 طراحی شوند با یکدیگر و مرجع [۴] مقایسه می شوند. انحراف سرعت ژنراتور در حالت های اول، سوم و پنجم با کنترل کننده های براساس δ_E و m_B در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که کنترل کننده های طراحی شده با J_3 عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده های طراحی

۴. طراحی کنترل کننده UPFC با روش PSO

در روش پیشنهادی، برای مسأله بهینه سازی تابع هدف چندمنظوره براساس مقادیر ویژه که ترکیبی از ضریب میرایی و نسبت میرایی مقادیر ویژه است در نظر گرفته می شود [۱۵]:

$$J_3 = J_1 + aJ_2 \quad (10)$$

بطوریکه $J_2 = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{\zeta_i < \zeta_0} (\zeta_0 - \zeta_i)^2$ و $J_1 = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{\sigma_i \geq \sigma_0} (\sigma_0 - \sigma_i)^2$ ، ζ_{ij} و σ_{ij} قسمت حقیقی و نسبت میرایی مقدار ویژه λ_m در نقطه کاری ژام است.

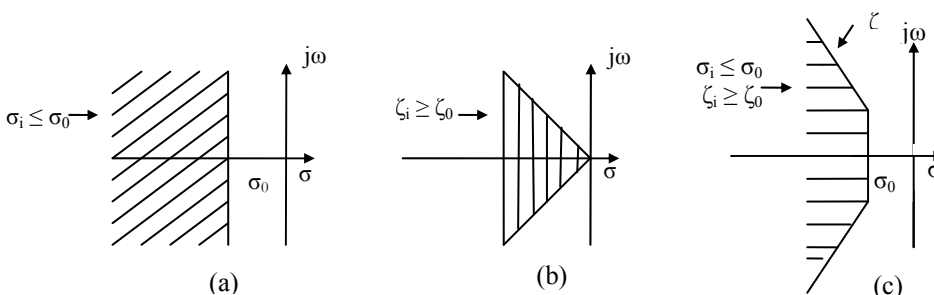
مقدار α برابر با ۱۰ و NP نیز برابر با تعداد نقاط کار مورد نظر که مسأله بهینه سازی صورت می گیرد، است. با در نظر گرفتن J_1 مقادیر ویژه غالب به سمت چپ خط $S = \sigma_0$ مطابق با شکل ۴-الف) در صفحه مختلط انتقال داده شده که این کار باعث تامین پایداری نسبی در سیستم می شود. بطور مشابه اگر تابع هدف J_2 مورد نظر باشد حداکثر فراجاهش مقادیر ویژه محدود شده و مقادیر ویژه به ناحیه مشخص شده در شکل ۴-ب) انتقال داده می شود. تابع هدف چندمنظوره J_3 هم مقادیر ویژه سیستم را به ناحیه D-شکل نشان داده شده در شکل ۴-ج) انتقال می دهد. طراحی کنترل کننده بعنوان بهینه سازی قیوددار فرمول بندی می شود که محدوده های پارامترهای کنترل کننده به صورت زیر می باشد:

Minimize J_i Subjected to

$$\begin{aligned} K^{\min} &\leq K \leq K^{\max} \\ T_1^{\min} &\leq T_1 \leq T_1^{\max} \\ T_2^{\min} &\leq T_2 \leq T_2^{\max} \\ T_3^{\min} &\leq T_3 \leq T_3^{\max} \\ T_4^{\min} &\leq T_4 \leq T_4^{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

محدوده های معمولی پارامترهای بهینه شده برای بهره کنترل کننده [۰/۱-۱۰۰] و ثابت های زمانی T_1 ، T_2 ، T_3 و T_4 در [۰/۱-۱] هستند. روش پیشنهادی از روش PSO برای حل مسئله بهینه سازی استفاده کرده تا مجموعه بهینه از پارامترهای کنترل کننده بدست آید. بهینه سازی

شده با J_1 و J_2 و روش مرجع [۴] دارد و باعث افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت می شود.



شکل ۴. ناحیه مشخص شده برای مقادیر ویژه با تابع هدف

جدول ۲ پارامترهای بهینه شده کنترل کننده ها با توابع هدف

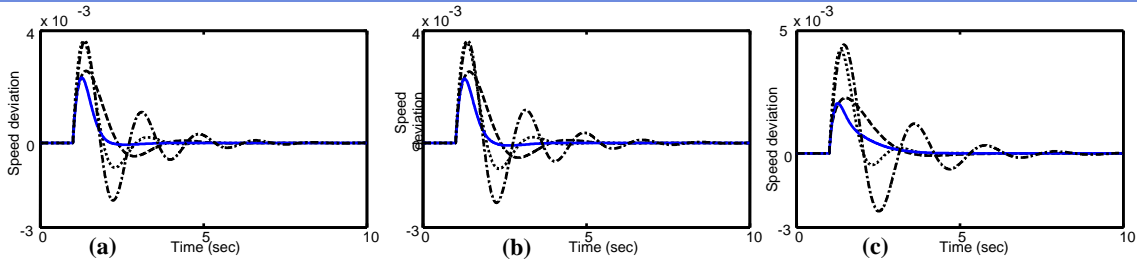
m_B			δ_E			پارامترهای کنترل کننده
J_3	J_2	J_1	J_3	J_2	J_1	
۶۸/۶۵	۷۹/۳۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۴/۲	۶۴/۴۵	K
۰/۰۱	۰/۳۲۳۵	۰/۶	۰/۱۰۶۹	۰/۲۵۶۶	۰/۴۱۸۵	T ₁
۰/۱۱۰۵	۰/۱۴۲۴	۰/۳۶۵۵	۰/۲۰۲۲	۰/۱۵۶۳	۰/۵۲۹۹	T ₂
۰/۴۷۰۴	۰/۴۵۲۳	۰/۵۲۶۲	۰/۴۳۴۷	۰/۱۳۶۱	۰/۳۸۳۵	T ₃
۰/۱۲۳۵	۰/۵۰۹۴	۰/۴۴۸۹	۰/۴۱۳۴	۰/۰۹۶۵	۰/۳۵۰۷	T ₄

جدول ۳ مقادیر ویژه و نسبت میرایی الکترومکانیکی با و بدون کنترل کننده δ_E

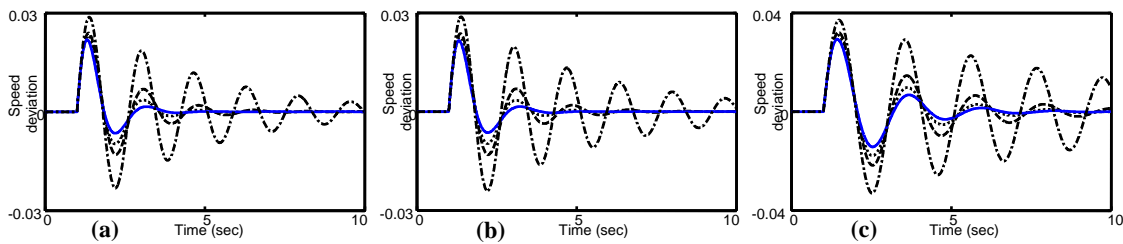
حالت ۵	حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	توابع هدف
0.23 ± i3.88, -0.059 -3.3868, -3.0673 -96.48	0.15 ± i4.03, -0.036 -3.18 ± i0.043, 0.99 -96.407	0.285 ± i4.49, -0.06 -3.1878, -2.9126 -96.643	0.03 ± i5.32, -0.006 -2.7951, -3.1728 -96.268	0.197 ± i4.51, -0.04 -2.99 ± i0.17, 0.99 -96.582	بدون کنترل کننده
-2.160 ± i7.022, 0.29 2.887 ± i0.059, 0.99 -4.7938, -1.8063 -96.443	-2.079 ± i7.256, 0.27 -2.894 ± i0.078, 0.99 -4.2825, -1.7806 -96.377	-2.112 ± i7.901, 0.25 -2.763 ± i0.125, 0.99 -4.3202, -1.8653 -96.598	-2.071 ± i6.984, 0.28 -2.788 ± i0.092, 0.99 -3.3636, -1.7719 -96.262	-2.012 ± i6.994, 0.27 -2.772 ± i0.144, 0.98 -3.97, -1.8499 -96.544	J_1
-1.130 ± i2.011, 0.49 -25.868, -7.0744 -3.6079, -2.965 -96.294	-1.284 ± i2.075, 0.52 -24.963, -7.0502 -2.9761, -3.4973 -96.259	-0.9004 ± i2.801, 0.31 -7.016, -2.7103 -3.5115, -21.66 -96.427	-1.840 ± i2.946, 0.54 -2.7044, -3.2538 -22.579, -6.9473 -96.24	-1.031 ± i2.830, 0.34 -6.9885, -2.7324 -3.3804, -20.766 -96.403	J_2
-4.507 ± i4.918, 0.67 -2.949 ± i1.510, 0.89 -2.4526, -2.8285 -96.445	-4.206 ± i5.034, 0.64 -2.188 ± i1.333, 0.85 -2.5341, -2.7465 -96.378	-3.337 ± i4.141, 0.63 -2.473 ± i2.638, 0.68 -2.468 ± i0.089, 0.99 -96.6	-3.173 ± i6.196, 0.45 -3.137 ± i0.736, 0.97 -2.428 ± i0.279, 0.98 -96.262	-2.961 ± i4.392, 0.56 -2.783 ± i2.264, 0.77 -2.460 ± i0.121, 0.99 -96.546	J_3

چندمنظوره عملکرد بهتری در میرا کردن نوسانات فرکانس پایین دارند. از نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که کنترل کننده δ_E نسبت به کنترل کننده m_B عملکرد بهتری دارد.

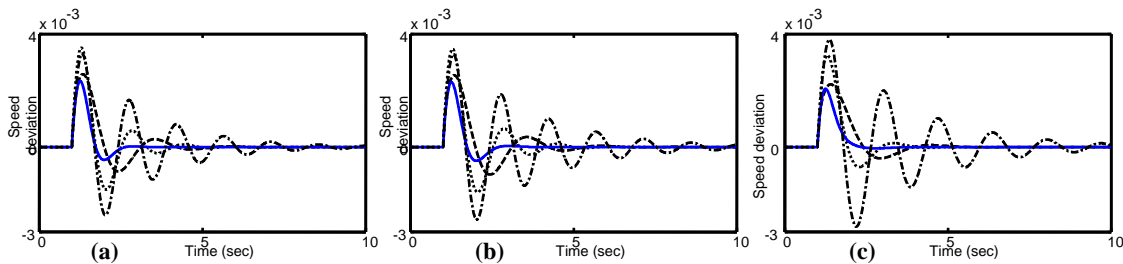
سناریو دوم: در این سناریو، یک خطای سه فاز شش سیکل در همان موقعیت ذکر شده در سناریو اول بکار گرفته شده است. خطا بدون قطع خط رفع می شود. پاسخ سیستم در این اغتشاش در شکل های ۷ و ۸ نشان داده است. مشاهده می شود که کنترل کننده های بهینه شده با تابع هدف



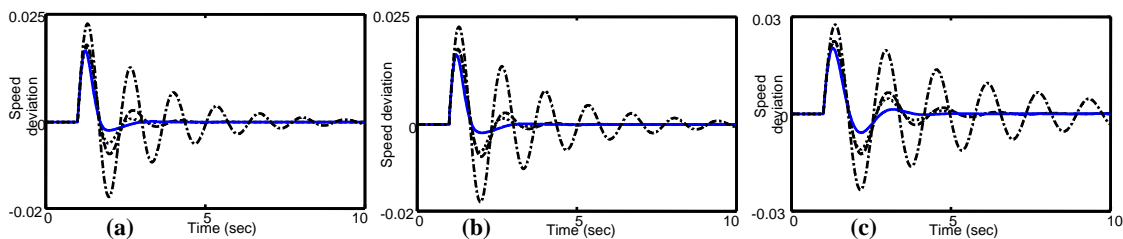
شکل ۵. پاسخ دینامیکی سیستم در سناریوی اول با کنترل کننده δ_E در (a) حالت اول (b) حالت سوم (c) حالت پنجم: خط یکپارچه (J_3)، خط تیره (J_2)، خط نقطه‌دار (J_1) و خط تیره-نقطه [۴].



شکل ۶. پاسخ دینامیکی سیستم در سناریوی اول با کنترل کننده m_B در (a) حالت اول (b) حالت سوم (c) حالت پنجم: خط یکپارچه (J_3)، خط تیره (J_2)، خط نقطه‌دار (J_1) و خط تیره-نقطه [۴].



شکل ۷. پاسخ دینامیکی سیستم در سناریوی دوم با کنترل کننده δ_E در (a) حالت اول (b) حالت سوم (c) حالت پنجم: خط یکپارچه (J_3)، خط تیره (J_2)، خط نقطه‌دار (J_1) و خط تیره-نقطه [۴].



شکل ۸. پاسخ دینامیکی سیستم در سناریوی دوم با کنترل کننده m_B در (a) حالت اول (b) حالت سوم (c) حالت پنجم: خط یکپارچه (J_3)، خط تیره (J_2)، خط نقطه‌دار (J_1) و خط تیره-نقطه [۴].

اند که مقادیر ویژه ناپایدار را به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط انتقال دهند. مساله چندمنظوره ترکیبی از توابع هدف براساس ضریب میرایی و نسبت میرایی مدهایی با

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، بهبود عملکرد پایداری گذرا با کنترل کننده UPFC بررسی شده است. پایدارسازها طوری تنظیم شده-

- system", 2003. <http://www.ieindia.org/publish/el/0603>.
- [5] L. Gyugyi, "Unified power-flow control concept for flexible ac transmission systems", IEE Proc. Gen. Transm, Distrib. 1992; 139 (4):323-31.
- [6] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems, Wiley-IEEE Press; 1999.
- [7] M.Vilathgamuwa, X. Zhu and S.S. Choi, "A robust control method to improve the performance of a unified power flow controller", Elect. Power Syst. Res. 2000; 55:103-11.
- [8] A. Nabavi-Niaki and M.R. Iravani, "Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies", IEEE Trans. Power Syst. 1996, 11(4): 1937-43.
- [9] 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, 2000; 15(3); 978-983.
- [10] P.K. Dash, S. Mishra and G. Panda, "A radial basis function neural network controller for UPFC", IEEE Trans. Power Syst. 2000;15(4): 1293-9.
- [11] B.C. Pal, "Robust damping of interarea oscillations with unified power flow controller", IEE Proc. Gen. Transm. Distrib. 2002; 149(6):733-8.
- [12] H. Shayeghi, A. Jalili and H. A. Shayanfar, "Multi-stage fuzzy load frequency control using PSO", Energy Conver. Manage., 49 (2008) 2570-2580.
- [13] J. Kennedy, R. Eberhart and Y. Shi, "Swarm intelligence", Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2001.
- [14] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space", IEEE Trans. Evolutionary Computation, 6 (1) (2002): 58-73.
- [15] Y. L. Abdel-Magid and M. A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms", IEEE Trans. Power Syst. 18 (3) (2003) 1125 -1132.

میرایی مثبت و ضعیف فرمول بندی و انتخاب پارامترهای کنترل کننده به یک مساله بهینه سازی تبدیل شده و با الگوریتم PSO حل گردیده است. کارایی کنترل کننده های پیشنهادی برای بهبود عملکرد پایداری گذرا در یک سیستم قدرت نمونه تحت اغتشاشات شدید تشریح شده است. نتایج تحلیل مقادیر ویژه و شبیه سازی غیرخطی زمانی نشان می دهد که کارایی کنترل کننده پیشنهادی طراحی شده با تابع هدف چندمنظوره میرایی مناسبی را برای نوسانات فرکانس پایین فراهم می کند.

پیوست:

پارامترها و شرایط کار سیستم در جدول ۴ داده شده است:

جدول ۴ پارامترهای سیستم

Generator	$M = 8 \text{ MJ/MVA}$	$T'_{do} = 5.044 \text{ s}$	$X_d = 1 \text{ pu}$
	$X_q = 0.6 \text{ p.u}$	$X'_d = 0.3 \text{ pu}$	$D = 0$
Excitation system		$K_a = 10$	$T_a = 0.05 \text{ s}$
Transformers		$X_r = 0.1 \text{ pu}$	$X_E = 0.1 \text{ pu}$
		$X_B = 0.1 \text{ pu}$	
Transmission line		$X_i = 1 \text{ pu}$	
Operating condition		$P = 0.8 \text{ pu}$	$V_s = 1.0 \text{ pu}$
		$V_r = 1.0 \text{ pu}$	
DC link parameter		$V_{DC} = 2 \text{ pu}$	$C_{dc} = 1 \text{ pu}$
UPFC parameter		$m_b = 0.08$	$\delta_b = -78.21^\circ$
		$\delta_e = -85.35^\circ$	$m_e = 0.4$
		$K_s = 1$	$T_s = 0.05$

مراجع

- [1] A.T. Al-Awami, Y.L. Abdel-Magid and M.A. Abido, "A particle-swarm-based approach of power system stability enhancement with unified power flow controller", Elect. Power Energy Syst., 2007, 29: 251-259.
- [2] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, Ames, IA: Iowa State Univ.Press, 1977 .
- [3] A. J. F. Keri, X. Lombard and A.A. Edris, "Unified power flow controller: modeling and analysis", IEEE Trans. Power Deliv. 1999; 14(2): 648-54.
- [4] N. Tambey and M. Kothari, "Unified power flow controller based damping controllers for damping low frequency oscillations in a power