

کنترل هوشمند کنترل کننده یکپارچه عبور توان (UPFC) جهت بهبود پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت چند ماشینه

حسن براتی^(۱) - رضا ساکی^(۲) - سید سعیداله مرتضوی^(۳)

(۱) استادیار - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

(۲) کارشناس ارشد - گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دورود

(۳) استادیار - دانشکده فنی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۸۸

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۸

خلاصه: یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از ادوات FACTS در سیستم انتقال افزایش حاشیه پایداری گذرای سیستم قدرت است که با کنترل توان اکتیو و راکتیو خط در طی بروز خطا در سیستم، صورت می‌پذیرد. گرچه پایدارساز سیستم قدرت (PSS)، مهم‌ترین وسیله برای میرایی نوسانات بوده است، اما در برخی از نقاط کار توانایی لازم در میرایی نوسانات را ندارد و لذا استفاده از تجهیزات FACTS یک راهکار مناسب برای این مسئله است. در این مقاله، جهت میراسازی نوسانات و بهبود پایداری گذرا از UPFC استفاده شده است. پارامترهای کنترل کننده UPFC، بر اساس کنترل کننده فازی نوع سوگنو (TSK) طراحی شده است. جهت بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده PI فازی از الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) و ترکیب آنها (HGAPSO) استفاده شده است. از نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری، تأثیر UPFC با کنترل کننده PI مرسوم، PI فازی و کنترل کننده‌های هوشمند (GA، PSO و HGAPSO) جهت میراسازی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای تحت اغتشاشات کوچک و بزرگ در یک شبکه دو ناحیه‌ای چهار ماشینه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

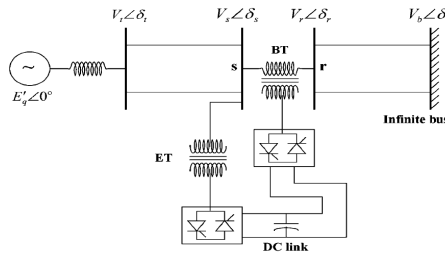
کلمات کلیدی: UPFC، کنترل کننده PI فازی، الگوریتم بهینه‌سازی GA، PSO و HGAPSO، پایداری گذرا.

۱- مقدمه

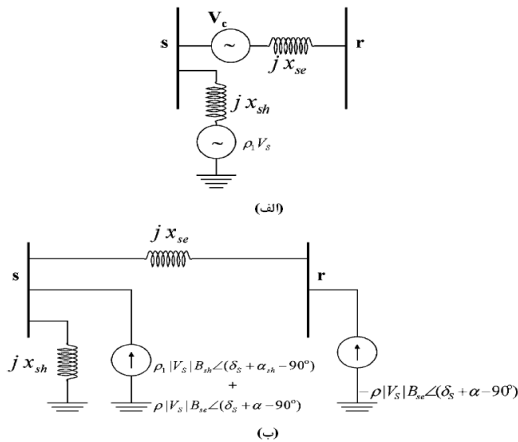
است، اما در برخی از نقاط کار توانایی لازم در میرایی نوسانات را ندارد و لذا استفاده از تجهیزات FACTS یک راه کار اساسی برای این مسئله است. یکی از مهم‌ترین مزایای ادوات FACTS، در سیستم انتقال افزایش حاشیه پایداری گذرای سیستم قدرت با کنترل توان اکتیو و راکتیو خط در طول رخ دادن خطا در سیستم است. کاربرد و نقش تجهیزاتی چون STATCOM، TCSC و UPFC برای بهبود پایداری گذرا و میرایی نوسانات مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۶]. UPFC یکی از مناسب‌ترین و تطبیق پذیرترین ادوات FACTS است که در سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملکرد اساسی UPFC در تزریق ولتاژ سری قابل کنترل (هم از نظر اندازه و هم از نظر فاز) نسبت به باسی است که در آن واقع شده است و نتیجه آن کنترل عبور توان در خط انتقال است. دو مبدل منبع ولتاژ (VSC) که با یک خازن لینک DC به هم متصل شده‌اند، به همراه دو ترانسفورمر

با توسعه سیستم‌های قدرت و به ویژه توسعه بازار برق، کنترل عبور توان خطوط انتقال اهمیت بسیاری یافته است. سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر برای کنترل مناسب جهت حصول به انعطاف پذیری سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲]. برای سال‌های متمادی پایدارساز قدرت معمول‌ترین کنترل کننده برای میرایی نوسانات بوده است. پایدارساز سیستم قدرت یک سیگنال کنترل تکمیلی تولید می‌کند تا نوسانات یک سیستم قدرت پس از یک اغتشاش سریعاً میرا شود. این سیستم کنترل خطای فرکانس را به عنوان ورودی می‌گیرد و سیگنالی که با ولتاژ مرجع جمع می‌شود را تولید می‌کند. نتایج عملی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگر این سیستم درست تنظیم شود در میرا کردن نوسانات سیستم بسیار مؤثر است [۳]. گرچه PSS مهم‌ترین وسیله برای میرایی نوسانات بوده

منبع کنترل شده در شکل (۳) - الف) نشان داده شوند و نیز UPFC را بتوان به عنوان دو منبع جریان متصل به باس های S و r در شکل (۳) - ب) نشان داد که در آن X_{sh}, B_{sh} و X_{se}, B_{se} به ترتیب راکتانس و سوسپتانس سری و موازی ترانسفورماتورهای UPFC می باشند، همچنین ρ نسبت ولتاژ سری به اندازه ولتاژ باس S و α اندازه فاز ولتاژ سری نسبت به ولتاژ باس S، ρ_1 نسبت ولتاژ شنت به اندازه ولتاژ باس S و α_{sh} اندازه فاز ولتاژ شنت نسبت به ولتاژ باس S می باشد.



شکل (۲): UPFC استفاده شده در یک سیستم تک ماشینه با شین بی نهایت
Fig. (2): The UPFC used in a single machine with infinite sheen



شکل (۳): مدار معادل UPFC

الف) با منبع ولتاژ کنترل شده ب) با منبع جریان کنترل شده

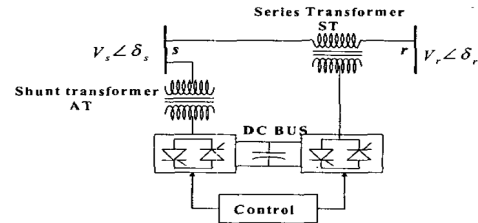
Fig. (3): The equivalent UPFC circuit
(a) With controlled voltage source, (b) With controlled current source

توان اکتیو و توان راکتیو تزریقی به باس S و r توسط روابط زیر به دست می آیند:

$$\begin{aligned}
 P_s &= \rho_1 |V_s|^2 B_{sh} \sin \alpha_{sh} + \rho |V_s|^2 B_{sc} \sin \alpha \\
 Q_s &= \rho_1 |V_s|^2 B_{sh} \cos \alpha_{sh} + \rho |V_s|^2 B_{sc} \cos \alpha - B_{sh} |V_s|^2 \\
 P_r &= -\rho B_{se} |V_s| |V_r| \sin(\theta_{sr} + \alpha) \\
 Q_r &= -\rho B_{se} |V_s| |V_r| \cos(\theta_{sr} + \alpha)
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

برای ثبات ولتاژ لینک DC، رابطه زیر باید برقرار باشد:

تحریک و تزریق، UPFC را تشکیل می دهند. مبدل اول یا مبدل موازی، توان اکتیو را از منبع می کشد و آن را با مبدل دوم مبادله می کند (البته منهای تلفات). مبادله توان بین دو مبدل به منظور ثابت نگاه داشتن ولتاژ خازن لینک DC است. آرایش کلی UPFC در شکل (۱) نشان داده شده است. استراتژی های کنترلی مختلفی برای کنترل UPFC پیشنهاد شده است [۷-۱۱].



شکل (۱): آرایش کلی UPFC
Fig. (1): The general configuration of UPFC

با توجه به وابستگی شدید کنترل کننده های کلاسیک (PI) به پارامترها و مدل دینامیکی سیستم قدرت امکان است توانایی میراسازی نوسانات ایجاد شده توسط خطا را نداشته باشند لذا از کنترل کننده های هوشمند مبتنی بر منطق فازی روی UPFC، استفاده خواهد شد.

روش طراحی کنترل کننده بر مبنای منطق فازی، طراحی کنترل کننده غیرخطی را بدون وابستگی به مدل سیستم و با قابلیت هماهنگی بین عملکرد مبدل های سری و موازی را فراهم می آورد. کنترل کننده فازی نوع ممدانی عملکرد مناسبی را در محدوده وسیعی از عملکرد در مدهای کنترلی تزریق توان، تثبیت ولتاژ و شیف فاز ارائه نمی دهد. کنترل کننده فازی نوع سوگنو محدوده وسیع تری از گین های کنترلی را در شرایط عملکرد سیستم ارائه داده و نسبت به نوع ممدانی انعطاف پذیری بیشتری دارد [۱۲-۱۴].

در مقاله حاضر، با بهره گیری از مرجع [۱۴]، کنترل کننده فازی نوع سوگنو بر روی UPFC طراحی شده است. این کنترل کننده از دو قانون استفاده کرده و یک کنترل کننده PI متغیر را ارائه می دهد. پارامترهای این کنترل کننده توسط الگوریتم های هوشمند ژنتیک (GA)، بهینه سازی گروهی ذرات (PSO) و ترکیب آنها (HGAPSO) [۱۵]، برای بهبود پایداری گذرای سیستم و میراسازی نوسانات محلی و بین ناحیه ای به ازای اغتشاشات کوچک و بزرگ در یک سیستم نمونه استفاده شده است.

۲- مدلسازی و کنترل UPFC

۲-۱- مدلسازی UPFC

شکل (۲) یک سیستم تک ماشینه متصل به باس بی نهایت را نشان می دهد که سیستم قدرت با یک UPFC بین باس های S و r بهره برداری می شود. فرض می شود ولتاژ القاء شده در ترانسفورماتور تزریق و تحریک UPFC به ترتیب $\rho |V_s|$ و $\rho_1 |V_s|$ باشند و با دو

$$V_{dc}' = \frac{1}{CV_{dc}} [V_s \| I_s - B_{se} \rho_{se} |V_s \| V_r | \sin(\theta_{sr} + \alpha_{se}) +$$

$$B_{se} \rho_{se} |V_s|^2 \sin(\alpha_{se}) + B_{sh} \rho_{sh} |V_s|^2 \sin(\alpha_{sh})]$$

در رابطه (۹) مؤلفه جریان هم فاز با V_s است که توسط مبدل شنت کشیده می‌شود.

کنترل ولتاژ لینک DC با استفاده از تنظیم I_s به وسیله یک کنترل کننده PI ساده انجام می‌شود. رابطه I_s به صورت زیر می‌باشد.

$$I_s = K_{pdc} (V_{dc\ ref} - V_{dc}) + K_{idc} \int (V_{dc\ ref} - V_{dc}) . dt \quad (10)$$

۳- مدل ماشین سنکرون

هر ژنراتور سنکرون در یک سیستم با باس بی‌نهایت تک ماشینه یا چند ماشینه، به صورت مدل درجه سه که به یک تنظیم‌کننده ولتاژ برای کنترل تحریک تجهیز شده است، مدل می‌شود. از PSS، برای کنترل نوسانات محلی استفاده شده است. همچنین به منظور پررنگ کردن اثر کنترل UPFC، گاورنر و سیم پیچ میراکننده لحاظ نشده است. دینامیک هر ماشین سنکرون به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega = \omega_0 + p\delta, \quad p = d/dt$$

$$p\omega = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e)$$

$$pE_q' = (E_{fd0} + \Delta E_{fd} - E_q' - (x_d - x_d') i_d) / \tau_{d0}' \quad (11)$$

$$p\Delta E_{fd} = K_e (V_{ref} - V_t + u) / \tau_e - \Delta E_{fd} / \tau_e$$

and $-6 \leq E_{fd} \leq 6$

$$P_e = E_q' i_q + (x_q - x_q') i_d i_q$$

متغیر کنترلی u در رابطه (۱۲) از حلقه قابل کنترل PSS به دست می‌آید.

$$u = K_\delta (s.t_q / 1 + s.t_q) . [(1 + s.t_1) / (1 + s.t_2)] \Delta\omega \quad (12)$$

۴- کنترل کننده PI فازی

اغلب کنترل کننده‌های PI مبتنی بر منطق فازی از دو ورودی مثل خطا (e)، مشتق آن (Δe) استفاده می‌کنند.

$$\Delta u = K_i e + K_p \Delta e \quad (13)$$

که ضرایب K_p و K_i تابعی از ورودی‌های سیستم فازی هستند. این نوع کنترل کننده نسبت به PI مرسوم (شکل (۴)) به ورودی‌های دارای نویز حساس‌تر است.

برای داشتن یک کنترل کننده فازی غیرخطی مقاوم، از یک روش طراحی تحلیلی استفاده می‌شود. مدل فازی TSK برای بخش فازی در نظر گرفته شده است و تنها یک ورودی (خطا) برای آن انتخاب شده است. برای حصول به تنظیم مستقل گین‌ها، یک نگاهت یک به دو مطابق شکل (۵) استفاده می‌شود.

دو کنترل کننده مستقل فازی برای بخش تناسبی ایجاد شده‌اند. طراحی کنترل کننده‌های تناسبی با استفاده از طرح TSK بر اساس دو قانون است. این قوانین عبارتند از:

$$P_{se} + P_{sh} = 0 \quad (2)$$

که در آن، P_{se} و P_{sh} به ترتیب توان‌های حقیقی مبادله شده مبدل‌های سری و شنت با سیستم قدرت است. از آنجا که کنترل مبدل شنت و سری مستقل از هم بوده و تعادل دقیق توان بین آنها به دست نمی‌آید، به منظور عدم تطابق توان حقیقی بین مبدل‌ها، عبارت $|V_s| |I_s|$ به P_s در رابطه (۱) اضافه می‌شود.

$$P_s = \rho |V_s|^2 B_{sh} \sin \alpha_{sh} + \rho |V_s|^2 B_{se} \sin \alpha_{se} + |V_s| |I_s| \quad (3)$$

که در آن، I_s مؤلفه حقیقی جریان مبدل شنت می‌باشد.

۲-۲- کنترل UPFC

UPFC توانایی منحصر به فرد کنترل مستقل فلوی توان اکتیو و راکتیو در خط انتقال در یک نقطه خاص را دارد. کنترل محلی با فرض آنکه، اینورترهای سری و شنت به عنوان منبع ولتاژ کنترل شونده عمل می‌کنند و همچنین ولتاژ باس DC در یک مقدار معین ثابت می‌ماند، طراحی می‌شود.

مؤلفه‌های فلوی توان اینورتر سری V_{ap} و V_{ar} هستند که هم‌فاز با جریان i_a خط انتقال و V_{ar} عمود بر i_a می‌باشند و با استفاده از روابط زیر توصیف می‌شوند.

$$i_a = \sqrt{i_{ad}^2 + i_{aq}^2} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{aq} \\ V_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ad} \\ V_{aq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$V_{ad} = \rho_{se} \cos(\alpha_{se}) V_{sd} - \rho_{se} \sin(\alpha_{se}) V_{sq}$$

$$V_{aq} = \rho_{se} \sin(\alpha_{se}) V_{sd} + \rho_{se} \cos(\alpha_{se}) V_{sq} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1}(i_{ad} / i_{aq})$$

$$V_a = \sqrt{V_{ad}^2 + V_{aq}^2}$$

$V_{ad}, V_{aq}, i_{ad}, i_{aq}, V_{ad}, V_{aq}, V_{ad}$ مؤلفه‌های متعامد جریان و ولتاژ می‌باشند. به علاوه آنکه رابطه بین پارامترهای قابل کنترل ρ و α با V_{ar} و V_{ap} به صورت زیر می‌باشد.

$$\rho = \sqrt{V_{cp}^2 + V_{cr}^2} / |V_s| \quad (7)$$

$$\alpha_{se} = \tan^{-1}(V_{ar} / V_{ap}) + \tan^{-1}(i_{ad} / i_{aq}) - \tan^{-1}(V_{sd} / V_{sq}) \quad (8)$$

مؤلفه‌های متعامد V_{ar} و V_{ap} برای کنترل ولتاژ سری UPFC معمولاً از تنظیم کننده‌های PI که بر مبنای انحراف توان اکتیو و راکتیو خط از مقادیر مبنای توان اکتیو و راکتیو P_{ref} و Q_{ref} کار می‌کنند، به دست می‌آیند.

مد دیگر کنترل UPFC به وسیله کنترل ولتاژ V_s با استفاده از مؤلفه جریان راکتیو اینورتر شنت می‌باشد. با صرف نظر کردن از تلفات، ولتاژ دینامیک لینک DC توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$u_p = e \{x_2 + (x_1 - x_2) |e|\} \quad (15)$$

شاخص حساسیت برای $e=0$ به صورت زیر می‌باشد:

$$\left. \frac{\partial u_p}{\partial e} \right|_{e=0} = x_2 \quad (16)$$

با توجه به رابطه (۱۶)، شاخص حساسیت بزرگتر از صفر است که این یک شرط مهم برای پایداری سیستم است.

در طراحی کنترل کننده انتخاب شاخص عملکرد بسیار مهم است. یک شاخص عملکرد ساده که خطای حالت ماندگار را منعکس کند، انتخاب شده است. در الگوریتم‌های مورد نظر از انتگرال خطا استفاده شده است و شاخص عملکرد به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$J = \int_0^{\infty} [y_k^d(t) - y_k(t)]^2 dt \quad (17)$$

۵- الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO)

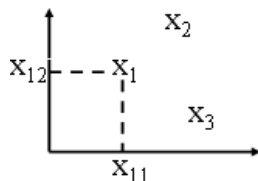
هوش گروهی شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌های الهام گرفته شده توسط رفتار طبیعی یک کلونی (جمعیت) برای حل مسائل دنیای واقعی است. مثل کلونی مورچگان، کلونی ذرات و امثال آن.

الگوریتم PSO دارای یک فرض ساختار همسایگی ذرات است که همسایه هر ذره را تعیین می‌کند. معمولاً این همسایگی ذرات در طی حل مسئله ثابت است و هر ذره همیشه همسایه‌های یکسانی دارد. این همسایگی‌ها می‌تواند به صورت توپولوژی حلقه‌ای یا اتصال کامل باشد. یک ذره شامل یک بردار از اعداد حقیقی به صورت زیر است:

$$x_i = \langle x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iD} \rangle \quad (18)$$

که در آن، x_{ij} ارزش یا مقدار ذره i ام هم‌هنگ با ذره j ام، i شماره متغیرها، D شماره ابعاد مسئله (چند بعدی).

در شکل (۷) یک مثال ساده از سه ذره در فضای جستجوی دو بعدی نشان داده شده است.



شکل (۷): سه ذره در فضای جستجوی دو بعدی

Fig. (7): Three particles in two dimension searching space

سرعت ذره یک بردار حقیقی است که به موقعیت آن در یک زمان از مرحله اضافه می‌شود. رابطه تنظیم موقعیت عبارت است:

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (19)$$

که در آن، $x_i(t)$ و $x_i(t-1)$ موقعیت ذره در زمان t و $t-1$ ، $v_i(t)$ سرعت ذره در زمان t است. رابطه کلی تر به صورت زیر بیان می‌شود:

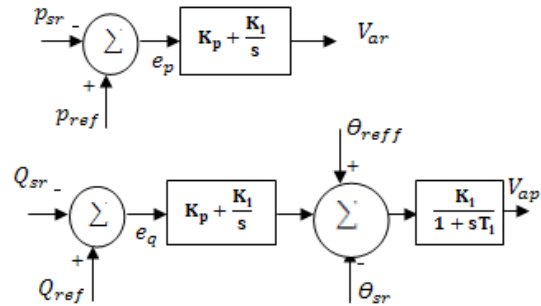
$$x_{ij}(t) = x_{ij}(t-1) + v_{ij}(t) \quad (20)$$

Rule1: If error $|e|$ is PB then $u_p = f_1(e)$

Rule2: If error $|e|$ is AZ then $u_p = f_2(e)$

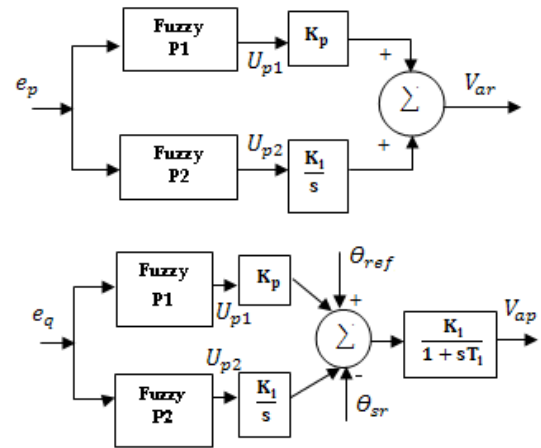
توابع عضویت در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. توابع f_1 و f_2 به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$f_1(e) = x_1 \cdot e, \quad f_2(e) = x_2 \cdot e \quad (14)$$



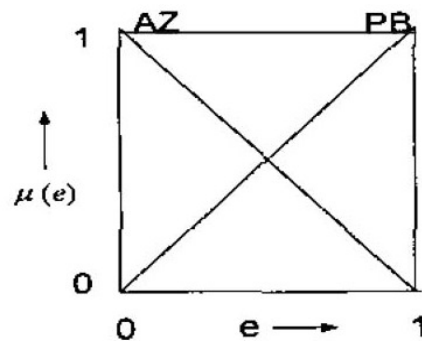
شکل (۴): ساختار PI (کنترل کننده P و Q)

Fig. (4): The general form of PI (Q,P controller)



شکل (۵): کنترل کننده PI فازی با نگاشت ۱ به ۲ (کنترل کننده P و Q)

Fig. (5): The PI fuzzy controller with drawing 1 to 2 (P,Q controller)



شکل (۶): توابع عضویت ورودی

Fig. (6): The input membership functions

فرم حلقه بسته استنتاج فازی به صورت زیر می‌باشد:

پیوند داده می‌شود، محاسبه PSO آسان است و مقدار ناچیزی محاسبات به آن افزوده می‌شود [۱۵].

در این بخش جزئیات طراحی یک کنترلر فازی با الگوریتم HGAPSO بیان می‌شود. در ارزش دهی ابتدایی، ثوابت آموختن و تعداد قانون‌ها توصیف می‌شوند. سپس پارامترهای یک کنترل کننده فازی با یک جواب منحصر بفرد در فرآیند انکدینگ ارائه می‌شوند. الگوریتم HGAPSO دارای سه مرحله عمده است: افزایش و بالا بردن، ترکیب و جهش. طبق روابط الگوریتم PSO:

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} &= WV_i^k + C_1 \text{rand}_1 (P_{\text{best}} - S_i^k) + C_2 \text{rand}_2 (G_{\text{best}} - S_i^k) \\ S_i^{k+1} &= S_i^k + V_i^{k+1} \end{aligned} \quad (23)$$

ارزش دهی آغازین تمام تعداد قانون‌ها C_1 و C_2 ، سایز جمعیت P_s و تعداد والد‌ها W هستند. در PSO در ابتدا دو مقدار رو به جلو در نظر گرفته می‌شوند (مهمترین حالت).

ارتقا: در هر والد پس از آنکه مقدار تابع هدف تمام افراد در یک جمعیت یکسان محاسبه شد، بهترین جواب‌ها علامت زده می‌شوند. این افراد به عنوان نخبه برگزیده می‌شوند و در ادامه به جای تولید دوباره زن، نخبگان به طور مستقیم برای والد‌ها به عنوان نخبه‌ی GA انجام وظیفه می‌کند. ما ابتدا نخبگان را با الگوریتم PSO ارتقا می‌دهیم. با به کارگیری این چنین نخبگان ارتقا یافته به عنوان والدین، تولید مثل آنها نتایج بهتری نسبت به به کارگیری نخبگان اصلی می‌دهد. گروه‌ها توسط نخبگان مورد توجه، به عنوان گروه ذرات تشکیل داده می‌شوند. هر نخبه با هر ذره در آن رابطه دارد. روابط PSO ارتباط با نخبگان دارند. در اینجا G_{best} بهترین عملکرد افراد هر نخبه مورد توجه یا تولید مثل کننده است. اگر نخبه \bar{X}_p تولید مثل کننده توسط والدین تولید مثل کننده قبلی باشد، $V_i(t)$ روی صفر تنظیم می‌شود و P_{best} روی $X_i(t)$ تنظیم می‌شود. در این صورت تولیدکنندگان خودی هستند. در غیر این صورت P_{best} بهترین جواب ذره \bar{X}_p را ثبت می‌کند. با به کارگیری PSO در نخبه‌ها ما ممکن است قابلیت جستجو را افزایش دهیم.

نیمی از جمعیت توسط افراد مورد توجه در والد‌های بعدی مجهز می‌شوند و باقی آنها توسط ترکیب انجام می‌شوند.

ترکیب: برای دریافت عملکرد ذره خوب در عملیات ترکیب والدین از نخبه‌های مورد توجه انتخاب می‌شوند. برای انتخاب والدین برای ترکیب از عملیات تورنمنت استفاده می‌شود. بدین ترتیب که از هر دو نخبه انتخاب شده برای ترکیب، آنهایی که دارای جواب مقدار هدف بهتری هستند انتخاب می‌شوند. شکل (۸) چرخه الگوریتم HGAPSO را نشان می‌دهد.

سرعت هر ذره به موقعیت قبلی خودش و موقعیت ذرات همسایه دارد و رابطه آن عبارتست از:

$$v_{ij}(t) = v_{ij}(t-1) + c_1 \cdot (p_{ij} - x_{ij}(t-1)) + c_2 \cdot (p_{gij} - x_{ij}(t-1)) \quad (21)$$

که در آن v_{ij} موقعیت ذره \bar{X}_p در بعد j ، p_{ij} بهترین موقعیت قبلی ذره \bar{X}_p در بعد j ، p_{gij} بهترین موقعیت همسایه ذره در بعد j و $C1$ ، $C2$ تصادفی بوده و وزن ذرات در هر مرحله است.

برای جلوگیری از انحراف سرعت ذرات شرایط زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{If } v_{ij}(t) > v_{\text{max}} \text{ then } v_{ij}(t) &= v_{\text{max}} \\ \text{elseif } v_{ij}(t) < -v_{\text{max}} \text{ then } v_{ij}(t) &= -v_{\text{max}} \end{aligned} \quad (22)$$

در الگوریتم برنامه PSO، به صورت اتفاقی یک ذره انتخاب می‌شود و صلاحیت جواب اولیه آن ذره محاسبه شده و به عنوان بهترین موقعیت ذره قرار داده می‌شود. یک حلقه تا رسیدن به جواب مطلوب ادامه می‌یابد. بنابراین تمام ذرات دارای یک جواب مطلوب هستند. اگر جواب هر ذره از موقعیت قبلی همان ذره بهتر بود این موقعیت به عنوان بهترین موقعیت ذره مورد نظر ذخیره می‌شود. در مرحله بعدی از میان بهترین موقعیت ذراتی که همسایه ذره \bar{X}_p است بهترین آن انتخاب می‌شود. سپس بر اساس ابعاد حرکت (D) سرعت ذره در بعد مورد نظر محاسبه می‌شود و ذره را به طرف بهترین موقعیت همسایه‌اش سوق می‌دهد به نحوی که سرعتش در محدوده مجاز باشد.

۵-۱- الگوریتم ترکیبی ژنتیک و بهینه‌سازی گروهی ذرات (HGAPSO):

در الگوریتم ژنتیک کاندیدای جواب مسئله کروموزوم نامیده می‌شود و شامل لیستی خطی از ژن‌ها است. هر ژن نماینده یک نقطه در فضای جستجو است و بنابراین یک احتمال جواب مسئله است. یک جمعیت شامل تعداد متناهی ژن است. برای هر عضو توسط یک ماشین ارزیابی تصمیم گرفته می‌شود تا مقدار هدف را به دست آورد. بر پایه مقدار تابع هدف و اپراتورهای الگوریتم GA جمعیت موفق جدید ایجاد می‌شود. GA به منظور دستکاری ماهرانه هر جمعیت دارای سه اپراتور مینا است (تکثیر، کراس‌اور و جهش). رفتار PSO، جمعیتی است که ذرات آن را تشکیل می‌دهند و معادل افراد یا ژن‌ها در الگوریتم GA است. در ابتدا این ذرات به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. هر ذره کاندیدای جواب است و دارای یک موقعیت است که با بردار \bar{X}_p نمایش داده می‌شود. یک دسته از ذرات در فضای جواب شروع به حرکت می‌کنند که سرعت هر ذره با بردار \bar{V}_p نشان داده می‌شود. در هر مرحله زمانی تابع f_i که کیفیت اندازه‌گیری است محاسبه می‌شود. با بکارگیری بردار \bar{X}_p به عنوان ورودی، هر ذره از بهترین موقعیتش تبعیت می‌کند. موقعیت هر ذره تابع دو پارامتر بهترین موقعیت خودش و بینش گروهش است یعنی P_{best} و G_{best} . وقتی با الگوریتم GA

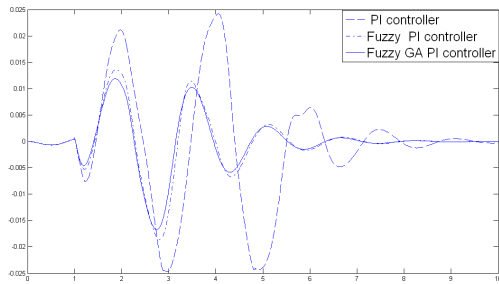
Table (1): The PI controller parameters on UPFC
جدول (۱): پارامترهای کنترل کننده PI روی UPFC

پارامترهای بهینه شده کنترل کننده PI	k_p	k_i	$\Delta u = \Delta \omega$
PI	0.1	0.2	0.04
GA فازی با PI	0.8	0.63	0.0000316
PSO فازی با PI	0.85	0.69	0.0000216
HGAPSO فازی با PI	0.88	0.63	0.00000134

الف) بررسی تأثیر کنترل کننده فازی UPFC با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA):

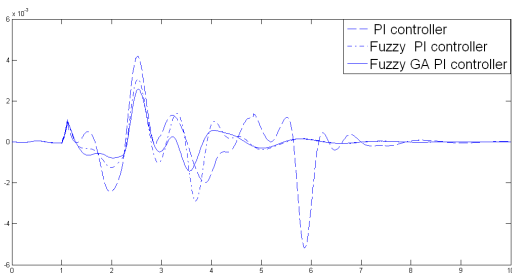
یک خطای سه فاز متقارن به مدت 100 ms در وسط خط ۷-۸ رخ داده است. میراسازی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای با حضور UPFC بین دو ناحیه و مجهز به کنترل کننده PI مرسوم و نیز کنترل کننده PI فازی بدون استفاده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نشان داده شده است.

برتری کنترل کننده فازی با GA برای میرایی نوسانات در مقایسه با کنترل کننده PI معمولی و فازی تنها، آشکار است. به طوری که فراجش و زمان برگشت نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای کاهش یافته است.



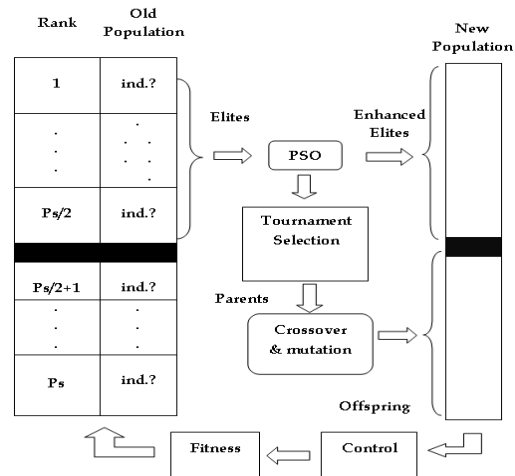
شکل (۱۰): نوسانات بین ناحیه‌ای $\omega_1 - \omega_4$ (rad/sec)

Fig. (10): The inter region oscillations $\omega_1 - \omega_4$ (rad/sec)



شکل (۱۱): نوسانات محلی $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)

Fig. (11): The local oscillations $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)



شکل (۸): چرخه الگوریتم F-HGAPSO

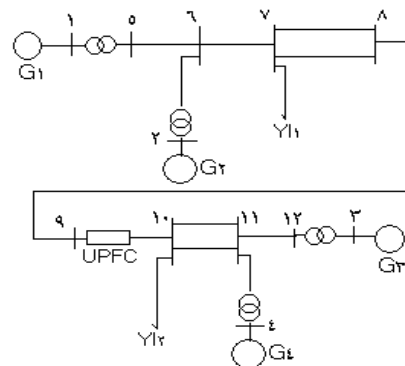
Fig. (8): The F-HGAPSO cycle algorithm

۶- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

در این مقاله، پارامترهای کنترل کننده PI روی UPFC به صورت یک رشته باینری کد شده‌اند و جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. الگوریتم‌های GA، PSO و HGAPSO برای انتخاب بهینه پارامترهای این کنترل کننده به کار رفته‌اند. برای بررسی تأثیر کنترل کننده‌های پیشنهادی، یک شبکه قدرت دو ناحیه‌ای چهار ماشینه در نظر گرفته شده است (شکل (۹)) [۳].

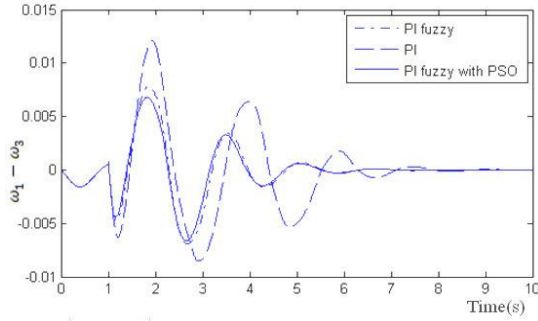
با بروز یک خطای متقارن سه فاز در وسط خط ۷-۸، عملکرد UPFC با کنترل کننده‌های PI مرسوم و PI فازی بهینه شده با الگوریتم‌های GA، PSO و HGAPSO در میراسازی نوسانات محلی (اختلاف سرعت بین ماشین‌های یک ناحیه) و نوسانات بین ناحیه‌ای (اختلاف سرعت بین ماشین‌های دو ناحیه) مورد بررسی قرار گرفته است.

پس از اجرای برنامه کامپیوتری، پارامترهای بهینه PI مرسوم و PI فازی هوشمند در جدول (۱) ارائه شده است.



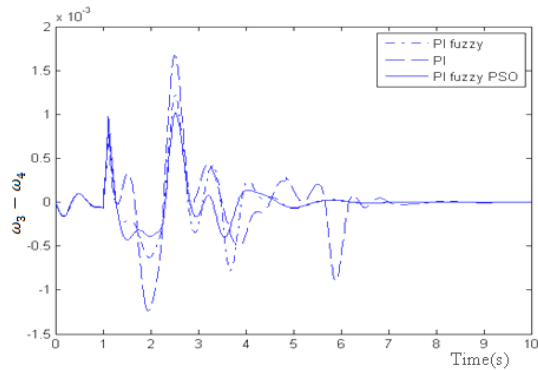
شکل (۹): سیستم قدرت چند ماشینه با UPFC

Fig. (9): The multi machine power system with UPFC



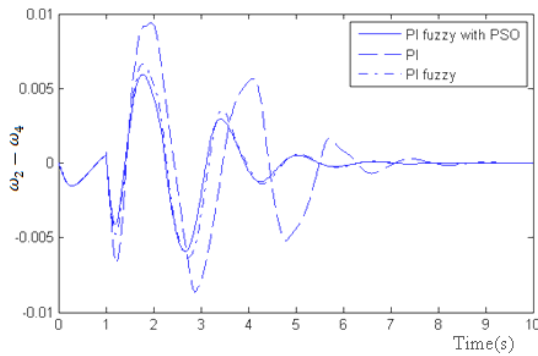
شکل (۱۵): نوسانات بین ناحیه‌ای $\omega_1 - \omega_3$ (rad/sec)

Fig. (15): The inter regional oscillations $\omega_1 - \omega_3$ (rad/sec)



شکل (۱۶): نوسانات محلی $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)

Fig. (16): The local oscillations $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)



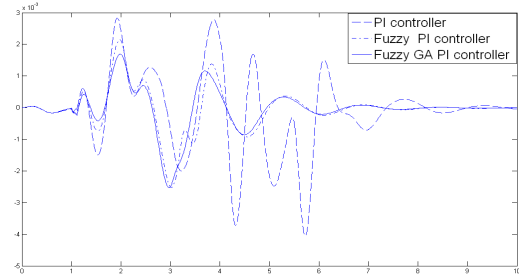
شکل (۱۷): نوسانات بین ناحیه‌ای $\omega_2 - \omega_4$ (rad/sec)

Fig. (17): The inter regional oscillations $\omega_2 - \omega_4$ (rad/sec)

ج) بررسی تأثیر کنترل کننده فازی UPFC با استفاده از

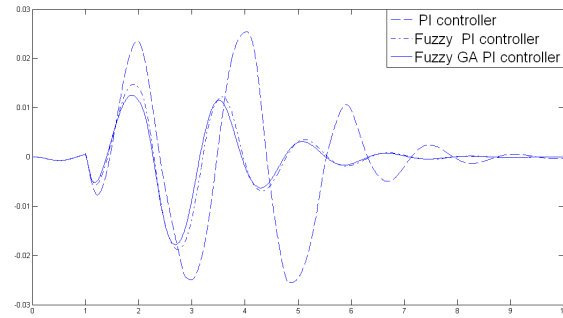
الگوریتم ترکیبی گروهی ذرات و ژنتیک (HGAPSO):

یک خطای سه فاز متقارن به مدت 250 ms در وسط خط ۷-۸ رخ داده است. شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای سیستم را نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود به ازای خطای مذکور با کنترل کننده PI مرسوم سیستم به سمت ناپایداری میل می‌نماید در صورتی که با کنترل کننده فازی بهینه‌شده با الگوریتم HGAPSO، نوسانات به طور قابل توجهی به سرعت میرا شده‌اند.



شکل (۱۲): نوسانات محلی $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)

Fig. (12): The local oscillations $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)

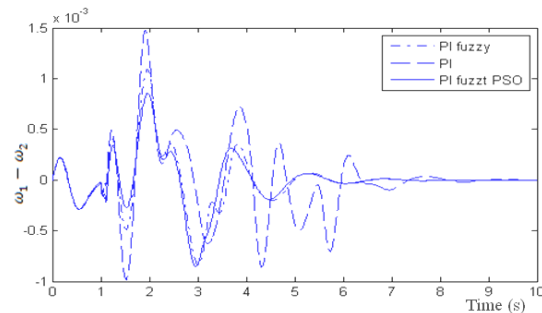


شکل (۱۳): نوسانات بین ناحیه‌ای $\omega_1 - \omega_3$ (rad/sec)

Fig. (13): The inter regional oscillations $\omega_1 - \omega_3$ (rad/sec)

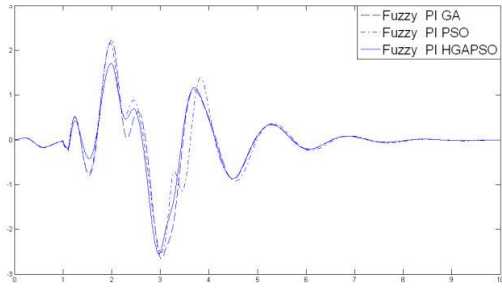
ب) بررسی تأثیر کنترل کننده فازی UPFC با استفاده از الگوریتم گروهی ذرات (PSO):

با تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده PI فازی با روش PSO و بروز خطای سه فاز متقارن به مدت 100 ms در وسط خط ۷-۸، عملکرد UPFC در میراسازی نوسانات در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷)، مناسب بوده است. با تنظیم پارامترهای کنترل کننده فازی با روش PSO، فراچسب و زمان نشست در نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای بهبود یافته است.

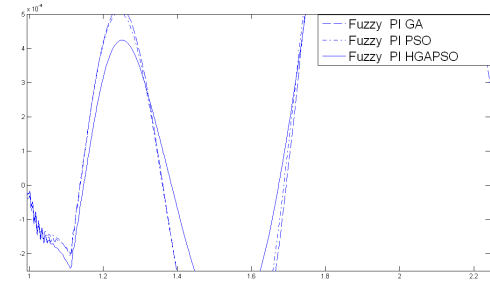


شکل (۱۴): نوسانات محلی $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)

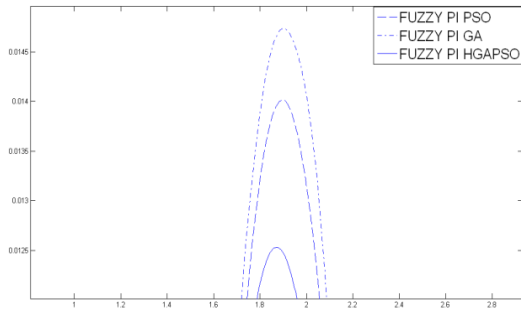
Fig. (14): The local oscillations $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)



شکل (۲۱): نوسانات محلی $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)
Fig. (21): The local oscillations $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)



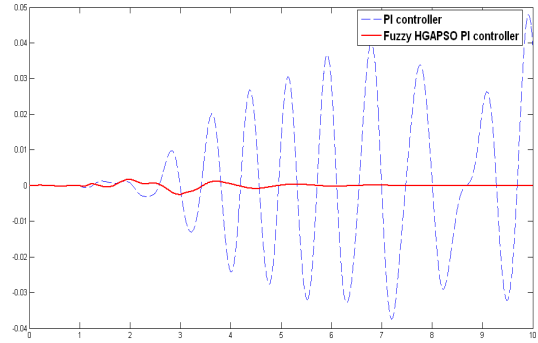
شکل (۲۲): بزرگنمایی نوسانات محلی $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)
Fig. (22): The magnified local oscillations $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)



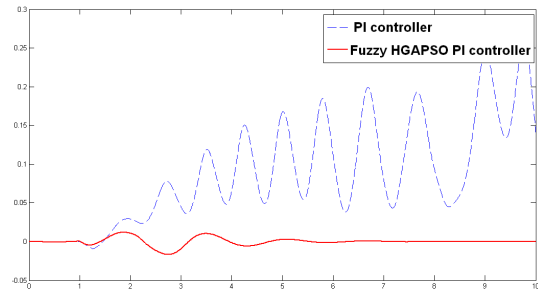
شکل (۲۳): نوسانات محلی $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)
Fig. (23): The local oscillations $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)

۷- نتیجه گیری

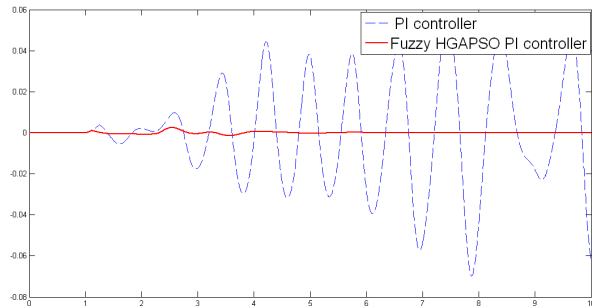
در این مقاله، با بررسی یک سیستم قدرت نمونه و به همراه UPFC کنترل کننده فازی با گین متغیر با بهبود توسط بهینه سازی به وسیله الگوریتم های GA، PSO و HGAPSO ارائه شده است. پارامترهای کنترل کننده بر اساس کنترل کننده فازی نوع سوگنو طراحی شده است. این کنترل کننده بر اساس دو قانون کار می کند. نتایج شبیه سازی سیستم برای اغتشاشات گذرا، تاثیر کنترل کننده پیشنهادی را برای میرایی نوسانات محلی و بین ناحیه ای در سیستم نسبت به کنترل کننده های PI مرسوم نشان می دهد. نتیجه آن که استفاده از ادوات FACTS و طراحی کنترل کننده روی این ادوات بر اساس منطق فازی و الگوریتم های بهینه سازی مانند GA و PSO تاثیر بسزایی در میراسازی نوسانات سیگنال بزرگ در سیستم قدرت دارد.



شکل (۱۸): نوسانات محلی $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)
Fig. (18): The local oscillations $\omega_1 - \omega_2$ (rad/sec)



شکل (۱۹): نوسانات بین ناحیه ای $\omega_1 - \omega_4$ (rad/sec)
Fig. (19): The inter regional oscillations $\omega_1 - \omega_4$ (rad/sec)



شکل (۲۰): نوسانات محلی $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)
Fig. (20): The local oscillations $\omega_3 - \omega_4$ (rad/sec)

د) مقایسه و بررسی تأثیر کنترل کننده فازی UPFC با استفاده از الگوریتم های GA، PSO و HGAPSO:

شکل های (۲۱) تا (۲۳) مقایسه تأثیر حضور UPFC با کنترل کننده PI فازی بهینه شده با الگوریتم های GA، PSO و HGAPSO را نشان می دهد که در هر سه حالت عملکرد خوبی در میراسازی نوسانات وجود دارد. با توجه به شکل های بزرگنمایی شده در کنترل بالازدگی نوسانات، بهینه سازی پارامترها به ترتیب با روش HGAPSO، PSO و GA تأثیر بهتری داشته اند.

کاهش زمان میرایی خطا و کاهش نسبی بالازدگی و میرا نمودن نوسانات ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای در سیستم نتیجه استفاده از کنترل کننده‌های هوشمند بر مبنای منطق فازی و الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی است. در صورت بروز خطای شدید (خطای سه فاز) در سیستم، نوسانات ایجاد شده در ژنراتور سنکرون به نحو مطلوب و در زمان حداقل، میرا شده و اجازه داده نشود که این خطا (نوسانات سیگنال بزرگ) ژنراتور را از حالت سنکرون خارج کند و سیستم ناپایدار شود.

مراجع

- [1] M. Torabian, R. Hooshmand, "Designing of thyristor controlled reactor (TCR) compensator parameter for electric arc furnaces", *Jou. Of Trans. On Elec. Tech. (JTET)*, Vol.1, No.4, pp.53-68, Aut. 2009.
- [2] G. Shahgholian, E. Haghjoo, A. Seifi, I. Hassanzadeh, "The improvement DISTATCOM to enhance the quality of power using fuzzy neural controller", *Jou. Of Trans. On Elec. Tech. (JTET)*, Vol.2, No.2, pp.3-18, Win. 2010.
- [3] P. Kundur, "Power system stability and control", New York, McGraw Hill, 1993.
- [4] L. Yo, "A unified power flow control concept for felexible AC transmission systems", *IEE Proc. Gen. Tran. Dis.*, Vol.139, No.4, pp.323-331, 1992.
- [5] U. Yi, C.D. Schauder, S.L. Torgenon, A. Edris, "The unified power flow contoller: A new approach to power transmission control", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.10, No.2, pp.1088-1097, 1995.
- [6] L. Hn, M.R. Travani, "Experimental evaluation of STATCOM closed loop dynamics", *IEEE Trans. Pow. Sys.*, 10,(2), pp.1085-1097, 1995.
- [7] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandari, G. Anderson, "Improving power system dynamics by series-connected FACTS devices", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.12, No.4, pp.1635-1641, 1997.
- [8] M. Noroozian, G. Anderson, "Damping of power system by controllable components", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.9, pp.2046-2054, 1994.
- [9] K.R. Padiyar, A.M. Kulkami, "Control desien and simulation of unified power flow controller", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.13, No.4, pp.1348-1354, 1998.
- [10] Z. Huaang, Y.X. Ni, C.M. Shen, F.F. Wu, S. Chen, B. Zhang, "Application of unified power flaw controller in interconnected power systems, modeling, interface, control strategy and case study", *IEEE Trans. On Pow. Sys.*, Vol.15, No.2, pp.811-816, 2000.
- [11] Xi. Yixin, Mak. Lai, On. Hung Zhenyu, C. Shausun, Z. Baolin, "Fuzzy logic damping controller for FACTS devices in interconnected power systems", *IEEE/ISCAS*, Vol.5, pp.591-594, 1999.
- [12] S. Morris, P.K. Dash, K.P. Basu, "A fuzzy variable structure current controller for flexible AC transmission systems", *IEEE/PES Conf.*, Vol.1, pp.330-335, 2002.
- [13] H.F. Frank, H.K. Lam, S.H. Ling, P.K.S. Tam, "Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm", *IEEE on Trans. Neu. Net.*, Vo1.14, No.1, Jan. 2003.
- [14] S. Morris, P.K. Dash, K.P. Basu, A.M. Sharaf, "UPFC controller design for power system stabilization with improved genetic algorithm", *IEEE/IECON*, Vol.2, pp.1540-1544, 2003.
- [15] Chia-F. Juang, "A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design", *IEEE Trans. on Sys., Man. and Cybe.*, Vol.34, No.2, Apr. 2004.

