

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

حسن براتی<sup>(۱)</sup> - رضا ساکی<sup>(۲)</sup> - سید سعیداله مرتضوی<sup>(۳)</sup>

(۱) گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

(۲) گروه برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دورود

(۳) گروه برق - دانشکده فنی - دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: بهمن ۱۳۸۸

تاریخ دریافت: مهر 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.

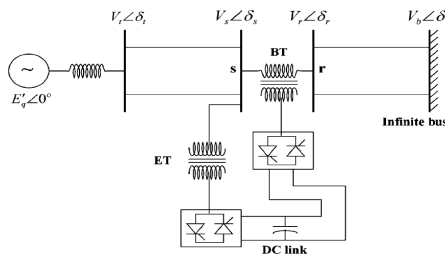
**کلمات کلیدی:** UPFC، کنترل کننده PI و فازی، الگوریتم بهینه‌سازی GA، PSO و HGAPSO، پایداری گذرا.

### ۱- مقدمه

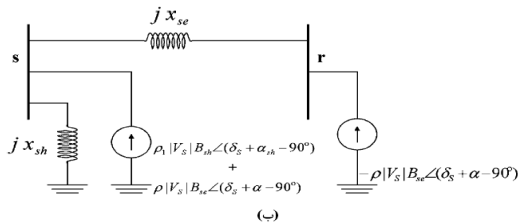
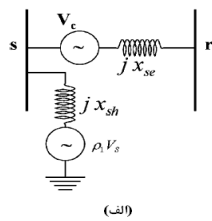
با توسعه سیستم‌های قدرت و به ویژه توسعه بازار برق، کنترل عبور توان خطوط انتقال اهمیت بسیاری یافته است. سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر برای کنترل مناسب جهت حصول به انعطاف‌پذیری سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲]. برای سال‌های متمادی پایدارساز قدرت معمول‌ترین کنترل کننده برای میرایی نوسانات 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 میراکردن نوسانات سیستم بسیار مؤثر است [۳]. گرچه 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 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 تطبیق‌پذیرترین 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 تحریک و تزریق، UPFC را تشکیل می‌دهند. مبدل اول یا مبدل موازی، توان اکتیو را از منبع می‌کشد و آن را با مبدل دوم مبادله

راکتانس و سوسپتانس سری و موازی ترانسفورماتورهای UPFC می‌باشند، همچنین  $\rho$  نسبت ولتاژ سری به اندازه ولتاژ باس S و  $\alpha$  اندازه فاز ولتاژ سری نسبت به ولتاژ باس S،  $\rho_1$  نسبت ولتاژ شنت به اندازه ولتاژ باس S و  $\alpha_{sh}$  اندازه فاز ولتاژ شنت نسبت به ولتاژ باس S می‌باشد.



شکل (۲): UPFC استفاده شده در یک سیستم تک ماشینه با شین بی‌نهایت



شکل (۳): مدار معادل UPFC

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

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

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

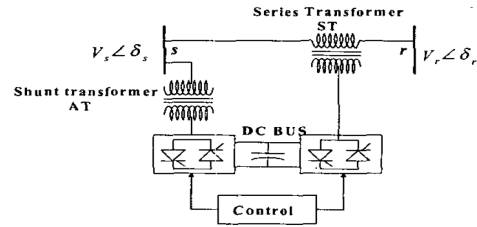
برای ثبات ولتاژ لینک DC، رابطه زیر باید برقرار باشد:

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

که در آن،  $P_{se}$  و  $P_{sh}$  به ترتیب توان‌های حقیقی مبادله‌شده 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  $P_s$  به  $|V_s| |I_s|$  در رابطه (۱) اضافه می‌شود.

می‌کند (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. استراتژی‌های کنترلی مختلفی برای کنترل UPFC پیشنهاد شده است [۷-۱۱].



شکل (۱): آرایش کلی UPFC

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

روش طراحی کنترل‌کننده بر مبنای منطق فازی، طراحی کنترل‌کننده غیرخطی را بدون وابستگی به مدل سیستم و با قابلیت هماهنگی بین عملکرد مبدل‌های سری و موازی را فراهم می‌آورد. کنترل‌کننده فازی نوع ممدانی عملکرد مناسبی را در محدوده وسیعی از عملکرد در مدهای کنترلی تزریق توان، تثبیت ولتاژ و شیفت فاز ارائه نمی‌دهد. کنترل‌کننده فازی نوع سوگنو محدوده وسیع‌تری از گین‌های کنترلی را در شرایط عملکرد سیستم ارائه داده و نسبت به نوع ممدانی انعطاف‌پذیری بیشتری دارد [۱۴-۱۲].

در مقاله حاضر، با بهره‌گیری از مرجع [۱۴]، کنترل‌کننده فازی نوع سوگنو بر روی UPFC طراحی شده است. این کنترل‌کننده از دو قانون استفاده کرده و یک کنترل‌کننده PI متغیر را ارائه می‌دهد. پارامترهای این کنترل‌کننده توسط الگوریتم‌های هوشمند ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO) و ترکیب آنها (HGAPSO) [۱۵]، برای بهبود پایداری گذرای سیستم و میراسازی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای به ازای اغتشاشات کوچک و بزرگ در یک سیستم نمونه استفاده شده است.

## ۲- مدل‌سازی و کنترل UPFC

### ۲-۱-۲ مدل‌سازی UPFC

شکل (۲) یک سیستم تک ماشینه متصل به باس بی‌نهایت را نشان می‌دهد که سیستم قدرت با یک UPFC بین باس‌های S و r بهره‌برداری می‌شود. فرض می‌شود ولتاژ القاء شده در ترانسفورماتور تزریق و تحریک UPFC به ترتیب  $\rho |V_s|$  و  $\rho_1 |V_s|$  باشند و با دو منبع کنترل‌شده در شکل (۳-الف) نشان داده شوند و نیز UPFC را بتوان به عنوان دو منبع جریان متصل به باس‌های S و r در شکل (۳-ب) نشان داد که در آن  $B_{se}, X_{se}$  و  $B_{sh}, X_{sh}$  به ترتیب

### 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 پرننگ کردن اثر کنترل UPFC، گاورنر و سیم پیچ میراکننده لحاظ نشده است. دینامیک هر ماشین سنکرون به صورت زیر می‌باشد:

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

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

$$pE'_q = (E_{fd0} + \Delta E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) i_d) / \tau'_{d0} \quad (11)$$

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

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

$$P_e = E'_q i_q + (x_q - x'_q) i_d i_q$$

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

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

### ۴- کنترل کننده PI فازی

اغلب کنترل کننده‌های PI مبتنی بر منطق فازی از دو ورودی مثل خطا ( $e$ )، مشتق آن ( $\Delta e$ ) 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 حساس تر 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:

$$\text{Rule1: If error } |e| \text{ is PB then } u_p = f_1(e)$$

$$\text{Rule2: If error } |e| \text{ is AZ then } u_p = f_2(e)$$

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

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

زیر انتخاب شده‌اند:

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

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

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

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

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

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

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

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

$V_{ad}, V_{aq}, i_{ad}, i_{aq}, V_{sd}, V_{sq}, V_{ar}, V_{ap}$  مؤلفه‌های متعامد جریان و ولتاژ

می‌باشند. به علاوه آنکه رابطه بین پارامترهای قابل کنترل  $\rho$  و  $\alpha$  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.

$$V_{dc}' = \frac{1}{CV_{dc}} [ |V_s| |I_s| - B_{se} \rho_{se} |V_s| |V_t| \sin(\theta_{sr} + \alpha_{se}) + \quad (9)$$

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

در رابطه (۹)  $I_s$  مؤلفه جریان هم‌فاز 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.

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

شده است. در الگوریتم‌های مورد نظر از انتگرال خطا استفاده شده است و شاخص عملکرد به صورت زیر تعریف می‌شود.

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

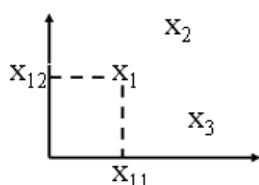
#### ۵- الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO)

هوش گروهی شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌های الهام گرفته‌شده 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 هم‌مانند با ذره  $j$ ام،  $j$  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

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

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

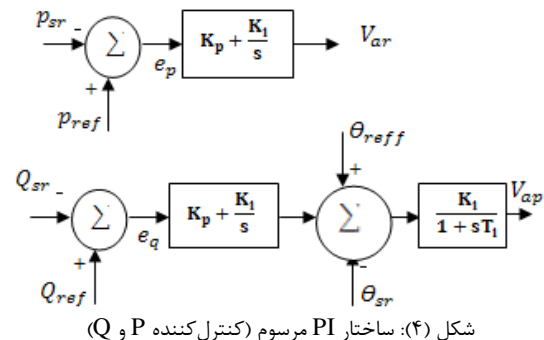
که در آن،  $x_i(t)$  و  $x_i(t-1)$  موقعیت ذره در زمان  $t$  و  $t-1$ ،  $v_i(t)$  سرعت ذره در زمان  $t$  است. رابطه کلی‌تر به صورت زیر بیان می‌شود:

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

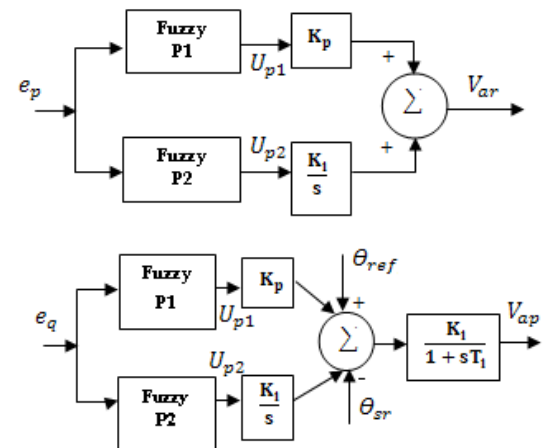
سرعت هر ذره به موقعیت قبلی خودش و موقعیت ذرات همسایه دارد و رابطه آن عبارتست از:

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

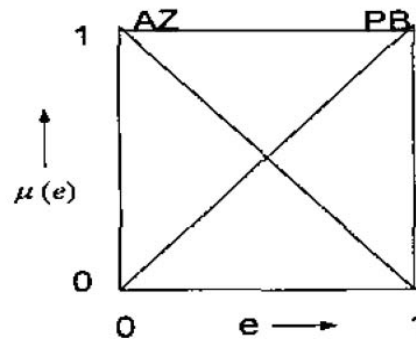
که در آن  $v_{ij}$  موقعیت ذره  $i$ ام در بعد  $j$ ،  $p_{ij}$  بهترین موقعیت قبلی ذره  $i$ ام در بعد  $j$ ،  $p_{gj}$  بهترین موقعیت همسایه ذره در بعد  $j$  و  $C1$ ،  $C2$  تصادفی بوده و وزن ذرات در هر مرحله است.



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



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



شکل (۶): توابع عضویت ورودی

فرم حلقه بسته استنتاج فازی به صورت زیر می‌باشد:

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

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

$$V_i^{k+1} = W V_i^k + C_1 \text{rand}_1 (P_{\text{best}} - S_i^k) + C_2 \text{rand}_2 (G_{\text{best}} - S_i^k)$$

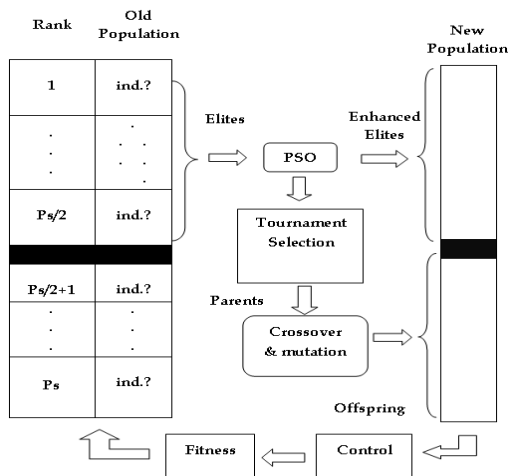
$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (23)$$

ارزش دهی آغازین تمام تعداد قانون‌ها  $C_1$  و  $C_2$ ، سائز 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 ژن، 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 اینچنین 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  $G_{\text{best}}$  بهترین عملکرد افراد هر نخبه مورد توجه یا تولید مثل کننده است. اگر نخبه  $\lambda$ م تولید مثل کننده توسط والدین تولید مثل کننده قبلی باشد،  $V_i(t)$  روی صفر تنظیم می‌شود و  $P_{\text{best}}$  روی  $X_i(t)$  تنظیم می‌شود. در این صورت تولیدکنندگان خودی هستند. در غیر این صورت  $P_{\text{ibest}}$  بهترین جواب ذره  $\lambda$ م 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.



شکل (۸): چرخه الگوریتم F-HGAPSO

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

$$\text{If } v_{ij}(t) > v_{\text{max}} \text{ then } v_{ij}(t) = v_{\text{max}} \quad (22)$$

$$\text{elseif } v_{ij}(t) < -v_{\text{max}} \text{ then } v_{ij}(t) = -v_{\text{max}}$$

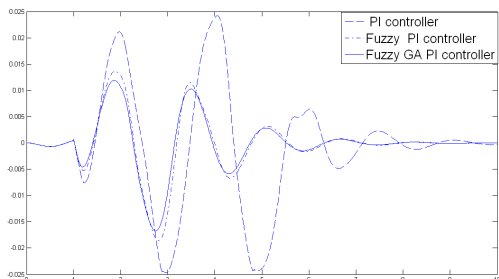
در الگوریتم برنامه PSO، به صورت اتفاقی یک ذره انتخاب می‌شود و صلاحیت جواب اولیه آن ذره محاسبه شده و به عنوان بهترین موقعیت ذره قرار داده می‌شود. یک حلقه تا رسیدن به جواب مطلوب ادامه می‌یابد. بنابراین تمام ذرات دارای یک جواب مطلوب هستند. اگر جواب هر ذره از موقعیت قبلی همان ذره بهتر بود این موقعیت به عنوان بهترین موقعیت ذره مورد نظر ذخیره می‌شود. در مرحله بعدی از میان بهترین موقعیت ذراتی که همسایه ذره  $\lambda$ م 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):

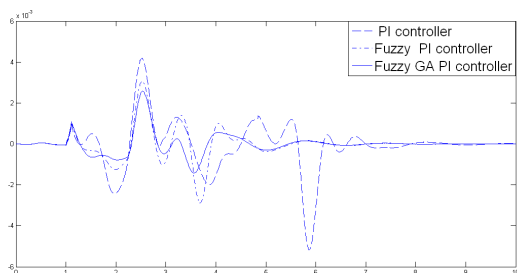
در الگوریتم ژنتیک کاندیدای جواب مسئله کروموزوم نامیده می‌شود و شامل لیستی خطی از ژن‌ها است. هر ژن نماینده یک نقطه در فضای جستجو است و بنابراین یک احتمال جواب مسئله است. یک جمعیت شامل تعداد متناهی ژن است. برای هر عضو توسط یک ماشین ارزیابی تصمیم گرفته می‌شود تا مقدار هدف را به دست آورد. بر پایه مقدار تابع هدف و اپراتورهای الگوریتم GA جمعیت موفق جدید ایجاد می‌شود. GA به منظور دستکاری ماهرانه هر جمعیت دارای سه اپراتور مبنا 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  $P_{\text{best}}$  و  $G_{\text{best}}$ . وقتی با الگوریتم GA 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 کنترلر 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:

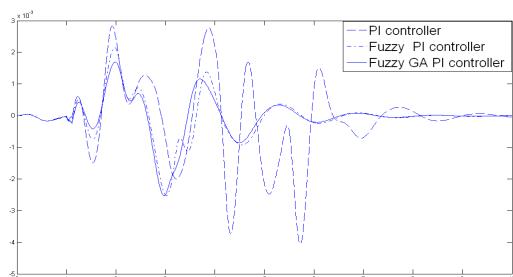
برتری کنترل کننده فازی با GA برای میرایی نوسانات در مقایسه با کنترل کننده PI معمولی و فازی تنها، آشکار است. به طوری که فرآیند و زمان برگشت نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای کاهش یافته است.



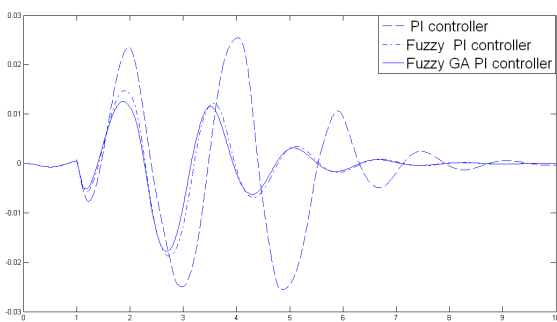
شکل (۱۰): نوسانات بین ناحیه‌ای  $\omega_1 - \omega_4$  (rad/sec)



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



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



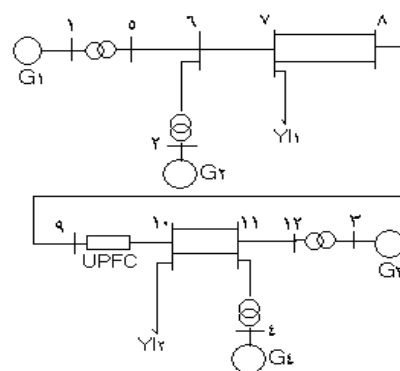
شکل (۱۳): نوسانات بین ناحیه‌ای  $\omega_1 - \omega_3$  (rad/sec)

## 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.



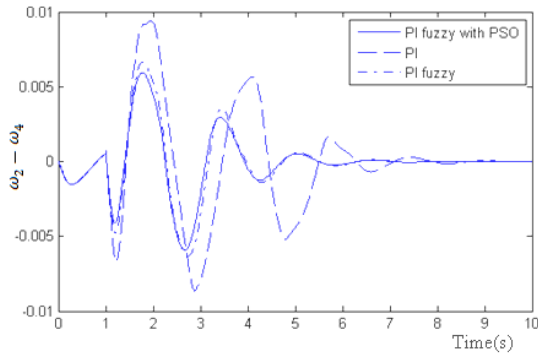
شکل (۹): سیستم قدرت چند ماشینه با UPFC

جدول (۱): پارامترهای کنترل کننده PI روی UPFC

پارامترهای بهینه شده کنترل کننده PI	$k_p$	$k_i$	$\Delta u = \Delta \omega$
PI	۰/۱	۰/۲	۰/۰۴
PI فازی با GA	۰/۸	۰/۶۳	۰/۰۰۰۰۳۱۶
PI فازی با PSO	۰/۸۵	۰/۶۹	۰/۰۰۰۰۲۱۶
PI فازی با HGAPSO	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۰۰۰۰۰۱۳۴

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

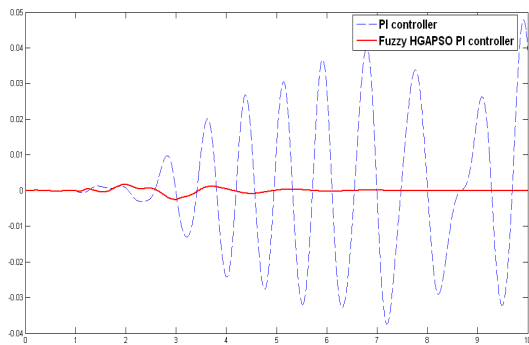
یک خطای سه فاز متقارن به مدت ۱۰۰ms در وسط خط ۷-۸ رخ داده است. میراسازی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای با حضور UPFC بین دو ناحیه و مجهز به کنترل کننده PI مرسوم و نیز کنترل کننده PI فازی بدون استفاده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نشان داده شده است.



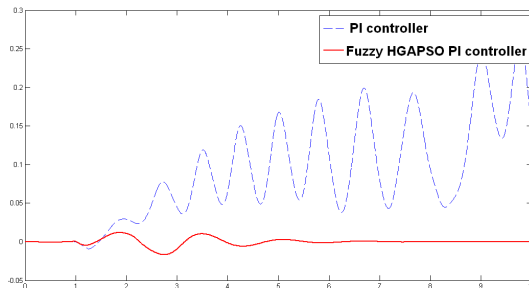
شکل (۱۷): نوسانات بین ناحیه‌ای  $\omega_2 - \omega_4$  (rad/sec)

ج) بررسی تأثیر کنترل کننده فازی UPFC با استفاده از الگوریتم ترکیبی گروهی ذرات و ژنتیک (HGAPSO):

یک خطای سه فاز متقارن به مدت ۲۵۰ 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.



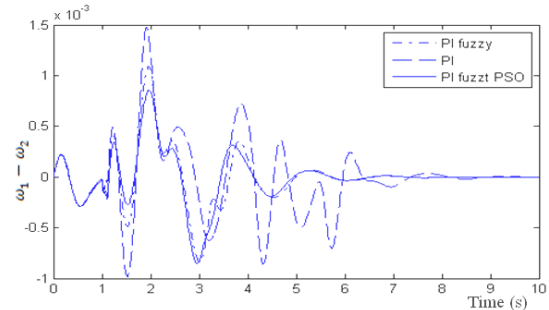
شکل (۱۸): نوسانات محلی  $\omega_1 - \omega_2$  (rad/sec)



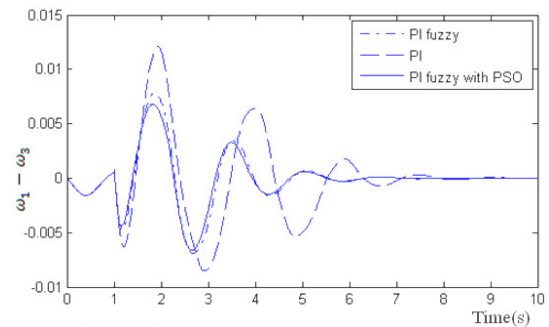
شکل (۱۹): نوسانات بین ناحیه‌ای  $\omega_1 - \omega_4$  (rad/sec)

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

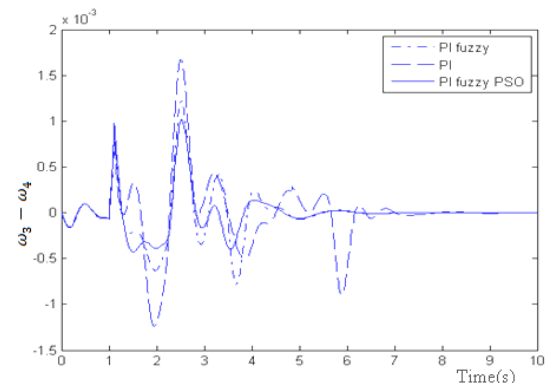
با تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده PI فازی با روش PSO و بروز خطای سه فاز متقارن به مدت ۱۰۰ ms در وسط خط ۷-۸، عملکرد UPFC در میراسازی نوسانات در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷)، مناسب بوده است. با تنظیم پارامترهای کنترل کننده فازی با روش PSO، فراجشش و زمان نشست در نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای بهبود یافته است.



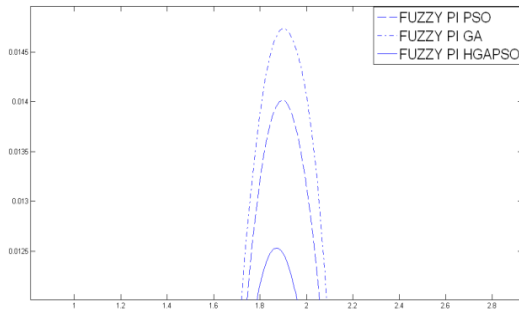
شکل (۱۴): نوسانات محلی  $\omega_1 - \omega_2$  (rad/sec)



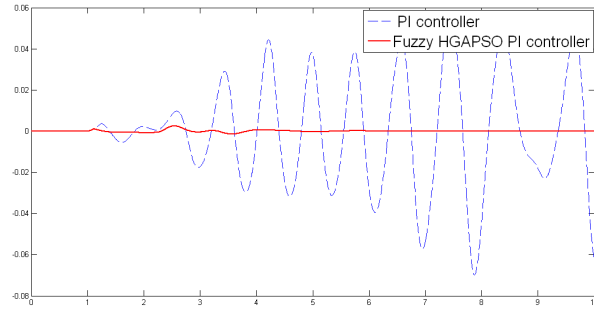
شکل (۱۵): نوسانات بین ناحیه‌ای  $\omega_1 - \omega_3$  (rad/sec)



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



شکل (۲۳): نوسانات محلی  $\omega_3 - \omega_4$  (rad/sec)



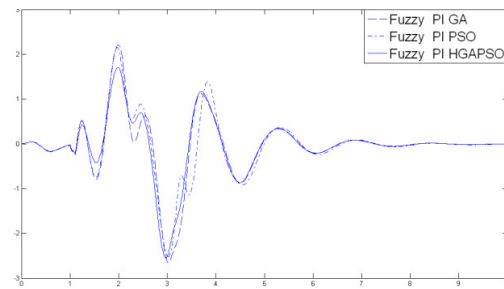
شکل (۲۰): نوسانات محلی  $\omega_3 - \omega_4$  (rad/sec)

#### ۷- نتیجه‌گیری

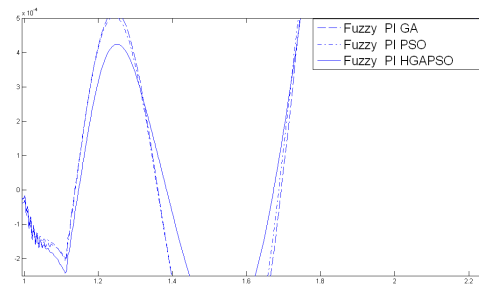
در این مقاله، با بررسی یک سیستم قدرت نمونه و به همراه UPFC کنترل کننده فازی با گین متغیر با بهبود توسط بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم‌های GA، PSO و HGAPSO ارائه شده است. پارامترهای کنترل کننده بر اساس کنترل کننده فازی نوع سوگنو طراحی شده است. این کنترل کننده بر اساس دو قانون کار می‌کند. نتایج شبیه‌سازی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

#### د) مقایسه و بررسی تأثیر کنترل کننده فازی UPFC با استفاده از الگوریتم‌های PSO، GA و HGAPSO.

شکل‌های (۲۱) تا (۲۳) مقایسه تأثیر حضور UPFC با کنترل کننده PI فازی بهینه‌شده با الگوریتم‌های GA، PSO و HGAPSO را نشان می‌دهد که در هر سه حالت عملکرد خوبی در میراسازی نوسانات وجود دارد. با توجه به شکل‌های بزرگنمایی شده در کنترل بالازدگی نوسانات، بهینه‌سازی پارامترها به ترتیب با روش PSO، HGAPSO و GA تأثیر بهتری داشته‌اند.



شکل (۲۱): نوسانات محلی  $\omega_1 - \omega_2$  (rad/sec)



شکل (۲۲): بزرگنمایی نوسانات محلی  $\omega_1 - \omega_2$  (rad/sec)

#### 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. Torgenson, A. Edris, "The unified power flow controller: 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. Kulkarni, "Control design 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 flow 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., Vol.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.

#### رزومه



حسن براتی در شهرستان دزفول متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک از دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه تبریز (۱۳۷۵) و دکتری مهندسی برق - قدرت از واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۶) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی ایشان در زمینه تجدیدساختار در صنعت برق، ادوات FACTS، قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت می‌باشد و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می‌باشد.



رضا ساکی در شهرستان دورود متولد شده است. ایشان تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه شهید رجایی تهران (۱۳۸۳) و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۸۸) سپری نموده است. زمینه فعالیت‌های پژوهشی ایشان ادوات FACTS، کاربرد سیستم‌های هوشمند در سیستم‌های قدرت می‌باشد. در حال حاضر عضو هیئت علمی و مدرس آموزش‌شده فنی دورود بوده و و نیز با دانشگاه‌های آزاد اسلامی واحد دورود، جامع علمی کاربردی دورود و پیام نور همکاری دارند.



سید سعیداله مرتضوی در سال ۱۳۴۳ در بهبهان متولد شده است. ایشان مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه فردوسی مشهد به ترتیب در سالهای ۱۳۶۴ و ۱۳۶۶ دریافت نموده است. او در سال ۱۳۷۸ موفق به اخذ مدرک دکترای خود از دانشگاه IIT-Delhi در رشته مهندسی برق گشت. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: قدرت سیستم‌های کنترل و شناسایی، کنترل هوشمند، محاسبات نرم و کاربردهای آن، موجک و شبکه‌های کامپیوتری. او هم‌اکنون به عنوان استادیار در دانشکده مهندسی الکترونیک دانشگاه شهید چمران اهواز مشغول تدریس است.