

افزایش میرایی نوسانات سیستم قدرت با جایابی UPFC براساس ضریب مانده و مدهای بحرانی

داود فاتح^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، علی اکبر مطیع بیرجندی^۲، استادیار، رضا ابراهیم پور^۳، استادیار
 ۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - d.fateh@srttu.edu
 ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - motiebirjandi@srttu.edu
 ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - rebrahimpour@srttu.edu

چکیده: در این تحقیق، جایابی UPFC در زمینه پایداری دینامیکی به کمک ضریب مانده و مدهای بحرانی سیستم قدرت ارائه شده است. جایابی با کمک مدهای بحرانی، تعداد UPFC مورد نیاز برای بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت را مشخص می نماید. برای کنترل UPFC از کنترل کننده تکمیلی استفاده شده است. سیگنال ورودی به این کنترل کننده بادی های برنجی مشارکت متغیرهای حالت سرعت ژنراتورها در مدهای بحرانی سیستم قدرت انتخاب شده است. تاثیر UPFC در بهبود پایداری سیستم قدرت با کمک رسم منحنی تغییرات سرعت و زاویه روتور ژنراتورها، مکان قطب های سیستم و دیاگرام بود بر روی سیستم قدرت IEEE 9-BUS شرح داده شده است.

واژه های کلیدی: پایداری دینامیکی، افزایش میرایی، جایابی UPFC، ضریب مانده، مدهای بحرانی.

Enhancement of Damping of Power System Oscillations through UPFC Placement based on Residue Factor and Critical Modes

D. Fateh¹, A. A. Motie Birjandi², R. Ebrahimpour³

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract: In this research, placement of UPFC is presented on dynamic stability by using the residue factor and critical modes of power system. The placement by using critical modes determines the requirement number of UPFC to enhance damping of power system oscillations. The supplementary controller is used to control UPFC. The input signal for this controller is selected based on the participation of the generators speed state variables in the critical modes of power system. The effectiveness of UPFC in power system stability enhancement are demonstrated on IEEE 9-BUS system by drawing the speed and angle deviations curve of generators, the system poles locations and Bode diagram.

Keywords: Dynamic stability, Enhancement of damping, Placement of UPFC, Residue factor, Critical modes.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۱۸

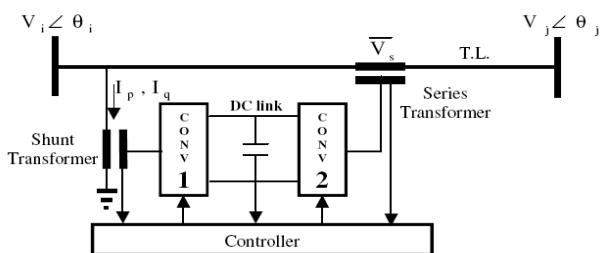
نام نویسنده مسئول: داود فاتح

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

۲- UPFC

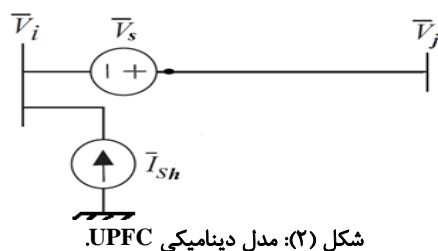
در شکل (۱) تصویری از اجزای ظاهری UPFC ارائه شده است [۲]. UPFC شامل دو مبدل بوده که با یک شاخه DC به هم وصل می‌شوند. مبدل موازی (مبدل ۱) به وسیله ترانسفورماتور موازی در شین ابتدای خط قرار می‌گیرد. مبدل سری (مبدل ۲) نیز به وسیله ترانسفورماتور سری، در ابتدای خط انتقال قرار می‌گیرد. مبدل ۲ ولتاژ V_s را در خط انتقال تزریق می‌نماید. مبدل ۱ نیز توان راکتیوی را به شین ابتدای خط تزریق یا جذب می‌نماید. این موضوع با جریان I_q نشان داده شده است. هم چنین مبدل ۱ توان حقیقی مورد نیاز مبدل ۲ را از طریق شاخه DC به وسیله جریان I_p تامین و یا جذب می‌نماید.



شکل (۱): تصویر اجزای ظاهری UPFC [۱۰].

۳- مدل دینامیکی UPFC

برای بررسی تاثیر دینامیکی UPFC، این تجهیز با یک منبع جریان متصل به شین نام با دامنه I_{sh} و زاویه θ_{sh} و نیز یک منبع ولتاژ سری با خط با دامنه V_s و زاویه θ_s مدل می‌شود. در شکل (۲) این موضوع نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل دینامیکی UPFC.

۴- روابط دینامیکی سیستم قدرت

برای بررسی عملکرد UPFC در پایداری سیگنال کوچک، نیاز است که معادلات سیستم حول نقطه کار $x = x_0$ خطی شوند. یک سیستم دینامیکی به طور کلی می‌تواند به صورت فضای حالت نشان داده شود. روابط (۱) تا (۳) بیان گر فضای حالت سیستم می‌باشند [۱۲ و ۱۳]:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

$$0 = g(x, u) \quad (2)$$

$$y = h(x, u) \quad (3)$$

کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) در بهبود پایداری سیستم قدرت، بسیار موثر است. مهم ترین نکته در استفاده از این تجهیز، بحث جایابی آن است. نویسندگان [۹-۱۱] با استفاده از معیارهای استاتیکی مانند شاخص پایداری ولتاژ، ضریب بارگذاری و روش های عددی به جایابی UPFC پرداخته اند. در زمینه پایداری دینامیکی، روش ها برای جایابی UPFC به تعداد کم و هم چنین مشترک هستند. به طوری که شاخص کنترل پذیری، شاخص رویت پذیری و ضریب مانده برای جایابی UPFC در زمینه پایداری دینامیکی استفاده می‌شوند. مدل های UPFC و سیگنال های انتخابی برای کنترل کننده آن، تفاوت در ارائه مقالات را به وجود آورده اند. برای مثال در [۱۰] جایابی UPFC براساس شاخص کنترل پذیری و انتخاب سیگنال ورودی کنترل کننده UPFC براساس شاخص رویت پذیری صورت گرفته است. در [۱۱] با کمک شاخص رویت پذیری به جایابی UPFC پرداخته شده و از بردارهای ویژه راست برای انتخاب سیگنال ورودی کنترل کننده UPFC استفاده شده است. هم چنین نویسندگان [۱۲ و ۱۳] جایابی UPFC را با کمک ضریب مانده انجام داده و با کمک روشی پیچیده شامل آنالیز کنترل پذیری و رویت پذیری و یکسری تکنیک ها، سیگنال ورودی به کنترل کننده UPFC را انتخاب نموده اند. در میان روش های جایابی UPFC، ضریب مانده روشی کامل تر است. زیرا کنترل مدهای بحرانی (مدهای با نسبت میرایی ضعیف) به وسیله UPFC و تاثیر این مدها در خروجی های سیستم در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، هر دو شاخص کنترل پذیری و رویت پذیری در نظر گرفته شده و UPFC در محلی قرار داده می‌شود که می‌تواند مدهای بحرانی را کنترل نموده و به واسطه این مدها، تاثیر موثری در نوسانات الکترومکانیکی سیستم داشته باشد.

در این تحقیق، نحوه جایابی UPFC در زمینه پایداری سیگنال کوچک براساس ضریب مانده و مدهای بحرانی سیستم ارائه شده که نحوه تشخیص تعداد UPFC مورد نیاز یک سیستم قدرت و محل بهینه آن ها را در زمینه افزایش میرایی نوسانات سیستم مشخص می‌نماید. تعداد UPFC مورد نیاز یک سیستم قدرت براساس تعداد مدهای بحرانی آن تعیین شده و با کمک ضریب مانده شاخه سری UPFC، محل بهینه آن ها تشخیص داده می‌شود. برای کنترل UPFC، کنترل کننده تکمیلی در نظر گرفته شده است. انتخاب سیگنال ورودی به این کنترل کننده، براساس ضریب مشارکت در نظر گرفته شده که برخلاف روش های ذکر شده فوق، روشی ساده و موثر در افزایش میرایی نوسانات است. تعیین پارامترهای این کنترل کننده با کمک الگوریتم بهینه سازی گروه ازدحام ذرات (PSO) صورت گرفته است. هم چنین رسم مکان قطب های سیستم، دیاگرام بود و محاسبه مقادیر حاشیه بهره و فاز برای بررسی تاثیر UPFC در بهبود پایداری، علاوه بر روش های معمول مقالات ارائه شده است.

با خطی سازی روابط (۹) تا (۱۲) حول نقطه کار، روابط (۱۳) تا (۱۶) حاصل می شود (مقدار اولیه پارامترهای UPFC صفر هستند).

$$\Delta P_i = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(-\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s \quad (13)$$

$$\Delta Q_i = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(-\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s \quad (14)$$

$$\Delta P_j = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s \quad (15)$$

$$\Delta Q_j = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s \quad (16)$$

که $|Y|$ و α نشان دهنده اندازه و زاویه ادمیتانس خط i - j است. هم چنین اندیس 0 نشان دهنده مقدار اولیه می باشد. لازم به ذکر است به دلیل صفر بودن مقادیر اولیه پارامترهای UPFC، ضرایب $\Delta \theta_s$ صفر می شوند. با اضافه کردن روابط (۱۳) تا (۱۶) به روابط توان های اکتیو و راکتیو شین های i و j رابطه (۵) به رابطه (۱۷) تغییر می یابد [۱۲]:

$$P \Delta x + Q \Delta u + H \Delta V_s = 0 \quad (17)$$

که H شامل ضرایب ΔV_s ناشی از روابط (۱۳) تا (۱۶) می باشد در صورتی که UPFC در خط i - j قرار گیرد. اگر N تعداد خطوط کاندید برای قرار گرفتن UPFC باشد، آنگاه ماتریس H ماتریسی $2(n+m) \times N$ می باشد. بنابراین هر ستون H مربوط به یکی از خطوط کاندید برای قرار گرفتن UPFC است و طبق روابط (۱۳) تا (۱۶)، تنها 2×2 ردیف از هر ستون می تواند غیر صفر باشد. پس در ابتدای کار فرض بر این است که در تمامی خطوط (بجز خطوط با ترانسفورماتور)، UPFC قرار داده شود. زیرا تاثیر آن ها در جایابی، مستقل از هم است. با قرار دادن رابطه (۱۷) در رابطه (۴) روابط (۱۸) و (۱۹) حاصل می شود [۱۲]:

$$\Delta \dot{x} = (A - BQ^{-1}P) \Delta x + (-BQ^{-1}H) \Delta V_s \quad (18)$$

$$\Delta \dot{x} = A' \Delta x + H' \Delta V_s \quad (19)$$

که با قرار دادن رابطه (۱۷) در رابطه (۶) روابط (۲۰) و (۲۱) حاصل می شود [۱۲]:

$$\Delta Y = (C - DQ^{-1}P) \Delta x + (-DQ^{-1}H) \Delta V_s \quad (20)$$

$$\Delta Y = C' \Delta x + D' \Delta V_s \quad (21)$$

بنابراین اندازه ولتاژ سری UPFC در خطوط مختلف نشان دهنده ورودی است. این بدین معنی است که در صورتی که UPFC در خط l قرار گیرد، ورودی l نشان دهنده اندازه ولتاژ تزریقی توسط UPFC در خط l می باشد. پس شاخص کنترل پذیری مد k ام به ازای ورودی l ام به صورت رابطه (۲۲) و شاخص رویت پذیری خروجی l ام برای مد k ام به صورت رابطه (۲۳) محاسبه می شوند [۱۰، ۱۲ و ۱۳]:

$$CI_{kl} = v_k^t H_l' \quad (20)$$

$$OI_{ki} = C_i' v_k \quad (21)$$

که رابطه (۱) نشان دهنده معادلات دیفرانسیلی سیستم قدرت، رابطه (۲) نشان دهنده معادلات جبری و رابطه (۳) نشان دهنده معادلات خروجی سیستم هستند. معادلات خروجی می توانند اندازه و زاویه ولتاژ شین ها باشند. با خطی سازی روابط (۱) تا (۳) حول نقطه کار، داریم:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (4)$$

$$0 = P \Delta x + Q \Delta u \quad (5)$$

$$\Delta Y = C \Delta x + D \Delta u \quad (6)$$

که Δx بردار متغیرهای حالت و Δu بردار متغیرهای جبری سیستم است. ماتریس های A, B, P, Q, C, D متناسب با معادلات دیفرانسیلی و جبری هستند. Δx و Δu به صورت روابط (۷) و (۸) در نظر گرفته شده اند.

$$\Delta x = [\Delta \delta_i, \Delta \omega_i, \Delta E'_{qi}, \Delta E'_{di}, \Delta E_{fdi}, \Delta V_{Ri}, \Delta R_{Fi}] \quad (7)$$

$$\Delta u = [\Delta I_{di}, \Delta I_{qi}, \Delta \delta_i, \Delta \theta_i, \Delta V_i, \Delta \theta_k, \Delta V_k] \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, m \quad k = m + 1, \dots, n$$

که m تعداد ژنراتورها و n تعداد شین ها می باشند. δ زاویه و ω سرعت رتور ژنراتورها هستند. E'_{d} و E'_{q} نیز ولتاژهای القا شده روی محورهای d و q می باشند. I_{d} و I_{q} مولفه های جریان استاتور روی محورهای d و q هستند. E_{fd} ولتاژ خروجی تحریک کننده است. V و θ نیز اندازه و زاویه ولتاژ شین ها هستند.

۵- ضریب مانده و معادلات UPFC برای جایابی

همان طور که گفته شد، مدل دینامیکی UPFC شامل یک منبع ولتاژ سری و یک منبع جریان موازی می باشد. این مدل شامل ۴ پارامتر اندازه و زاویه ولتاژ سری و اندازه و زاویه جریان موازی است. در [۱۰] نشان داده شده است که جایابی UPFC براساس اندازه ولتاژ سری (V_s) هست. هم چنین در [۱۲ و ۱۳] نیز برای تعیین خط UPFC، از اندازه مقدار موهومی ولتاژ سری مدل UPFC استفاده شده است. در این تحقیق برای جایابی UPFC، منبع ولتاژ سری مدل UPFC با اندازه (V_s) و زاویه (θ_s) در نظر گرفته شده است. با فرض اینکه UPFC در خط l ام و بین شین های i و j قرار گیرد، روابط (۹) و (۱۰) به توان اکتیو و راکتیو تزریقی شین l ام اضافه می شوند.

$$P_l = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_s - \theta_j - \alpha_{ij}) \quad (9)$$

$$Q_l = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_s - \theta_j - \alpha_{ij}) \quad (10)$$

هم چنین روابط (۱۱) و (۱۲) نیز به توان های اکتیو و راکتیو تزریقی شین l ام اضافه می شوند.

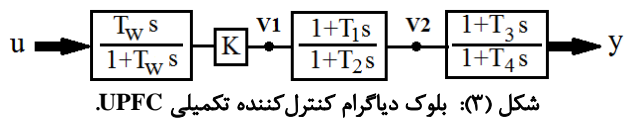
$$P_j = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_j - \theta_s - \alpha_{ij}) \quad (11)$$

$$Q_j = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_j - \theta_s - \alpha_{ij}) \quad (12)$$

که v_{ik} عنصر Δ بردار ویژه راست مد k ام و u_{ki} عنصر Δ بردار ویژه چپ مد k ام می‌باشند.

۸- کنترل کننده تکمیلی UPFC

کنترل کننده تکمیلی به منظور بهبود عملکرد UPFC استفاده می‌شود [۱۵]. شکل (۳) بلوک دیاگرام این کنترل کننده را نشان می‌دهد. برای هر کدام از پارامترهای UPFC ($V_s, \theta_s, I_{sh}, \theta_{sh}$) یک کنترل کننده تکمیلی در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده تکمیلی UPFC.

که T_W ثابت زمانی پاک‌ساز، T_1 و T_3 ثابت زمانی‌های پیش‌فاز و T_2 و T_4 ثابت زمانی‌های پس‌فاز هستند و K نیز بهره هست [۱۴، ۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق، برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده، از الگوریتم گروه ازدحام ذرات (PSO) [۱۷ و ۱۸] کمک گرفته شده است. بدین ترتیب نیازی به بررسی مدل هفرون-فیلپس نخواهد بود. تابع هدف بهینه‌سازی این پارامترها براساس افزایش نسبت میرایی مدهای بحرانی سیستم قدرت (مدهای با نسبت میرایی ضعیف) تعریف شده است.

برای افزایش نسبت میرایی نوسانات سیستم قدرت، بهترین سیگنال برای کنترل پارامترهای مدل UPFC، سیگنال سرعت ژنراتورها می‌باشد. در این تحقیق انتخاب سیگنال ورودی به کنترل کننده تکمیلی هر یک از پارامترهای UPFC براساس روشی ساده و موثر صورت گرفته است. به طوری که هر یک از سیگنال سرعت ژنراتورها که بیش‌ترین مشارکت را در مدهای بحرانی سیستم قدرت دارا است، به عنوان ورودی به این کنترل کننده انتخاب شده است. این روش بسیار ساده بوده و با اعمال سیگنال منتخب به کنترل کننده تکمیلی هر یک از پارامترهای مدل UPFC و افزایش میرایی این سیگنال، افزایش در نسبت میرایی مدهای بحرانی به وجود می‌آید.

۸-۱- معادلات دیفرانسیل یک کنترل کننده تکمیلی

روابط (۳۴) تا (۳۶) از کنترل کننده تکمیلی حاصل می‌شوند:

$$u \times \frac{T_W K s}{1 + T_W s} = V1 \quad (34)$$

$$V1 \times \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} = V2 \quad (35)$$

$$V2 \times \frac{1 + T_3 s}{1 + T_4 s} = y \quad (36)$$

که v_k نشان‌دهنده بردار ویژه راست مد k ام می‌باشد. برای جابایی UPFC نیاز است مقدار ضریب‌مانده به ازای خطوط مختلف محاسبه شده و خطی که بالاترین مقدار ضریب مانده را دارد به عنوان محل UPFC انتخاب می‌شود. حاصل ضرب دو رابطه (۲۲) و (۲۳) مقدار ضریب مانده برای خط k ام را می‌دهد [۱۲ و ۱۴]:

$$|R_{kil}| = OI_{ki} * CI_{kl} \quad (24)$$

R_{kil} ضریب مانده مد k ام بوده و معیاری از حساسیت مد به فیدبک بین خروجی y و ورودی u می‌باشد. نکته مهم در جابایی UPFC این است که با بروز خطا در سیستم قدرت، نقطه کار سیستم تغییر خواهد کرد و ممکن است جابایی UPFC تغییر نماید. به همین دلیل، در این تحقیق حالات مختلف خطا که می‌توانند در جابایی UPFC موثر باشند، در نظر گرفته شده و محل نهایی UPFC با بررسی حالات مختلف صورت گرفته است.

۶- روابط کامل توان تزریقی UPFC

برای شبیه‌سازی لازم است مدل کامل UPFC که شامل منبع ولتاژ و منبع جریان می‌باشد، در نظر گرفته شود. اگر UPFC در شین i و ابتدای خط i - j قرار گیرد، روابط (۲۵) تا (۲۸) به معادلات توان شین‌های i و j اضافه می‌شوند:

$$P_i = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_s - \theta_j - \alpha_{ij}) - V_i \cdot I_{sh} \cdot \cos(\theta_i - \theta_{sh}) \quad (25)$$

$$Q_i = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_s - \theta_j - \alpha_{ij}) - V_i \cdot I_{sh} \cdot \sin(\theta_i - \theta_{sh}) \quad (26)$$

$$P_j = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_j - \theta_s - \alpha_{ij}) \quad (27)$$

$$Q_j = V_s \cdot V_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_j - \theta_s - \alpha_{ij}) \quad (28)$$

با خطی‌سازی روابط (۲۵) تا (۲۸) حول نقطه کار و با فرض اینکه مقدار اولیه تمامی پارامترهای UPFC صفر هستند، روابط (۲۹) تا (۳۲) حاصل می‌شوند.

$$\Delta P_i = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(-\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s - V_{i0} \cdot \cos(\theta_{i0}) \cdot \Delta I_{sh} \quad (29)$$

$$\Delta Q_i = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(-\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s - V_{i0} \cdot \sin(\theta_{i0}) \cdot \Delta I_{sh} \quad (30)$$

$$\Delta P_j = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s \quad (31)$$

$$\Delta Q_j = V_{j0} \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{j0} - \alpha_{ij}) \Delta V_s \quad (32)$$

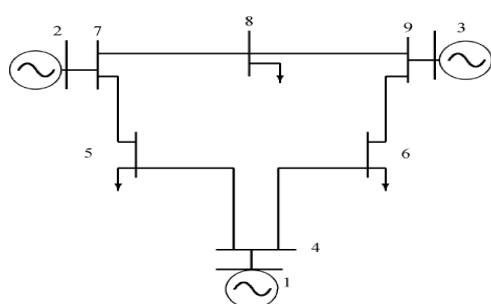
۷- ضریب مشارکت

این ضریب نشان‌دهنده سنجشی از مشارکت نسبی متغیر حالت Δ ام در مد k ام است که در رابطه (۳۳) تعریف شده است [۱۴].

$$P_{ik} = v_{ik} \cdot M_{ki} \quad (33)$$

جدول (۱): مقادیر ویژه با میرایی کم سیستم IEEE 9-BUS

مقادیر ویژه	نسبت میرایی	فرکانس (Hz)
-0.72±j12.74	0.056	2.02
-0.19±j8.36	0.022	1.33
-5.48±j7.94	0.56	1.26
-5.32±j7.92	0.55	1.26
-5.22±j7.81	0.55	1.24
-0.44±j1.21	0.34	0.19
-0.43±j0.73	0.51	0.11
-0.42±j0.49	0.65	0.07



شکل (۴): سیستم IEEE 9-BUS

جدول (۲) میزان مشارکت متغیرهای حالت سرعت ژنراتورها در دو مد با نسبت میرایی ضعیف فوق‌الذکر را نشان می‌دهد. سیگنال تغییرات سرعت ژنراتور ۳ بیش‌ترین مشارکت را در مدهای نوسانی دارا است و برای ورودی کنترل‌کننده تکمیلی انتخاب می‌شود. برای بحرانی‌ترین مد سیستم مذکور، مقادیر ضریب‌مانده به ازای کلیه خطوط (بجز خطوط با ترانسفورماتور) و تحت ۷ حالت عملکردی مختلف محاسبه شده و در جدول (۳) آورده شده است. نکته قابل توجه این است که یک خط مانند خط $i-z$ می‌تواند در دو حالت کاندیدای قرار گرفتن UPFC باشد. به طوری که UPFC می‌تواند در ابتدای خط $i-z$ و یا در ابتدای خط $i-1$ قرار گیرد. در برخی از نوشته‌ها ابتدا خط تعیین شده و سپس شین مربوط به UPFC تعیین می‌شود. اما در این تحقیق نشان داده شده است که یک خط در دو حالت خود، مقدار ضریب‌مانده نزدیک به همی را دارد. طبق جدول (۳) خط ۷-۸ در اکثر موارد، بیش‌ترین مقدار ضریب‌مانده را دارد و بهترین محل برای قرار گرفتن UPFC می‌باشد.

جدول (۴) نیز برای دومین مد با نسبت میرایی کم محاسبه شده و نشان‌دهنده این است که این بار نیز خط ۷-۸ بهترین محل برای قرار گرفتن UPFC است. بنابراین در سیستم IEEE 9-BUS، دو مد با نسبت میرایی ضعیف وجود دارد که نیاز به جایابی دو UPFC است. اما نتایج جایابی برای این دو UPFC براساس هر یک از مدهای بحرانی نشان می‌دهد که محل بهینه هر دو، یک خط بوده و برای این سیستم تنها یک UPFC کافی است. صحت این نتیجه در ادامه و به خصوص در جدول (۵) بررسی شده است. پس UPFC در شین ۸ و در ابتدای

با ساده‌سازی روابط (۳۴) تا (۳۶) و تبدیل لاپلاس معکوس آن‌ها، روابط دیفرانسیلی (۳۷) تا (۳۹) حاصل می‌شوند.

$$\dot{V}1 = K\dot{u} - \frac{1}{T_W}V1 \quad (37)$$

$$\dot{V}2 = \frac{T_1}{T_2}\dot{V}1 + \frac{1}{T_2}V1 - \frac{1}{T_2}V2 \quad (38)$$

$$\dot{y} = \frac{T_3}{T_4}\dot{V}2 + \frac{1}{T_4}V2 - \frac{1}{T_4}y \quad (39)$$

در نهایت روابط (۴۰) تا (۴۲) به ازای هر پارامتر یک UPFC به معادلات حالت سیستم اضافه می‌شوند.

$$\dot{V}1 = K\dot{u} - \frac{1}{T_W}V1 \quad (40)$$

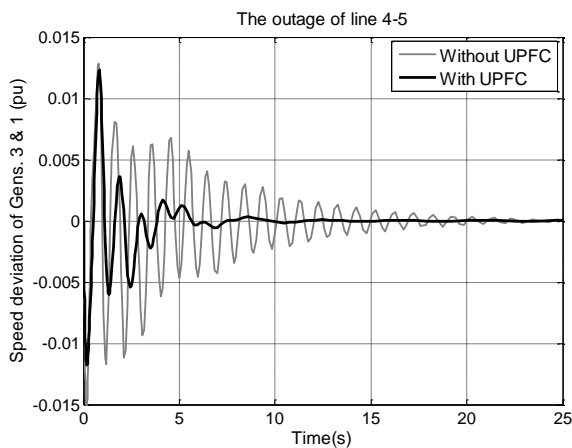
$$\dot{V}2 = K\frac{T_1}{T_2}\dot{u} + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2T_W}\right)V1 - \frac{1}{T_2}V2 \quad (41)$$

$$\dot{y} = K\frac{T_1T_3}{T_2T_4}\dot{u} + \frac{T_3}{T_4}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2T_W}\right)V1 + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_2T_4}\right)V2 - \frac{1}{T_4}y \quad (42)$$

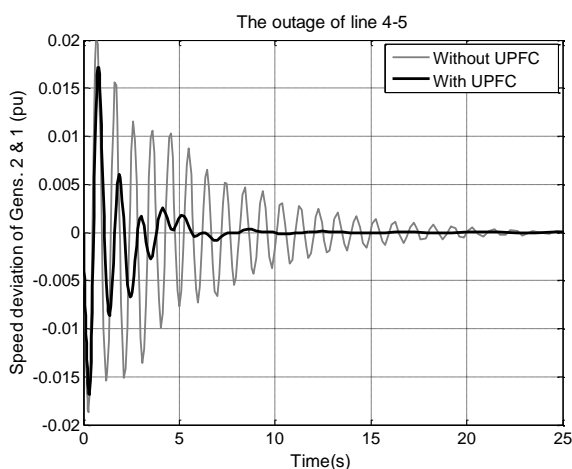
متغیر حالت (u) سرعت ژنراتوری است که بیش‌ترین مشارکت را در مدهای بحرانی دارا است. متغیر حالت (y) نیز به هر یک از پارامترهای UPFC اختصاص داده می‌شود. یک UPFC دارای چهار پارامتر اندازه و زاویه منبع ولتاژ و جریان بوده و برای هر یک یک کنترل‌کننده تکمیلی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای کنترل‌کننده تکمیلی با هدف افزایش کم‌ترین نسبت میرایی، بهینه‌سازی شده‌اند.

۹- نتایج

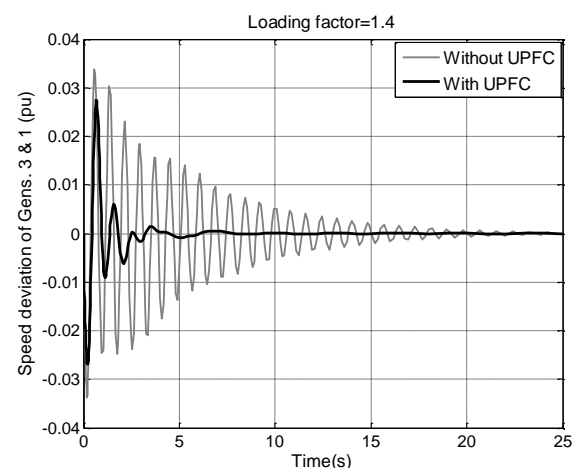
برای پیاده‌سازی روش ارائه‌شده و شبیه‌سازی، از سیستم IEEE 9-BUS استفاده شده است. محیط مورد استفاده برای شبیه‌سازی، نرم‌افزار MATLAB است. در شکل (۴) دیگرام تک خطی سیستم IEEE 9-BUS و در [۱۶] اطلاعات این سیستم ارائه شده است. با بررسی دینامیکی این سیستم در زمینه پایداری سیگنال کوچک، مدهای نوسانی این سیستم به صورت جدول (۱) حاصل شده است. این سیستم دارای دو مد با نسبت میرایی ضعیف بوده که بحرانی‌ترین مد [۱۲ و ۱۹]، دارای نسبت میرایی ۰/۰۲۲ می‌باشد. مد با نسبت میرایی ۰/۰۵۶ نیز دارای نسبت میرایی ضعیفی است. در این تحقیق جایابی UPFC به ازای بحرانی‌ترین مد انجام شده است. اما به دلیل اینکه مد با نسبت میرایی ۰/۰۵۶ نیز دارای میرایی ضعیفی است، جایابی UPFC بر اساس این مد نیز بررسی شده است.



شکل (۵): سرعت ژنراتور ۳ در حالت خروج خط ۴-۵.



شکل (۶): سرعت ژنراتور ۲ در حالت خروج خط ۴-۵.



شکل (۷): سرعت ژنراتور ۳ در حالت ضریب بارگذاری ۱/۴.

خط ۷-۸ قرار می‌گیرد و معادلات (۳۸) تا (۴۱) مربوط به توان‌های UPFC به معادلات شین‌های ۸ و ۷ اضافه می‌شوند.

جدول (۲): ضرایب مشارکت سرعت ژنراتورهای سیستم IEEE 9-BUS.

متغیر حالت	مد با میرایی ۰.۰۲۲	مد با میرایی ۰.۰۵۶	میانگین
ω_2	0.3189	0.0927	0.2058
ω_3	0.0508	0.4142	0.2325

۱۰- نتایج شبیه‌سازی

برای سیستم IEEE 9-BUS، ابتدا با فرض خروج خط ۴-۵ متحنی تغییرات سرعت ژنراتورها رسم شده است. در شکل (۵) دیده می‌شود که در صورت خروج خط ۴-۵، تغییرات سرعت ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور مرجع با دامنه ابتدایی ۰/۰۱۵ پریونیت نوسان کرده و بعد از مدت حدود ۲۲ ثانیه میرا می‌شود. با قرار گرفتن UPFC در خط ۷-۸، دامنه نوسانات کاهش یافته و هم‌چنین میرایی نوسانات افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. به طوری که نوسانات تغییرات سرعت ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور مرجع بعد از چند سیکل میرا می‌شود. این میرایی در مدت زمان حدود ۱۲ ثانیه رخ می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که فرکانس نوسانات نیز کاهش یافته است. تاثیر UPFC برای تغییرات سرعت ژنراتور ۲ نیز در شکل (۶) نمایش داده شده است. شکل‌های (۷) و (۸) نیز برای زمانی است که سیستم با ضریب بارگذاری ۱/۴ در حال عملکرد می‌باشد. در این دو شکل نیز تاثیر UPFC در کاهش دامنه نوسانات و افزایش میرایی چشمگیر است. هم‌چنین کاهش فرکانس نوسانات نیز مشهود است. همان‌طور که گفته شد، سیستم قدرت IEEE 9-BUS دارای دو مد با میرایی ضعیف است که نتایج جایابی نشان داد که تنها یک UPFC برای این دو مد بحرانی نیاز است. جدول (۵) نیز تاییدی بر مطالب فوق است. طبق این جدول، UPFC و کنترل‌کننده آن، نسبت میرایی دو مد بحرانی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده که تاییدی بر انتخاب مناسب محل UPFC است. هم‌چنین کاهش فرکانس نوسانات نیز به خوبی مشهود است.

جدول (۳): ضریب مانده خطوط در حالات مختلف خطا برای بحرانی‌ترین مد (با نسبت میرایی ۰/۰۲۲) سیستم IEEE 9-BUS

خط	سیستم بدون خطا	خروج خط ۴-۵	خروج خط ۴-۶	خروج خط ۵-۷	خروج خط ۶-۹	خروج خط ۷-۸	خروج خط ۸-۹
۴-۵	۰/۲۴۹۱	-	۰/۶۷۸۱	۰/۴۶۸۲	۰/۶۵۰۶	۰/۹۵۸۴	۰/۰۴۳۸
۵-۴	۰/۲۵۶۷	-	۰/۶۹۸	۰/۴۹۷	۰/۶۷۵۵	۱	۰/۰۴۵۳
۴-۶	۰/۱۱۲۳	۰/۸۱۰۱	-	۰/۵۷۹۵	۰/۴۵۸۹	۰/۵۹۹۷	۰/۰۵۶۹
۶-۴	۰/۱۱۳۶	۰/۸۲۴۸	-	۰/۵۹۱۹	۰/۴۷۸۴	۰/۶۰۹۷	۰/۰۵۷۷
۵-۷	۰/۲۷۸	۱	۰/۲۸۵۳	-	۰/۵۱۷۶	۰/۷۸۴۵	۰/۱۸۷۹
۷-۵	۰/۲۶۹۹	۰/۸۴۹۲	۰/۲۷۸۸	-	۰/۴۹۳۲	۰/۷۴۹۴	۰/۱۸۴۱
۶-۹	۰/۱۲۲۹	۰/۵۲۲۴	۱	۰/۴۴۵۵	-	۰/۲۸۰۳	۰/۰۳۳۲
۹-۶	۰/۱۲۰۵	۰/۵۳۰۳	۰/۹۲۶۳	۰/۴۲۶۲	-	۰/۲۷۶۶	۰/۰۳۳۴
۷-۸	۰/۹۹۰۴	۰/۹۳۰۸	۰/۳۸۱۴	۰/۹۸۶۲	۰/۹۸۹۹	-	۰/۹۶۸۶
۸-۷	۱	۰/۹۲۹۲	۰/۳۸۷۵	۱	۱	-	۱
۸-۹	۰/۶۰۸۲	۰/۶۷۷۹	۰/۳۸۹۱	۰/۷۷۱۸	۰/۵۸۸۹	۰/۴۲۴۲	-
۹-۸	۰/۵۹۸۵	۰/۶۵۴۸	۰/۳۸۵۱	۰/۷۵۸۲	۰/۵۷۸۵	۰/۴۰۶	-

جدول (۴): ضریب مانده خطوط در حالات مختلف خطا برای مد بحرانی دوم (با نسبت میرایی ۰/۰۵۶) سیستم IEEE 9-BUS

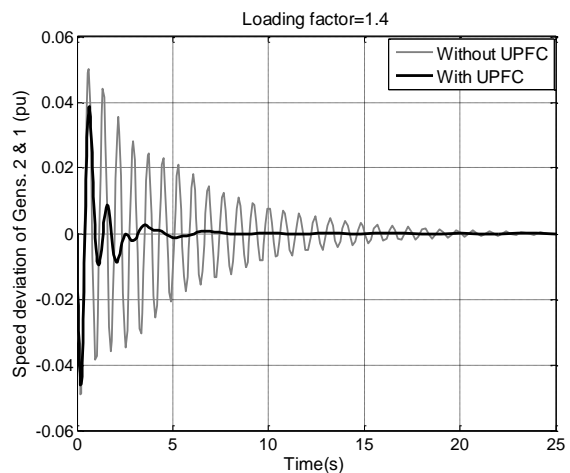
خط	سیستم بدون خطا	خروج خط ۴-۵	خروج خط ۴-۶	خروج خط ۵-۷	خروج خط ۶-۹	خروج خط ۷-۸	خروج خط ۸-۹
۴-۵	۰/۶۲۶	-	۰/۳۵۶	۰/۱۳۴۹	۰/۲۰۱	۸۲۹۳	۰/۰۷۵۸
۵-۴	۰/۶۴۵	-	۰/۳۶۶۴	۰/۱۴۳۲	۰/۲۰۸۷	۰/۸۷۵۸	۰/۰۷۸۳
۴-۶	۰/۶۱۷۵	۰/۹۵۴۸	-	۰/۱۴۹	۰/۱۳۷	۰/۹۸۳۷	۰/۳۱۶۵
۶-۴	۰/۶۲۵۵	۰/۹۷۲۱	-	۰/۱۵۲۱	۰/۱۴۲۸	۱	۰/۳۲۰۹
۵-۷	۰/۴۸۳۷	۰/۷۳۲۸	۰/۳۱۵۴	-	۰/۱۶۸۵	۰/۴۶۶	۰/۳۷۰۷
۷-۵	۰/۴۶۹۵	۰/۶۲۲۳	۰/۳۰۸۱	-	۰/۱۶۰۵	۰/۴۴۵۱	۰/۳۶۳۳
۶-۹	۰/۳۶۷۷	۰/۵۷۶۶	۰/۵۸۶۱	۰/۱۳۹۱	-	۰/۶۲۲۷	۰/۶۱۱۳
۹-۶	۰/۳۶۰۷	۰/۵۷۴۳	۰/۵۴۳	۰/۱۳۳۱	-	۰/۶۱۴۶	۰/۵۹۶۴
۷-۸	۰/۹۹۰۴	۱	۰/۹۸۴۳	۰/۹۸۴۲	۰/۱۲	-	۰/۹۶۸۶
۸-۷	۱	۰/۹۹۸۲	۱	۱	۰/۱۲۱۲	-	۱
۸-۹	۰/۴۴۵۹	۰/۵۱۶۴	۰/۶۷۵۲	۰/۴۸۰۶	۱	۰/۶۰۳۵	-
۹-۸	۰/۴۳۸۸	۰/۴۹۸۸	۰/۶۶۸۳	۰/۴۷۲۲	۰/۹۸۲۴	۰/۵۷۷۶	-

جدول (۵): تاثیر UPFC در فرکانس و نسبت میرایی مدهای با نسبت میرایی

ضعیف سیستم IEEE 9-BUS

بدون UPFC			با UPFC		
مد	میرایی	فرکانس	مد	میرایی	فرکانس
-0.72 ± 12.74i	0.056	2.028	-1.52 ± 11.42i	0.1324	1.818
-0.19 ± 8.36i	0.022	1.331	-0.98 ± 7.38i	0.1321	1.174

برای بررسی بیش‌تر تاثیر UPFC در افزایش پایداری سیستم قدرت، مکان قطب‌های سیستم IEEE 9-BUS نیز ترسیم شده است. شکل (۹) نمایشی از قطب‌های این سیستم در حالت عادی (بدون خطا) برای دو حالت با و بدون UPFC است. همان‌طور که گفته شد، سرعت ژنراتور ۳ برای ورودی کنترل‌کننده تکمیلی UPFC استفاده شده است. در شکل (۹) دیده می‌شود، UPFC توانسته قطب‌های مربوط به سرعت و زاویه ژنراتورهای ۲ و ۳ را به سمت چپ منحنی



شکل (۸): سرعت ژنراتور ۲ در حالت ضریب بارگذاری ۰/۱۴

۱۱- نتیجه

در این تحقیق نحوه جایابی UPFC در زمینه پایداری دینامیکی سیستم قدرت با کمک ضریب مانده و مدهای بحرانی سیستم ارائه شد. جایابی به کمک ضریب مانده، روشی کامل بوده که در آن، هر دو موضوع کنترل مدهای بحرانی به وسیله UPFC و تاثیر UPFC در نوسانات الکترومکانیکی در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین با ایده جدید استفاده از مدهای بحرانی، تعداد UPFC مورد نیاز یک سیستم قدرت تعیین شد. مدل سازی UPFC با یک منبع ولتاژ و یک منبع جریان در نظر گرفته شد که کنترل هر یک از پارامترهای این مدل به کمک کنترل کننده تکمیلی صورت گرفته است. هم‌چنین انتخاب سیگنال ورودی برای این کنترل کننده براساس میزان مشارکت متغیر حالت سرعت ژنراتورها در مدهای با نسبت میرایی ضعیف سیستم صورت گرفت که روشی ساده، موثر و جدید به منظور افزایش میرایی نوسانات هست. به‌کارگیری روش هوش مصنوعی گروه ازدحام ذرات (PSO) به عنوان الگوریتمی در بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده تکمیلی، ایده و کاربردی جدید است که با هدف افزایش نسبت میرایی مدهای بحرانی به کار گرفته شده است. از این ایده می‌توان برای بهینه‌سازی پارامترهای سایر کنترل کننده‌ها و به خصوص برای پایداری سیستم قدرت (PSS) استفاده نمود.

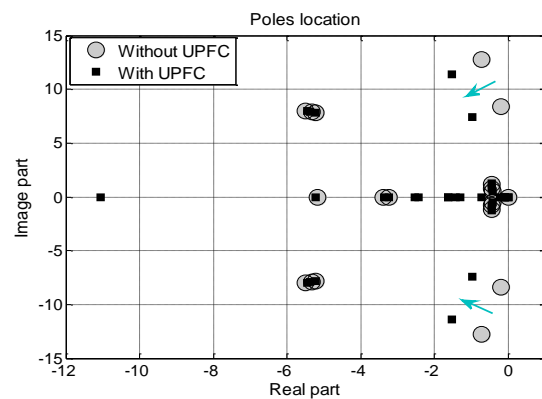
از سیستم IEEE 9-BUS برای بررسی روش‌های پیشنهادی استفاده شد. این سیستم دارای دو مد با نسبت میرایی ضعیفی است. جایابی UPFC به ازای هر یک از مدهای بحرانی صورت گرفت که نتایج نشان داد خط ۷-۸ بهترین محل برای هر دو مد بحرانی است. هم‌چنین براساس نتایج شبیه‌سازی، UPFC می‌تواند میرایی نوسانات ناشی از اغتشاش در سیستم IEEE 9-BUS را افزایش داده و دامنه این نوسانات را نیز به خوبی کاهش دهد. و نیز استفاده از UPFC و کنترل کننده آن، فرکانس نوسانات این سیستم را کاهش می‌دهد. با بررسی مکان قطب‌های سیستم IEEE 9-BUS، دیده می‌شود که UPFC قطب‌های مربوط به زاویه و سرعت ژنراتورهای این سیستم را پایدارتر نموده و به واسطه استفاده از کنترل کننده تکمیلی UPFC، تعدادی قطب پایدار و دارای مقدار حقیقی منفی به قطب‌های سیستم افزوده شده که به پایداری هرچه بیشتر سیستم کمک می‌نماید.

مراجع

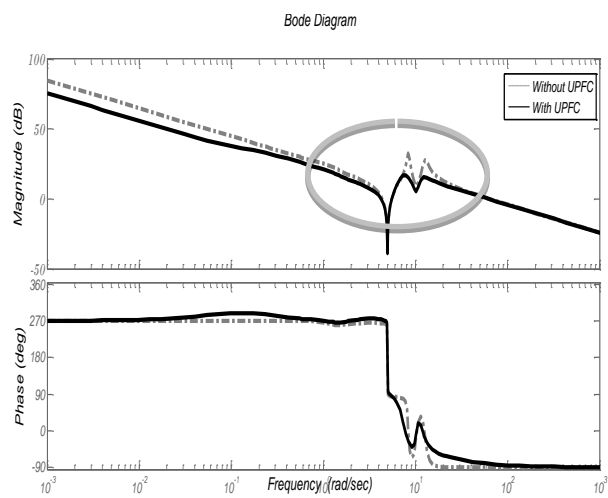
- [1] R. W. Chang, T. Kuo and T. K. Saha, "Mixed-integer method for optimal UPFC placement based on line flow-based equations," IEEE Universities Power Engineering Conference, pp. 1-6, 2010.
- [2] S. R. Donapati and M. K. Verma, "An approach for optimal placement of upfc to enhance voltage stability margin under contingencies," Fifteenth National power systems conference (NPSC), IIT Bombay, pp. 541-546, December 2008.

انتقال داده و مقداری از قسمت موهومی آن‌ها را نیز بکاهد. این بدان معنی است که UPFC پایداری سیستم را افزایش داده و هم‌چنین میرایی نوسانات روتور ژنراتورها نیز افزایش پیدا کرده است. ضمن آنکه قطب‌های پایدار و بدون مقدار موهومی به قطب‌های سیستم اضافه شده که باعث پایداری بیشتر سیستم می‌شود. این قطب‌ها به واسطه استفاده از UPFC و کنترل کننده تکمیلی آن ایجاد شده‌اند.

شکل (۱۰) نمایشی از دیاگرام بود سیستم در دو حالت با و بدون UPFC است. محل نشان داده شده در این شکل، وجود قطب‌های نوسانی را نمایش می‌دهد. نقاط برآمده، نشان دهنده قطب‌های با نسبت میرایی کم سیستم (مدهای بحرانی) بوده که به وسیله UPFC این نقاط برآمده ضعیف‌تر شده‌اند. بنابراین مقدار نسبت میرایی این قطب‌ها افزایش یافته است. هم‌چنین مقادیر حد بهره و فاز برای این سیستم محاسبه شده است. برای حالت بدون UPFC، مقدار حد بهره برابر با ۳۸db و مقدار حاشیه فاز برابر با ۸۴/۳ درجه بوده، که با UPFC مقدار حد بهره برابر با ۳۸/۸db و حاشیه فاز برابر با ۹۳/۷ درجه می‌شود و این نشان از بهبود پایداری سیستم قدرت با کمک UPFC است.



شکل (۹): نمایش قطب‌های سیستم IEEE 9-BUS در حالت عادی.



شکل (۱۰): مقایسه نمودار بود سیستم IEEE 9-BUS با و بدون UPFC.

- [۳] مطیع بیرجندی، فاتح، «افزایش حاشیه پایداری ولتاژ سیستم قدرت با جایابی UPFC به کمک ضریب بارگذاری»، اولین همایش ملی مهندسی برق ایران (INCEE)، ص ۸-۱، ۱۳۹۲.
- [4] T. Nireekshana, G. K. Rao and S. S. N. Raju, "Incorporation of unified power flow controller model for optimal placement using particle swarm optimization technique," IEEE Electronics Computer Technology, pp. 209-214, 2011.
- [5] H. I. Shaheen, G. I. Rashed and S. J. Cheng, "Optimal location and parameter setting of upfc for enhancing power system security based on differential evolution algorithm," Electrical Power and Energy Systems, pp. 94-105, 2011.
- [6] S. A. Taher, M. K. Amooshahi, "Optimal placement of UPFC in power systems using immune algorithm," Simulation Modeling Particle and Theory, pp. 1399-1412, 2011.
- [7] J. G. Singh and S. C. Srivastava, "Enhancement of power system security through optimal placement of TCSC and UPFC," IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, 2007.
- [8] H. I. Sheen, G. I. Rashed and S. J. Cheng, "Application and comparison of computational intelligence technies for optimal location and parameter setting of UPFC," Engineering Applications of Artificial Intelligence, pp. 203-216, 2010.
- [9] S. Gerbex and R. Cherkaoui, "Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms," IEEE Trans. on Power System, pp. 70-73, 2001.
- [۱۰] صالحی، مطیع بیرجندی، «جایابی UPFC جهت میراکردن نوسانات سیستم قدرت»، بیستیمین و پنجمین کنفرانس بین المللی برق (PSC)، ص ۹-۱، ۲۰۱۰.
- [11] M. Zarghami and M. L. Crow, "optimal placement and signal selection for wide-area controlled UPFCs for damping power system oscillations," IEEE Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-6, 2009.
- [12] N. Magaji and M. W. Mustafa, "Optimal location and signal selection of UPFC device for damping oscillation," ELSEVIER Electrical Power and Energy Systems, pp. 1031-1042, 2011.
- [13] N. Magaji, M.W. Mustafa and Z.B. Muda, "determination of best location of UPFC device for damping oscillation," European Journal of Scientific Research, pp. 203-211, 2010.
- [14] Kundur, *Power System Stability and Control*, 1994.
- [15] Y. Yuan, L. Cheng, Y. Sun and G. Li, "Placement of SVCs and selection of stabilizing signals based on observability and controllability," IEEE International Conference on Power and Energy, pp. 1-7, 2008.
- [16] M. A. Pai and P. W. Sauer, *Power System Dynamics and Stability*, 1998.
- [17] R. C. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in Proc. 6th Int. Symp. Micromachine Human Sci., Nagoya, Japan, pp. 39-43, 1995.
- [18] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," in Proceedings, IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.
- [19] F. Albuyeh, A. Bose and B. Heath, "reactive power considerations in automatic contingency selection," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, pp. 107-112, 1982.