

طراحی کنترل کننده‌های UPFC برای کنترل همزمان توان و ولتاژ با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سید عباس طاهر^۱ رضا همتی^۲ علی عبدالعلی پور^۳

۱- استادیار گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

sataher@kashanu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

reza.hematti@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

aliabdolalipour@gmail.com

چکیده: در این مقاله به طراحی کنترل کننده‌های داخلی UPFC شامل کنترل کننده توان عبوری از خط، کنترل کننده ولتاژ DC و کنترل کننده ولتاژ پایانه ماشین سنکرون پرداخته شده است. بر اساس مدل خطی به شکل فضای حالت برای سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت کنترل کننده‌های مذکور با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای این سیستم بهینه‌سازی شده‌اند. با توجه به اینکه سیستم اصلی ناپایدار می‌باشد لذا قبل از طراحی کنترل کننده، باید سیستم پایدار شود. در نتیجه برای پایداری سیستم ابتدا کنترل کننده میراساز بر اساس روش جبران‌سازی پیش فاز طراحی شده است. بعد از پایداری سیستم، بهینه‌سازی کنترل کننده‌های داخلی UPFC با روش الگوریتم ژنتیک انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: کنترل توان، کنترل ولتاژ، UPFC، الگوریتم ژنتیک.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۶/۳/۲۷

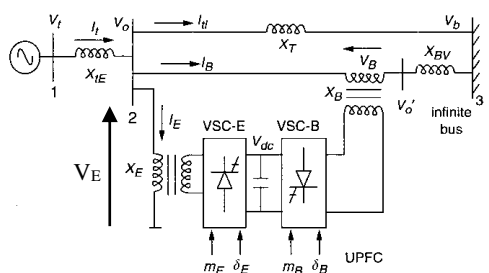
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید عباس طاهر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کاشان - کیلومتر ۶ جاده راوند - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

دو خط موازی نصب شده است. این ساختار امکان کنترل توان اکتیو و راکتیو را از طریق یکی از خطوط می‌دهد. مدل سیستم تحریک ژنراتور بصورت STIA - IEEE در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): سیستم قدرت تک ماشینه به‌همراه UPFC [۸]

UPFC شامل یک ترانس تحریک (ET)، یک ترانس تقویت‌کننده (BT)، یک مبدل و یک رابط DC می‌باشد. در شکل (۱) کمیتهای m_E و m_B دامنه نرخ مدلاسیون و δ_E و δ_B زاویه فاز سیگنال کنترل هر مبدل منبع ولتاژ (VSC) هستند که سیگنالهای ورودی UPFC می‌باشند.

۳- مدل دینامیکی سیستم با UPFC

۳-۱- مدل غیر خطی سیستم

با حذف مقاومت همه اجزا (شامل ترانسفورماتورها، خط انتقال و ژنراتور) و همچنین صرفنظر از حالت‌های گذرای خط انتقال و ترانسفورماتورها، مدل غیر خطی سیستم با UPFC به صورت رابطه (۱) خواهد بود [۸]:

$$\dot{\omega} = \frac{(P_m - P_e - D\omega)}{M} \quad (1)$$

$$\dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \quad (2)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{(-E_q + E_{fd})}{T'_{do}} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{-E_{fd} + K_a(V_{ref} - V_t)}{T_a} \quad (4)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{3m_E}{4C_{dc}} (\sin(\delta_E)I_{Ed} + \cos(\delta_E)I_{Eq}) + \quad (5)$$

$$\frac{3m_B}{4C_{dc}} (\sin(\delta_B)I_{Bd} + \cos(\delta_B)I_{Bq})$$

که در آن:

در یک سیستم قدرت، توان عبوری از خطوط با پایداری گذرا، پایداری ولتاژ و پایداری سیگنال کوچک محدود می‌شود و در نتیجه نمی‌توان از خطوط موجود ماکزیمم استفاده را نمود. که این امر از لحاظ اقتصادی مطلوب نبوده و همچنین در مواقع اضطراری قابلیت مانور بر روی شبکه موجود نمی‌باشد. ادوات FACTS کنترل‌کننده‌هایی هستند که با قابلیت تغییر توان عبوری از خط و همچنین افزایش پایداری شبکه و بهبود پروفیل ولتاژ، محدودیت‌های انتقال توان را برطرف نموده و به ما امکان استفاده بهینه از شبکه موجود را می‌دهد [۱]. در میان ادوات FACTS، UPFC جامع‌ترین و کامل‌ترین کنترل‌کننده بوده و بیشترین کارایی را دارد. UPFC پارامترهای موثر بر پخش بار مانند امپدانس خط، دامنه ولتاژ و زاویه ولتاژ را کنترل کرده و به این ترتیب توان عبوری از خط را تغییر می‌دهد. UPFC با وظیفه اولیه کنترل توان عبوری از خط گسترش یافته و می‌تواند برای بهبود پایداری گذرا، کنترل ولتاژ و میرایی نوسانات سیستم نیز بکار رود [۲-۴]. اخیراً مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی UPFC [۵-۷]، طراحی کنترل‌کننده میرا ساز برای UPFC [۸]، استفاده از آن در پخش بار [۹] و بهبود پایداری گذرا انجام گرفته است [۱۰]. در [۸] طراحی کنترل‌کننده‌های UPFC برای کنترل ولتاژ DC و کنترل توان عبوری از خط به روش تکرار نیوتن انجام گرفته است. در [۱۱] نیز طراحی کنترل‌کننده‌های UPFC به روش فازی انجام گرفته است. در این مقاله از UPFC علاوه بر کنترل توان عبوری از خط برای کنترل ولتاژ پایانه نیز استفاده شده است تا حداکثر استفاده مفید از UPFC به عمل آید. بنابراین در اینجا هدف طراحی کنترل‌کننده‌های ولتاژ پایانه، توان و کنترل‌کننده ولتاژ DC با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

سیستم تحت مطالعه بصورت یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با وجود UPFC برای انجام مطالعات در نظر گرفته شده است. ابتدا مدل خطی سیستم مذکور در فرم فضای حالت ارائه می‌شود و سپس کنترل‌کننده‌های مناسب برای سیستم فوق طراحی می‌گردند. چون سیستم اصلی دارای مقادیر ویژه مثبت است لذا ناپایدار می‌باشد. بنابراین ابتدا با طراحی یک کنترل‌کننده میراساز بر اساس روش جبران‌سازی پیش فاز، سیستم را پایدار نموده و سپس برای سیستم پایدار، کنترل‌کننده‌های مناسب توسط روش الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شوند. معمولاً کنترل‌کننده‌های داخلی UPFC را کنترل‌کننده PI در نظر گرفته و پارامترهای آن را با روشهای متفاوت بدست می‌آورند که در این مقاله از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده استفاده شده است.

۲- سیستم تحت مطالعه

سیستم تحت مطالعه یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است [۱]. UPFC در یکی از



$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} - \frac{K_A}{T_A} \Delta V_t \quad (10)$$

$$\Delta \dot{V}_{dc} = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E'_q - K_9 \Delta V_{dc} + K_{ce} \Delta m_E + K_{c\delta e} \Delta \delta_E + K_{cb} \Delta m_B + K_{c\delta b} \Delta \delta_B \quad (11)$$

که در آن :

$$\Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{pd} \Delta V_{dc} + K_{pe} \Delta m_E + K_{p\delta e} \Delta \delta_E + K_{pb} \Delta m_B + K_{p\delta b} \Delta \delta_B$$

$$\Delta E'_q = K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q + K_{qd} \Delta V_{dc} + K_{qe} \Delta m_E + K_{q\delta e} \Delta \delta_E + K_{qb} \Delta m_B + K_{q\delta b} \Delta \delta_B$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{vd} \Delta V_{dc} + K_{ve} \Delta m_E + K_{v\delta e} \Delta \delta_E + K_{vb} \Delta m_B + K_{v\delta b} \Delta \delta_B$$

با جایگذاری معادلات فوق در معادله خطی سیستم قدرت می‌توان معادلات کامل حالت سیستم را به صورت رابطه (۱۲) نوشت.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_{pd}}{M} \\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_{qd}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & \frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vd}}{T_A} \\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{pe}}{M} & -\frac{K_{p\delta e}}{M} & -\frac{K_{pb}}{M} & -\frac{K_{p\delta b}}{M} \\ \frac{K_{qe}}{T'_{do}} & \frac{K_{q\delta e}}{T'_{do}} & \frac{K_{qb}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\delta b}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_{ve}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\delta e}}{T_A} & -\frac{K_A K_{vb}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\delta b}}{T_A} \\ K_{ce} & K_{c\delta e} & K_{cb} & K_{c\delta b} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta m_E \\ \Delta \delta_E \\ \Delta m_B \\ \Delta \delta_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

سیگنالهای $\Delta m_E, \Delta m_B, \Delta \delta_E, \Delta \delta_B$ ، سیگنالهای کنترلی خطی شده UPFC می‌باشند. مدل دینامیکی خطی شده فوق می‌تواند توسط شکل (۲) نمایش داده شود که در این شکل فقط یک سیگنال کنترل ورودی با u مشخص شده است که می‌تواند هر یک از چهار سیگنال کنترل باشد. در شکل (۲)، پارامتر u یک بردار ستونی بوده و به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$u = [\Delta m_E \quad \Delta \delta_E \quad \Delta m_B \quad \Delta \delta_B]^T \quad (13)$$

که مقادیر $K_{pu}, K_{qu}, K_{vu}, K_{cu}$ و نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$K_{pu} = [K_{pe} \quad K_{p\delta e} \quad K_{pb} \quad K_{p\delta b}]$$

$$K_{qu} = [K_{qe} \quad K_{q\delta e} \quad K_{qb} \quad K_{q\delta b}]$$

$$K_{vu} = [K_{ve} \quad K_{v\delta e} \quad K_{vb} \quad K_{v\delta b}]$$

$$K_{cu} = [K_{ce} \quad K_{c\delta e} \quad K_{cb} \quad K_{c\delta b}]$$

$$I_{Ed} = \frac{(x_{dt} - x_{BB} x_{b3})}{x_{dE}} V_b \cos(\delta) - \frac{(x_{dt} + x_{BB} x_{b2})}{x_{dE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \cos(\delta_E) + \frac{x_{BB}}{x_{dE}} E'_q - \frac{x_{dt}}{x_{dE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \cos(\delta_B)$$

$$I_{Eq} = \frac{(x_{dt} + x_{BB} x_{a3})}{x_{qE}} V_b \sin(\delta) - \frac{(x_{qt} + x_{BB} x_{a2})}{x_{qE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \sin(\delta_E) - \frac{x_{qt}}{x_{qE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \sin(\delta_B)$$

$$I_{Bd} = \frac{(x_{b3} x_E - x_{b1})}{x_{dE}} V_b \cos(\delta) + \frac{(x_{b1} - x_E x_{b2})}{x_{dE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \cos(\delta_E) + \frac{x_E}{x_{dE}} E'_q + \frac{x_{b1}}{x_{dE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \cos(\delta_B)$$

$$I_{Bq} = -\frac{(x_{a3} x_E + x_{b1})}{x_{qE}} V_b \sin(\delta) + \frac{(x_{a1} - x_E x_{a2})}{x_{qE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \sin(\delta_E) + \frac{x_{a1}}{x_{qE}} \frac{m_e V_{dc}}{2} \sin(\delta_B)$$

$$I_{td} = \frac{x_E}{X_T} I_{Ed} + \frac{1}{X_T} \frac{m_e V_{dc}}{2} \cos(\delta_E) - \frac{1}{X_T} V_b \cos(\delta)$$

$$I_{tq} = \frac{x_E}{X_T} I_{Eq} - \frac{1}{X_T} \frac{m_e V_{dc}}{2} \sin(\delta_E) + \frac{1}{X_T} V_b \sin(\delta)$$

$$P_e = V_{td} I_{td} + V_{tq} I_{tq}; E_q = E'_q + (X_d - X'_d) I_{td}$$

$$V_t = V_{td} + j V_{tq}; V_{td} = X_q I_{tq}; V_{tq} = E'_q - X'_d I_{td};$$

$$I_{td} = I_{td} + I_{Ed} + I_{Bd}; I_{tq} = I_{tq} + I_{Eq} + I_{Bq}$$

$$x_{dT} = X_{tE} + X'_d; x_{qT} = X_q + X_{tE}$$

$$x_{ds} = X_E + x_{dT}; x_{qs} = X_E + x_{qT}; x_{BB} = x_B + x_{BV}$$

$$x_{a1} = \frac{(x_{qs} X_T + x_{qT} X_E)}{X_T}; x_{a2} = 1 + \frac{x_{qT}}{X_T}; x_{a3} = -\frac{x_{qT}}{X_T}$$

$$x_{b1} = \frac{(x_{ds} X_T + x_{dT} X_E)}{X_T}; x_{b2} = 1 + \frac{x_{dT}}{X_T}; x_{b3} = \frac{x_{dT}}{X_T}$$

$$x_{qE} = -\left(\frac{x_{BB} x_{qT} x_E}{X_T} + x_E x_{qT} + x_{BB} x_{qs} \right)$$

$$x_{dE} = \left(\frac{x_{BB} x_{dT} x_E}{X_T} + x_E x_{dT} + x_{BB} x_{ds} \right)$$

و معادله برابری توان بین قسمت شنت و سری UPFC به صورت رابطه (۶) می‌باشد [۸].

$$\text{Re}(V_B I_B^* - V_E I_E^*) = 0 \quad (6)$$

۲-۳- مدل خطی سیستم

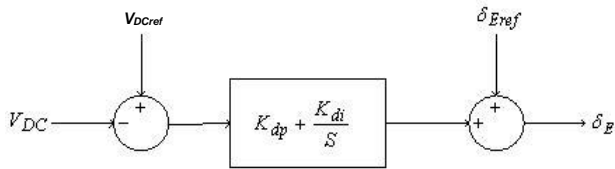
با خطی‌سازی معادلات غیرخطی حول نقطه کار، مدل خطی سیستم با فرض ثابت بودن توان مکانیکی بصورت روابط (۷-۱۱) بدست می‌آید.

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (7)$$

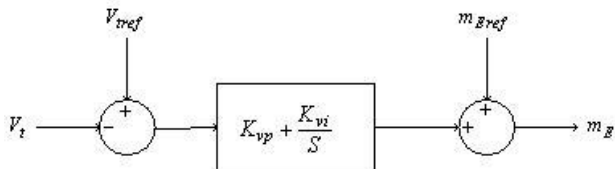
$$\Delta \dot{\omega} = (-\Delta P_e - D \Delta \omega) / M \quad (8)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = (-\Delta E_q + \Delta E_{fd}) / T'_{do} \quad (9)$$

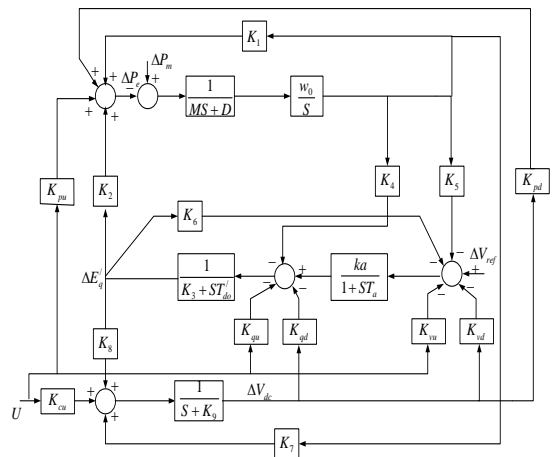




شکل (۴): کنترل کننده ولتاژ DC خازن رابط DC [۸]



شکل (۵): کنترل کننده ولتاژ باس V_i [۱۴]



شکل (۲): مدل خطی سیستم به همراه UPFC

۵- تحلیل سیستم

پارامترهای سیستم در نقطه کار نامی در ضمیمه آورده شده است. برای محاسبه ضرایب ثابت مدل فضای حالت در نقطه کار نامی، مقادیر اولیه مولفه‌های d و q جریان و ولتاژها و همچنین زاویه گشتاور بصورت زیر می‌باشند [۸ و ۱۴].

$$E_d = 0.448 pu, \quad E_q = 0.929 pu, \quad I_d = 0.682 pu, \quad I_q = 0.746 pu$$

$$V_E = 1.02 \angle 30.19^\circ, \quad V_B = 0.18 \angle -73.5^\circ, \quad \delta = 61.5^\circ$$

ضرایب ثابت مدل فضای حالت محاسبه شده برای نقطه کار نامی (با استفاده از پارامترهای سیستم در نقطه نامی که در پیوست داده شده‌اند) در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱): ضرایب ثابت سیستم در نقطه نامی		
$K_1 = 0.1784$	$K_{pe} = 0.3916$	$K_{qb} = 0.025$
$K_2 = 1.2082$	$K_{qe} = -1.0641$	$K_{vb} = 0.0097$
$K_3 = 2.4422$	$K_{ve} = 0.5532$	$K_{cb} = -0.1845$
$K_4 = 0.1855$	$K_{ce} = -0.0984$	$K_{p\delta b} = -0.0005$
$K_5 = -0.0485$	$K_{p\delta e} = 1.495$	$K_{q\delta b} = 0.0153$
$K_6 = 0.344$	$K_{q\delta e} = 0.6357$	$K_{v\delta b} = -0.0069$
$K_7 = -0.295$	$K_{v\delta e} = 0.0058$	$K_{c\delta b} = 0.0101$
$K_8 = 0.2216$	$K_{c\delta e} = 0.6555$	$K_{pd} = 0.2107$
$K_9 = 0.0565$	$K_{pb} = 0.1077$	$K_{qd} = -0.5439$
		$K_{vd} = 0.2849$

برای این نقطه کار، با استفاده از مدل فضای حالت ارائه شده در رابطه (۱۲) مقادیر ویژه سیستم بدست آمده و در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. به وضوح مشخص است که سیستم ناپایدار می‌باشد.

۴- کنترل کننده‌های UPFC

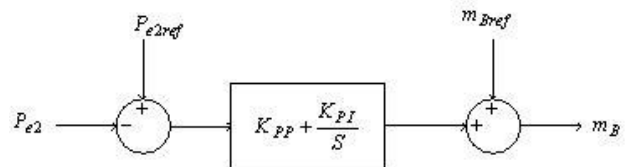
کنترل کننده‌های داخلی UPFC شامل سه کنترل کننده به صورت زیر می‌باشند:

(الف) کنترل کننده توان عبوری از خط.

(ب) کنترل کننده ولتاژ DC.

(پ) کنترل کننده ولتاژ پایانه.

شکل (۳) کنترل کننده توان را که یک کنترل کننده از نوع PI می‌باشد نشان می‌دهد. کنترل کننده توان برای تنظیم توان عبوری از خط شماره ۲ بکار می‌رود. k_{pi} و k_{pp} ضرایب ثابت کنترل کننده توان هستند. توان حقیقی خروجی مبدل شنت باید برابر توان حقیقی ورودی مبدل سری باشد و بر عکس. برای نگهداری تعادل توان بین دو مبدل، ولتاژ رابط DC باید ثابت باشد. در نتیجه از یک کنترل کننده PI برای ثابت نگهداشتن ولتاژ DC استفاده شده است. شکل (۴) کنترل کننده ولتاژ DC را که یک کنترل کننده از نوع PI است نشان می‌دهد. این کنترل کننده برای تنظیم ولتاژ DC بکار می‌رود. ضرایب k_{di} و k_{dp} ضرایب ثابت این کنترل کننده هستند. شکل (۵) کنترل کننده ولتاژ پایانه را که یک کنترل کننده از نوع PI است نشان می‌دهد. کنترل کننده ولتاژ پایانه برای تثبیت ولتاژ پایانه بکار می‌رود. ضرایب k_{vi} و k_{vp} ضرایب ثابت کنترل کننده ولتاژ پایانه هستند.



شکل (۳): کنترل کننده توان عبوری از خط [۸]

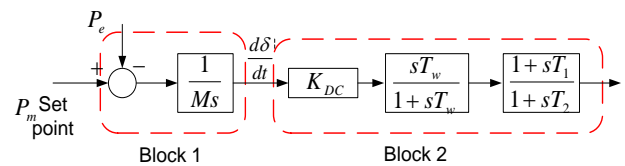


جدول (۲): مقادیر ویژه بدون کنترل کننده میراساز

$$\begin{aligned} & -19.2669 \\ & 0.0613 \pm 2.7719i \\ & -0.6982 \pm 0.5661i \end{aligned}$$

۶- طراحی کنترل کننده میراساز برای پایداری

کنترل کننده میراساز برای تولید یک گشتاور الکتریکی همفاز با تغییرات سرعت بر اساس روش جبران سازی فاز طراحی می شود. ورودی کنترل کننده میراساز معمولا $\Delta\omega$ یا $\Delta\delta$ می باشد و خروجی آن می تواند هر یک از چهار سیگنال ورودی UPFC یعنی m_B ، m_E ، δ_B و یا δ_E باشد. در این مقاله $\Delta\omega$ به عنوان ورودی کنترل کننده میراساز و Δm_B به عنوان خروجی کنترل کننده میراساز در نظر گرفته شده است. ساختار کنترل کننده میراساز در شکل (۶) نشان داده شده است. که شامل یک بهره، یک بلوک فیلتر و یک بلوک جبران ساز فاز می باشد. پارامترهای کنترل کننده میراساز با استفاده از روش جبران سازی فاز بدست می آیند [۱۲]. روش جبران سازی فاز در [۱۳] بطور کامل توضیح داده شده است.



شکل (۶): ساختار کنترل کننده میراساز [۸]

تابع تبدیل کنترل کننده میراساز برای سیستم تحت مطالعه به صورت زیر بدست آمده است (با انتخاب نسبت میرائی ۸/۰).

$$T_{DC}(s) = \frac{80}{(s+0.1)} \frac{s}{(s+10)} (s+41.66)$$

بعد از اعمال این کنترل کننده مقادیر ویژه سیستم بدست آمده و در جدول (۳) نشان داده شده اند. همانطور که مشخص است سیستم پایدار می باشد. بعد از پایداری سازی سیستم، مرحله بعد طراحی کنترل کننده های شکل های (۳ تا ۵) است.

جدول (۳): مقادیر ویژه سیستم بعد از اعمال کنترل کننده میراساز

$$\begin{aligned} & -57.2266, -19.3578, -2.6326, -0.6774 \\ & -0.1063, -0.5367 \pm 1.4457i \end{aligned}$$

۷- بهینه سازی کنترل کننده ها توسط روش الگوریتم ژنتیک

در این قسمت هدف بدست آوردن ضرایب ثابت کنترل کننده های شکل های (۳ تا ۵) می باشد. روشهای متفاوتی برای این کار وجود دارد،

در این مقاله از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن بهینه ترین ضرایب کنترل کننده استفاده می شود. در بخش بعد مروری بر روش الگوریتم ژنتیک ارائه می شود.

۷-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی است که از تئوری انتخاب طبیعی بهره می گیرد. در حالت کلی برای بهینه سازی مسئله، الگوریتم ژنتیک به دو صورت باینری و پیوسته می تواند در نظر گرفته شود که در این مقاله از الگوریتم ژنتیک پیوسته استفاده شده است. مراحل مختلف بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک در قسمت بعد ارائه شده است [۱۵].

۷-۲- تشکیل جمعیت اولیه

جمعیت اولیه بصورت یک ماتریس می باشد که هر سطر مربوط به این ماتریس کروموزوم نامیده می شود. تعداد درایه های کروموزوم بستگی به تعداد متغیرهایی دارد که باید بهینه شود. هر متغیر در داخل یک محدوده معین قرار می گیرد. در این مسئله دو بهره کنترل کننده PI نشان داده شده در شکل های (۳ تا ۵) متغیرهایی هستند که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می شوند. لذا چون سه کنترل کننده بطور همزمان بهینه می شوند در نتیجه ۶ متغیر برای بهینه سازی وجود دارند و بنابراین طول هر کروموزوم در جمعیت اولیه برابر ۶ می باشد و تعداد کروموزومها در جمعیت اولیه به صورت دلخواه در نظر گرفته می شود که در این مقاله برابر ۴۸ در نظر گرفته شده است. برای این مسئله ماتریس جمعیت اولیه (pop) به صورت زیر می باشد.

$$pop = \begin{bmatrix} k_{pp1} & k_{pi1} & k_{dp1} & k_{di1} & k_{vp1} & k_{vi1} \\ k_{pp2} & k_{pi2} & k_{dp2} & k_{di2} & k_{vp2} & k_{vi2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{pp48} & k_{pi48} & k_{dp48} & k_{di48} & k_{vp48} & k_{vi48} \end{bmatrix}$$

$$k_{min} \leq k \leq k_{max}, k_{min} = 0.01, k_{max} = 100$$

۷-۳- تابع هزینه

برای پیدا کردن بهینه ترین جواب باید هزینه مربوط به هر کروموزوم محاسبه شود و کروموزومهایی که دارای هزینه کمتری هستند برای تولید حالت های جدید انتخاب شده و بقیه حالتها از ماتریس اولیه حذف می شوند. بنابراین برای انتخاب بهینه ترین پارامترهای کنترل کننده به منظور بهبود پایداری دینامیکی و افزایش میرائی سیستم تابع هزینه به صورت رابطه (۱۴) در نظر گرفته می شود [۱۴].

$$J = \alpha \int t |\Delta\omega| dt + \beta \int t |\Delta P_{e2}| dt + \gamma \int t |\Delta V_{DC}| dt \quad (14)$$

که $\Delta\omega$ ، ΔP_{e2} و ΔV_{DC} به ترتیب تغییرات سرعت سیستم، تغییرات توان عبوری از خط دوم و تغییرات ولتاژ DC رابط خازنی بین مبدل های UPFC می باشد.



۴-۷- تولید حالت‌های جدید (جفت‌گیری) و جهش

بعد از محاسبه هزینه هر کروموزوم توسط تابع هزینه حالت‌های برتر یا حالت‌هایی که دارای کمترین هزینه هستند برای تولید حالت‌های جدید انتخاب می‌شوند، که تعداد این حالت‌های برتر توسط نرخ نگهداری مشخص می‌شود. در این مسئله نرخ نگهداری برابر ۰/۵ انتخاب شده است. یعنی بعد از مرتب کردن جمعیت اولیه بر اساس کمترین هزینه نصف حالتها برای جفت‌گیری نگهداشته می‌شود و بقیه حالتها از ماتریس جمعیت حذف می‌شوند. برای جفت‌گیری، کروموزوم‌های پدر و مادر به صورت تصادفی از داخل جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند. برای تولید کروموزوم‌های جدید از روی کروموزوم‌های برتر روشهای متفاوتی وجود دارد که در این مقاله از روابط (۱۶ و ۱۵) برای تولید حالت‌های جدید استفاده شده است [۱۵]:

$$\text{کروموزوم پدر} = (k_{pp}^{pa}, k_{pi}^{pa}, k_{dp}^{pa}, k_{di}^{pa}, k_{vp}^{pa}, k_{vi}^{pa}) \quad (15)$$

$$\text{کروموزوم مادر} = (k_{pp}^{ma}, k_{pi}^{ma}, k_{dp}^{ma}, k_{di}^{ma}, k_{vp}^{ma}, k_{vi}^{ma}) \quad (16)$$

$$k^{new} = \eta \cdot k^{pa} + (1 - \eta) \cdot k^{ma} \quad 0 \leq \eta \leq 1$$

بعد از ایجاد حالت‌های جدید و تکمیل ماتریس جمعیت برای دستیابی به بهینه‌ترین حالت در تمام فضای ورودی (مینیمم کلی) به جای دستیابی به مینیمم محلی بر روی تعداد محدودی از کروموزومها جهش انجام می‌شود، تا تمام فضای ورودی در فرایند بهینه‌سازی مورد جستجو قرار گیرد. نرخ جهش در این مسئله برابر ۰/۵ انتخاب شده است. یعنی بعد از انتخاب تصادفی ۵ درصد از کروموزومهای فضای حالت ورودی، درایه‌های این کروموزومها به صورت تصادفی در داخل محدوده مجاز دوباره تولید می‌شوند، که با این کار از همگرا شدن فرایند بهینه‌سازی به سمت مینیمم‌های محلی جلوگیری می‌شود.

۸- بهینه‌سازی همزمان کنترل‌کننده‌های UPFC

در این قسمت هدف، انتخاب بهینه بهره‌های کنترل‌کننده‌های داخلی UPFC که در شکل‌های (۳ تا ۵) نشان داده شده‌اند می‌باشد. هر کنترل‌کننده دو بهره دارد که یکی بهره کنترل‌کننده تناسبی و دیگری بهره کنترل‌کننده انتگرال‌گیر می‌باشد. محدوده تغییرات پارامترهای سیستم بین مقادیر مجاز مینیمم و ماکزیمم طوری انتخاب می‌شود که پایداری سیستم در این محدوده تضمین شود. هر سه کنترل‌کننده بطور همزمان در نظر گرفته شده‌اند و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک که در قسمت قبل به آن اشاره شد بهینه‌ترین بهره‌ها برای این کنترل‌کننده‌ها بدست آمده، که این مقادیر به صورت زیر می‌باشند.

بهره‌های کنترل‌کننده توان (کنترل‌کننده شکل (۳))

$$k_{pp} = 0.1778, k_{pi} = 3.5$$

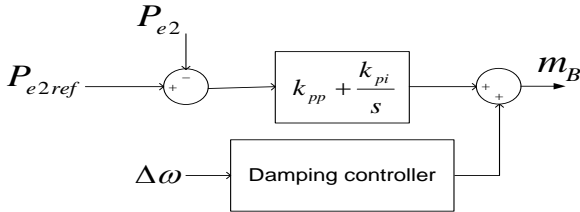
بهره‌های کنترل‌کننده ولتاژ DC (کنترل‌کننده شکل (۴))

$$k_{dp} = 1.31, k_{di} = 0.59$$

بهره‌های کنترل‌کننده ولتاژ پایانه (کنترل‌کننده شکل (۵)):

$$k_{vp} = 1.056, k_{vi} = 14.58$$

البته باید توجه شود که در تمام مراحل طراحی فوق، کنترل‌کننده میراساز در مدار می‌باشد. بعنوان نمونه ساختار کنترل‌کننده توان با وجود کنترل‌کننده میراساز در نظر گرفته شده به صورت شکل (۷) می‌باشد.



شکل (۷): کنترل‌کننده توان با وجود کنترل‌کننده میراساز

۹- نتایج شبیه‌سازی غیرخطی

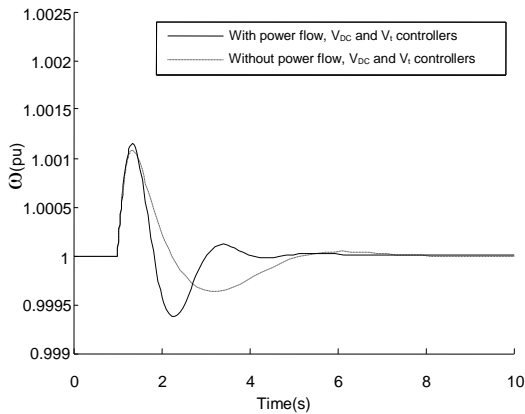
بعد از اعمال کنترل‌کننده میراساز سیستم پایدار شده، سپس با اعمال سایر کنترل‌کننده‌های داخلی (شکل‌های ۳ تا ۵)، عملکرد سیستم به‌مراه این کنترل‌کننده‌ها به ازای اغتشاشات کوچک و بزرگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا برای بررسی تاثیر کنترل‌کننده‌های طراحی شده در برابر اغتشاشات کوچک، پاسخ سیستم با اعمال ورودی پله به ورودیهای توان مرجع خط انتقال دوم ($P_{e2(ref)}$) و توان مکانیکی مرجع (T_m) با شبیه‌سازی غیرخطی در حوزه زمان در شکل‌های (۸ تا ۱۴) نشان داده شده است. همچنین برای نمایش تاثیر کنترل‌کننده های فوق در برابر اغتشاشات بزرگ، پاسخ سیستم به ازای اتصال کوتاه سه فاز در پایانه ماشین سنکرون در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نشان داده شده است. نتایج حاصله با وجود کنترل‌کننده طراحی شده نشان دهنده عملکرد خوب سیستم به ازای اعمال اغتشاشات با دامنه کوچک و بزرگ می‌باشد.

۹-۱- پاسخ سیستم به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۵

به ورودی توان مکانیکی ($T_m = 0.05 pu$)

در شکل‌های (۸ تا ۱۰) پاسخ دینامیکی سیستم به ازای اعمال ورودی پله با دامنه ۰/۵ pu به ورودی توان مکانیکی در دو حالت بدون کنترل‌کننده‌های داخلی (کنترل‌کننده‌های شکل‌های (۳ تا ۵)) و با وجود کنترل‌کننده‌های داخلی نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۸) به خوبی مشخص است ولتاژ DC در حالت با کنترل‌کننده به مقدار اولیه قبل از اغتشاش برگشته است در حالیکه ولتاژ DC در حالت بدون کنترل‌کننده دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد. در شکل (۹) نیز به خوبی مشخص است که ولتاژ پایانه ماشین سنکرون در حالت با کنترل‌کننده به مقدار اولیه قبل از اغتشاش برگشته است در حالیکه در حالت بدون کنترل‌کننده دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد. همچنین شکل (۱۰) نشان دهنده سرعت سیستم در دو حالت بدون کنترل‌کننده و با کنترل‌کننده است که به خوبی مشخص است در حالت

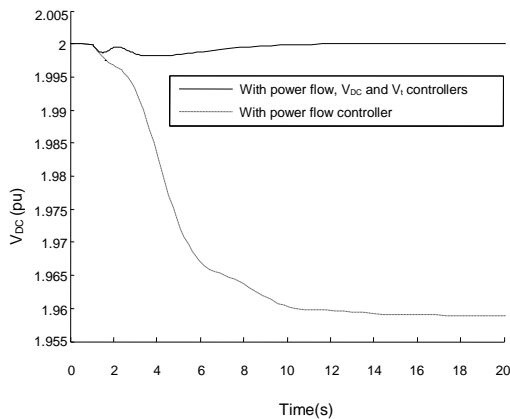




شکل (۱۰): پاسخ دینامیکی تغییرات سرعت به ازای اعمال پله با دامنه $0.05 pu$ به ورودی توان مکانیکی ($T_m=0.05 pu$)

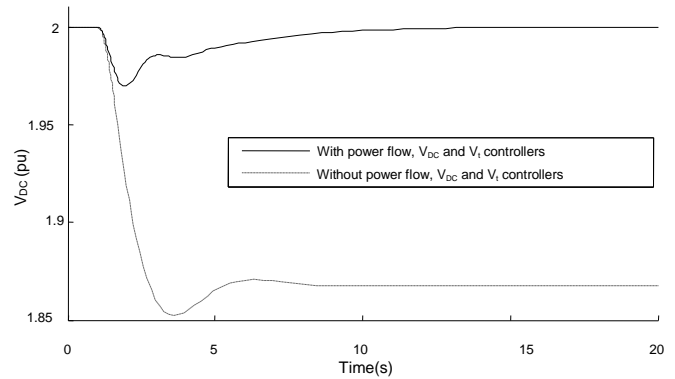
۲-۹- پاسخ دینامیکی سیستم به ازای اعمال پله با دامنه $0.1 pu$ به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}=0.1 pu$)

در این قسمت هدف بررسی عملکرد کنترل کننده توان عبوری از خط می باشد. لذا به توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}$) یک ورودی پله با دامنه 0.1 اعمال می شود و هدف این است که توان عبوری از خط دوم به اندازه ورودی اعمال شده یعنی 0.1 افزایش یابد. در شکل های (۱۱) تا (۱۴) پاسخ سیستم به ازای اعمال پله با دامنه 0.1 به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}=0.1 pu$) نشان داده شده است.

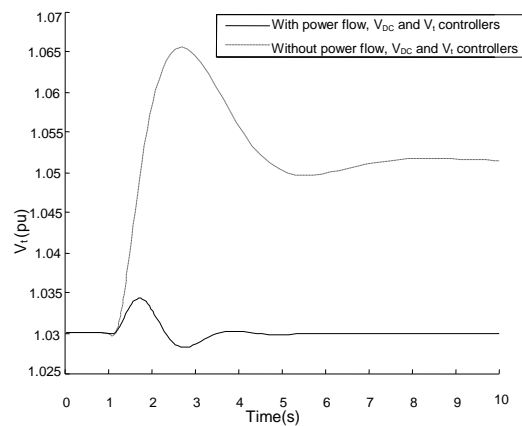


شکل (۱۱): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ DC به ازای اعمال پله دامنه $0.1 pu$ به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}=0.1 pu$)

وجود کنترل کننده، میرایی نوسانات سیستم بیشتر از حالت بدون کنترل کننده بوده و تغییرات سرعت در این حالت سریعتر میرا می شود. لذا همانگونه که قبلا بیان شد هدف از طراحی کنترل کننده های ولتاژ پایانه و ولتاژ DC، کنترل دو پارامتر تثبیت ولتاژ پایانه و ولتاژ DC بعد از بروز یک اغتشاش در سیستم می باشد بگونه ای که پس از بروز اغتشاش این دو ولتاژ به مقدار اولیه قبل از خطا برگردند. همانطور که در شکل های (۸) و (۹) مشخص است در این حالت هدف فوق محقق شده و علاوه بر آن همانطور که در شکل (۱۰) نیز به خوبی مشخص است کنترل کننده های مذکور علاوه بر کنترل پارامترهای سیستم، میرایی سیستم را نیز نسبت به حالت بدون وجود کنترل کننده های مذکور افزایش داده اند. لذا دو کنترل کننده ولتاژ DC و ولتاژ پایانه به خوبی عمل کنترل لازم را انجام داده اند.



شکل (۸): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ DC به ازای اعمال پله با دامنه $0.05 pu$ به ورودی توان مکانیکی ($T_m=0.05 pu$)



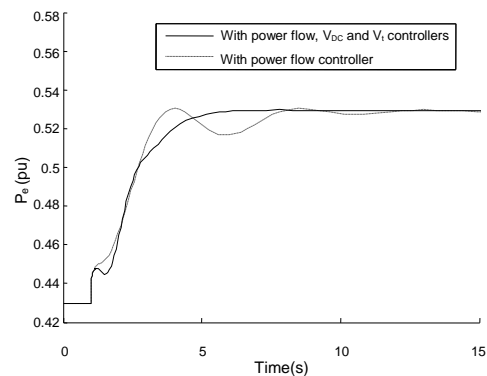
شکل (۹): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ پایانه به ازای اعمال پله با دامنه $0.05 pu$ به ورودی توان مکانیکی ($T_m=0.05 pu$)

در این حالت چون هدف مطالعه کنترل کننده توان است لذا یکبار کنترل کننده توان بصورت تنها در مدار قرار گرفته است و بار دوم هر سه کنترل کننده بطور همزمان در مدار قرار گرفته‌اند. همانطور که به خوبی مشخص است در شکل (۱۱)، ولتاژ DC در حالتی که فقط کنترل کننده توان در مدار است دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد در حالیکه هنگام وجود هر سه کنترل کننده، ولتاژ DC پس از یک نوسان دینامیکی به مقدار اولیه قبل از بروز اغتشاش برگشته است. همچنین مقدار توان عبوری از خط دوم که در شکل (۱۲) نشان داده شده است به اندازه مقدار ورودی اعمال شده یعنی ۰/۱، از مقدار اولیه افزایش پیدا کرده است و همچنین میرائی سیستم در حالتی که هر سه کنترل کننده در مدار هستند نسبت به حالتی که فقط کنترل کننده توان در مدار است بیشتر می‌باشد. در شکل (۱۳) نیز به خوبی مشخص است که ولتاژ پایانه در حالتی که فقط کنترل کننده توان در مدار است دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد ولی در هنگام وجود هر سه کنترل کننده، پس از یک نوسان به مقدار اولیه بازگشته است. منحنی سرعت سیستم نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است که به خوبی مشخص است در حالت وجود هر سه کنترل کننده، میرائی نوسانات سیستم بیشتر از حالتی است که فقط کنترل کننده توان در مدار بوده و تغییرات سرعت در این حالت سریعتر میرا می‌شود.

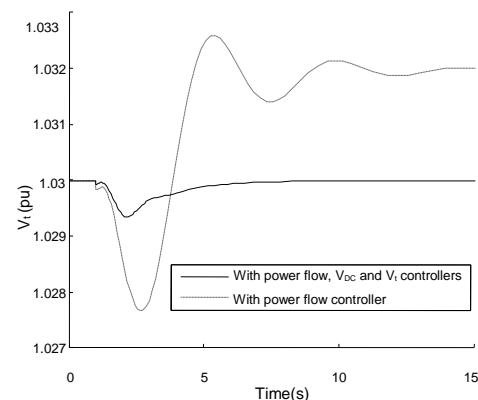
لذا بطور کلی می‌توان بیان نمود که با وجود کنترل کننده توان، توان عبوری از خط به اندازه ورودی اعمال شده به توان مرجع تغییر خواهد کرد و این به معنای عملکرد مناسب کنترل کننده طراحی شده می‌باشد. ولی در این حالت ولتاژ DC و ولتاژ پایانه دارای انحراف از مقدار اولیه خواهند بود و لذا برای رفع این مشکل می‌توان علاوه بر کنترل کننده توان از کنترل کننده‌های ولتاژ پایانه و ولتاژ DC نیز بطور همزمان استفاده کرد تا علاوه بر کنترل توان بتوان به کنترل همزمان ولتاژ نیز دست یافت. همچنین در صورت طراحی مناسب می‌توان علاوه بر دست-یابی به کنترل همزمان توان و ولتاژ، میرائی نوسانات سیستم را نیز افزایش داد.

۳-۹- بررسی اتصال کوتاه سه فاز در سیستم

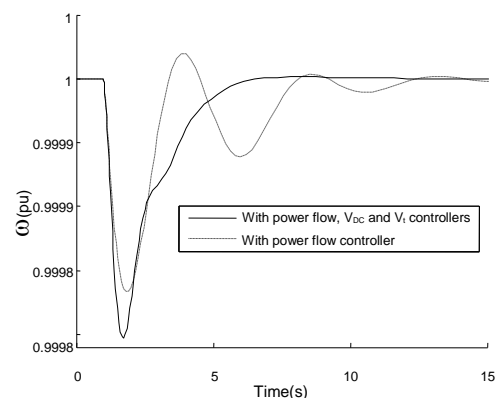
در این قسمت برای بررسی تاثیر کنترل کننده‌های طراحی شده در مقابل اغتشاشات بزرگ، یک اتصال کوتاه سه فاز در پایانه ژنراتور سنکرون انجام گرفته است که نتیجه شبیه‌سازی این اتصال کوتاه در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با وجود کنترل کننده‌های طراحی شده، پاسخ سیستم نسبت به حالتی که کنترل کننده‌ها در مدار نیستند مناسب‌تر بوده و سریعتر میرا می‌شود.



شکل (۱۲): پاسخ دینامیکی تغییرات توان عبوری از خط دوم به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۱pu به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}=0.1 pu$)



شکل (۱۳): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ پایانه به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۱pu به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}=0.1 pu$)



شکل (۱۴): پاسخ دینامیکی تغییرات سرعت به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۱pu به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}=0.1 pu$)

بیشتر شبکه و میرائی بیشتر نوسانات سیستم قدرت متصل شده با UPFC می توان به جای استفاده از یک کنترل کننده میراساز از ۲ یا چند کنترل کننده میراساز بطور همزمان استفاده کرد که با توجه به اینکه UPFC دارای ۴ ورودی است و امکان اعمال کنترل کننده میراساز بر روی هر ۴ ورودی بطور همزمان وجود دارد. لذا UPFC دارای این قابلیت قوی در پایدارسازی و افزایش میرائی شبکه می باشد و این امکان را به ما می دهد که با افزایش تعداد کنترل کننده میراساز پایداری شبکه را در برابر تغییرات شبکه و بار تضمین نمائیم. در این مقاله هدف کنترل همزمان توان عبوری از خط دوم و ولتاژ پایانه می باشد به صورتی که نوسانات سیستم نیز بطور مناسبی میرا گردد. همانطور که نتایج نشان می دهند پارامترهای سیستم مانند ولتاژ DC و ولتاژ پایانه ماشین سنکرون در حالت بدون کنترل کننده دارای خطای حالت ماندگار هستند ولی با وجود کنترل کننده های طراحی شده این متغیرها تثبیت شده و خطای حالت ماندگار آنها از بین می رود، همچنین با کنترل کننده توان، توان عبوری از خط را می توان تغییر داد و در عین حال ولتاژهای سیستم نیز با کنترل کننده های مناسب تثبیت می شوند. همچنین کنترل کننده های مذکور علاوه بر کنترل پارامترهای مورد نظر بر روی میرائی سیستم نیز تاثیر داشته و باعث افزایش میرائی نوسانات سیستم شده اند. بطور کلی می توان بیان نمود که کنترل کننده های UPFC در حالت بروز اغتشاشات کوچک و اغتشاشات بزرگ، عملکرد مناسبی در میرائی و کنترل پارامترهای سیستم داشته اند که نتایج شبیه سازی موکد این امر می باشد.

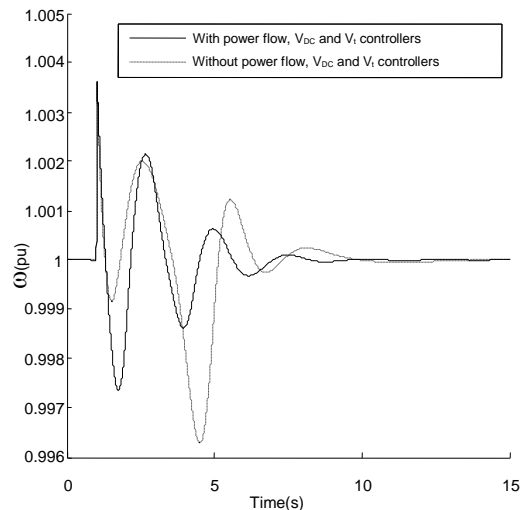
پیوست

الف- مشخصات سیستم در نقطه نامی

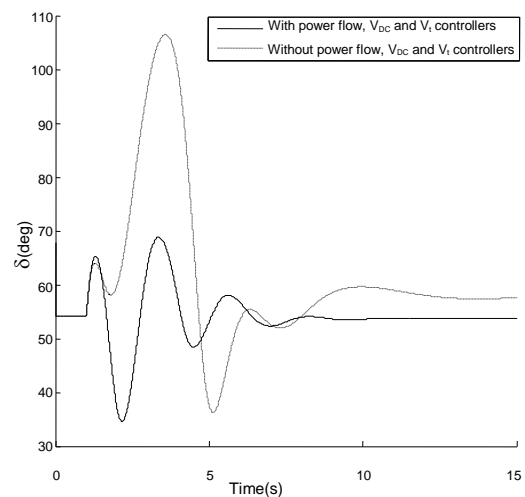
	$M = 8 \frac{\text{Mj}}{\text{MVA}}$	$T'_{do} = 5.044 \text{ sec}$	$X_d = 1 \text{ pu}$
Generator	$X_q = 0.6 \text{ pu}$	$X'_d = 0.3 \text{ pu}$	$D = 0$
Excitation system		$K_a = 10$	$T_a = 0.05 \text{ s}$
Transformers		$X_{TE} = 0.1 \text{ pu}$	$X_E = 0.1 \text{ pu}$
Transmission line		$X_B = 0.1 \text{ pu}$	$X_{T2} = 1.3 \text{ pu}$
Operating condition	$P = 1 \text{ pu}$	$Q = 0.3 \text{ pu}$	
DC link parameter	$V_t = 1.05 \text{ pu}$	$V_{DC} = 2 \text{ pu}$	$C_{DC} = 3 \text{ pu}$
UPFC parameters	$m_B = 0.18$	$\delta_B = -73.5^\circ$	
	$\delta_E = 30.19^\circ$	$m_E = 1.026$	

همچنین محدوده تغییرات سیگنال m_B بصورت زیر می باشد:

$$0 \leq m_B \leq 2$$



شکل (۱۵): پاسخ دینامیکی سرعت سیستم به ازای اتصال کوتاه سه فاز در پایانه ژنراتور به مدت ۳۰ میلی ثانیه



شکل (۱۶): پاسخ دینامیکی زاویه گشتاور ماشین به ازای اتصال کوتاه سه فاز در پایانه ژنراتور به مدت ۳۰ میلی ثانیه

۱۰- نتیجه گیری

UPFC یکی از ادوات FACTS بوده که قابلیت همزمان کنترل توان و ولتاژ را دارا می باشد. همچنین توانائی بهبود پایداری شبکه را نیز دارا می باشد. با طراحی کنترل کننده میراساز مناسب می توان علاوه بر پایدارسازی سیستم قدرت متصل شده با UPFC میرائی سیستم را نیز افزایش داد. بعد از پایدارسازی می توان با طراحی کنترل کننده مناسب برای UPFC توسط کنترل همزمان توان عبوری از خط و ولتاژ شینه ای که UPFC بر روی آن قرار دارد دست یافت. جهت افزایش پایداری

ب - فهرست متغیرها

- [5] NABAVI-NIAKI, A., and IRAVANI, M.R., "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies," IEEE Trans. Power Sys., 1996, 11, (4), pp. 1937-1943.
- [6] SMITH, K. S., RAN, L., and PENMAN, J., "Dynamic Modeling of a Unified Power Flow Controller," IEE Proc. C Gen. Trans. Dist., 1997, 144(1), pp. 7-12.
- [7] WANG, H.F., "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillation Part III: Unified Power Flow Controller," IEEE Trans. Power Delivery, 2000, 15, (3), pp. 978-983.
- [8] Tambey, N., Kothari, M. L., "Damping of Power System Oscillation with Unified Power Flow Controller (UPFC)," IEE Proc. Gen. Trans. Dist., Vol. 150, No. 2, March 2003, pp. 129-140.
- [9] Li, N., Xu, Y., and Chen, H., "FACTS-Based Power Flow Control in Interconnected Power Systems," IEEE Trans. Power Sys, Vol. 15, Feb. 2000. pp. 257-262.
- [10] GHOLIPOU, E., and SAADAT, S., "Improving of Transient Stability of Power SYSTEMA Using UPFC," IEEE Trans. Power Delivery, 2005, Vol. 20, No. 2.
- [11] Eldamaty, A. A., Faried, S. O., Aboreshaid, S., "Damping Power System Oscillation Using a Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controller," IEEE CCECE/CCGEI 2005, Vol. 1, May 2005, pp. 1950-1953.
- [12] YU, Y., Electric Power System Dynamics, Academic Press, Inc London, 1983.
- [13] WANG, H.F., LI, M., and SWIFT, F. J., "FACTS-Based Stabilizer Designed by Phase Compensation Method. Part I and II," Proceedings of APSCOM-97, Hong-Kong, 1997, pp. 638-649.
- [14] Hemmati, R., Abdolalipour, A., Optimal Robust UPFC Controller Design in Electric Power Systems, MSc Thesis, University of Kashan, Kashan, Iran (in Persian), 2008.
- [15] Randy, L. H., and Sue, E. H., Practical Genetic Algorithms, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 2004.
- H: ثابت اینرسی
 ω_n : فرکانس طبیعی نوسانات
 X_E : راکتانس معادل سیستم
 X_T : راکتانس خط انتقال اول
 X_{BV} : راکتانس خط انتقال دوم
 X_{IE} : راکتانس ترانسفورماتور
 X_E : راکتانس ترانسفورماتور تحریک
 X_B : راکتانس ترانسفورماتور تقویت کننده سری
 X_d : راکتانس محور طولی ژنراتور
 X_q : راکتانس محور عرضی ژنراتور
 X_d : راکتانس گذرای محور طولی ژنراتور
 T_{do} : ثابت زمانی گذرای محور طولی ژنراتور در حالت مدار باز
 P_e : توان الکتریکی ژنراتور
 P_m : توان مکانیکی ژنراتور
 $P_{e2(ref)}$: توان مرجع خط انتقال دوم
 V_t : ولتاژ پایانه ژنراتور
 V_b : ولتاژ شین بی نهایت
 V_0 : ولتاژ در شین UPFC
 V_{B0} : مقدار اولیه ولتاژ تزریقی سری
 V_{E0} : مقدار اولیه ولتاژ تزریقی شنت
 I_{t1} : جریان خط انتقال اول
 I_B : جریان خط انتقال دوم
 V_{dc} : ولتاژ رابط DC
 C_{dc} : خازن رابط DC
 m_E : اندیس مدولاسیون مبدل شنت
 m_B : اندیس مدولاسیون مبدل سری
 K_{DC} : بهره کنترل کننده میراساز
 T_1, T_2 : ثوابت زمانی کنترل کننده میراساز

مراجع

- [1] Narain, G. Hingorani, and Laszlo Gyugyi, UNDERSTANDING FACTS, IEEE Press, New York, 2000.
- [2] Gyugyi, L., and C D Schauder, et al., "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995, pp. 1085-1093.
- [3] Gyugyi, L., "Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems," IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 4, July 1992, p 323-331.
- [4] Sedraui, K., Oliver G., AL-Haddad K., Chandra A., "Versatile Control Strategy of the Unified Power Flow Controller," IEEE CCECE 2000, Vol. 1, May 2000, pp.142-147.

