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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

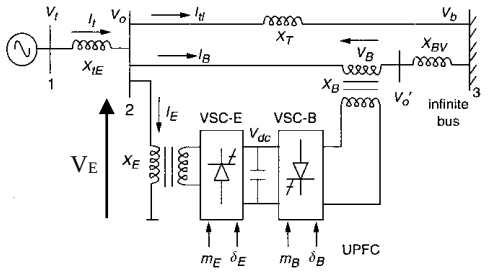
۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت، توان عبوری از خطوط با توجه به 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 کنترل‌کننده‌هائی 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 کارائی 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 میرائی نوسانات سیستم نیز بکار رود [۴-۲]. اخیراً مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی UPFC [۷-۵]، 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 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 IEEE - ST1A در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): سیستم قدرت تک ماشینه بهمراه 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 غیرخطی سیستم

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

$$\dot{\omega} = \frac{(P_m - P_e - D\omega)}{M} \qquad (۱)$$

$$\dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \qquad (۲)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{(-E_q + E_{fd})}{T'_{do}} \qquad (۳)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{-E_{fd} + K_a(V_{ref} - V_t)}{T_a} \qquad (۴)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{3m_E}{4C_{dc}}\left(\sin(\delta_E)I_{Ed} + \cos(\delta_E)I_{Eq}\right) + \frac{3m_B}{4C_{dc}}\left(\sin(\delta_B)I_{Bd} + \cos(\delta_B)I_{Bq}\right) \qquad (۵)$$

که در آن:

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

$$I_{Ed}=\frac{\left(x_{dt}-x_{BB}x_{b3}\right)}{x_{dE}}V_b\cos(\delta)-\frac{\left(x_{dt}+x_{BB}x_{b2}\right)}{x_{dE}}\frac{m_eV_{dc}}{2}\cos(\delta_E)$$
$$+\frac{x_{BB}}{x_{dE}}E'_q-\frac{x_{dt}}{x_{dE}}\frac{m_BV_{dc}}{2}\cos(\delta_B)$$
$$I_{Eq}=\frac{\left(x_{dt}+x_{BB}x_{a3}\right)}{x_{qE}}V_b\sin(\delta)-\frac{\left(x_{qt}+x_{BB}x_{a2}\right)}{x_{qE}}\frac{m_eV_{dc}}{2}\sin(\delta_E)$$
$$-\frac{x_{qt}}{x_{qE}}\frac{m_BV_{dc}}{2}\sin(\delta_B)$$
$$I_{Bd}=\frac{\left(x_{b3}x_E-x_{b1}\right)}{x_{dE}}V_b\cos(\delta)+\frac{\left(x_{b1}-x_Ex_{b2}\right)}{x_{dE}}\frac{m_eV_{dc}}{2}\cos(\delta_E)$$
$$+\frac{x_E}{x_{dE}}E'_q+\frac{x_{b1}}{x_{dE}}\frac{m_BV_{dc}}{2}\cos(\delta_B)$$
$$I_{Bq}=-\frac{\left(x_{a3}x_E+x_{b1}\right)}{x_{qE}}V_b\sin(\delta)+\frac{\left(x_{a1}-x_Ex_{a2}\right)}{x_{qE}}\frac{m_eV_{dc}}{2}\sin(\delta_E)$$
$$+\frac{x_{a1}}{x_{qE}}\frac{m_BV_{dc}}{2}\sin(\delta_B)$$

$$I_{tld}=\frac{x_E}{X_T}I_{Ed}+\frac{1}{X_T}\frac{m_eV_{dc}}{2}\cos(\delta_E)-\frac{1}{X_T}V_b\cos(\delta)$$
$$I_{tlq}=\frac{x_E}{X_T}I_{Eq}-\frac{1}{X_T}\frac{m_eV_{dc}}{2}\sin(\delta_E)+\frac{1}{X_T}V_b\sin(\delta)$$

$$P_e=V_{td}I_{td}+V_{tq}I_{tq};E_q=E'_q+\left(X_d-X'_d\right)I_{td}$$
$$V_t=V_{td}+jV_{tq};V_{td}=X_qI_{tq};V_{tq}=E'_q-X'_dI_d;$$
$$I_{td}=I_{tld}+I_{Ed}+I_{Bd};I_{tq}=I_{tlq}+I_{Eq}+I_{Bq}$$
$$x_{dT}=X_{tE}+X'_d;\ x_{qT}=X_q+X_{tE}$$
$$x_{ds}=X_E+x_{dT};\ x_{qs}=X_E+x_{qT};\ x_{BB}=x_B+x_{BV}$$
$$x_{a1}=\frac{\left(x_{qs}X_T+x_{qT}X_E\right)}{X_T};\ x_{a2}=1+\frac{x_{qT}}{X_T};\ x_{a3}=-\frac{x_{qT}}{X_T}$$
$$x_{b1}=\frac{\left(x_{ds}X_T+x_{dT}X_E\right)}{X_T};\ x_{b2}=1+\frac{x_{dT}}{X_T};\ x_{b3}=\frac{x_{dT}}{X_T}$$
$$x_{qE}=-\left(\frac{x_{BB}x_{qT}x_E}{X_T}+x_Ex_{qT}+x_{BB}x_{qs}\right)$$
$$x_{dE}=\left(\frac{x_{BB}x_{dT}x_E}{X_T}+x_Ex_{dT}+x_{BB}x_{ds}\right)$$

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

$$\mathrm{Re}\left(V_BI_B^*-V_EI_E^*\right)=0 \qquad (۶)$$

۲-۳- مدل خطی سیستم

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

$$\Delta\dot{\delta}=\omega_0\Delta\omega \qquad (۷)$$
$$\Delta\dot{\omega}=(-\Delta P_e-D\Delta\omega)/M \qquad (۸)$$
$$\Delta\dot{E}'_q=(-\Delta E_q+\Delta E_{fd})/T'_{do} \qquad (۹)$$
$$\Delta\dot{E}_{fd}=-\frac{1}{T_A}\Delta E_{fd}-\frac{K_A}{T_A}\Delta V_t \qquad (۱۰)$$
$$\Delta\dot{V}_{dc}=K_7\Delta\delta+K_8\Delta E'_q-K_9\Delta V_{dc}+K_{ce}\Delta m_E \qquad (۱۱)$$
$$+K_{c\delta e}\Delta\delta_E+K_{cb}\Delta m_B+K_{c\delta b}\Delta\delta_B$$

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.

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{\delta}\\ \Delta\dot{\omega}\\ \Delta\dot{E}'_q\\ \Delta\dot{E}_{fd}\\ \Delta\dot{v}_{dc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0\\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_{pd}}{M}\\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_{qd}}{T'_{do}}\\ -\frac{K_AK_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_AK_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_AK_{vd}}{T_A}\\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta\omega\\ \Delta E'_q\\ \Delta E_{fd}\\ \Delta v_{dc}\end{bmatrix} \qquad (۱۲)$$
$$+\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ -\frac{K_{pe}}{M} & -\frac{K_{p\delta e}}{M} & -\frac{K_{pb}}{M} & -\frac{K_{p\delta b}}{M}\\ -\frac{K_{qe}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\delta e}}{T'_{do}} & -\frac{K_{qb}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\delta b}}{T'_{do}}\\ -\frac{K_AK_{vc}}{T_A} & -\frac{K_AK_{v\delta e}}{T_A} & -\frac{K_AK_{vb}}{T_A} & -\frac{K_AK_{v\delta b}}{T_A}\\ Kce & K_{c\delta e} & K_{cb} & K_{c\delta b}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta m_E\\ \Delta\delta_E\\ \Delta m_B\\ \Delta\delta_B\end{bmatrix}$$

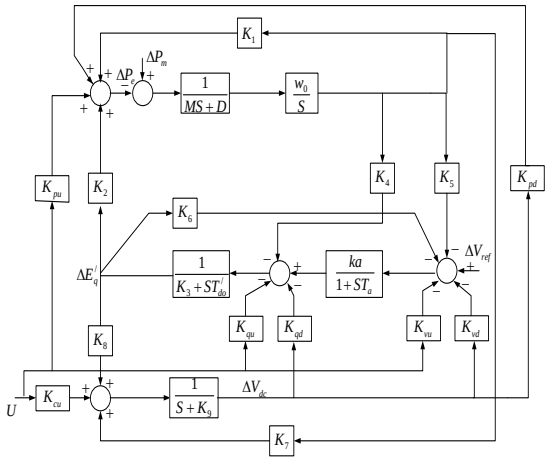
سیگنالهای $\Delta m_E,\Delta m_B,\Delta\delta_E,\Delta\delta_B$، سیگنالهای کنترلی خطی‌شده UPFC می‌باشند. مدل دینامیکی خطی‌شده فوق می‌تواند توسط شکل(۲) نمایش داده شود که در این شکل فقط یک سیگنال کنترل ورودی با u مشخص شده است که می‌تواند هر یک از چهار سیگنال کنترل باشد. در شکل (۲)، پارامتر u یک بردار ستونی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

$$u=[\Delta m_E\quad\Delta\delta_E\quad\Delta m_B\quad\Delta\delta_B]^T \qquad (۱۳)$$

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

$$K_{pu}=[K_{pe}\quad K_{p\delta e}\quad K_{pb}\quad K_{p\delta b}]$$
$$K_{qu}=[K_{qe}\quad K_{q\delta e}\quad K_{qb}\quad K_{q\delta b}]$$
$$K_{vu}=[K_{ve}\quad K_{v\delta e}\quad K_{vb}\quad K_{v\delta b}]$$
$$K_{cu}=[K_{ce}\quad K_{c\delta e}\quad K_{cb}\quad K_{c\delta b}]$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]



شکل (۲): مدل خطی سیستم بهمراه UPFC

۴- کنترل‌کننده‌های UPFC

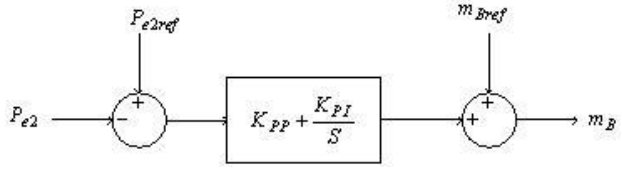
کنترل‌کننده‌های داخلی UPFC شامل سه کنترل‌کننده به صورت زیر می باشند.:

الف) کنترل‌کننده توان عبوری از خط.

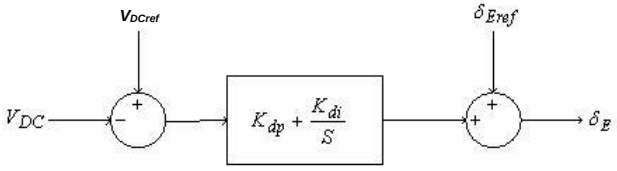
ب) کنترل‌کننده ولتاژ DC.

پ) کنترل‌کننده ولتاژ پایانه.

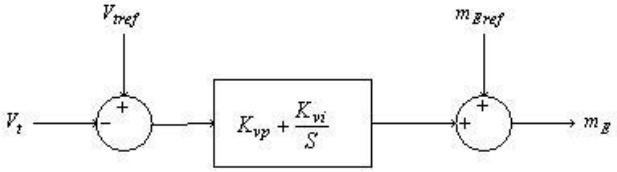
شکل (۳) کنترل‌کننده توان را که یک کنترل‌کننده از نوع PI می‌باشد نشان می‌دهد. کنترل‌کننده توان برای تنظیم توان عبوری از خط شماره ۲ بکار می‌رود. k_{pp} و k_{pi} ضرایب ثابت کنترل‌کننده توان هستند. توان حقیقی خروجی مبدل شنت باید برابر توان حقیقی ورودی مبدل سری باشد و بر عکس. برای نگهداری تعادل توان بین دو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



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



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



شکل(۵): کنترل‌کننده ولتاژ باس V_t [۱۴]

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].

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

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

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.

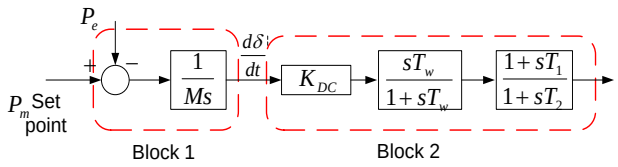
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

جدول (۲): مقادیر ویژه بدون کنترل‌کننده میراساز
-19.2669
$0.0613 \pm 2.7719i$
$-0.6982 \pm 0.5661i$

۶- طراحی کنترل‌کننده میراساز برای پایداری

کنترل‌کننده میراساز برای تولید یک گشتاور الکتریکی همفاز با تغییرات سرعت بر اساس روش جبران‌سازی فاز طراحی می‌شود. ورودی کنترل‌کننده میراساز معمولا $\Delta\omega$ یا $\Delta\delta$ می‌باشد و خروجی آن می‌تواند هریک 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 کنترل‌کننده میراساز و Δm_B به عنوان خروجی کنترل‌کننده میراساز در نظر گرفته شده است. ساختار کنترل‌کننده میراساز در شکل (۶) نشان داده شده است. که شامل یک بهره، یک بلوک فیلتر و یک بلوک جبران‌ساز فاز می‌باشد. پارامترهای کنترل‌کننده میراساز با استفاده از روش جبران‌سازی فاز بدست می‌آیند [۱۲]. روش جبران‌سازی فاز در [۱۳] بطور کامل توضیح داده شده است.



شکل (۶): ساختار کنترل‌کننده میراساز [۸]

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

$$T_{DC}(s) = \frac{80}{(s+0.1)}\frac{s}{(s+10)}\frac{(s+41.66)}{}$$: تابع تبدیل کنترل‌کننده میراساز

بعد از اعمال این کنترل‌کننده مقادیر ویژه سیستم بدست آمده و در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. همانطور که مشخص است سیستم پایدار می‌باشد. بعد از پایدارسازی سیستم، مرحله بعد طراحی کنترل‌کننده‌های شکل‌های (۳ تا ۵) است.

جدول (۳): مقادیر ویژه سیستم بعد از اعمال کنترل‌کننده میراساز
$-57.2266, -19.3578, -2.6326, -0.6774$
$-0.1063, -0.5367 \pm 1.4457i$

۷- بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ها توسط روش الگوریتم ژنتیک

در این قسمت هدف بدست آوردن ضرایب ثابت کنترل‌کننده‌های شکل‌های (۳ تا ۵) می‌باشد. روشهای متفاوتی برای این کار وجود دارد، در این مقاله از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن بهینه‌ترین ضرایب کنترل‌کننده استفاده می‌شود. در بخش بعد مروری بر روش الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود.

۷-۱- الگوریتم ژنتیک

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

۷-۲- تشکیل جمعیت اولیه

جمعیت اولیه بصورت یک ماتریس می‌باشد که هر سطر مربوط به این ماتریس کروموزوم نامیده می‌شود. تعداد درایه‌های کروموزوم بستگی به تعداد متغیرهائی دارد که باید بهینه شود. هر متغیر در داخل یک محدوده معین قرار می‌گیرد. در این مسئله دو بهره کنترل‌کننده PI نشان داده شده در شکل‌های (۳ تا ۵) متغیرهائی هستند که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شوند. لذا چون سه کنترل‌کننده بطور همزمان بهینه می‌شوند در نتیجه ۶ متغیر برای بهینه‌سازی وجود دارند و بنابراین طول هر کروموزوم در جمعیت اولیه برابر ۶ می‌باشد و تعداد کروموزومها در جمعیت اولیه به صورت دلخواه در نظر گرفته می‌شود که در این مقاله برابر ۴۸ در نظر گرفته شده است. برای این مسئله ماتریس جمعیت اولیه (pop) به صورت زیر می‌باشد.

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

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

۷-۳- تابع هزینه

برای پیدا کردن بهینه‌ترین جواب باید هزینه مربوط به هر کروموزوم محاسبه شود و کروموزوم‌هائی که دارای هزینه کمتری هستند برای تولید حالتهای جدید انتخاب شده و بقیه حالتها از ماتریس اولیه حذف می‌شوند. بنابراین برای انتخاب بهینه‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده به منظور بهبود پایداری دینامیکی و افزایش میرائی سیستم تابع هزینه به صورت رابطه (۱۴) در نظر گرفته می‌شود [۱۴].

$$J = \alpha\int t|\Delta\omega|dt + \beta\int t|\Delta P_{e2}|dt + \gamma\int t|\Delta V_{DC}|dt \qquad (۱۴)$$

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 مبدلهای UPFC می‌باشد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

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

بعد از محاسبه هزینه هر کروموزم توسط تابع هزینه حالتهای برتر یا حالتهائی 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 (۱۵و۱۶) برای تولید حالتهای جدید استفاده شده است [۱۵]:

$$\text{کروموزوم پدر} = \left(k_{pp}^{pa}, k_{pi}^{pa}, k_{dp}^{pa}, k_{di}^{pa}, k_{vp}^{pa}, k_{vi}^{pa}\right) \qquad (۱۵)$$

$$\text{کروموزوم مادر} = \left(k_{pp}^{ma}, k_{pi}^{ma}, k_{dp}^{ma}, k_{di}^{ma}, k_{vp}^{ma}, k_{vi}^{ma}\right) \qquad (۱۶)$$

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

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 ۰/۰۵ 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 مجار 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))

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

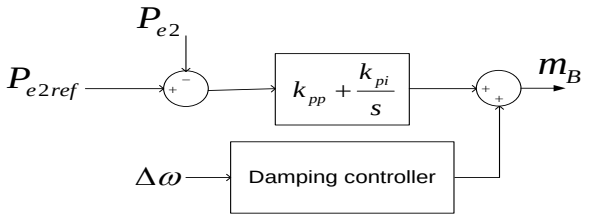
بهره‌های کنترل‌کننده ولتاژ DC (کنترل‌کننده شکل(۴))

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

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 $\left(P_{e2(ref)}\right)$ 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 کنترل کننده 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.

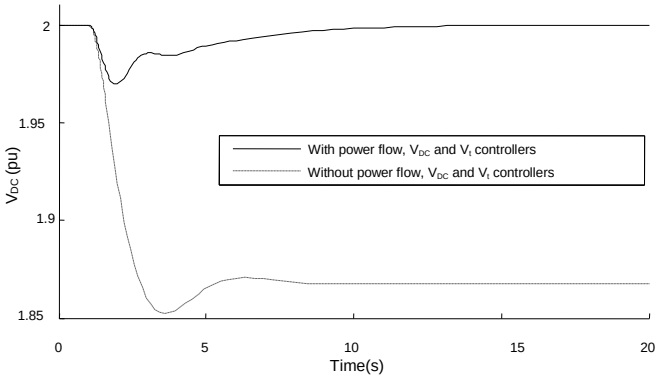
۹-۱- پاسخ سیستم به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۰۵ به ورودی توان مکانیکی T_m (T_m=0.05 pu)

در شکل‌های (۸ تا ۱۰) پاسخ دینامیکی سیستم به ازای اعمال ورودی پله با دامنه ۰/۰۵pu به ورودی توان مکانیکی در دوحالت بدون کنترل‌کننده‌های داخلی (کنترل‌کننده‌های شکل‌های (۳تا 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 می باشد. 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

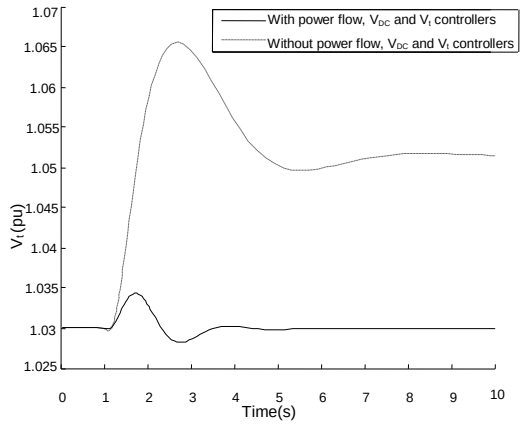
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

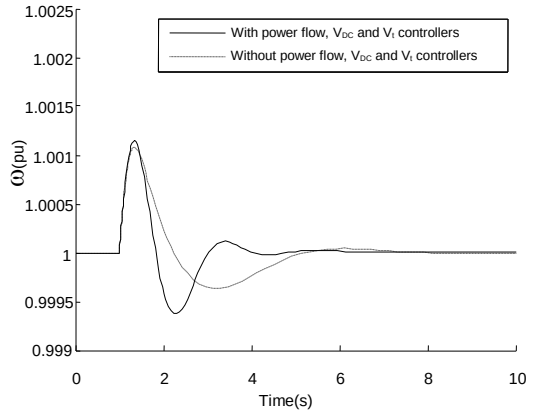
وجود کنترل‌کننده، میرائی نوسانات سیستم بیشتر از حالت بدون کنترل‌کننده بوده و تغییرات سرعت در این حالت سریعتر میرا می‌شود. لذا همانگونه که قبلا بیان شد هدف از طراحی کنترل‌کننده‌های ولتاژ پایانه و ولتاژ DC، کنترل دو پارامتر تثبیت ولتاژ پایانه و ولتاژ DC بعد از بروز یک اغتشاش در سیستم می‌باشد بگونه‌ای که پس از بروز اغتشاش این دو ولتاژ به مقدار اولیه قبل از خطا برگردند. همانطور که در شکل‌های (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 کنترل‌کننده‌های مذکور علاوه بر کنترل پارامترهای سیستم، میرائی سیستم را نیز نسبت به حالت بدون وجود کنترل‌کننده‌های مذکور افزایش داده‌اند. لذا دو کنترل‌کننده ولتاژ DC و ولتاژ پایانه به خوبی عمل کنترل لازم را انجام داده‌اند.



شکل (۸): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ DC به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۰۵pu به ورودی توان مکانیکی(T_m=0.05 pu)



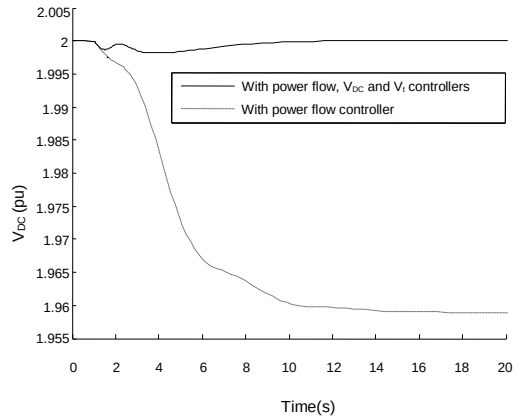
شکل (۹): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ پایانه به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۰۵pu به ورودی توان مکانیکی(T_m=0.05 pu)



شکل (۱۰): پاسخ دینامیکی تغییرات سرعت به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۰۵pu به ورودی توان مکانیکی (T_m=0.05 pu)

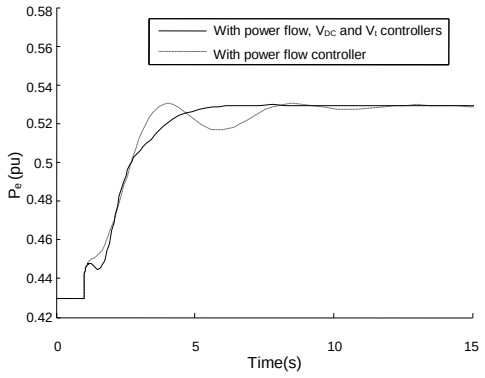
۹-۲- پاسخ دینامیکی سیستم به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۱ pu به ورودی توان مرجع خط دوم ($P_{e2(ref)}$=0.1 pu)

در این قسمت هدف بررسی عملکرد کنترل‌کننده توان عبوری از خط می‌باشد. لذا به توان مرجع خط دوم $\left(P_{e2(ref)}\right)$ یک ورودی پله با دامنه ۰/۱ اعمال می‌شود و هدف این است که توان عبوری از خط دوم به اندازه ورودی اعمال شده یعنی ۰/۱ افزایش یابد. در شکل‌های (۱۱ تا ۱۴) پاسخ سیستم به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۱ به ورودی توان مرجع خط دوم $\left(P_{e2(ref)}=0.1pu\right)$ نشان داده شده است.

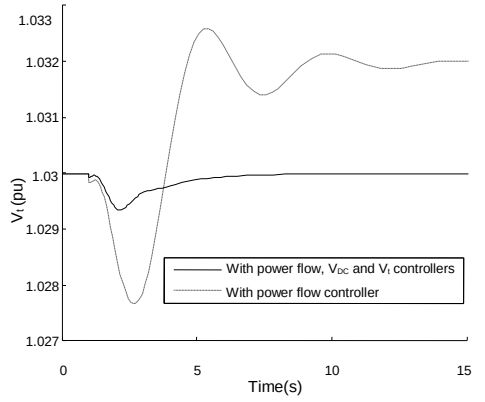


شکل (۱۱): پاسخ دینامیکی تغییرات ولتاژ DC به ازای اعمال پله دامنه ۰/۱pu به ورودی توان مرجع خط دوم($P_{e2(ref)}$=0.1 pu)

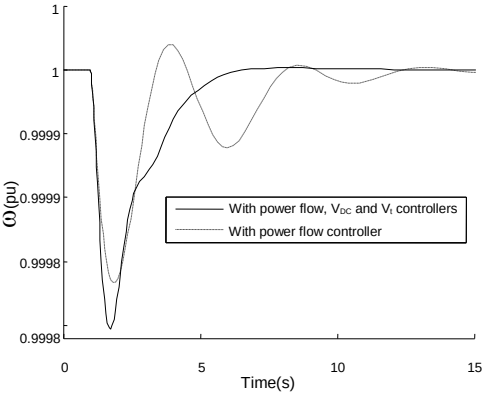
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]



شکل (۱۲): پاسخ دینامیکی تغییرات توان عبوری از خط دوم به ازای اعمال پله با دامنه ۰/۱pu به ورودی توان مرجع خط دوم (Pe2(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)

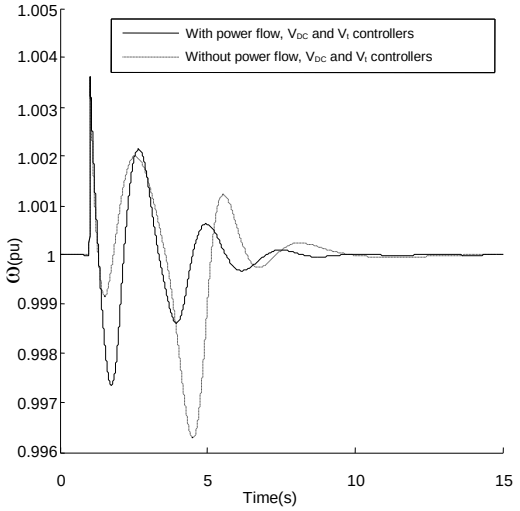
در این حالت چون هدف مطالعه کنترل‌کننده توان است لذا یکبار کنترل‌کننده توان بصورت تنها در مدار قرار گرفته است و بار دوم هر سه کنترل‌کننده بطور همزمان در مدار قرار گرفته‌اند. همانطور که به خوبی مشخص است در شکل (۱۱)، ولتاژ DC در حالتی که فقط کنترل‌کننده توان در مدار است دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد در حالیکه هنگام وجود هر سه کنترل‌کننده، 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 کنترل‌کننده در مدار هستند نسبت به حالتی که فقط کنترل‌کننده توان در مدار است بیشتر می‌باشد. در شکل(۱۳) نیز به خوبی مشخص است که ولتاژ پایانه در حالتی که فقط کنترل‌کننده توان در مدار است دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد ولی در هنگام وجود هر سه کنترل‌کننده، 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 کنترل‌کننده، میرائی نوسانات سیستم بیشتر از حالتی است که فقط کنترل‌کننده توان در مدار بوده و تغییرات سرعت در این حالت سریعتر میرا می‌شود.

لذا بطور کلی می‌توان بیان نمود که با وجود کنترل‌کننده توان، توان عبوری از خط به اندازه ورودی اعمال شده به توان مرجع تغییر خواهد کرد و این به معنای عملکرد مناسب کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده توان از کنترل‌کننده‌های 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.

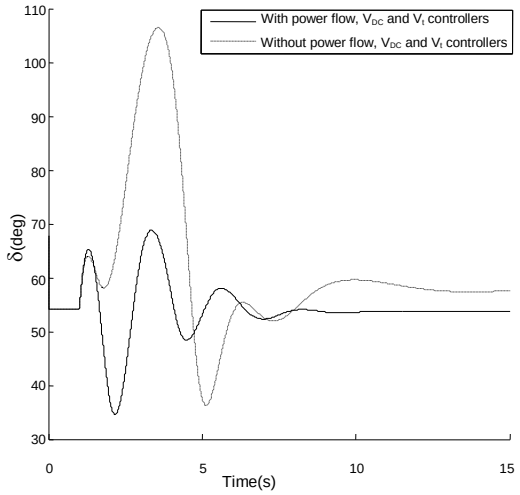
۳-۹- بررسی اتصال کوتاه سه فازه در سیستم

در این قسمت برای بررسی تاثیر کنترل‌کننده‌های 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 کنترل‌کننده‌های طراحی شده، پاسخ سیستم نسبت به حالتی که کنترل‌کننده‌ها در مدار نیستند مناسب‌تر بوده و سریعتر میرا می‌شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]



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- نتیجه‌گیری

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 کنترل‌کننده میراساز مناسب می‌توان علاوه بر پایدارسازی سیستم قدرت متصل شده با UPFC میرائی سیستم را نیز افزایش داد. بعد از پایدارسازی می‌توان با طراحی کنترل‌کننده مناسب برای UPFC توسط کنترل همزمان توان عبوری از خط و ولتاژ شینه‌ای که UPFC بر روی آن قرار دارد دست یافت. جهت افزایش پایداری بیشتر شبکه و میرائی بیشتر نوسانات سیستم قدرت متصل شده با UPFC می‌توان به جای استفاده از یک کنترل‌کننده میراساز از ۲ یا چند کنترل‌کننده میراساز بطور همزمان استفاده کرد که با توجه به اینکه UPFC دارای ۴ ورودی است و امکان اعمال کنترل‌کننده میراساز بر روی هر ۴ ورودی بطور همزمان وجود دارد. لذا UPFC دارای این قابلیت قوی در پایدارسازی و افزایش میرائی شبکه می‌باشد و این امکان را به ما می‌دهد که با افزایش تعداد کنترل‌کننده 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 می‌باشد به صورتی که نوسانات سیستم نیز بطور مناسبی میرا گردد. همانطور که نتایج نشان می‌دهند پارامترهای سیستم مانند ولتاژ DC و ولتاژ پایانه ماشین سنکرون در حالت بدون کنترل‌کننده دارای خطای حالت ماندگار هستند ولی با وجود کنترل‌کننده‌های طراحی شده این متغیرها تثبیت شده و خطای حالت ماندگار آنها از بین می‌رود، همچنین با کنترل‌کننده توان، توان عبوری از خط را می‌توان تغییر داد و در عین حال ولتاژهای سیستم نیز با کنترل‌کننده‌های مناسب تثبیت می‌شوند. همچنین کنترل‌کننده‌های مذکور علاوه بر کنترل پارامترهای مورد نظر بر روی میرائی سیستم نیز تاثیر داشته و باعث افزایش میرائی نوسانات سیستم شده‌اند. بطور کلی می‌توان بیان نمود که کنترل‌کننده‌های UPFC در حالت بروز اغتشاشات کوچک و اغتشاشات بزرگ، عملکرد مناسبی در میرائی و کنترل پارامترهای سیستم داشته‌اند که نتایج شبیه‌سازی موکد این امر می‌باشد.

پیوست

الف-مشخصات سیستم در نقطه نامی

Generator	$M = 8^{\mathrm{Mj}}/_{\mathrm{MVA}}$ $T'_{do} = 5.044\,\mathrm{sec}$	$X_d = 1\mathrm{pu}$
	$X_q = 0.6\mathrm{p.u}$ $X'_d = 0.3\mathrm{pu}$	$D = 0$
Excitation system	$K_a = 10$	$T_a = 0.05s$
Transformers	$X_{tE} = 0.1pu$	$X_E = 0.1pu$
	$X_B = 0.1pu$	
Transmission line	$X_{T1} = 1\mathrm{pu}$	$X_{T2} = 1.3pu$
Operating condition	$P = 1pu$	$Q = 0.3pu$
	$V_t = 1.05pu$	
DC link parameter	$V_{Dc} = 2pu$	$C_{DC} = 3pu$
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 می‌باشد:

$$0 \le m_B \le 2$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

ب- فهرست متغیرها

H: ثابت اینرسی

ω_n: فرکانس طبیعی نوسانات

Xe: راکتانس معادل سیستم

X_T: راکتانس خط انتقال اول

X_{BV}: راکتانس خط انتقال دوم

X_{tE}: 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 بی‌نهایت

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 کنترل‌کننده میراساز

T_1, T_2: ثوابت زمانی کنترل‌کننده 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.

[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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]