

طراحی کنترل کننده یک پارچه توان به صورت دوخطی جهت بهبود پایداری شبکه

مجید نیری پور، علی یزدیان ورجانی و مصطفی محمدیان

فوق جهت افزایش پایداری گذرا و تثبیت توان‌های انتهایی خط از روابط توان‌های دریافتی انتهایی خط مشتق‌گیری و با صفر قرار دادن آن، کنترل کننده مبدل سری طراحی شده است. در این طراحی‌ها جهت به دست آوردن روابط کنترلی مناسب، لازم است که از اثر مقاومت‌های موجود در مسیر مبدل سری صرف نظر گردد. همچنین از کنترل کننده کلاسیک PI جهت مبدل موازی استفاده شده و با توجه به قرار گرفتن مبدل موازی در طرف باس کنترل شده ولتاژ و عدم عملکرد کنترل کننده مبدل موازی در تثبیت ولتاژ AC باس مربوطه اثر عملکرد هم‌زمان این کنترل کننده با کنترل کننده مبدل سری در نظر گرفته نشده است.

مرجع [۹] نیز به طراحی و به دست آوردن سیگنال‌های مدوله‌کننده‌ای که با خروجی کنترل کننده‌های PI جمع می‌شود پرداخته است. مزیت مهم کنترل کننده PI سادگی و عملکرد مطلوب آن در حالت دائم و پاسخ مطلوب به اغتشاش‌هایی با دامنه نسبتاً کم بوده و عیب آن عدم پاسخ مناسب و ایجاد نوسان در اثر اغتشاش‌های شدید و مقاوم نبودن آن به تغییر پارامترهای شبکه و تغییر نقطه کار می‌باشد. این عیب با طراحی کنترل کننده‌های غیر خطی [۱۰] و [۱۱] برطرف شده است ولی پیچیدگی ساختار غیر خطی این کنترل کننده‌ها از جمله مشکلات آن در پیاده‌سازی می‌باشد.

به دست آوردن یک قانون کنترل کلی برای دو مبدل موازی و سری که اثرات کنترل کننده مبدل‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته شده و به طور یکجا طراحی شده باشد و در عین سادگی توانایی خوبی جهت افزایش پایداری گذرا داشته باشد از جمله اهداف این مقاله می‌باشد. این کار با منظور نمودن تغییرات ولتاژ خازن DC در معادلات حالت و کنترلی و طراحی کنترل کننده‌های دو مبدل به طور هم‌زمان صورت می‌گیرد. در این مقاله ابتدا به بررسی و عملکرد UPFC و به دست آوردن روابط مربوطه پرداخته شده است. در قسمت ۳ طراحی کنترل کننده و در قسمت ۴ به شبیه‌سازی و در قسمت ۵ نتایج ارائه شده است.

۲- عملکرد کنترل کننده یک پارچه توان (UPFC)

شکل ۱ بلوک دیاگرام UPFC قرار گرفته در یک شبکه سه‌فاز و مدار معادل آن را نشان می‌دهد. UPFC شامل دو مبدل سه‌فاز بوده که طرف DC آنها توسط خازنی به هم متصل می‌شود. طرف AC مبدل موازی توسط ترانس سه‌فازی با شبکه موازی و طرف AC مبدل سری از طریق ترانس سه‌فاز دیگری با خط سری شده و ولتاژی را به صورت سری در مسیر خط قرار می‌دهد [۱۲].

با تغییر ولتاژ سری اعمالی توسط مبدل سری می‌توان توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط را تغییر و در مقادیر مشخصی تنظیم کرد. مبدل موازی نیز علاوه بر تأمین توان اکتیو مورد نیاز مبدل سری جهت تثبیت ولتاژ خازن، قابلیت تولید یا مصرف توان راکتیو به طور مستقل از مبدل سری جهت تنظیم ولتاژ در باس متصل شده به آن را دارد [۱۳].

چکیده: در این مقاله مدل کنترل کننده یک پارچه توان (UPFC) با استفاده از فرم اصلاح شده معادلات دوخطی بیان شده است. سپس با استفاده از روش دوم لیاپانوف و با در نظر گرفتن تابع انرژی ورودی‌ها طوری به دست آورده شده که تحت شرایط معینی مشتق تابع انرژی همواره نزولی باشد. در نهایت کنترل کننده به دو روش طراحی می‌شود. در روش اول تغییرات متغیرهای حالت به عنوان ورودی کنترل کننده جهت به دست آوردن سیگنال‌های مدوله‌کننده به مبدل‌های موازی و سری در نقطه کار اضافه می‌شوند. در روش دوم، متغیرهای حالت غیر خطی به کنترل کننده مبدل سری اعمال و از کنترل کننده PI در مبدل موازی استفاده می‌شود. مقایسه این دو نوع کنترل کننده با کنترل کننده PI بیانگر کاهش دامنه نوسان اول پس از رفع اغتشاشات بزرگ می‌باشد. سادگی کنترل کننده و طراحی کنترل کننده‌های خطی مبدل موازی و سری به طور هم‌زمان از مزیت‌های استفاده از این روش کنترلی نسبت به کنترل کننده‌های PI می‌باشد.

کلید واژه: کنترل کننده یک پارچه توان، مبدل موازی، مبدل سری.

۱- مقدمه

کنترل کننده‌های یک پارچه توان (UPFC) از مهم‌ترین و کامل‌ترین صورت ادوات الکترونیک قدرت به کار برده شده در سیستم‌های انتقال (FACTS) هستند که قادرند توان‌های عبوری از خط را در مقدار معینی به عنوان مرجع تنظیم کرده و با تنظیم توان راکتیو تولیدی یا مصرفی دو طرف خود به طور مستقل از هم، ولتاژ دو طرف خود را تنظیم نماید [۱]. UPFC علاوه بر وظایف اصلی فوق اثراتی را نیز در شبکه متصل شده به آن ایجاد کرده که از جمله می‌توان به بهبود نوسان‌های زاویه توان و میرا کردن نوسان‌های ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای [۲] و [۳] و افزایش پایداری گذرا اشاره نمود [۴] و [۵].

با توجه به وجود دو کنترل کننده مربوط به مبدل موازی و سری UPFC که معمولاً به صورت مجزا طراحی می‌شوند، [۶] و [۷] به بررسی عملکردهای تداخلی این دو کنترل کننده پرداخته است و با بیان عملکردهای پایدار دو کنترل کننده موازی و سری به طور مستقل از یکدیگر، نشان داده شده است که عملکردهای هم‌زمان دو کنترل کننده تحت شرایطی ناپایدار می‌شود. به همین علت برخی از مراجع از جمله [۸] فقط به طراحی یکی از کنترل کننده‌ها (مبدل سری) پرداخته و کنترل کننده دیگر به صورت PI مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع

این مقاله در تاریخ ۱۱ فروردین ماه ۱۳۸۶ دریافت و در تاریخ ۸ دی ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

مجید نیری پور، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، صندوق پستی ۳۱۳-۷۱۵۵۵ (email: nayeri@sutech.ac.ir).

علی یزدیان، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، کدپستی ۱۶۸۴۴ (email: yazdian@modares.ac.ir).

مصطفی محمدیان، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، کدپستی ۱۶۸۴۴ (email: mohamadian@modares.ac.ir).

$$P_E = \text{Re}\{V_{Ea}I_{Ea}^* + V_{Eb}I_{Eb}^* + V_{Ec}I_{Ec}^*\} \quad (۴)$$

$$P_B = \text{Re}\{V_{Ba}I_{Ba}^* + V_{Bb}I_{Bb}^* + V_{Bc}I_{Bc}^*\}$$

که در آن P_E و P_B به ترتیب توان‌هایی هستند که به مبدل موازی وارد و از مبدل سری خارج می‌شوند.

با در نظر گرفتن جهت‌های فرض شده در شکل، P_E و P_B مثبت و جهت انتقال توان اکتیو از مبدل موازی به سری می‌باشد. همچنین در صورتی که توان اکتیو مبدل موازی و سری برابر باشد، ولتاژ دو سر خازن ثابت می‌ماند. در غیر این صورت رابطه تعادل توان اکتیو به هم خورده و ولتاژ خازن نیز دچار تغییرات خواهد شد. روابط طرف DC مبدل‌ها نیز به صورت زیر بیان می‌شود

$$P_E = V_{dc}I_{Edc} \quad (۵)$$

$$P_B = V_{dc}I_{Bdc}$$

$$I_{Edc} = I_{Bdc} + I_{dc} \quad (۶)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_{dc}}{C} - \frac{V_{dc}}{CR_p}$$

R_p مقاومتی است که معادل تلفات سوئیچینگ می‌باشد و در حالت دائم داریم

$$R_p = \frac{V_{dc}^2}{|P_E - P_B|} \quad (۷)$$

در حالت دائم نیز مشتق ولتاژ خازن برابر صفر می‌باشد. با نوشتن معادلات (۱) در مختصات d-q داریم

$$V_{\gamma d} = R_E I_{ED} + L_E \frac{dI_{ED}}{dt} - \omega I_{EQ} + V_{ED}$$

$$V_{\gamma q} = R_E I_{EQ} + L_E \frac{dI_{EQ}}{dt} + \omega I_{ED} + V_{EQ} \quad (۸)$$

$$V_{\gamma d} = -V_{BD} + R_B I_{BD} + L_B \frac{dI_{BD}}{dt} - \omega I_{BQ} + V_{\gamma d}$$

$$V_{\gamma q} = -V_{BQ} + R_B I_{BQ} + L_B \frac{dI_{BQ}}{dt} + \omega I_{BD} + V_{\gamma q}$$

همچنین از (۲) و (۳) خواهیم داشت

$$V_{\gamma} = |V_{\gamma}| \cos \delta_{\gamma} + J |V_{\gamma}| \sin \delta_{\gamma} = V_{\gamma d} + J V_{\gamma q}$$

$$V_E = V_{ED} + J V_{EQ}$$

$$V_{ED} = V_{dc} k_E m_E \cos(\delta_{\gamma} - \delta_E)$$

$$V_{EQ} = V_{dc} k_B m_B \sin(\delta_{\gamma} - \delta_E) \quad (۹)$$

$$V_B = V_{BD} + J V_{BQ}$$

$$V_{BD} = V_{dc} k_B m_B \cos(\delta_{\gamma} + \delta_B)$$

$$V_{BQ} = V_{dc} k_B m_B \sin(\delta_{\gamma} + \delta_B)$$

از (۶) نیز خواهیم داشت

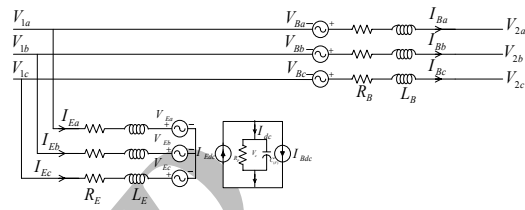
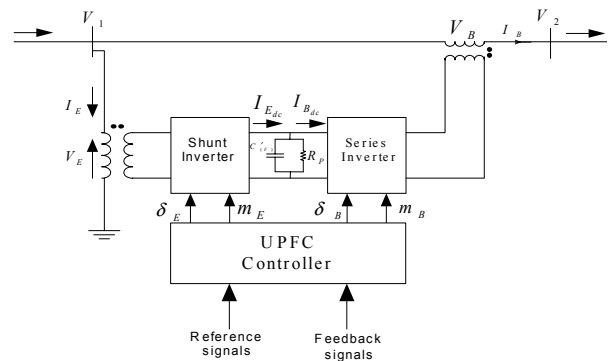
$$I_{dc} = I_{Edc} - I_{Bdc}$$

$$I_{Edc} = \frac{2}{3} \frac{V_{ED} I_{ED} + V_{EQ} I_{EQ}}{V_{dc}}$$

$$= \frac{2}{3} (k_E m_E (\cos(\delta_{\gamma} - \delta_E) I_{ED} + \sin(\delta_{\gamma} - \delta_E) I_{EQ})) \quad (۱۰)$$

$$I_{Bdc} = \frac{V_{BD} I_{BD} + V_{BQ} I_{BQ}}{V_{dc}}$$

$$= \frac{2}{3} (k_B m_B (\cos(\delta_{\gamma} + \delta_B) I_{BD} + \sin(\delta_{\gamma} + \delta_B) I_{BQ}))$$



شکل ۱: کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) و مدار معادل.

در واقع با فرارگرفتن UPFC در مسیر یک خط قسمتی از توان اکتیو عبوری، توسط مبدل موازی دریافت و از طریق لینک DC به مبدل سری منتقل و توسط این مبدل به خط تزریق می‌شود. البته جهت انتقال توان اکتیو با توجه به عملکرد کنترل کننده می‌تواند معکوس شود. منبع ولتاژ سری اعمال شده توسط مبدل سری با تنظیم اندازه و زاویه خود می‌تواند باعث تغییر توان انتقالی و همچنین تنظیم ولتاژ خط در طرف مبدل سری شود.

با توجه به شکل ۱ داریم

$$V_{\gamma} = R_E I_E + J X_E I_E + V_E \quad (۱)$$

$$V_{\gamma} = -V_B + R_B I_B + J X_B I_B + V_{\gamma}$$

که در آن V_E و V_B ولتاژهای خروجی مبدل موازی و سری هستند که از طریق ترانس‌های مربوطه به طرف شبکه منتقل شده و داریم

$$|V_E| = V_{dc} k_E m_E \quad (۲)$$

$$|V_B| = V_{dc} k_B m_B$$

از طرفی

$$V_{\gamma} = |V_{\gamma}| \angle \delta_{\gamma}$$

$$V_E = |V_E| \angle \delta_E$$

$$V_B = |V_B| \angle \delta_B \quad (۳)$$

در روابط فوق (δ_E, m_E) و (δ_B, m_B) به ترتیب نسبت مدلاسیون دامنه و زاویه فاز در مبدل‌های موازی و سری می‌باشند. K_B و K_E نیز به ترتیب نسبت تبدیل ترانس‌های مربوط به مبدل موازی و سری می‌باشند که ولتاژ را از طرف خروجی AC مبدل‌ها به طرف متصل شده به شبکه منتقل می‌کنند. این دو نسبت معمولاً بزرگ‌تر از یک می‌باشند. یعنی ولتاژ طرف DC مبدل‌ها (V_{dc}) در حداکثر مدلاسیون دامنه از ولتاژ AC اعمالی به شبکه (V_B و V_E) کوچک‌تر است. البته با تغییر نسبت مدلاسیون دامنه و زاویه فاز می‌توان به ترتیب اندازه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ اعمالی را تغییر داد.

روابط (۱) و (۲) و (۳) را می‌توان برای هر سه فاز (a, b, c) نوشت. روابط توان نیز چنین بیان می‌شوند [۱۴]

بنابراین داریم

$$\dot{X} = AX + \left(\sum_{K=1}^m P_K U_K\right)X + B \quad (15)$$

۳- طراحی کنترل کننده های UPFC با استراتژی تابع انرژی لیاپانوف

در به دست آوردن قانون کنترل ابتدا تابع انرژی مثبت و معینی را انتخاب و لازم است که ورودی های انتخاب شده در اعمال به سیستم، انرژی کل سیستم را جهت پایداری کاهش دهد. به عبارت دیگر مشتق تابع انرژی منفی و معین شود. برای این منظور معادله حالت را به فرم کلی زیر در نظر می گیریم

$$\frac{dX}{dt} = AX + \sum_{k=1}^m P_k U_k X + B \quad (16)$$

با در نظر گرفتن ماتریس معین و مثبت Q و تابع لیاپانوف به صورت

$$V = X^T Q X \quad (17)$$

ورودی های زیر با شرط $\alpha_k > 0$ در نقطه کار سیستم فوق را پایدار خواهد کرد

$$U_k = -\alpha_k [P_k X]^T Q X, \quad k = 1, \dots, m \quad (18)$$

زیرا با جایگذاری ورودی های (۱۸) در (۱۷) و مشتق گیری خواهیم داشت

$$I_{dc} = I_{Edc} - I_{Bdc}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_{dc}}{C} - \frac{V_{dc}}{CR_p} = \frac{3}{2} \frac{1}{C} \times \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &k_E m_E (\cos(\delta_1 - \delta_E) I_{ED} + \sin(\delta_1 - \delta_E) I_{EQ}) \\ &-k_B m_B (\cos(\delta_1 + \delta_B) I_{BD} + \sin(\delta_1 + \delta_B) I_{BQ}) \end{aligned} \right\} - \frac{V_{dc}}{CR_p}$$

با در نظر گرفتن متغیرهای جریان محور d و q در میدل های سری و موازی و ولتاژ دو سر خازن به عنوان متغیرهای حالت معادلات حالت بر حسب پیرونیته طبق (۱۲) خواهد شد.

در معادلات فوق داریم

$$\begin{aligned} U_1 &= k_B m_B \cos(\delta_1 + \delta_B) \\ U_2 &= k_B m_B \sin(\delta_1 + \delta_B) \\ U_3 &= -k_E m_E \cos(\delta_1 - \delta_E) \\ U_4 &= -k_E m_E \sin(\delta_1 - \delta_E) \\ X_1 &= I_{BD}, X_2 = I_{BQ}, X_3 = I_{ED}, X_4 = I_{EQ}, X_5 = V_{dc} \end{aligned} \quad (13)$$

معادلات حالت فوق نسبت به ورودی و متغیرهای حالت خطی هر یک به تنهایی خطی ولی در مجموع غیر خطی می باشد و می توان آن را به فرم معادلات دو خطی (۱۴) بیان نمود.

بنابراین

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \end{bmatrix} = \omega_b \begin{bmatrix} \frac{-R_B}{L_B} & \frac{\omega}{\omega_b} & \cdot & \cdot & \frac{U_1}{L_B} \\ -\omega & \frac{-R_B}{L_B} & \cdot & \cdot & \frac{U_2}{L_B} \\ \cdot & \cdot & \frac{-R_E}{L_E} & \frac{\omega}{\omega_b} & \frac{-U_3}{L_E} \\ \cdot & \cdot & \frac{-\omega}{\omega_b} & \frac{-R_E}{L_E} & \frac{-U_4}{L_E} \\ -\gamma_1 \Delta U_1 C & -\gamma_1 \Delta U_2 C & +\gamma_1 \Delta U_3 C & +\gamma_1 \Delta U_4 C & \frac{-C}{R_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} + \omega_b \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{L_B} & \cdot & \frac{-\gamma}{L_B} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{\gamma}{L_B} & \cdot & \frac{-\gamma}{L_B} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\gamma}{L_E} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{\gamma}{L_E} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \\ V_{2d} \\ V_{2q} \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{L_B} (V_{1d} - V_{2d}) \\ \frac{\omega_b}{L_B} (V_{1q} - V_{2q}) \\ \frac{\omega_b}{L_E} (V_{1d}) \\ \frac{\omega_b}{L_E} (V_{1d}) \\ \cdot \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_B \omega_b}{L_B} & \omega & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\omega & \frac{-R_B \omega_b}{L_B} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \frac{-R_E \omega_b}{L_E} & \omega & \cdot \\ \cdot & \cdot & -\omega & \frac{-R_E \omega_b}{L_E} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{-C \omega_b}{R_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} U_1$$

$$\begin{aligned} &+ \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -\gamma_1 \Delta C \omega_b & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} U_2 + \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} U_3 + \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} U_4 \\ &= AX + P_1 U_1 X + P_2 U_2 X + P_3 U_3 X + P_4 U_4 X + D = AX + \sum_{K=1}^m P_K U_K X + D \quad (14) \end{aligned}$$

بنابراین ماتریس Q قرار گرفته در (۱۷) و (۱۸) را می‌توان چنین در نظر گرفت

$$Q' = \begin{bmatrix} \frac{4q_1}{9(V_{rD}^2 + V_{rQ}^2)} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{4q_1}{9(V_{rD}^2 + V_{rQ}^2)} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & q_r & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & q_r & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & q_b \end{bmatrix} \quad (27)$$

ورودی‌های به‌دست آمده از (۱۸) از رابطه فوق تأثیر می‌گیرد. از طرفی با توجه به ظرفیت UPFC، دامنه ورودی‌های UPFC دارای حد معینی بوده که محدودیتی برای ورودی‌های اعمالی (۱۸) می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی

شکل ۲ مراحل طراحی و شبیه‌سازی UPFC قرار گرفته در یک شبکه قدرت سه‌فاز را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها ابتدا مؤلفه‌های DQ هر یک از توالی‌های مثبت، منفی و صفر ولتاژهای سه‌فاز دو طرف UPFC و ولتاژهای میدل سری و موازی محاسبه و سپس با توجه به این مؤلفه‌های ولتاژ، (۱۴) برای توالی‌های مثبت، منفی و صفر به‌طور جداگانه حل و جریان‌های توالی‌های مثبت، منفی و صفر دو میدل به‌دست آورده شده و در نهایت به مؤلفه‌های DQ در مختصات کلی تبدیل می‌شوند. جهت اعمال کنترل‌کننده ابتدا مؤلفه‌های DQ را به مختصات dq محلی تبدیل می‌کنیم. برای این منظور ولتاژ ورودی UPFC را $(V_1 = |V_1| \angle \delta_1)$ در مختصات dq محلی به عنوان مرجع و به صورت $V_{1d} + jV_{1q} = |V_1| \angle \delta_1$ در نظر می‌گیریم. به‌همین ترتیب با کاهش زاویه سایر متغیرهای ولتاژ و جریان به‌اندازه δ_1 مقادیر متغیرها در مختصات محلی مرجع به‌دست خواهد آمد. بنابراین اگر $Y_1 = |Y_1| \angle \delta_1 + \alpha$ متغیر ولتاژ یا جریان در مختصات کلی (DQ) باشد، مقدار آن در مختصات مرجع محلی (dq) به‌صورت $|Y_1| \angle \alpha$ خواهد بود و داریم

$$\begin{bmatrix} Y_d \\ Y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_D \\ Y_Q \end{bmatrix} \quad (28)$$

با استفاده از تبدیل فوق و انتقال متغیرها به مختصات محلی (dq)، کنترلر (۱۸) اعمال و ولتاژ خروجی میدل‌ها به‌دست آمده و سپس با توجه به معکوس رابطه فوق، این ولتاژها به مختصات کلی (DQ) تبدیل و در نهایت به ولتاژهای سه‌فاز خروجی میدل‌ها تبدیل و به شبکه اعمال می‌شوند.

با توجه به روند تجزیه متغیرهای ولتاژ و جریان به‌صورت توالی‌های مثبت، منفی و صفر در تحلیل و طراحی، شبکه و کنترلرهای مربوطه عملکرد مطلوبی تحت شرایط متعادل و نامتعادل همچون اتصال کوتاه‌های نامتعادل تک‌فاز و دوفاز خواهد داشت.

جهت بررسی اثر کنترل‌کننده طراحی‌شده، شبیه‌سازی بر روی شبکه دوماشین نشان داده شده در شکل ۳ صورت گرفته است. ژنراتورهای قرار گرفته در این شبکه دارای توان نامی ۱۰۰۰ MVA و ولتاژ ۱۳/۸ KV می‌باشند. طرف راست باس پنج به یک شبکه معادل با ظرفیت اتصال کوتاه ۲۵+۵ MVA و امپدانس اتصال کوتاه $Z_{sc} = 0.2645 \Omega$ متصل شده که ۸۱۱ MVA از طریق UPFC و ۶۷۲ MVA از طریق خط دوماشین پایین به آن وارد می‌شود.

$$\dot{V} = X^T [QA + A^T Q] X - 2\alpha_k \sum_{k=1}^m [X^T Q (P_k X)]^2 \quad (19)$$

جمله اول عبارت فوق همواره منفی و جمله دوم آن نیز با شرط زیر همواره منفی و پایداری خواهیم داشت

$$\begin{bmatrix} (P_1 X)^T Q X \\ \vdots \\ (P_m X)^T Q X \end{bmatrix} \neq 0, \alpha_k > 0 \quad (20)$$

بنابراین با انتخاب ماتریس معین و مثبت Q و ضرایب $\alpha_k > 0$ ورودی‌های به‌دست آمده، خطای ایجادشده در حالت‌های سیستم را به صفر خواهد رساند.

در به‌دست آوردن تابع انرژی (۱۷) ماتریس Q به‌صورت قطری و با ضرایب مثبت در نظر گرفته می‌شود و این استراتژی خطای متغیرهای حالت را به صفر خواهد رساند.

برای رسیدن به استراتژی میراسازی نوسان توان، تابع انرژی (۱۷) را به‌صورت دو جزء زیر می‌نویسیم

$$\begin{aligned} V_{r1} &= X_{r1}^T Q_{r1} X_{r1} \\ V_{r-2} &= X_{r-2}^T Q_{r-2} X_{r-2} \end{aligned} \quad (21)$$

از طرفی رابطه توان‌های دریافتی در انتهای خط چنین می‌باشد

$$\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{rD} & V_{rQ} \\ -V_{rQ} & V_{rD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_r \end{bmatrix} \quad (22)$$

عبارت اول (۲۱) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

$$\begin{aligned} V_{r1} &= \frac{4}{9(V_{rD}^2 + V_{rQ}^2)^2} \left(\begin{bmatrix} V_{rD} & -V_{rQ} \\ V_{rQ} & V_{rD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \right)^T \times \\ & \begin{bmatrix} q_1 & q_c \\ q_d & q_r \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{rD} & -V_{rQ} \\ V_{rQ} & V_{rD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

رابطه فوق را می‌توان چنین نوشت

$$\begin{aligned} V_{r1} &= \frac{4}{9(V_{rD}^2 + V_{rQ}^2)^2} \times \\ & \left(\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \right)^T \left\{ \begin{bmatrix} V_{rD} & V_{rQ} \\ -V_{rQ} & V_{rD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 & q_c \\ q_d & q_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rD} & -V_{rQ} \\ V_{rQ} & V_{rD} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \\ &= \left(\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \right)^T Q' \begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

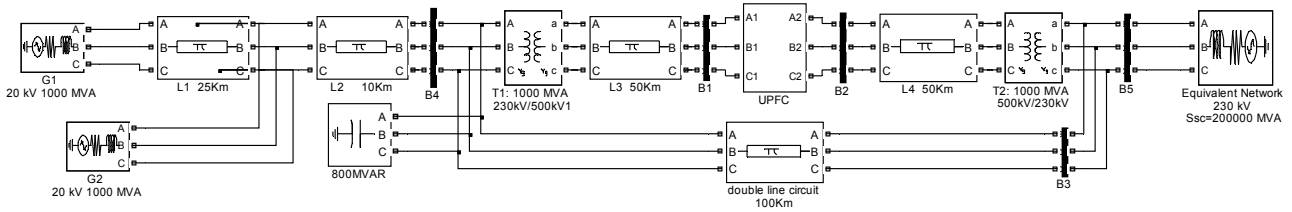
اگر در عبارت فوق فرض شود

$$q_c = q_d = 0, \quad q_1 = q_r \quad (25)$$

مؤلفه اول تابع انرژی چنین خواهد شد

$$\begin{aligned} V_{r1} &= \frac{4}{9(V_{rD}^2 + V_{rQ}^2)^2} \left(\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} q_1 & \cdot \\ \cdot & q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \\ &= \left(\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \right)^T Q' \begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

با توجه به آنکه ماتریس Q' در عبارت فوق مثبت معین می‌باشد، به‌کارگیری این استراتژی خطای توان‌های دریافتی در طرف راست UPFC را به صفر می‌رساند.



شکل ۳: شبکه دوماشین متصل شده به یک شبکه معادل.

کنترل کننده حاصل از (۱۸) که در شبیه سازی ها به کار می رود عبارتند از

$$\begin{aligned}
 U_v &= \alpha_v \frac{1}{V_v^r} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{L_B} \right) X_v X_\delta \\
 U_r &= \alpha_r \frac{1}{V_r^r} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{L_B} \right) X_r X_\delta \\
 U_f &= \alpha_f \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{L_E} \right) X_f X_\delta \\
 U_g &= \alpha_g \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{L_E} \right) X_g X_\delta
 \end{aligned} \tag{29}$$

برای بررسی اثرات واقعی، ژنراتورها به تنظیم کننده ولتاژ (AVR) و پایدارساز نوسانات سیستم (PSS) مجهز شده است.

شکل های ۴ تا ۱۰ نتایج حاصل از سه نوع کنترل کننده زیر را نشان می دهد:

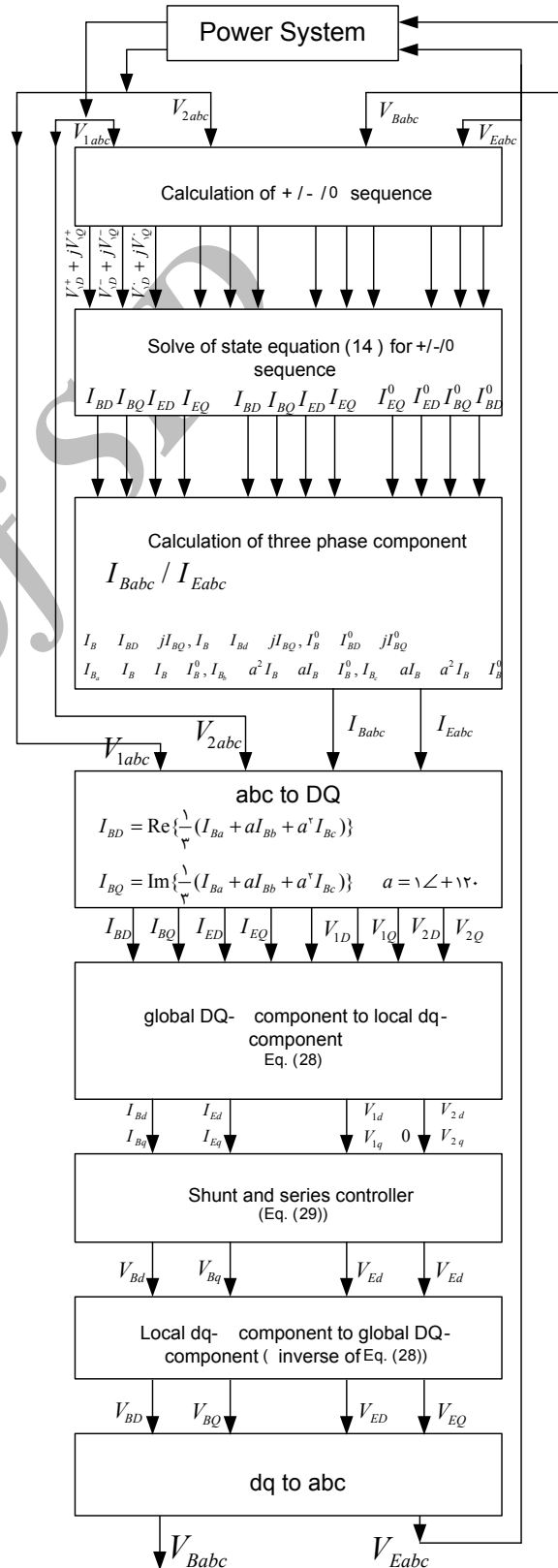
۱) کنترل کننده خطی حاصل از (۲۹)، که به عنوان سیگنال های مدوله کننده به سیگنال های ورودی در نقطه کار اضافه می شوند. در این حالت ماتریس Q' به صورت ثابت و از تغییرات V_r صرف نظر می شود.

۲) کنترل کننده غیر خطی U_v و U_r حاصل از (۲۹) در مبدل سری و کنترل کننده های PI در مبدل موازی جهت تنظیم ولتاژ باس ورودی و ولتاژ خازن.

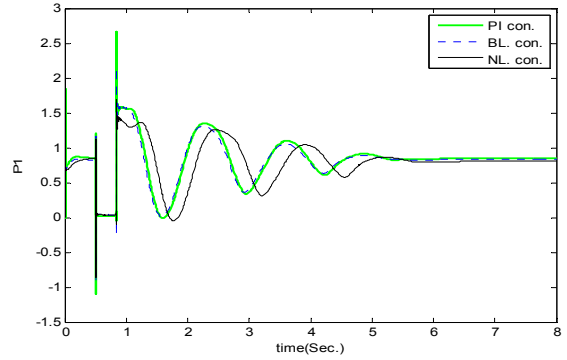
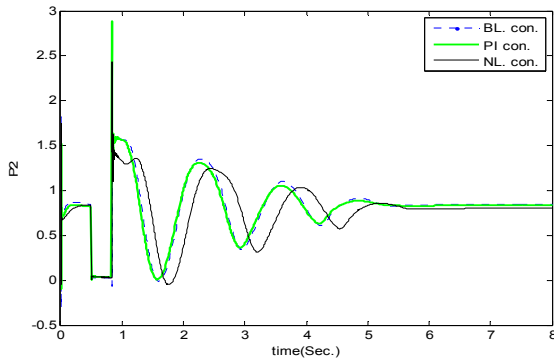
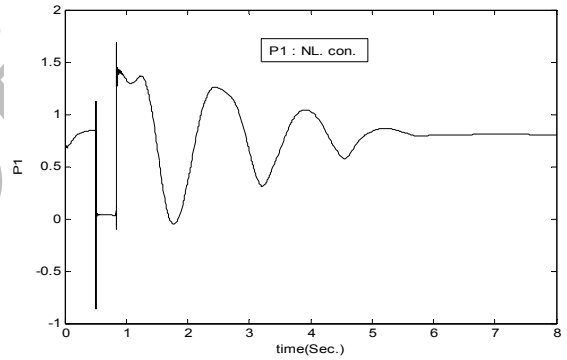
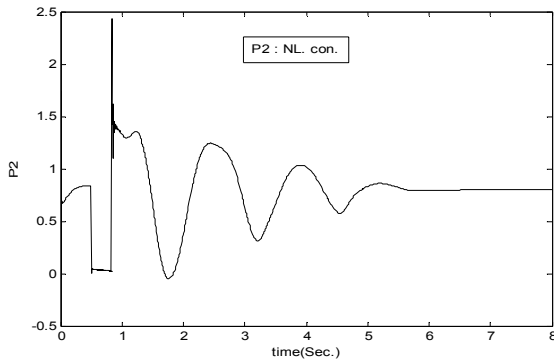
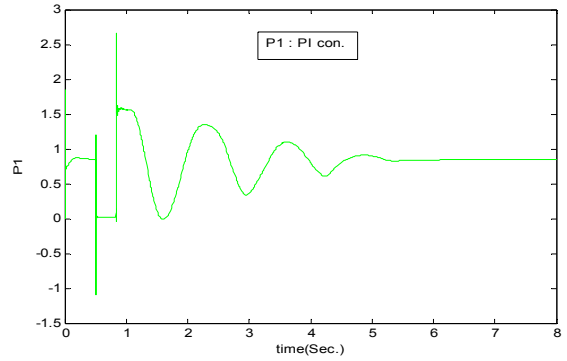
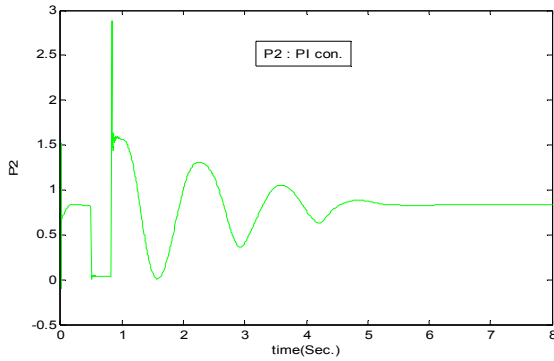
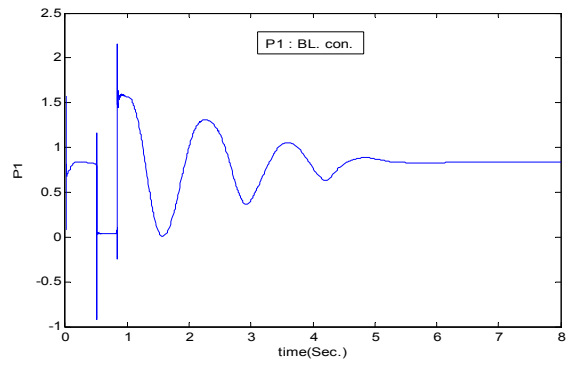
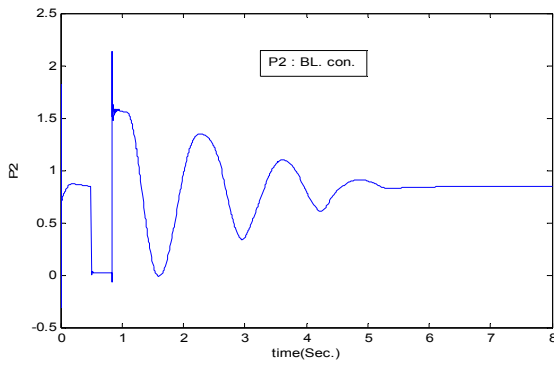
۳) کنترل کننده های PI در مبدل های موازی و سری. با توجه به اثرات تداخلی مبدل های موازی و سری بر یکدیگر [۷] و مشکل بودن دکوپله سازی در تعیین گین های ثابت (۲۹) جهت تنظیم ولتاژ و توان ها در نقطه کار کنترل کننده غیر خطی، نتایج مطلوبی حاصل نشده است. به همین علت در روش دوم شبیه سازی از کنترل کننده غیر خطی فقط در مبدل سری استفاده شده و در مبدل موازی کنترل کننده های PI به کار برده شده است.

در شبیه سازی های صورت گرفته در زمان $t = 0.5$ Sec اتصال کوتاه سه فاز در باس چهار شبکه ایجاد و پس از ۲۰ سیکل برطرف می شود. شکل ۴ توان اکتیو در باس ورودی و شکل ۵ توان اکتیو در باس خروجی UPFC را با استفاده از سه روش کنترلی فوق نشان می دهد که به صورت مجزا و همچنین جهت مقایسه یکجا آورده شده است. شکل ۶ نیز توان اکتیو را در سایر باس های شبکه در به کارگیری سه نوع کنترل کننده فوق نشان می دهد.

با مقایسه توان های اکتیو در باس های مختلف شبکه که با استفاده از سه روش مختلف کنترلی به دست می آید مشاهده می شود که کنترل کننده دوخطی طراحی شده باعث ایجاد دامنه نوسان کمتر بلافاصله پس از رفع اتصال کوتاه نسبت به کنترل کننده PI می شود. از طرفی با توجه به آنکه بهبود پاسخ گذرا تا حدودی باعث بدتر شدن پاسخ دینامیکی و برعکس بهبود پاسخ دینامیکی باعث بدتر شدن پاسخ گذرا خواهد شد [۶]، مشاهده می شود که در اینجا با بهتر شدن پاسخ گذرا، پاسخ دینامیکی چندان تغییر نکرده است.



شکل ۴: مراحل طراحی و شبیه سازی UPFC در شبکه قدرت.



شکل ۵: توان‌های اکتیو در باس خروجی UPFC.

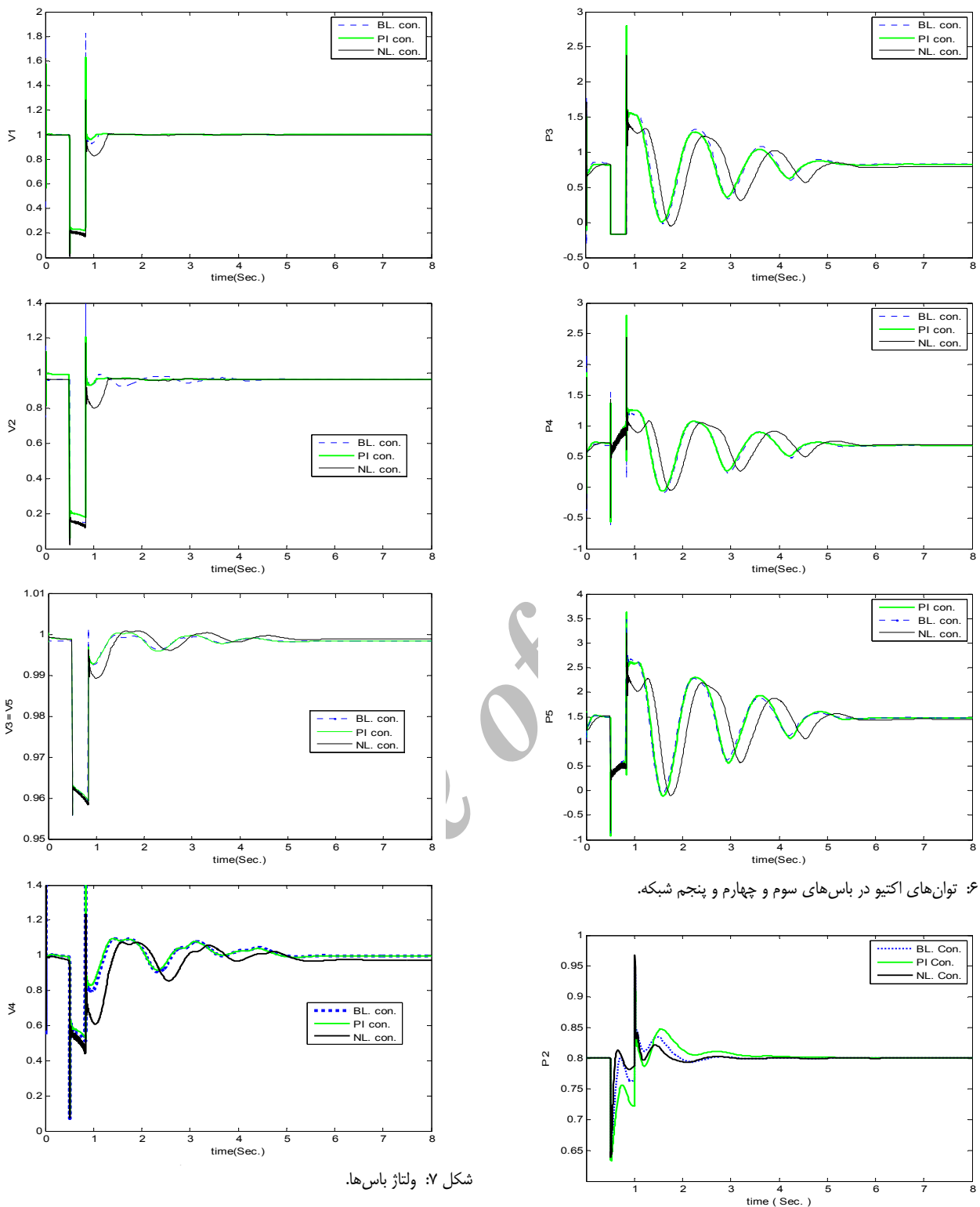
شکل ۴: توان‌های اکتیو در باس‌های ورودی UPFC.

افزایش پیک دامنه ولتاژ پس از رفع خطا خواهد شد. این نتیجه در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم دامنه ولتاژ پس از رفع خطا در کنترل‌کننده دوخطی با استفاده از متغیرهای حالت خطی‌شده به‌طور قابل توجهی از کنترل‌کننده PI بیشتر نیست. کنترل‌کننده غیرخطی نیز دامنه ولتاژ بلافاصله پس از رفع خطا کمتر داشته ولی نوسانات توان و ولتاژ آن دیرتر میرا شده است.

شکل ۸ نتایج حاصل از اتصال کوتاه تک‌فاز در باس خروجی UPFC را در $t = 0.5$ sec و به مدت 0.5 sec نشان می‌دهد. با توجه به روند شبیه‌سازی شکل ۲ در توانایی تحلیل‌های نامتعادل شبکه و کنترل‌کننده، مشاهده می‌شود که در هر دو حالت خطی و غیرخطی و همچنین

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش گین‌های ثابت (۲۹) یا به‌عبارت دیگر افزایش دامنه سیگنال‌های مدوله‌کننده باعث کاهش دامنه توان‌های اکتیو نوسانی پس از رفع اتصال کوتاه می‌شود. با توجه به آنکه کنترل‌کننده غیر خطی به‌کار برده شده در میدل سری برای ایجاد سیگنال‌های نقطه کار به گین بالاتری نسبت به کنترل‌کننده خطی نیاز دارد، پیک اولین نوسان کمتر داشته ولی نوسانات توان به‌طور مشهودی در زمان طولانی‌تر میرا می‌شود.

بهبود پاسخ گذرا و کاهش اولین پیک نوسان توان اکتیو پس از رفع خطا با توجه عملکرد سیستم در تولید توان راکتیو بلافاصله پس از رفع خطا قابل توجه بوده که موجب افزایش دامنه توان راکتیو و در نتیجه



شکل ۷: ولتاژ باس‌ها.

شکل ۶: توان‌های اکتیو در باس‌های سوم و چهارم و پنجم شبکه.

شکل ۸: توان خروجی UPFC به‌ازای اتصال کوتاه تک‌فاز در باس خروجی UPFC.

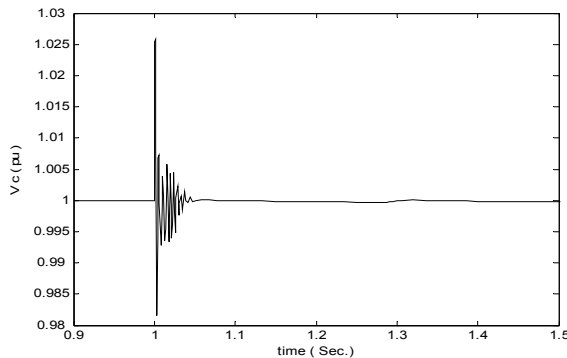
ژنراتور به سمت راست عبور می‌کند. با توجه به اینکه جمع کل این دو توان توسط مرجع ژنراتور تعیین می‌شود، قطع یک خط باعث عبور توان قطع شده از UPFC خواهد شد.

شکل ۹ نتایج حاصل از خروج خط دومداره موازی با UPFC را در زمان $t = 1$ sec به بعد نشان می‌دهد. در این حالت با توجه به توانایی کنترل کننده غیرخطی در پاسخ‌گویی به اغتشاش‌های بزرگ، تنها کنترل کننده غیرخطی به نحو مطلوبی قادر به میرا کردن نوسان توان شده است. در این حالت، دو نوع کنترل کننده خطی و PI وضعیت ناپایداری دارند. زیرا این دو نوع کنترل کننده تنها در مد عملکرد سیگنال کوچک، وضعیت مناسبی دارند.

کنترل کننده PI به صورت مطلوبی نوسان‌های توان میرا و پایداری بهبود یافته است. در این حالت به دلیل به کارگیری معادلات غیرخطی با دقت بیشتر، کنترل کننده غیرخطی توانایی بهتری در میراسازی نوسان توان دارد.

برای بررسی اثر این کنترل کننده تحت اغتشاش‌های بزرگ، فرض خروج خط دومداره موازی با UPFC را در $t = 0.5$ sec به بعد در نظر می‌گیریم. در این حالت نقطه کار طوری انتخاب شده که توان 0.8 pu و 0.2 pu به ترتیب توسط UPFC و خط دومداره موازی با آن از طرف دو

تغییرات متغیرهای حالت به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده‌های میدل موازی و سری استفاده شده است. با توجه به اثرات تداخلی میدل‌های موازی و سری بر یکدیگر و مشکل بودن دکوپله‌سازی در تعیین گین‌های ثابت کنترل‌کننده جهت تنظیم ولتاژ و توان‌ها در نقطه کار، کنترل‌کننده غیرخطی، نتایج مطلوبی نداشته و



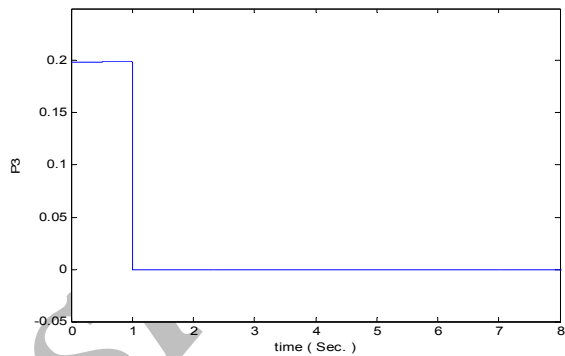
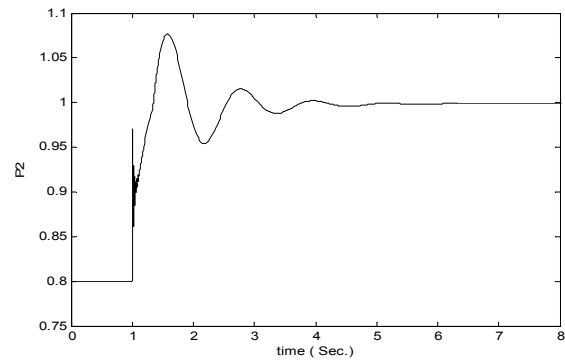
شکل ۱۰: ولتاژ DC خازن UPFC به‌ازای قطع ناگهانی خط دومداره موازی با UPFC در شبکه.

به‌همین علت در روش دوم شبیه‌سازی از کنترل‌کننده غیرخطی فقط در میدل سری استفاده و در میدل موازی کنترل‌کننده‌های PI به‌کار برده شده است. مقایسه نتایج حاصل از طراحی این دو نوع کنترل‌کننده با کنترل‌کننده PI بیانگر آن است که با افزایش دامنه سیگنال‌های مدوله‌کننده در محدوده مجاز پایداری، دامنه نوسان توان بلافاصله پس از رفع اتصال کوتاه در هر دو روش کنترلی به‌طور قابل توجهی کاهش و در عوض دامنه نوسان ولتاژ بلافاصله پس از رفع خطا در روش اول کنترلی، به مقدار ناچیزی نسبت به کنترل‌کننده PI بیشتر و در روش دوم کنترلی، دامنه نوسان ولتاژ بلافاصله بعد از رفع خطا کمتر ولی نوسانات ولتاژ دیرتر میرا خواهد شد.

همچنین با توجه به اینکه کنترل‌کننده غیرخطی قابلیت خوبی در بهبود پایداری سیستم به‌دنبال وقوع اغتشاش‌های بزرگ را دارد، در خطای بزرگ خروج خط از شبکه وضعیت پایداری را ایجاد می‌کند.

مراجع

- [1] E. V. Larsen, J. J. Sanchez-Gasca, and J. H. Chow, "Concepts for design of FACTS controllers, to damp power swings," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 948-956, May 1995.
- [2] H. Wang, "A unified model for the analysis of facts device in damping power system oscillations - part III: unified power flow controller," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 978-983, Jul. 2000.
- [3] P. K. Dash and S. Mishra, "Damping of multimodal power system oscillations by FACTS devices using non-linear Takagi-Sugeno fuzzy controller," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 481-490, 2003.
- [4] R. Mihalic, P. Zunko, and D. Povh, "Improvement of transient stability using unified power flow controller," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 10, no. 2, pp. 948-956, Jan. 1996.
- [5] H. Chen, Y. Wang, and R. Zhou, "Analysis of voltage stability enhancement via unified power flow controller," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Power System Technology*, vol. 1, pp. 403-408, 2000.
- [6] H. F. Wang, M. Jazaeri, and Y. J. Cao, "Analysis of control conflict between UPFC multiple control functions and their interaction indicator," *International J. of Control, Automation, and System*, vol. 3, no. 2, pp. 315-321, Jun. 2005.
- [7] H. F. Wang, "Interaction and multivariable design of multiple control function of a unified power flow controller," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, no. 7, pp. 591-600, 2002.
- [8] E. Golipour and S. Saadate, "Improving of transient stability of power systems using UPFC," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1677-1681, Apr. 2005.



شکل ۹: توان خروجی UPFC به‌ازای قطع ناگهانی خط دومداره موازی با UPFC در شبکه.

شکل ۱۰ ولتاژ خازن DC رابط بین دو میدل UPFC را در به‌کارگیری مدل‌سازی جدید و روش کنترل‌کننده غیرخطی، در اثر خروج خط دومداره از شبکه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با مدل‌سازی ولتاژ خازن در معادلات غیرخطی، این کنترل‌کننده به نحو مطلوبی قادر به تثبیت ولتاژ و بهبود پایداری UPFC شده است.

پارامترهای ژنراتورهای سنکرون در این شبیه‌سازی‌ها عبارتند از

$$S' = 900 \text{ MVA}, V_L = 20 \text{ KV}, f = 60 \text{ Hz}, 4 \text{ pole}$$

$$X_d = 1.78 \text{ pu}, X'_d = 0.73 \text{ pu}, X''_d = 0.25 \text{ pu}$$

$$X_q = 1.77 \text{ pu}, X'_q = 0.55 \text{ pu}, X''_q = 0.25 \text{ pu}$$

$$X_l = 0.72 \text{ pu}, R_a = 0.025 \text{ pu}$$

$$T'_{do} = 8 \text{ s}, T''_{do} = 0.3 \text{ s}, T_{qo} = 0.4 \text{ s}, T_{qo'} = 0.15 \text{ s}, H = 6.7 \text{ s}$$

پارامترهای UPFC نیز به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است

$$R_E = 7.3333e-4 \text{ pu}, L_E = 0.72 \text{ pu}$$

$$R_B = 5.3333e-4 \text{ pu}, L_B = 0.16 \text{ pu}$$

$$C = 75 \mu \text{F}, V_c = 4000 \text{ V}$$

پارامترهای خطوط انتقال نیز چنین می‌باشد

$$R = 0.529 \Omega / \text{Km}$$

$$X_l = 0.9337e-3 \Omega / \text{Km}$$

$$X_c = 2e+5 \Omega / \text{Km}$$

۵- نتایج

در این مقاله ابتدا معادلات حالت کنترل‌کننده یک‌پارچه توان (UPFC) با استفاده از مدل دوخطی (BILINEAR) بیان شده است. سپس با استفاده از روش دوم لیاپانوف و تابع انرژی به‌کار برده شده، کنترل‌کننده جهت میدل‌های موازی و سری به‌طور هم‌زمان به‌دست آورده شده که ساختار غیرخطی دارد. در روش اول با خطی‌سازی این کنترل‌کننده، از

علی یزدیان ورجانی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی از دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۶۸ و کارشناسی ارشد و دکتری در سالهای ۱۳۷۳ و ۱۳۷۷ از دانشگاه ولنگونگ استرالیا همگی در رشته برق - قدرت به پایان رسانده است و هم اکنون عضو هیئت علمی بخش برق دانشگاه تربیت مدرس می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و کنترل ادوات FACTS و کاربرد آنها در سیستم های قدرت، طراحی و کنترل فیلترهای فعال و حفاظت شبکه های قدرت.

مصطفی محمدیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی از دانشگاه صنعتی امیرکبیر در سال ۱۳۶۸ و کارشناسی ارشد خود را از دانشکده فنی دانشگاه تهران در سال ۱۳۷۱ و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه کلگری کانادا همگی در رشته برق-قدرت به پایان رسانده است و هم اکنون عضو هیئت علمی بخش برق دانشگاه تربیت مدرس می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: کنترل ماشینهای الکتریکی و کاربرد DSP در الکترونیک قدرت و کاربرد الکترونیک قدرت در ادوات پراکنده.

- [9] K. R. Padiyar and H. V. Saikumar, "Coordinated design and performance evaluation of UPFC supplementary modulation controllers," *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 101-111, 2005.
- [10] B. Lu and B. T. Ooi, "Unified power flow controller (UPFC) under nonlinear control," in *Proc. Power Conversion Conference*, vol. 3, pp. 1118-1123, Osaka, Japan, 2002.
- [11] T. T. Ma and K. L. Lo, "Nonlinear power system damping control strategies for the unified power flow controller (UPFC)," in *Proc. Int. Cong. on Power System Technology*, vol. 2, pp. 673-678, Perth, Australia, Dec. 2000.
- [12] H. Fujita, Y. Watanabe, and H. Akagi, "Control and analysis of a unified power flow controller," in *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 14, no. 6, pp. 1021 - 1027, Nov. 1998.
- [13] A. Nabavi - Niaki and M. R. Iravani, "Steady - state and dynamic model of unified power flow controller (UPFC) for power system studies," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 11, no. 4, pp. 1937-1943, Nov. 1996.
- [14] I. Papic, P. Zunko, D. Povh, and M. Weinhold, "Basic control of unified power flow controller," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 12, no. 4, pp. 1734-1739, Nov. 1997.

مجید نیروی پور تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی برق-الکترونیک در سالهای ۱۳۷۲-۱۳۶۸ از دانشگاه گیلان و کارشناسی ارشد برق - قدرت در سالهای ۱۳۷۴-۱۳۷۲ از دانشگاه صنعتی اصفهان و دکترای مهندسی برق- قدرت در سالهای ۱۳۸۶-۱۳۸۲ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده و هم اکنون عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شیراز می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و کنترل ادوات FACTS و کاربرد آنها در سیستم های قدرت، کیفیت توان، سیستم های توزیع و تولیدات پراکنده .

Archive of SID