

## مقایسه عملکرد پایدار ساز مبتنی بر UPFC و PSS بر پایداری دینامیکی سیستم قدرت

حمید لسانی  
دانشکده فنی دانشگاه تهران

خدایار جوانی  
شرکت خدمات مهندسی برق (مشانیر)

واژه های کلیدی : سیستم قدرت، مدل هفرن - فیلیپس، پایدارساز مبتنی بر UPFC ، PSS.

کنترل کننده تنظیم ولتاژ DC میرایی نوسانات کم شده است و حتی در بعضی مواقع منفی می شود که برای خستگی نمودن این اثر پایدارساز مبتنی بر UPFC طراحی و به سیستم اعمال می کنیم و در حالت دیگر PSS را جایابی و تنظیم کرده و به سیستم اعمال می کنیم و عملکرد آن را بررسی و با حالت های قبل با استفاده از روش آنالیز مقادیر ویژه و شبیه سازی غیر خطی مقایسه می کنیم نتایج حاصله نشان می دهد که میرایی مد بین ناحیه ای سیستم با اعمال پایدارساز مبتنی بر UPFC به مقدار مطلوب تری نسبت به PSS افزایش می یابد.

### ۱- مقدمه

مساله پایداری سیستم قدرت در برابر اغتشاشات موجود در شبکه از دیرباز مورد توجه محققین بوده است و گسترش شبکه های قدرت از اهمیت ویژه ای برخوردار است. توانائی سیستم قدرت در حفظ

### چکیده :

این مقاله مدل هفرن فیلیپس سیستم قدرت با حضور UPFC برای بررسی پایداری نوسانهای سیستم قدرت بدست می آورد، همچنین نشان می دهد که تنظیم کننده ولتاژ DC میرایی سیستم قدرت را تضعیف می کند. در ادامه تاثیر پایدارساز مبتنی بر UPFC و PSS بر مد نوسانی را با هم مقایسه کرده و نشان می دهیم که عملکرد پایدارساز با تغییر ساختار شبکه و شرایط شبکه تغییر می کند و عملکرد PSS به پارامترهای ژنراتوری که روی آن نصب است بستگی دارد و همچنین عملکرد پایدارساز مبتنی بر UPFC به پارامترهای کلیه ژنراتورهای شبکه بستگی دارد. در ادامه تاثیر نصب UPFC بر میرایی نوسانات دینامیکی در یک سیستم سه ماشینه، در حالت هایی که کنترل کننده های تنظیم ولتاژ DC، تنظیم ولتاژ AC و عبور توان به UPFC اعمال شده است را با هم مقایسه می کنیم. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که با اعمال

تنظیم ولتاژ AC و کنترل عبور توان به UPFC اعمال شده است با هم مقایسه شده است. نشان داده می شود که با اعمال تنظیم کننده ولتاژ DC میرایی نوسانات کم شده است و حتی در بعضی مواقع منفی می شود که برای خنثی نمودن این اثر پایدارساز مبتنی بر UPFC طراحی و به سیستم اعمال می کنیم و در حالت دیگر PSS را جایابی و تنظیم کرده و به سیستم اعمال می کنیم و عملکرد آن را بررسی و با حالت های قبل با استفاده از روش آنالیز مقادیر ویژه و شبیه سازی غیر خطی مقایسه می کنیم نتایج حاصله نشان می دهد که میرایی مد بین ناحیه ای سیستم با اعمال پایدارساز مبتنی بر UPFC به مقدار مطلوب تری نسبت به PSS افزایش می یابد.

## ۲- مدل هفرن- فیلیپس سیستم قدرت چند ماشینه با نصب UPFC و اعمال

### پایدارساز مبتنی بر UPFC و PSS

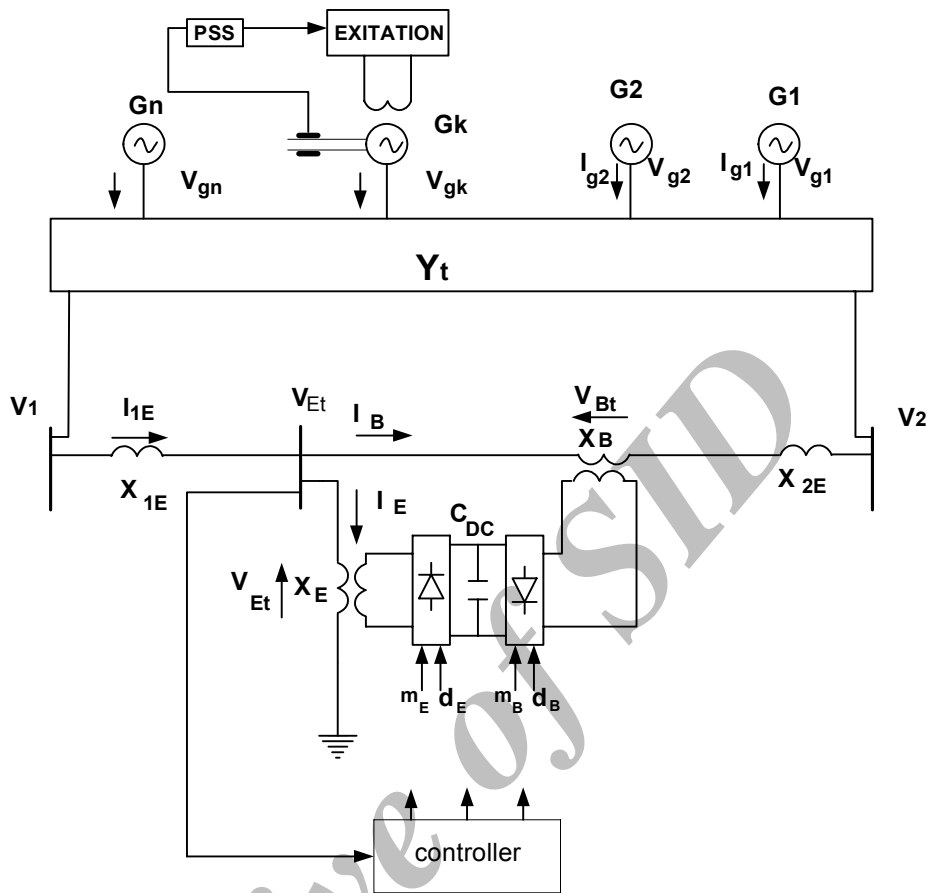
شکل (۱) سیستم n ماشینه نشان می دهد که UPFC بین گره ۱ و گره ۲ نصب شده است، VSC ولتاژی قابل کنترل در خط تزریق می کند که با کنترل ولتاژ تزریقی و فاز آن توان راکتیو بین شبکه قدرت و UPFC رد و بدل می گردد. [۴ و ۵]. فرض کنیم قبل از نصب UPFC ماتریس شبکه برابر  $\bar{Y}_l$  باشد. شبکه دارای n گره ژنراتوری و دو گره شماره ۱ و ۲ می باشد، که با توجه به شکل (۱) معادلات شبکه سیستم قدرت n ماشینه با نصب UPFC بین گره های ۱ و ۲ به صورت رابطه (۱) بدست می آید.

$$\mathbf{I}_g = [I_{g1} I_{g2} \dots I_{gn}]^T, \bar{\mathbf{V}}_g = [V_{g1} V_{g2} \dots V_{gn}]^T$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}'_{11} \bar{V}_1 + \bar{I}_{1E} + \bar{Y}_{13} \bar{V}_g &= 0 \\ \bar{Y}'_{22} \bar{V}_2 + \bar{I}_{2E} + \bar{Y}_{23} \bar{V}_g &= 0 \\ \bar{Y}_{31} \bar{V}_1 + \bar{Y}_{32} \bar{V}_2 + \bar{Y}_{33} \bar{V}_g &= \bar{I}_g \end{aligned} \quad (1)$$

پایداری تا حد زیادی به میرا کردن نوسانهای الکترومکانیکی به وسیله کنترلرهای موجود روی سیستم قدرت می باشد. مطالعات و تحقیقات قابل ملاحظه ای جهت افزایش میرایی و پایداری سیستم قدرت بر روی کنترل کننده های تحریک ژنراتورها صورت گرفته است، که یکی از این کنترل کننده ها پایدارساز سیستم قدرت (PSS) می باشد. این نوع پایدارسازها بر روی مدهای بین ناحیه ای عملکرد مطلوبی از خود نشان نمی دهند. با ظهور ادوات FACTS نوع دیگری از کنترل کننده ها که توانایی میرا کردن مدهای بین ناحیه ای دارند مورد استفاده قرار گرفتند. UPFC یکی از عناصر FACTS است که اهداف کنترلی چندگانه دارد. هدف اصلی این عنصر کنترل عبور توان است [۱ و ۵]. هدفهای دیگر این عنصر کنترل ولتاژ [۲]، بهبود پایداری گذرا [۳] و میرایی نوسانهای سیستم قدرت می باشد.

این مقاله مدل هفرن فیلیپس سیستم قدرت با حضور UPFC برای بررسی پایداری نوسانهای سیستم قدرت بدست می آورد و همچنین نشان می دهد که تنظیم کننده ولتاژ DC میرایی سیستم قدرت را تضعیف می کند، جهت خنثی نمودن این اثر پایدارساز مبتنی بر UPFC طراحی و به سیستم اعمال می کنیم که برای طراحی پایدارساز با استفاده از تحلیل رؤیت پذیری مناسبترین و موثرترین سیگنال جهت اعمال به UPFC انتخاب می کنیم. برای سیستم چند ماشینه با استفاده از روش تخصیص مقادیر ویژه پارامترهای پایدارساز تنظیم شده است و در ادامه تاثیر پایدارساز مبتنی بر UPFC و PSS را بر مد نوسانی با هم مقایسه کرده و نشان می دهیم که عملکرد پایدارساز به ساختار شبکه و شرایط شبکه بستگی دارد و PSS نسبت به پارامترهای ژنراتوری که روی آن نصب است حساس تر است. همچنین تاثیر نصب UPFC بر میرایی نوسانات دینامیکی در یک سیستم سه ماشینه را در حالت هایی که که کنترل کننده های تنظیم ولتاژ DC،



شکل (۱): سیستم قدرت n ماشینه با حضور UPFC

که در این رابطه

$$x_{\Sigma} = (x_{1E} + x_E)(x_E + x_{2E} + x_B) - x_E^2$$

با جایگذاری معادله (۲) در (۱) و حذف  $V_1$   $V_2$  [رابطه زیر بدست می آید.]<sup>T</sup>

$$\bar{I}_g = \bar{C}\bar{V}_g + \bar{F}_E\bar{V}_E + \bar{F}_B\bar{V}_B \quad (۴)$$

که در این رابطه داریم:

$$\bar{C} = \bar{Y}_{33} - [\bar{Y}_{31} \bar{Y}_{31}] \bar{Y}'_t^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{13} \\ \bar{Y}_{23} \end{bmatrix}$$

در رابطه (۱)،  $\bar{Y}'_{22}$  و  $\bar{Y}'_{11}$  از تغییر  $x_{12}$  به  $x_{1E} + x_{2E}$  در  $\bar{Y}_{11}$  و  $\bar{Y}_{22}$  دست می آید. از شکل (۱) داریم.

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= jx_{1E}\bar{I}_{1E} + \bar{V}_{Et} \\ \bar{V}_{Et} &= jx_{E2}\bar{I}_{E2} + \bar{V}_{Et} + \bar{V}_2 \end{aligned} \quad (۲)$$

$\bar{I}_E = \bar{I}_{1E} - \bar{I}_{E2}$   
با جایگذاری معادله (۳) در (۲) داریم.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{1E} \\ \bar{I}_{E2} \end{bmatrix} = \frac{1}{x_{\Sigma}} \begin{bmatrix} -j(x_E + x_{E2} + x_B) & jx_E \\ -jx_E & j(x_{1E} + x_E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{x_{\Sigma}} \begin{bmatrix} j(x_{E2} + x_B) & jx_E \\ -jx_E & j(x_{1E} + x_E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_E \\ \bar{V}_B \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Gi} &= \bar{I}_{gi} e^{j\delta_i} \\ &= \sum_{k=1}^n \bar{C}_{dik} \left[ \begin{array}{l} E'_{qk} e^{j(90^\circ + \delta_k - \delta_i)} + (x_{qk} - x'_{dk}) e^{j(\delta_k - \delta_i)} I_{qk} \\ + \bar{C}_{Ek} \bar{V}_E e^{j\delta_i} + \bar{C}_{Bk} \bar{V}_B e^{j\delta_i} \end{array} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

با جدا کردن قسمتهای حقیقی و موهومی معادله (۵) داریم.

$$\begin{aligned} I_{di} &= \sum_{k=1}^n C_{dik} \left\{ \begin{array}{l} -E'_{qk} \sin \delta_{ikg} + (x_{qk} - x'_{dk}) I_{qk} \cos \delta_{ikg} \\ + C_{Ek} V_E \cos \delta_{Ek} + C_{Bk} V_B \cos \delta_{Bk} \end{array} \right\} \\ I_{qi} &= \sum_{k=1}^n C_{dik} \left\{ \begin{array}{l} E'_{qk} \cos \delta_{ikg} + (x_{qk} - x'_{dk}) I_{qk} \sin \delta_{ikg} \\ + C_{Ek} V_E \sin \delta_{Ek} + C_{Bk} V_B \sin \delta_{Bk} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

معادله فوق را خطی می کنیم.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{I}_q &= \mathbf{Y}_q \Delta \delta + \mathbf{F}_q \Delta E'_q + \mathbf{G}_q \Delta V_{DC} \\ &+ \mathbf{H}_{Eq} \Delta m_E + \mathbf{H}_{Bq} \Delta \delta_E + \mathbf{R}_{Eq} \Delta m_B + \mathbf{R}_{Bq} \Delta \delta_B \\ \Delta \mathbf{I}_d &= \mathbf{Y}_d \Delta \delta + \mathbf{F}_d \Delta E'_d + \mathbf{G}_d \Delta V_{DC} \\ &+ \mathbf{H}_{Ed} \Delta m_E + \mathbf{H}_{Bd} \Delta \delta_E + \mathbf{R}_{Ed} \Delta m_B + \mathbf{R}_{Bd} \Delta \delta_B \end{aligned} \quad (9)$$

حال با خطی کردن معادلات سیستم قدرت چندماشینه و استفاده از روابط فوق معادلات حالت سیستم قدرت با حضور UPFC بدست می آید. برای بدست آوردن مدلی دقیق از سیستم قدرت با حضور UPFC و تنظیم کننده ولتاژ خازن ارتباطی دو مبدل UPFC، ولتاژ خازن را وارد معادلات حالت می کنیم که نتیجه حاصل به صورت رابطه (۱۰) است.

با توجه به رابطه (۱۰) مدل اصلاح شده هفرن فیلیپس با نصب UPFC به صورت شکل (۲) خواهد شد.

$$\begin{aligned} \bar{F}_E &= -[\bar{Y}_{31} \bar{Y}_{31}] \bar{Y}'_t^{-1} \left[ \begin{array}{l} j(x_{E2} + x_B) \\ x_\Sigma \\ \frac{jx_{E1}}{x_\Sigma} \end{array} \right] \\ \bar{F}_B &= -[\bar{Y}_{31} \bar{Y}_{31}] \bar{Y}'_t^{-1} \left[ \begin{array}{l} \frac{jx_E}{x_\Sigma} \\ x_\Sigma \\ -j(x_{1E} + x_E) \\ x_\Sigma \end{array} \right] \end{aligned}$$

$$\bar{Y}'_t = \left[ \begin{array}{cc} \bar{Y}'_{11} - \frac{j(x_E + x_{E2} + x_B)}{x_\Sigma} & \frac{jx_E}{x_\Sigma} \\ \frac{jx_E}{x_\Sigma} & \bar{Y}'_{22} - \frac{j(x_{1E} + x_E)}{x_\Sigma} \end{array} \right]$$

برای سیستم قدرت n ماشینه ولتاژ ترمینال ژنراتور از رابطه زیر محاسبه می شود [۷۶].

$$\bar{V}_g = \bar{E}'_q - jX'_D \bar{I}_g = j(X_Q - X'_D) \bar{d}_g$$

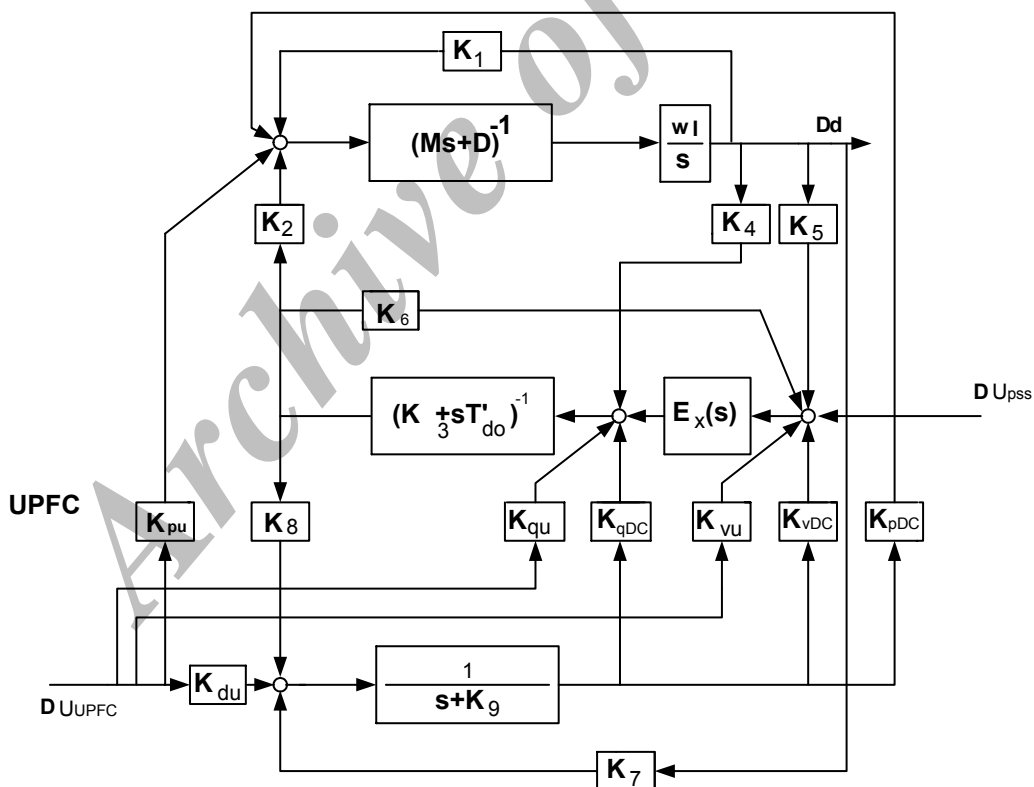
از رابطه (۴) و (۵) داریم

$$\begin{aligned} \bar{I}_g &= \bar{C}_d \left[ \bar{E}'_q - j(X_Q - X'_D) \bar{I}_g + \bar{C}_E \bar{V}_E + \bar{C}_B \bar{V}_B \right] \\ \bar{C}_d &= (\bar{C}^{-1} + jX'_D)^{-1} \\ \bar{C}_E &= \bar{C}^{-1} \bar{F}_E \\ \bar{C}_B &= \bar{C}^{-1} \bar{F}_B \end{aligned} \quad (6)$$

با انتقال در مختصات  $d_i$  و  $q_i$  داریم

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \omega_b \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_1 & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_2 & \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_{pDC} \\ -\mathbf{T}'^{-1}_{do} \mathbf{K}_4 & \mathbf{0} & -\mathbf{T}'^{-1}_{do} \mathbf{K}_3 & -\mathbf{T}'^{-1}_{do} & -\mathbf{T}'^{-1}_{do} \mathbf{K}_{qDC} \\ -\mathbf{T}^{-1}_A \mathbf{K}_A \mathbf{K}_5 & \mathbf{0} & -\mathbf{T}^{-1}_A \mathbf{K}_A \mathbf{K}_6 & -\mathbf{T}^{-1}_A & -\mathbf{T}^{-1}_A \mathbf{K}_A \mathbf{K}_{vDC} \\ \mathbf{K}_7 & \mathbf{0} & \mathbf{K}_8 & \mathbf{0} & \mathbf{K}_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_p I_n \\ -\mathbf{T}'^{-1}_{do} \mathbf{K}_q I_n \\ -\mathbf{T}^{-1}_A \mathbf{K}_A \mathbf{K}_u I_n \\ K_c I_n \end{bmatrix} \times \Delta U_{UPFC} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\mathbf{K}_A \mathbf{T}^{-1}_A I_0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta U_{PSS}$$

(۱۰)



شکل (۹): مدل اصلاح شده هفرن فیلیپس با نصب UPFC

### ۳- گشتاور الکتریکی تولیدی به توسط تنظیم

#### کننده ولتاژ DC و اثر آن بر روی

#### پایداری نوسانهای سیستم قدرت

برای شرایط کار موثر و پیوسته UPFC، ولتاژ خازن ارتباطی بین دو مبدل باید ثابت نگه داشته شود. که برای برآورده کردن این شرط تنظیم کننده ولتاژ DC،  $u_k = T_{DC}(s) (V_{dref} - V_{dc})$  بر روی UPFC نصب می شود. تنظیم کننده ولتاژ DC با تغییر توان اکتیو بین UPFC و سیستم قدرت کنترل می شود و از آنجا که تنظیم کننده ولتاژ DC بر روی میرایی نوسانهای سیستم قدرت تاثیر می گذارد باید در مدل هفرن - فیلیپس در نظر گرفته شود. [۹ و ۸]

توان اکتیو ورودی UPFC نصب شده در مدل تک ماشینه به شین بینهایت برابر  $P_{com} = V_{dc} I_{dc}$  می باشد. معادله تعادل توان در سیستم تک ماشینه با حضور UPFC به صورت  $P_m - P_{eo} = P_{acc} + P_{com}$  است. که  $P_m$  قدرت مکانیکی ورودی ژنراتور،  $P_e$  قدرت الکتریکی خروجی از ژنراتور و  $P_{acc}$  قدرت شتاب دهنده روتور ژنراتور است. در حالت ماندگار  $P_{com} = V_{dco}$  پس  $P_{acc} = 0$  و  $P_{me} - P_{eo} = 0$  و  $I_{dco} = 0$  در نتیجه  $I_{dco} = 0$  در طول یک اغتشاش دینامیکی معادله تعادل قدرت به صورت  $\Delta P_e + \Delta P_{acc} + \Delta P_{com} = 0$  در می آید که با توجه به این رابطه برای تعادل،  $\Delta P_{com}$  مخالف  $\Delta P_e$  و  $\Delta P_{acc}$  است بنابراین فاز  $\Delta P_{com}$  مخالف فاز  $\Delta P_e$  و با فاز  $\Delta \omega$ ، ۹۰ درجه اختلاف دارد.

$\Delta P_{com} = V_{dco} \Delta I_{dc} + I_{dco} \Delta V_{DC}$   
 $= V_{plco} \Delta I_{dco} \dot{\Delta V}_{dc} = sCV_{dco} \Delta V_{dc}$   
 بنابراین فاز  $\Delta V_{dc}$ ، ۹۰ درجه نسبت به  $\Delta P_{com}$  جلو و همفاز با  $\Delta \omega$  می باشد، در نتیجه  $\Delta u_{dc} = K_{DC\omega} \Delta \omega$  در مدل تک ماشینه سیستم قدرت به

باسبار بینهایت با حضور UPFC گشتاور الکتریکی تولیدی به توسط تنظیم کننده ولتاژ DC، اعمال شده به حلقه الکترومکانیکی ژنراتور  $\Delta T_{EDC} = -K_{puk} T_{DC}(J\omega s) \Delta u_{dc}$  و  $K_{DC\omega} \Delta \omega$  اگر تنظیم کننده ولتاژ DC، PI و  $K_{puk} > 0$  باشد. قسمت تناسبی گشتاور میرایی منفی ایجاد می کند و قسمت انتگرالی میرایی تولید نمی کند.

### ۴- عملکرد پایدارساز مبتنی بر UPFC و

#### PSS

از معادله (۱۰) داریم

$$\dot{X} = AX + B_1 \Delta U_{UPFC} + B_2 \Delta U_{PSS}$$

$$= \sum_{L=1}^2 B_L \Delta U_L \quad (11)$$

کنترل پذیری پایدارساز نسبت به مد نوسانی  $i$  ام  $(\lambda_i)$  طبق رابطه زیر تعریف می شود

$$MD_i = \left| \omega_i^T B_L \right| \quad (12)$$

از معادله (۱۲) کنترل پذیری PSS بدست می آید.

$$\omega_i^T B_L = \omega_{i2}^T M^{-1} K_2 [(\lambda_i T_A + I)(\lambda_i T_D + K_3) + K_A K_6]^{-1} K_A K_0 I_0$$

$$\omega_i^T B_L = \omega_{i2}^T M^{-1} T_P I_0 \quad (13)$$

همچنین از معادله (۱۲) کنترل پذیری پایدار ساز مبتنی بر UPFC بدست می آید.

$$\omega_i^T B_L = -\omega_{i2}^T M^{-1} * \{K_p - K_2 [(\lambda_i T_A + I)(\lambda_i T_D + K_3) + K_A K_6]^{-1} [(\lambda_i T_A + I)K_q + K_A K_v]\} I_n$$

$$\omega_i^T B_L = -\omega_{i2}^T M^{-1} T_F I_n \quad (14)$$

که ماتریس های  $I_0$  و  $I_n$  به صورت زیر می باشد

$$I_n = [I, I, \dots, I, I] \epsilon R^{n+1}$$

## ۵- انتخاب سیگنال کنترل ورودی UPFC

### برای اعمال پایدار ساز مبتنی بر UPFC

از معادله (۱۰) دیده می‌شود که چهار گزینه  $m_E$ ،  $m_B$ ،  $\delta_E$  و  $\delta_B$  برای سیگنال کنترلی ورودی UPFC وجود دارد که پایدار ساز مبتنی بر UPFC می‌تواند به آن اعمال شود. بنابراین مهمترین موضوع قبل از طراحی پایدار ساز مبتنی بر UPFC انتخاب سیگنال کنترلی ورودی UPFC است، که این انتخاب مؤثر بر عملکرد پایدار ساز مبتنی بر UPFC می‌باشد.

بر مبنای مدل هفرن - فیلیپس، به صورت زیر سیگنالی ورودی UPFC برای اعمال پایدار ساز مبتنی بر UPFC انتخاب می‌شود.

معادلات حالت سیستم قدرت با حضور UPFC، به صورت زیر می‌نویسیم.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta}_j \\ \Delta \dot{\omega}_j \\ \dot{x}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 \\ -K_j & -d_j & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_j \\ \Delta \omega_j \\ x_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \Delta u_k$$

شاخص کنترل پذیری که برابر اندازه اثر پایدار ساز مبتنی بر UPFC بر مد نوسانی است برابر:

$$K_{bi}(\lambda_i) = B_2 + A_{23} (\lambda_i I - A_{33})^{-1} B_{3bi}(\lambda_i) = K_{bi}(\lambda_i) \times \omega_{i2} \quad (16)$$

$\omega_{i2}$  برابر عنصر  $i$  ام از بردار ویژه چپ ماتریس حالت با مد نوسانی  $\lambda_i$  است از معادله (۱۶) دیده می‌شود که برای سیگنال ورودی متفاوت مقدار  $K_{bi}(\lambda_i)$  تغییر می‌کند. و برای ورودی های مختلف  $m_E$ ،  $m_B$ ،  $\delta_E$  و  $\delta_B$  مقدار  $\omega_{i2}$  ثابت است. بنابراین  $|K_{bi}(\lambda_i)|$  شاخصی است که برای انتخاب مؤثرترین سیگنال ورودی استفاده می‌شود.

$$I_0 = [0, 0, \dots, 0, I, 0, \dots, 0, 0] \in R^{n+1}$$

از روابط بدست آمده دیده میشود که کنترل پذیری PSS دارای یک تابع تبدیل که به ماتریس های  $k_1$  تا  $k_6$  بستگی دارد و ماتریس  $I_0$  که نشان میدهد کنترل پذیری به پارامترهای ژنراتوری که بر روی آن نصب است بستگی دارد. و کنترل پذیری پایدار ساز مبتنی بر UPFC دارای تابع تبدیلی که به ماتریسهای  $k_1$  تا  $k_6$  و همچنین ماتریسهای  $k_p$  و  $k_q$  و  $k_v$  بستگی دارد و به ماتریس که نشان میدهد که کنترل پذیری به پارامترهای کلیه ژنراتورها بستگی دارد.

شکل (۳) سیستم سه ماشینه با نصب UPFC نشان می‌دهد که پارامترهای این سیستم در ضمیمه داده شده است جدول (۱) نتیجه تحلیل مقادیر ویژه در دو حالت (۱) سیستم سه ماشینه بدون پایدار ساز (۲) با نصب PSS بر روی G1 (۳) با UPFC و تنظیم کننده ولتاژ AC و کنترلر عبور (۴) با UPFC و تنظیم کننده ولتاژ DC و AC و کنترلر عبور توان نشان می‌دهد.

UPFC مثال ذکر شده به کنترل کننده عبور توان، کنترل کننده ولتاژ AC و تنظیم کننده ولتاژ DC مجهز شده است. [۱۰]

کنترل کننده عبور توان

$$(P) : u_k = m_B = k_{pf} (P_{ref} - P_e)$$

کنترل کننده ولتاژ AC

$$(AC) : u_k = m_E = k_{VEt} (u_{Eref} - u_{Et})$$

کنترل کننده ولتاژ DC

$$(DC) : u_k = \delta_E = k_{pc} (u_{dcref} - u_{dc})$$

دیده می‌شود که سیستم سه ماشینه دارای دو مد نوسانی می‌باشد. که با نصب UPFC و تنظیم کننده ولتاژ DC میرایی کاهش می‌یابد. و حتی در بعضی مواقع باعث ناپایداری دینامیکی سیستم قدرت می‌شود.

عملگرهای دیفرانسیل به یک مساله بهینه سازی عددی می‌رسیم که با روشهای تکراری حل می‌شود.

تابع تبدیل پایدار ساز مبتنی بر UPFC

$$H(s) = \frac{sT_\omega}{1+sT_\omega} \cdot \frac{K_u}{1+sT_u} \times \frac{(1+sT_2)(1+sT_4)}{(1+sT_1)(1+sT_3)}$$

حال با استفاده از روش تخصیص مقادیر ویژه پارامترهای پایدار ساز مبتنی بر UPFC مدل سه ماشینه را تنظیم می‌کنیم. با توجه به شکل (۲) گشتاور الکتریکی تولیدی به توسط حلقه پایدار ساز مبتنی بر UPFC سیستم n ماشینه از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$\Delta T_{jES} = \frac{K_{jC}(\lambda_i)K_{jO}(\lambda_i)H(\lambda_i)}{1 - K_{jL}(\lambda_i)H(\lambda_i)} \Delta \omega_j = D_{jES} \Delta \omega_j \quad (17)$$

که در این رابطه داریم.

$$K_{jO}(s) = \left( \frac{\omega_b}{s} C_{j1} + C_{j2} \right) + C_{j3}^T (sI - A_{j33})^{-1} \left( \frac{\omega_b}{s} A_{j31} + A_{j32} \right)$$

$$K_{jC}(s) = A_{j23}^T (sI - A_{j33})^{-1} B_{j3} + B_{j2}$$

$$K_{jL}(s) = C_{j23}^T (sI - A_{j33})^{-1} B_{j3}$$

با استفاده از روش تکراری (۱۸) مقدار مینیمم تابع هدف را بدست می‌آوریم.

$$H_{K+1} = H_K - st \times \nabla J(H_K)$$

$$\nabla J(H_K) = 2(\lambda_i - \lambda_i^*) \frac{\partial \lambda_i}{\partial H_K} \quad (18)$$

حساسیت مدونسانی i ام نسبت به ضریب D<sub>jES</sub> به صورت  $S_{ij} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial D_{jES}}$  تعریف می‌کنیم. و از رابطه (۱۷) داریم:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial H_K} = \frac{\Delta \lambda_i}{\Delta H_K} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \lambda_i}{\partial D_{jES}} \frac{K_{jC}(\lambda_i)K_{jO}(\lambda_i)}{[1 - K_{jL}(\lambda_i)H_{K-1}(\lambda_i)]^2} \quad (19)$$

که با توجه به رابطه های (۱۸) و (۱۹) فرمول، برای تنظیم پارامترهای پایدار ساز کامل می‌شود.

جدول (۲): مقدار  $|K_{bi}(\lambda_i)|_{U_K}$  به ازای ورودی های مختلف

| u <sub>K</sub>       | $ K_{bi}(\lambda_i) _{U_K}$ |
|----------------------|-----------------------------|
| m <sub>E</sub>       | ۰.۱۳۸                       |
| <b>m<sub>B</sub></b> | ۰.۲۱۰                       |
| δ <sub>E</sub>       | ۰.۱۶۰                       |
| δ <sub>B</sub>       | ۰                           |

## ۶- تنظیم هماهنگ پایدار ساز مبتنی بر UPFC

تنظیم هماهنگ پایدار سازها به معنای تنظیم پارامترهای پایدار سازها پس از جابجایی است. یعنی پس از اینکه معلوم شد چه ماشین هایی برای نصب PSS و چه خطوطی برای نصب پایدار ساز مبتنی بر UPFC مناسب اند، پارامترهای پایدار ساز به گونه ای تعیین شوند که سیستم دچار ناپایداری نشود و

و هدف از استفاده از پایدار ساز نیز برآورده شود [۱۰]. در روش تخصیص مقادیر ویژه، ابتدا محل بهینه برای پایدار سازها به وسیله یکی از روشهای جابجایی مشخص می‌گردد [۱۱]، سپس محل مطلوب مقادیر ویژه تعیین شده، و با تعریف تابع هدفی مبنی بر میزان خطای موجود بین مودهای منتقل شده و مودهای مطلوب و با محاسبه پارامترهای قابل تنظیم در هر مرحله سعی می‌شود تابع هدف ذکر شده را مینیمم کرد. لازم به ذکر است که تعداد پارامترهای قابل تنظیم در این روش بایستی حداقل برابر با تعداد مودهای جابجا شده باشد. برای این روش می‌توان تابع هدف زیر استفاده نمود. [۱۳ و ۱۴].

$$H = \sum_{i=1}^n q_i (\lambda_i - \lambda_i^*)^2$$

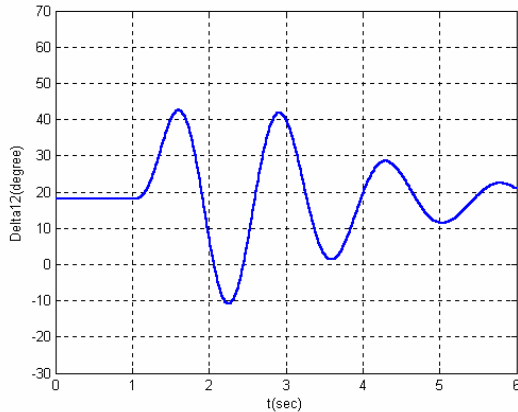
که  $\lambda_i^*$  مقدار ویژه ناشی از تغییر پارامترها و  $q_i$  مقدار ویژه مطلوب جاسازی شده توسط ما می‌باشد. ها ضرایبی هستند که به مقادیر ویژه ارزش وزنی می‌دهند پس از تغییر تابع هدف و استفاده از



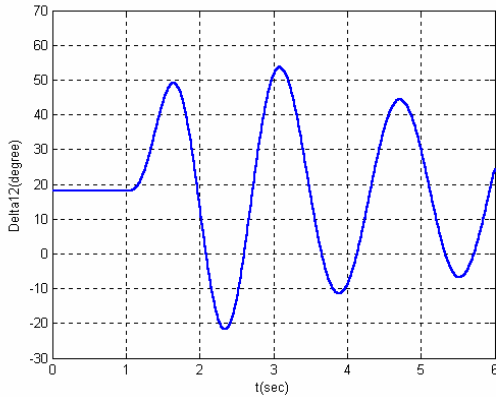


است اما نه به اندازه حالتی که از پایدار ساز مبتنی بر UPFC استفاده شده است.

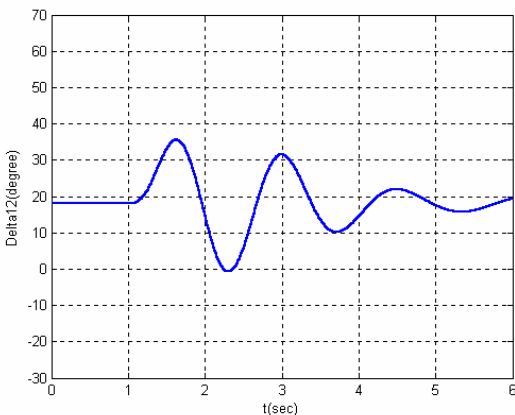
نتایج حاصل از شبیه سازی که یک خطای سه فاز متقارن بین باسهای ۳ و ۵ در یک ثانیه اتفاق افتاده و ۱۰۰ میلی ثانیه بعد رفع شده، در حالت‌های مختلف در شکل‌های (۴) تا (۹) نشان داده شده است. شکل (۴) پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه بدون پایدار ساز می‌باشد که در این حالت سیستم نوسانی است که با اعمال سیستم پایدار می‌شود و در حالت دیگر با اعمال تنظیم کننده ولتاژ وضعیتی نسبت به حالت قبل بدتر شده است با اعمال پایدار ساز مبتنی بر سیستم به مقدار مطلوبی میرا شده است



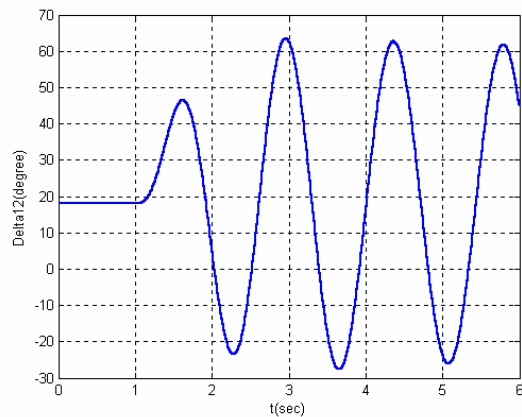
شکل (۶): پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه نصب PSS بر روی G1 و UPFC بمنظور تنظیم ولتاژ AC و کنترل عبور توان



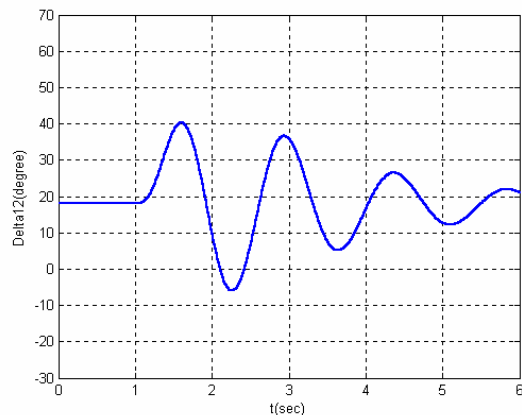
شکل (۷): پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه نصب PSS بر روی G1 و UPFC بمنظور تنظیم ولتاژ AC و کنترل عبور توان به همراه تنظیم کننده ولتاژ DC دو سر خازن



شکل (۸): پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه با اعمال پایدار ساز مبتنی بر UPFC

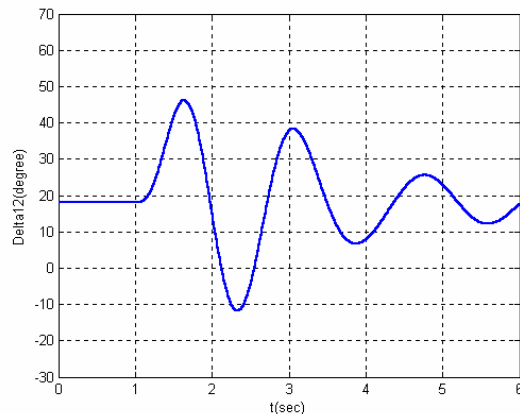


شکل (۴): پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه بدون پایدار ساز



شکل (۵): پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه با نصب PSS بر روی G1

نشان داده شد که با اعمال تنظیم کننده ولتاژ DC میرایی نوسانات کم شده است و حتی در بعضی مواقع منفی می شود که برای خنثی نمودن این اثر پایدارساز مبتنی بر UPFC طراحی و به سیستم اعمال می کردیم و در حالت دیگر PSS را جایابی و تنظیم کرده و به سیستم اعمال کردیم و عملکرد آن را بررسی و با حالتی قبل با استفاده از روش آنالیز مقادیر ویژه و شبیه سازی غیر خطی مقایسه کردیم نتایج حاصله از شبیه سازی نشان داد که میرایی مد بین ناحیه ای سیستم با اعمال پایدارساز مبتنی بر UPFC به مقدار مطلوب تری نسبت به PSS افزایش می یابد.



شکل (۹): پاسخ زمانی سیستم سه ماشینه، با نصب تنظیم کننده ولتاژ DC خازن و تنظیم دوباره PSS

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله مدل هفرن - فیلیپس سیستم قدرت با حضور UPFC را با در نظر گرفتن ولتاژ DC خازن به عنوان یکی از متغیرهای حالت بدست آوردیم. با استفاده از روابط ریاضی و تحلیل مقادیر ویژه و شبیه سازی غیر خطی نشان دادیم که تنظیم کننده ولتاژ DC باعث تضعیف میرایی نوسانات سیستم قدرت می شود، که برای خنثی نمودن این اثر و تقویت میرایی با استفاده از روش تحلیل مدال بهترین و موثرترین سیگنال کنترلی جهت اعمال به UPFC برای سیستم چند ماشینه با استفاده از روش تخصیص مقادیر ویژه پارامترهای پایدارساز تنظیم شده است در ادامه تاثیر پایدارساز مبتنی بر UPFC و PSS را بر مد نوسانی با هم مقایسه کرده و نشان داده شده است که عملکرد پایدارساز به ساختار شبکه و شرایط شبکه بستگی دارد و PSS نسبت به پارامترهای ژنراتوری که روی آن نصب است حساس تر است. همچنین تاثیر نصب UPFC بر میرایی نوسانات دینامیکی در یک سیستم سه ماشینه را در حالتی که کنترل کننده های تنظیم ولتاژ DC، تنظیم ولتاژ AC و کنترل عبور توان به UPFC اعمال شده است با هم مقایسه شده است.

## ۸- مراجع

- [1] Gyuguyi.L , “ Unified power –flow control : Concept for flexible AC transmission systems , “ IEE Proc.C, no . 4 1992.
- [2] Gyuguyi.L , Rietman.T.R , Edris.A , Schauder .C.D,Torgerson.D.R , and Williams.S.L , “ The unified power flow controller : A new approach to power transmission control , “ IEEE Trans . on PWRs , no . 2 , 1995.
- [3] Nabavi –Niaki.A and Iravani.M.R , “ Steady – stated and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies , “ IEEE Trans. On PWRs , no.4,1996.
- [4] Arabi.A and Kundur.P , “ Aversatile FACTS deviece model for power flow and stability simulation , “ IEEE Trans , on PWRs , no . 4 , 1996.
- [5] Noroozian.M and Andersson.G , “ Damping of power system oscillation by use of controllable components , “ IEEE Trans . on PWRD , no . 4 , 1994.
- [6] Heffron.W.G and Phillips.R.A , “ Effect of a modern amplidyne Voltage regulatior on under excited operation of large turbine generator , “ AIEE Trans ., 1952.
- [7] GYUGYO. I.Aunified power flow control concept for flexible AC

### ۹- ضمیمه

پارامترهای مدل سه ماشین سیستم قدرت با حضور

UPFC

ژنراتور:

$$\begin{aligned} H_1 = H_2 = 20s, H_3 = 11.8s, \\ D_1 = 0.0, D_2 = 0.0, D_3 = 0.0, \\ T'_{d01} = 7.5s, T'_{d02} = 7.5s, T'_{d03} = 4.7s, \\ x_{d1} = 0.19, x_{d2} = 0.19, x_{d3} = 0.41, \\ x_{q1} = 0.163, x_{q2} = 0.163, x_{q3} = 0.33, \\ x'_{d1} = 0.0765, x'_{d2} = 0.0765, x'_{d3} = 0.173 \end{aligned}$$

تحریک:

$$\begin{aligned} K_{A1} = K_{A3} = 20.0, K_{A2} = 100, \\ T_{A1} = T_{A3} = 0.05 s, T_{A2} = 0.01 s \end{aligned}$$

شبکه و UPFC:

$$\begin{aligned} Z_{13} = j1.2, Z_{23} = j0.2, Z_{1E} = j0.2, Z_{E3} = j0.2, \\ V_{1t} = 1 < 9, V_{2t} = 1 < 5, V_{3t} = 1 < 0, L_3 = 1.5 + j 0.5 \\ Z_{T2} = j0.03, \\ P_{53} = 0.6 \text{ p.u.}, P_{43} = 0.8 \text{ p.u.} \\ CDC = 1.0, VDC0 = 1.0, KP = 10.0, KV = 40 : \end{aligned}$$

- transmission systems . IEE Proc.C.1992 , 4 , (139) , pp. 323-331
- [8] PAPIĆ . ZUNKO . P. POVH.D. and WEINIIONI.D.M. Basic control of unified power flow controller , IEEE trans . 1997 , PWRs 4 , (12) , pp.1734-1739
- [9] SMITH, K.S. RAN, L. and PENMAN, J. Dynamic modeling of a unified power flow controller, IEE proc. C. 2000, 1(144)PP.7-12.
- [10] LIMYINGCHAROEN , S. ANNAKAGE , U.D. , and PAHALAWATHTHA , N.C. : Effects of unified power flow controllers on transient stability , IEE Proc. C.2002.2.(145).pp.182-188
- [11] WANG.H.F. , and SWIFT.F.J. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. Part 1 : Single -machine infinite - bus POWER systems . IEEE trans 1997 PD-2 (12) , pp. 941-964.
- [12] WANG, H.F.: Selection of robots installing locations and feed back signals of FACTS -based stabilizers in multi -machine power systems . IEEE Trans . 1998, PWRs , (PE-066-PWRs-0-05)(IN press)
- [13] Schoder , K., Hasanovic A. Feliachi , A . “ Power System Damping Using Fuzzy Controlled unified power flow Controller “ IEEE Trans Power Delivery 2001 pp 617-622
- [14] Chen.C.T and Hsu.Y. Y. , “ Design of UPFC controllers and Supplementary damping controller for power transmission control and stability enhancement of longitudinal power system , “ IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 149, no. 4, 2002