

## بررسی تأثیرات عوامل غیر خطی بر روی رفتار سیستم های قدرت

سپهر سلطانی\*<sup>(۱)</sup> رضا قاضی<sup>(۲)</sup> ناصر پریرز<sup>(۳)</sup>

(۱) استادیار، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار

(۲) استاد، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار

**چکیده** عوامل غیر خطی، سبب ایجاد تداخل های غیر خطی میان مودهای خطی سیستم می شوند و در نتیجه نقش بسیار مهمی در پیچیده سازی رفتار سیستم های قدرت به خصوص سیستم های قدرت تحت استرس را دارند. در این مقاله ضمن مرور مختصری بر روش های تحلیل سیستم های غیر خطی مرسوم، هم چون روش مودال خطی، روش شکل نرمال و روش سری مودال، به بررسی دقت پاسخ تقریبی آنها می پردازیم. برای این منظور، نتایج شبیه سازی هر یک از روش های مذکور را در یک سیستم قدرت در حضور UPFC با استفاده از محاسبه معیار مشابهت، مورد بررسی قرار می دهیم. نتایج حاصله نشان داد، روش سری مودال در تمام شرایط، عملکرد بسیار بهتری نسبت به سایر روش های مرسوم تحلیل رفتار سیستم های غیر خطی دارد.

**واژه های کلیدی** مودال خطی، نرمال فرم، سری مودال، معیار مشابهت، UPFC.

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، دانشکده مهندسی، گروه برق

پست الکترونیکی: sep\_soltani@iaus.ac.ir

تلفن: ۰۹۱۵۱۷۱۱۸۲۹

## ۱- مقدمه

تحلیل رفتار دینامیکی سیستم های قدرت، کاری بسیار پیچیده و دقیق است. برای مطالعه این رفتار، از دو روش معمول استفاده می شود. روش اول، شبیه سازی دینامیکی سیستم است که اثرات غیر خطی را نمایان می کند، ولی جهت بررسی تأثیر این عوامل بر روی عملکرد سیستم، می بایست شبیه سازی برای چندین بار و به مدت طولانی انجام شود. روش دیگر، تحلیل مودال خطی سیستم است که در آن از عوامل غیر خطی چشم پوشی می شود و نمی توان تأثیر این عوامل را بررسی و در نتایج مشاهده نمود؛ از طرفی عوامل غیر خطی سبب ایجاد تداخل های غیر خطی میان مدهای خطی سیستم می شوند و در نتیجه، نقش بسیار مهمی در پیچیده سازی رفتار سیستم های قدرت، به خصوص سیستم های قدرت تحت استرس را دارند. لزوم بررسی اثرات عوامل غیر خطی در سیستم های قدرت تحت استرس در مرجع [۱] آمده است. برای بررسی اثرات غیر خطی در سیستم های قدرت تحت استرس، کمیته ای در IEEE در اواخر سال ۲۰۰۰ میلادی تشکیل شد. هم چنین از اواخر دهه ۱۹۸۰، در زمینه تداخل های غیر خطی میان مدهای خطی سیستم و اثرات آن بر روی رفتار سیستم قدرت، تحقیقاتی صورت گرفت که نتایج آن در مراجع [۲] الی [۶] ارائه گردیده است. در این تحقیقات از تکنیک شکل نرمال فرم (Normal Form) استفاده شده است. در این روش، سعی شده است تا در بسط تیلور توابع غیر خطی جملات، مراتب بالاتر نیز در نظر گرفته شوند. اگرچه تکنیک شکل نرمال، ابزار مفیدی برای تحلیل سیستم های غیر خطی می باشد، لیکن به علت استفاده از تبدیلات غیر خطی در شرایط کار مختلف هم چون شرایط تشدید و شبه تشدید مرتبه دوم، دارای مشکلاتی نظیر؛ محدود بودن ناحیه اعتبار، نداشتن پاسخ و غیره می باشد.

روش جدید دیگری موسوم به سری مودال MS (Modal Series) ارائه گردیده است که ضمن دارا بودن ویژگی های روش شکل نرمال، مشکلات آن را نیز مرتفع ساخته است [۷ و ۸]. با استفاده از این روش می توان عوامل غیر خطی مؤثر بر تداخل مدهای سیستم را شناسایی و سیستم کنترلی مناسب جهت کاهش تداخل را طراحی نمود. در این مقاله، ضمن مرور مختصری بر روش های مودال خطی، شکل نرمال و سری مودال، این روش ها را بر روی یک سیستم قدرت تک ماشین و باس بی نهایت (Single Machine Infinite Bus) SMIB در حضور یک کنترل کننده یکپارچه سیلان توان (Unified Power Flow Controller) UPFC پیاده سازی نموده ایم. نتایج نشان می دهد روش سری مودال در تمام شرایط، عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش های مرسوم دیگر دارد.

## ۲- شکل نرمال میدان برداری

فرض کنید معادله (۱) دینامیک غیر خطی یک سیستم را که دارای N متغیر حالت می باشد، بیان می کند. معادله (۲) بسط تیلور معادله (۱) حول نقطه تعادل پایدار ( $X_{SEP}$ ) است.

$$\dot{X} = F(X) \quad (1)$$

$$\dot{X}_i = A_i X + \frac{1}{2} X^T H^i X + H.O.T \quad (2)$$

به طوری که:

$$F(X_{SEP}) = 0$$

$A_i$  و  $H^i$  به ترتیب، برابر سطر i ام ماتریس

جاکوبی و ماتریس هسیان است یعنی:

در صورتی که تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم وجود نداشته باشد؛ یعنی برای تمام ترکیب های ممکن  $j$  و  $k$  و  $l$  نامساوی  $\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j \neq 0$  برقرار باشد، تبدیل غیر خطی به صورت (۴) وجود دارد؛ به طوری که سیستم در فضای جدید به صورت (۵) تبدیل می شود:

$$Y=Z+h_2(Z) \quad (4)$$

به طوری که:

$$h_2^j(Z) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j z_k z_l$$

$$h_{kl}^j = \frac{C_{kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j} \quad \text{و}$$

$$\dot{Z} = \Lambda Z + O(|Z|^m) \quad m > 2 \quad (5)$$

ساختار کلی این تبدیل در دیاگرام شکل (۱)

آمده است:

$$A_i = \left[ \frac{\partial F_i}{\partial X_j} \right]_{X_{SEP}}$$

و:

$$H^i = \left[ \frac{\partial^2 F_{kl}^i}{\partial X_k \partial X_l} \right]_{X_{SEP}}$$

فرض کنید  $N$  مقدار مشخصه ماتریس  $A$ ، مجزا از هم باشد و  $U_i$  و  $V_i$  به ترتیب بردارهای مشخصه سمت راست و چپ مقدار مشخصه  $\lambda_i$  با نرم واحد تعریف شود. با اعمال تبدیل خطی  $X=UY$  به دو جمله اول معادله (۲)، معادله (۳) حاصل می شود:

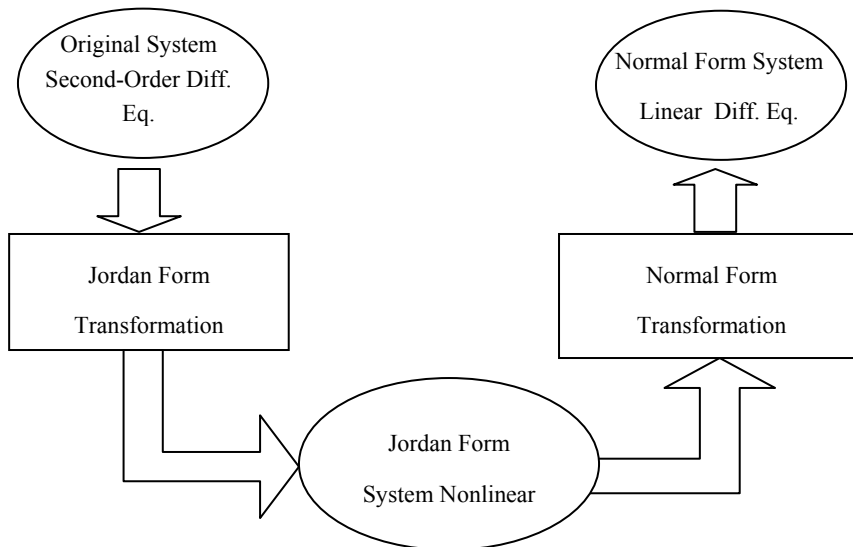
$$\dot{y}_j = \lambda_j y_j + Y^t C^j Y = \lambda_j y_j +$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_k y_l$$

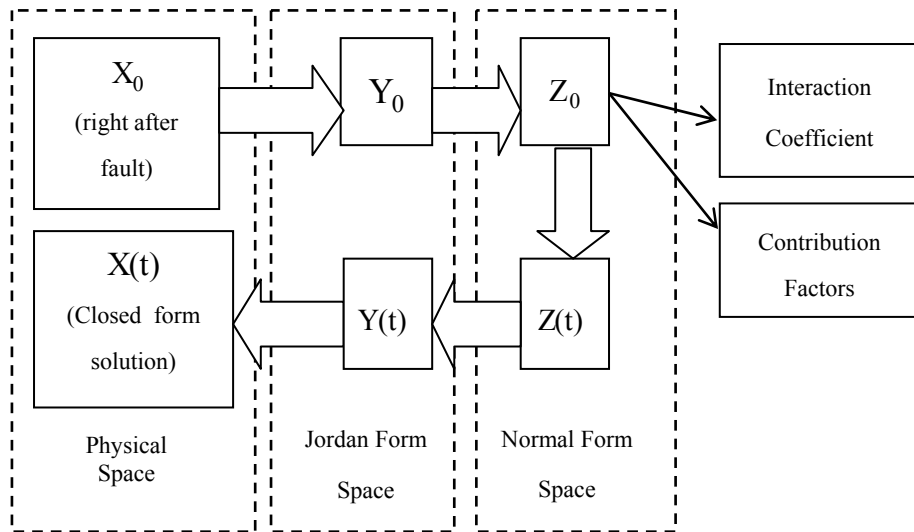
(۳)

به طوری که:

$$C^j = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^N V_{jp}^t (U^t H^p U) = [C_{kl}^j]$$



شکل ۱ تبدیل معادلات به صورت شکل نرمال میدان برداری



شکل ۲ ساختار کلی تبدیل شکل نرمال میدان برداری

در غیاب تشدید مرتبه سوم و بالاتر، این روند را می‌توان ادامه داد و با اعمال تبدیلات پی در پی، درجه

قسمت غیر خطی را در مختصات جدید افزایش داد. اگر در معادله (۱) از جملات درجه دوم و بالاتر چشم پوشی شود، به سادگی می‌توان پاسخ زمانی آن را با داشتن شرایط اولیه  $Z_0 = [z_{10}, z_{20}, z_{30}, \dots, z_{N0}]^T$  به صورت معادله (۶) به دست آورد.

$$y_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_j + \lambda_l)t} \quad (8)$$

$$z_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} \quad (6)$$

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} \left[ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_j + \lambda_l)t} \right] \quad (9)$$

برای یافتن شرایط اولیه مورد لزوم، بایستی دستگاه معادلات غیر خطی (۷) را حل کرد.

$$f(Z_0) = Y_0 - Z_0 - h_2(Z_0) = 0 \quad (7)$$

برای این منظور، می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی از جمله برنامه `fsolve` در نرم افزار MATLAB و یا روش‌های تکرار استفاده نمود. در بعضی از شرایط این دستگاه، معادلات غیر خطی جواب ندارد و این موضوع یکی از نقاط ضعف این تکنیک به شمار می‌رود.

$$y_j(t) = F_j(Y_0, t) \quad (10)$$

با بسط ماکلورن (۱۰) نسبت به  $Y_0$  حول مبدأ مختصات در فضای حالت و جایگزینی آن در معادله (۳)

برای این منظور، می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی از جمله برنامه `fsolve` در نرم افزار MATLAB و یا روش‌های تکرار استفاده نمود. در بعضی از شرایط این دستگاه، معادلات غیر خطی جواب ندارد و این موضوع یکی از نقاط ضعف این تکنیک به شمار می‌رود.

با قراردادن (۶) در معادله (۴) و اعمال تبدیل

غیر خطی ارائه نماید. اگر مجموعه  $R'_2$  خالی باشد، یعنی هیچ تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم رخ ندهد، پاسخ تقریبی به شکل (۱۳) خواهد بود:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N (L_j^i) e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N K_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (13)$$

#### ۴- سیستم مورد مطالعه

در این بخش با استفاده از مطالب ارائه شده در بخش (۲) و (۳)، سیستم قدرت شکل (۳) که شامل یک سیستم قدرت تک SMIB در حضور یک UPFC می باشد، مورد بررسی قرار می دهیم. پارامترهای این سیستم در پیوست (الف) آمده است.

#### ۴-۱- معادلات دینامیکی ژنراتور

هر ژنراتور سنکرون را می توان با مدل دو محوری و یک سیستم تحریک استاتیکی جایگزین نمود. معادلات دیفرانسیل (۱۴)، (۱۵) و (۱۶)، عملکرد یک ژنراتور سنکرون به همراه سیستم تحریک را به صورت دینامیکی مدل می کند:

#### - معادلات نوسانی رتور:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_k &= \omega_0(\omega_k - 1) = f_{1k} \\ \dot{\omega}_k &= \frac{1}{2H_k} (P_{mk} - (E'_{dk} I_{dk} + E'_{qk} I_{qk})) - \\ D_k (\omega_k - 1) &= f_{2k} \end{aligned} \quad (14)$$

#### - معادلات داخلی ولتاژ:

$$\begin{aligned} \dot{E}'_{qk} &= \frac{1}{T'_{d0k}} (E_{fdk} - (x_{dk} - x'_{dk}) I_{dk} - \\ E'_{qk}) &= f_{3k} \\ \dot{E}'_{dk} &= \frac{1}{T'_{q0k}} (-E'_{dk} - (x_{qk} - x'_{qk}) I_{qk}) = f_{4k} \end{aligned} \quad (15)$$

و حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حاصله و صرف نظر از جمله های مرتبه سوم و بالاتر خواهیم داشت [۷ و ۸]:

$$\begin{aligned} y_j(t) &= \left[ y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \in R'_2} \right] e^{\lambda_j t} + \\ &+ \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \in R'_2} + \\ &+ \left\{ \left[ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right] t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R'_2} \end{aligned} \quad (11)$$

مجموعه  $R'_2$  شامل تمامی ترکیبات سه تایی  $(k,l,j)$  که در شرط تشدید مرتبه دوم صدق می کند. در نتیجه پاسخ مرتبه دوم معادله دیفرانسیل را می توان به شکل (۱۲) تقریب زد:

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \sum_{j=1}^N u_{ij} y_j(t) = \sum_{j=1}^N (L_j^i + M_j^i t) e^{\lambda_j t} + \\ &+ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N K_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \end{aligned} \quad (12)$$

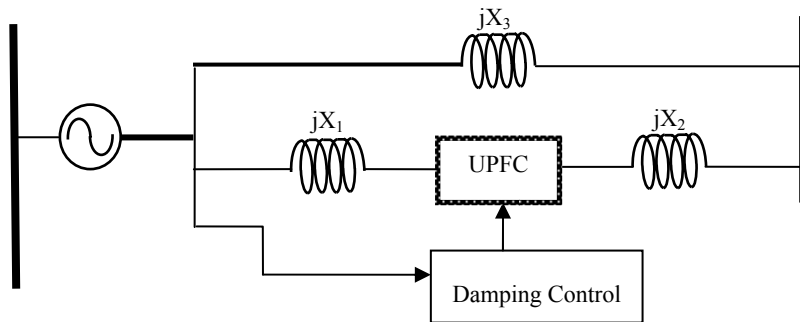
به طوری که:

$$L_j^i = u_{ij} \left[ y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \in R'_2} \right]$$

$$M_j^i = \left[ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} C_{kl}^i y_{k0} y_{l0} \right]_{(k,l,j) \in R'_2}$$

$$K_{kl}^i = \left[ y_{k0} y_{l0} \sum_{k=1}^N u_{ij} h_{kl}^i \right]_{(k,l,j) \in R'_2}$$

با توجه به روابط فوق، مشاهده می گردد که روش سری مودال با استفاده از یک تبدیل خطی، می تواند، پاسخی تقریبی و بسته ای را برای سیستم های



شکل ۳ دیاگرام SMIB در حضور یک UPFC

## سیستم تحریک استاتیکی

مدولاسیون و زاویه فاز، سیگنال‌های کنترلی هر یک از VSC ها و در نتیجه UPFC می‌باشند. کنترل سه پارامتر سیلان توان، ولتاژ AC و ولتاژ DC از طریق سه سیگنال کنترلی از مجموعه:  $\delta_B, \delta_E, m_B, m_E$  امکان پذیر است. شکل (۴) دیاگرام شماتیکی UPFC را با سه کانال کنترلی:  $U_P - P_t$ ،  $U_{AC} - V_{Et}$  و  $U_{DC} - V_{DC}$  با کنترلر PI مجزا، نشان می‌دهد.

سیگنال‌های خروجی هر یک از کنترلرهای UPFC به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [10]:

$U_P = m_B$ ،  $U_{AC} = m_E$  و  $U_{DC} = \delta_B$   
بنابراین برای کنترلرهای UPFC می‌توان نوشت:  
۱- کنترلر PI ولتاژ dc:

$$U_{DC} = \delta_B = \left( K_{DCP} + \frac{K_{DCI}}{s} \right) (V_{DC-ref} - V_{DC}) \quad (18)$$

۲- کنترلر PI ولتاژ ac:

$$U_{AC} = m_E = \left( K_{ACP} + \frac{K_{ACI}}{s} \right) (V_{Et-ref} - V_{Et}) \quad (19)$$

۳- کنترلر PI سیلان توان:

$$U_P = m_B = \left( K_{PP} + \frac{K_{PI}}{s} \right) (P_{t-ref} - P_t) \quad (20)$$

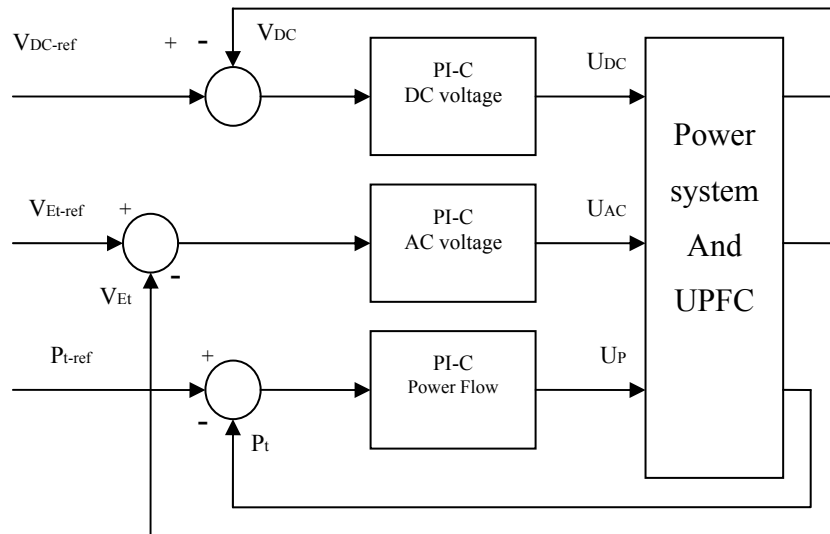
$$\begin{aligned} \dot{E}'_{fdk} &= -\frac{1}{T'_A} (E'_{fdk} + K_A (V_{refk} - V_t)) = f_{5k} \\ V_t &= \sqrt{v_{dt}^2 + v_{qt}^2} \\ &= \sqrt{(E'_{dk} + x'_{qk} I_{qk})^2 + (E'_{qk} - x'_{dk} I_{dk})^2} \end{aligned} \quad (16)$$

## ۲-۴- معادلات دینامیکی UPFC

ساختمان UPFC از دو کانورتر منبع ولتاژ (VSC) که به صورت پشت به پشت از طریق یک خازن به یکدیگر متصل می‌باشند، تشکیل شده است. این دو کانورتر توسط دو ترانس ET (Excitation Transformer) و BT (Boosting Transformer) به شبکه متصل شده‌اند. شکل (۳).

معادلات دینامیکی UPFC، با صرف نظر از مقاومت و حالت گذرای ترانس ها عبارت است از [۹]:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{DC} &= -\frac{3m_E}{4C_{DC}} [\cos\delta_E \sin\delta_E] \begin{bmatrix} i_{Ed} \\ i_{Eq} \end{bmatrix} - \\ &\frac{3m_B}{4C_{DC}} [\cos\delta_B \sin\delta_B] \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} = f_{6k} \end{aligned} \quad (17)$$



شکل ۴ دیاگرام شماتیکی UPFC با سه کنترلر PI مجزا

### ۳-۴- معادلات خطی سازی شده شبکه :

معادلات دینامیکی سیستم قدرت را به صورت معادله (۲۱) در نظر بگیرید. مدل خطی این سیستم از خطی نمودن معادله (۲۱) یعنی معادلات (۱۴) الی (۲۰) حول نقطه کار و صرف نظر از جملات درجه دوم و بالاتر به فرم معادله (۲۲) به دست می آید:

$$\dot{X} = F(X) = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6] \quad (21)$$

$$\dot{X} = AX + BU + \frac{1}{2} [X^T H_1 X \dots X^T H_N X]^T \quad (22)$$

به طوری که بردار حالت و متغیر ورودی برای سیستم تک ماشینه به فرم:

$$X = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E'_q, \Delta E_{fd}, \Delta V_{DC}]^T$$

$$U = [\Delta\delta_E \quad \Delta m_E \quad \Delta m_B]$$

و برای یک سیستم چند ماشینه به صورت بلوک های قطری می باشد.

### ۴-۴- مقادیر ویژه سیستم

سیستم SMIB دارای یک زوج مقدار ویژه مزدوج مختلط با مقدار حقیقی منفی می باشد. مقادیر ویژه، فرکانس تشدید و نسبت میرایی مود نوسانی در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ مقادیر ویژه، فرکانس تشدید و نسبت میرایی مود نوسانی شبکه

فرکانس تشدید (HZ)	نسبت میرایی ( $\zeta$ )	مقادیر ویژه	
1.095	0.045	$-0.3094 \pm j6.88$	$\lambda_4, \lambda_3$

$$Pm_i = \int_0^{+\infty} |X_{iN}(\omega) - X_{i_{other}}(\omega)| d\omega \quad (23)$$

$$Pm_{pu,i} = \frac{Pm_i}{\int_0^{+\infty} X_{iN}(\omega) d\omega} \quad (24)$$

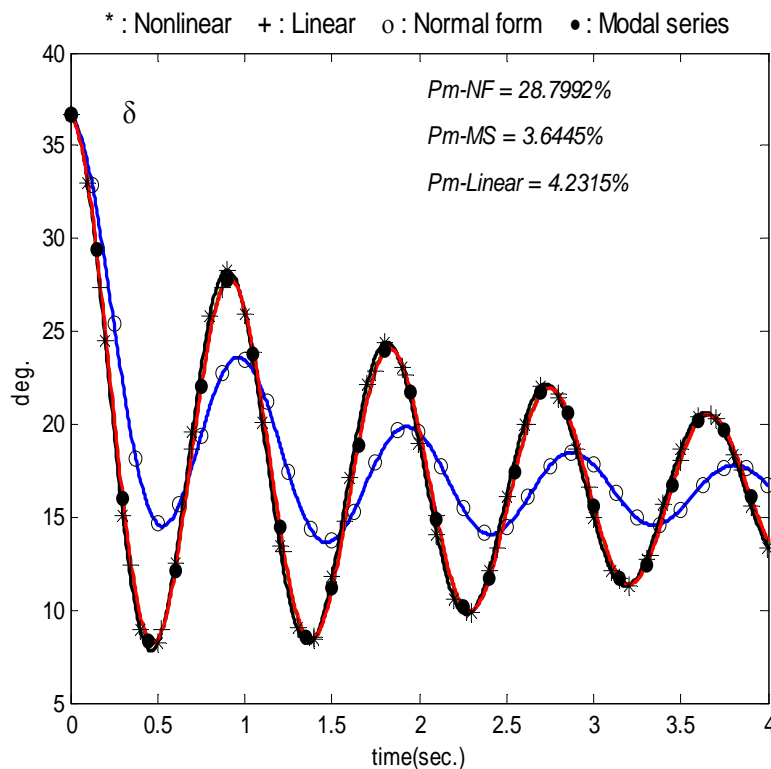
$$Pm = \sum_{i=1}^N Pm_i \quad (25)$$

اندازه تبدیل فوریه سیگنال های  $X_{iN}(\omega)$ ,  $X_{i_{other}}(\omega)$  به ترتیب نشان دهنده

خطی و سایر روش های تقریبی مذکور می باشد. محاسبه پارامتر میزان مشابهت نشان می دهد که پاسخ حاصل از روش سری مودال نسبت به سایر روش ها دارای دقت بیشتری است.

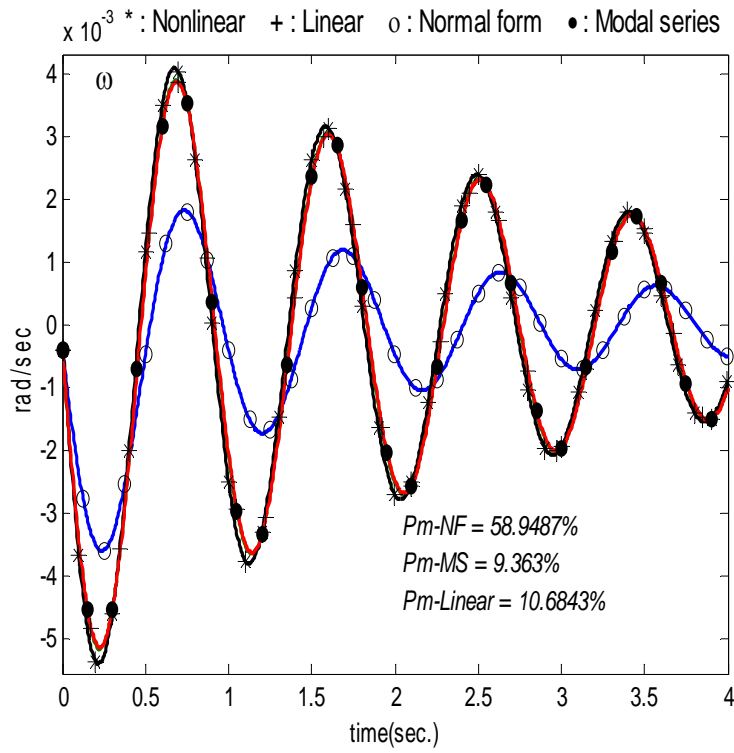
برای روشن تر شدن موضوع، نتایج شبیه سازی سیستم به ازاء  $D=3.52$  پس از یک ثانیه اتصال کوتاه درخط ۳، در شکل های (۵) الی (۹) آمده است. همان گونه که در این اشکال مشاهده می شود، در این نقطه کار، روش شکل نرمال میدان برداری نمی تواند بر خلاف روش های خطی و به خصوص سری مودال، پاسخ غیر خطی را دنبال و شبیه سازی نماید.

به منظور تعیین میزان مشابهت پاسخ حاصله از شبیه سازی غیر خطی و سایر پاسخ های تقریبی حاصل از روش هایی هم چون تحلیل خطی، مودال مرتبه دوم با روش شکل نرمال و سری مودال، معیار مشابهت به صورت زیر تعریف شده است [۷]:

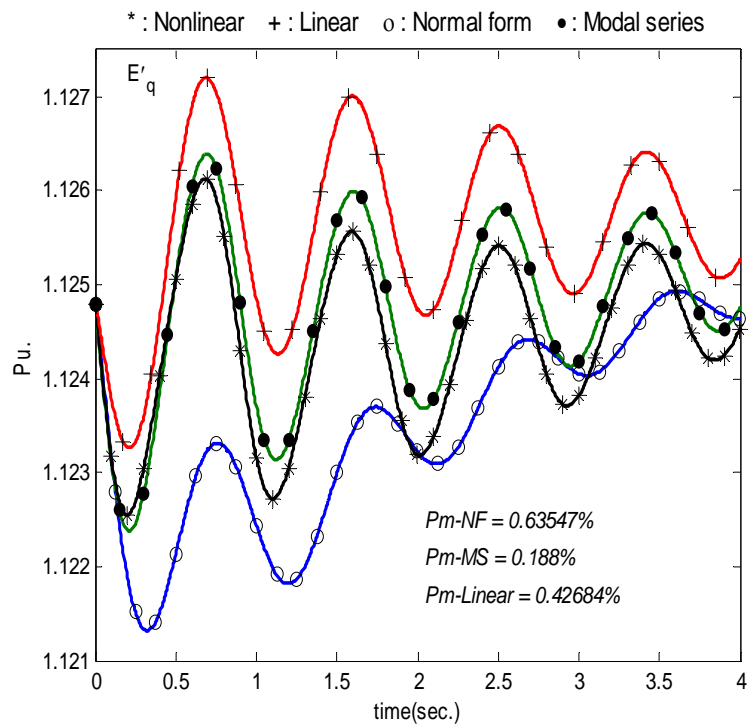


شکل ۵ نتایج شبیه سازی روش های مختلف برای  $\delta$

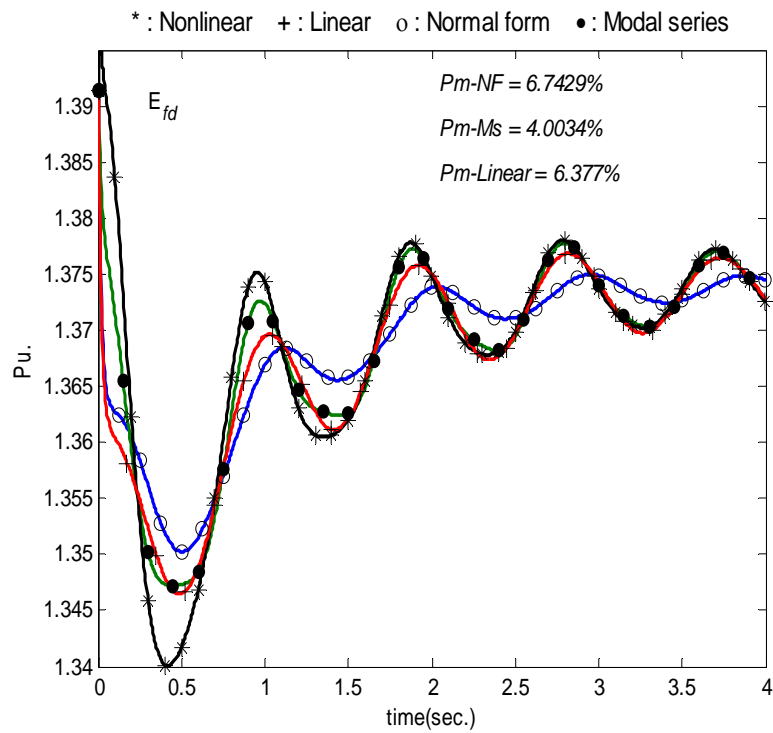




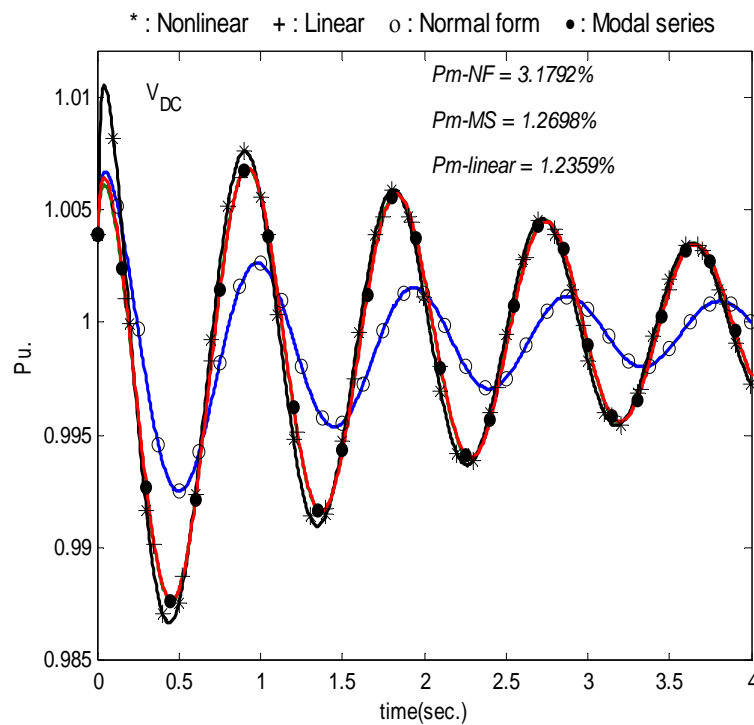
شکل ۶ نتایج شبیه سازی روش های مختلف برای  $\omega$



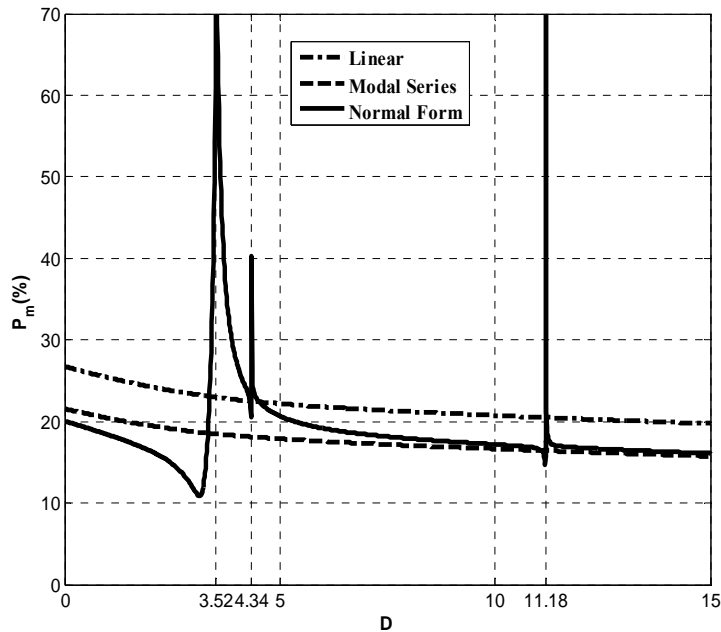
شکل ۷ نتایج شبیه سازی روش های مختلف برای  $E'_q$



شکل ۸ نتایج شبیه سازی روش های مختلف برای  $E_{fd}$



شکل ۹ نتایج شبیه سازی روش های مختلف برای  $V_{DC}$



شکل ۱۰ تغییرات  $P_m$  بر حسب ضریب میرایی

۲- با نزدیک شدن به شرایط تشدید، اعتبار پاسخ ناشی از شکل نرمال میدان برداری، کم‌تر می‌شود و در صورت بروز تشدید، اعتبار آن به طور کامل از بین می‌رود. بنابراین در استفاده از شاخص‌های تعریف شده بر اساس پاسخ فرم بسته این روش بایستی دقت نمود.

۳- پاسخ سری مودال در شرایط مختلف نسبت به سایر روش‌های تقریبی، از اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد.

#### پیوست (الف): مشخصات سیستم مورد مطالعه

پارامترهای ماشین، سیستم انتقال و UPFC:

$$H=4.0, T'_{d0}=5.044, T'_{q0}=4, x_d=1.0, x_q=0.7, x'_d=0.3,$$

$$KA=2.0, TA=0.02, V_{Rmax}=10, V_{Rmin}=-10$$

$$x_1=0.1, x_2=0.3, x_3=0.2, x_E=0.3, x_B=0.03$$

$$C_{dc}=1, K_{DCP}=14, K_{DCI}=10, K_{pp}=1, K_{PI}=5$$

$$K_{ACP}=1.75, K_{ACI}=20$$

منحنی تغییرات  $P_m$  بر حسب تغییرات ضریب میرایی  $D$  در شکل (۱۰) آمده است. پاسخ روش سری مودال در تمام شرایط، وضعیت مطلوبی دارد. پاسخ حاصل از روش نرمال فرم در بعضی نقاط که تشدید و یا شبه تشدید مرتبه دوم رخ داده است، دارای پرش می‌باشد.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از معرفی مختصری از روش‌های مودال خطی، شکل نرمال و سری مودال، با شبیه‌سازی یک سیستم قدرت ساده به بررسی نقاط ضعف و قوت این روش‌های تقریبی پرداختیم و نتایج زیر به دست آمد:

۱- برای دستیابی به پاسخ غیر خطی با روش شکل نرمال میدان برداری، نیاز به حل یک دسته معادلات غیر خطی است که در مواردی این دستگاه معادلات غیر خطی دارای پاسخ نیستند.

## مراجع

1. Dcjan J. Sobajic, "An introduction to normal forms of vector fields: New Frameworks for Assessing Stability of Highly Stressed Power Systems," IEEE Transaction on Power System, No. 1, pp. 108-111, 1996.
2. Y. Tamota, and N. Yorino, "Possibility of Auto-& Hetro-Parametric Resonances in Power Systems and their Relationship with Long-Term Dynamics" IEEE Transaction on Power System, vol. PWRS-2, No.4, pp.890-894, November 1987.
3. N. Yorinio, H. Sasaki, Y.Tamura and Yokoyama, "A Generalized Analysis Method of Auto-Parametric Resonances in Power Systems" IEEE Transaction on Power System, vol.4, No.3, pp.1057-1064, August 1989.
4. A. M. A. Hamdan, "A Generalized Analysis Method of Auto-Parametric Resonance in Power System," IEEE Transaction on Power System, vol.4, No.3, pp.843-848, August 1989.
5. C. M. Lin, V. Vittal, W. Kliemann and A. A. Fouad, "Investigation of Modal Interaction and its Effects on Performance in Stressed Power Systems Using Normal Forms of Vector Fields," IEEE Transaction on Power System, vol. 11, No.2, pp.781-787, May 1996.
6. J. Thaper, V. Vittal, W. Kliemann, A. A. Fouad, "Application of Normal Form of the Vector Field to Predict Inter area Separation in Power Systems ," IEEE Transaction on Power System, vol.12, No.2, pp. 844-850, May 1997.
7. N. Pariz, H. M. Shanechi, and E. Vaahedi, "Explaining and Validating Stressed Power Systems Behavior Using Modal Series" IEEE Transaction on Power System, vol.18, No.2, pp.778-785, May 2003.
8. H. M. Shanechi, N. Pariz, and E. Vaahedi, "General Nonlinear Modal Representation of Large Scale Power Systems ," IEEE Transaction on power System, vol.18, No.3, pp.1103-1109, August 2003.
9. Wang, "Application of Modeling UPFC into Multi-Machine Power System, IEE Proc. Gener. Trans. Distrib., vol. 146, No. 3, pp. 306-312, 1999.
10. H.F. Wang, "Interactions and Multivariable Design of Multiple Control Functions of a Unified Power Flow Controller," Electric Power Systems Research, vol.24, pp. 591-600, 2002.