

بررسی تداخل غیرخطی مدهای سیستم قدرت در حضور UPFC با استفاده از سری مودال

سپهر سلطانی^۱، استادیار، رضا قاضی^۲، استاد، ناصر پریز^۳، استاد

۱- دانشگاه آزاد اسلامی - واحد سبزوار - گروه برق دانشکده مهندسی - سبزوار - ایران - sep_soltani@iaus.ac.ir

۲- گروه برق دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران - rghazi@ferdowsi.um.ac.ir

۳- گروه برق دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران - n-pariz@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده: پیشرفت‌های اخیر در الکترونیک قدرت استفاده از ادوات FACTS را در سیستم‌های قدرت مطرح نموده است. مطالعات جدید نشان داده است حضور ادوات FACTS همچون UPFC، می‌تواند تداخل میان مدهای سیستم را افزایش دهد. در این مقاله، برای اولین بار، تداخل‌های غیرخطی میان کنترل‌کننده‌های مختلف UPFC در یک شبکه قدرت، با استفاده از روش سری مودال، موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور روشی جدید و کلی برای یافتن ماتریس‌های جاکوبین و هسیان به شکل بسته، برای سیستم‌های قدرت شامل UPFC، ارائه گردیده است. علاوه بر آن از طریق محاسبه اندیس‌های مربوطه، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ضریب میرایی و تغییر درجه غیرخطی سیستم بر روی میزان تداخل مدهای سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی صحت پاسخ حاصل از روش‌های مختلف شاخص مشابهت محاسبه گردیده است. واژه‌های کلیدی: کنترل‌کننده یکپارچه توان (UPFC)، سری مودال، شاخص تداخل.

Analysis of Nonlinear Interactions in Power Systems Modes with UPFC Controller Using Modal Series Method

S. Soltani, Assistant of Professor ¹, R. Ghazi, Professor ², N. Pariz, Professor ³

1- Faculty of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, sep_soltani@iaus.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, University of Mashhad, Mashhad, Iran, rghazi@ferdowsi.um.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, University of Mashhad, Mashhad, Iran, n-pariz@ferdowsi.um.ac.ir

Abstract: Recent development of power electronics introduces the use of FACTS devices in power systems. The novel studies have shown that the presence of these devices, like UPFC, can enhance the interaction of system modes. In this paper, for the first time, the nonlinear interactions among different controllers of UPFC in a SMIB power system are analyzed, using the Modal Series method. To do so, a new and general method has proposed to obtain the Jacobian and Hessian matrices in closed form for power systems with UPFC. In addition, the effect of the damping coefficient and fault clearing time on interaction phenomenon examined. In order to analyzing the accuracy of the solutions obtained by different methods, a proximity measure is computed.

Keywords: Unified power flow controller (UPFC), modal series, interaction index.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰ و ۱۳۹۴/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۰۸

نام نویسنده مسئول: سپهر سلطانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خراسان رضوی - سبزوار - مجتمع دانشگاه آزاد اسلامی - دانشکده مهندسی - گروه برق.

۱- مقدمه

تداخل‌های غیرخطی میان مدهای خطی که به دلیل عوامل غیرخطی ایجاد می‌شود، نقش مهمی در پیچیده‌سازی رفتار سیستم‌های قدرت به‌خصوص سیستم‌های قدرت تحت استرس دارند. برای بررسی اثرات غیرخطی در سیستم‌های قدرت تحت استرس که لزوم آن در مرجع [۱] آمده است، کمیته‌ای در IEEE در اواخر سال ۲۰۰۰ میلادی تشکیل شده است. همچنین از اواخر دهه ۱۹۸۰ در زمینه تداخل‌های غیرخطی میان مدهای خطی سیستم و اثرات آن بر روی رفتار سیستم قدرت تحقیقاتی صورت گرفت که نتایج در مراجع [۲-۶] ارائه گردیده است. در این تحقیقات از روش شکل نرمال میدان برداری^۱ یا شکل نرمال میدان برداری (NF) استفاده شده است.

از طرفی لزوم استفاده از ادوات FACTS در بهبود عملکرد سیستم‌های قدرت کاملاً به اثبات رسیده است [۷]. مفهوم کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان^۲ (UPFC) در سال ۱۹۹۱ توسط "جی یوجی" ارائه گردید [۸]. UPFC قادر به کنترل همزمان یا انتخابی تمام پارامترهای مؤثر بر سیلان توان در خط انتقال یعنی ولتاژ، امپدانس و زاویه فاز است و این قابلیت منحصر به فرد با قید "یکپارچه" در نام آن معنی یافته است. علاوه بر آن می‌توان به‌صورت مستقل، سیلان هر دو توان اکتیو و راکتیو را در خط کنترل نمود. حضور ادوات کنترلی می‌تواند منجر به تشدید میان مدهای سیستم و مدهای کنترلی سیستم گردد [۹]. روش‌های تحلیل مودال خطی در چنین شرایطی، قادر به شناسایی عوامل غیرخطی و نتایج عملکرد این تداخل‌ها نخواهند بود. روش‌هایی که عمدتاً برای تحلیل سیستم‌های غیرخطی به کار رفته است شامل تحلیل مودال خطی و روش شکل نرمال برداری می‌باشند. با به‌کارگیری این روش‌ها می‌توان رفتار سیستم‌های قدرت تحت استرس و سیستم‌های قدرت شامل ادوات FACTS که در آن‌ها انواع تداخل‌ها، به‌خصوص میان کنترل‌کننده‌های مختلف ادوات FACTS مطرح است، را مورد مطالعه قرار داد و عوامل غیرخطی مؤثر بر تداخل را شناسایی و سیستم کنترلی مناسب برای این ادوات طراحی کرد. اگرچه روش شکل نرمال میدان برداری ابزار مفیدی برای این منظور خواهد بود، لیکن دارای مشکلاتی نظیر، محدود بودن ناحیه جذب و نداشتن پاسخ در بعضی شرایط و غیره است که روش سری مودال^۳ (MS) آن‌ها را مرتفع ساخته است [۱۰، ۱۱].

در مراجع [۱۲-۱۴] تئوری شکل نرمال میدان برداری برای بررسی تداخل‌های غیرخطی ناشی از کاربرد جبران‌کننده SVC در سیستم قدرت به کار رفته است. در این مطالعات روش تحلیلی مبتنی بر تئوری شکل نرمال میدان برداری برای تحلیل تداخل‌های مرتبه دوم مدها، در سیستم‌های دارای جبران‌کننده SVC ارائه شده است. در این مراجع نشان داده شده است که کنترل‌کننده SVC تأثیر بسیار مؤثری بر روی عملکرد غیرخطی سیستم به‌خصوص سیستم‌های تحت استرس می‌گذارد. طبیعت این تداخل‌ها پیچیده بوده و به فاکتورهای بسیاری همچون تنظیمات کنترل‌کننده‌ها و شرایط کاری شبکه بستگی دارد.

پدیده تداخل میان کانال‌های کنترلی UPFC در مرجع [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت. در این مرجع، UPFC به‌عنوان یک سیستم چند ورودی و چند خروجی (MIMO) در نظر گرفته شده و یک کنترل‌کننده چند متغیره برای جلوگیری از تداخل میان کانال‌های کنترلی آن طراحی گردیده است.

در مرجع [۱۶] روش شکل نرمال میدان برداری برای تحلیل تداخل کانال‌های کنترلی (کنترل ولتاژ DC، کنترل ولتاژ AC و کنترل توان منتقله) یک UPFC به کار رفته است. اندیس تداخل تعریف شده بر اساس این روش محاسبه و تداخل میان مدهای سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که روش شکل نرمال میدان برداری در تمام شرایط کار سیستم پاسخ صحیحی ارائه نمی‌کند (شرایط تشدید و شبه تشدید) به علت استفاده از تبدیل غیرخطی دارای محدودیت‌هایی است [۱۱، ۱۲]، بررسی تداخل میان مدهای سیستم با استفاده از این روش، به‌تنهایی پاسخ‌گوی تمامی نظرات طراحان ادوات FACTS نخواهد بود.

رویکردی جدید در به‌کارگیری روش اختلال^۴ جهت تحلیل تداخل‌های غیرخطی در سیستم‌های قدرت بزرگ تحت استرس بسط داده شده است [۱۷، ۱۸]. کارایی روش پیشنهادی در بررسی تداخل‌های کانال‌های کنترلی UPFC مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله برای اولین بار روش سری مودال برای شبیه‌سازی و بررسی تداخل‌های غیرخطی میان کانال‌های کنترلی یک UPFC و همچنین میان کانال‌های کنترلی آن با سیستم قدرت به کار گرفته شده است. در این راستا، از روش جدید و کلی برای یافتن ماتریس‌های جاکوبی و هسیان به شکل بسته، برای سیستم‌های قدرت شامل UPFC، استفاده شده است [۱۹]. علاوه بر آن از طریق محاسبه اندیس‌های تداخل، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ضریب میرایی و تغییر درجه غیرخطی سیستم بر روی میزان تداخل مدهای سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده صحت نتایج حاصله را تأیید می‌نماید. نتایج حاصله کلی بودن نتایجی که بر اساس ضرایب تعریف‌شده مبتنی بر روش شکل نرمال میدان برداری در مرجع [۱۷] آمده است را دچار اشکال می‌سازد.

به‌منظور بررسی میزان مشابهت پاسخ حاصله از شبیه‌سازی غیرخطی و سایر پاسخ‌های تقریبی حاصل از روش‌هایی مانند تحلیل خطی، روش شکل نرمال و سری مودال، شاخص معیار مشابهت تعریف و نتایج حاصله ارائه گردید.

۲- سری مودال

فرض کنید رابطه (۱) دینامیک غیرخطی یک سیستم را که دارای N متغیر حالت است، بیان می‌کند. رابطه (۲) بسط تیلور رابطه (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 و $H.O.T$ جمله‌های مراتب بالای بسط است به طوری که:

$$H^i = [\partial^2 F_{kl}^i / \partial x_k \partial x_l]_{X_{SEP}} \text{ و } A_i = [\partial F_i / \partial x_j]_{X_{SEP}}$$

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 λ_i با نرم واحد تعریف شود. پاسخ رابطه (۱) به شرایط اولیه $Y_0 = [Y_{10}, \dots, Y_{N0}]$ به صورت زیر قابل بیان است:

$$y_j(t) = F_j(Y_0, t) \quad (3)$$

با بسط ماکلورن (۳) نسبت به Y_0 حول مبدأ مختصات در فضای حالت و با قرار دادن آن در رابطه (۱) و حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حاصله و صرف نظر از ترم‌های مرتبه سوم و بالاتر خواهیم داشت:

$$y_j(t) = \left[y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h 2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R_2'} \right] e^{\lambda_j t} + \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h 2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \notin R_2'} + \left\{ \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right] t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R_2'} \quad (4)$$

به طوری که:

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

و

$$h 2_{kl}^j = \frac{C_{kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j}$$

مجموعه R_2' شامل تمامی ترکیبات سه تایی (k, l, j) که در شرط تشدید مرتبه دوم صدق می‌کند. در نتیجه پاسخ مرتبه دوم رابطه دیفرانسیل را می‌توان به شکل زیر تقریب زد:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} y_j(t) = \sum_{j=1}^N (L_j^i + M_j^i t) e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N K_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (5)$$

که:

$$L_j^i = u_{ij} \left[y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h 2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R_2'} \right]$$

$$M_j^i = \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right]_{(k,l,j) \in R_2'}$$

$$K_{kl}^i = \left[y_{k0} y_{l0} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} h 2_{kl}^j \right]_{(k,l,j) \notin R_2'}$$

با توجه به روابط فوق مشاهده می‌گردد که روش سری مودال با استفاده از یک تبدیل خطی می‌تواند، پاسخی تقریبی و به شکل بسته‌ای را برای سیستم‌های غیرخطی ارائه نماید. اگر مجموعه R_2' خالی باشد، یعنی هیچ تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم رخ ندهد، پاسخ تقریبی به شکل زیر خواهد بود:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N (L_j^i) e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N K_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (6)$$

$$I 2_{kl}^i = \left| \frac{K_{kl}^i}{\text{real}(\lambda_k + \lambda_l)} \right| \quad (7)$$

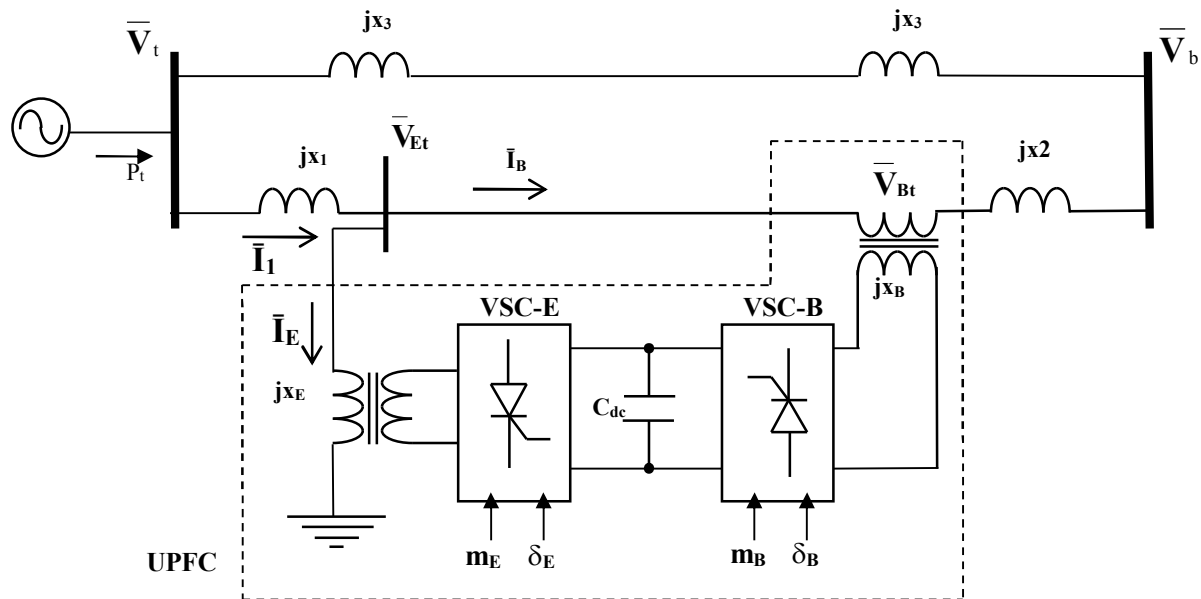
شاخص تداخل $I 2_{kl}^i$ به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود [۱۰]. در عبارت $K_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ ، دو پارامتر پاسخ زمانی را متأثر می‌سازد، اندازه K_{kl}^i و ثابت زمانی مود مرتبه دوم، $\tau_{kl} = -1/\text{real}(\lambda_k + \lambda_l)$. لذا این شاخص به عنوان معیاری برای اندازه تأثیر مدهای تداخلی مرتبه دوم در پاسخ زمانی تعریف می‌شود. شاخص تداخل $I 2_{kl}^i$ به هر متغیر حالت، N^2 مقدار نسبت می‌دهد که با مقایسه آن‌ها می‌توان مدهای تداخلی مرتبه دوم را که در پاسخ زمانی آن متغیرهای حالت سیستم تأثیر نسبی بیشتری دارند، تشخیص داد.

برای بررسی اثر تحریک کنندگی عوامل غیرخطی بر روی مدهای خطی سیستم شاخص Π_j^i به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\Pi_j^i = \frac{\text{sign}(|u_{ij} y_{j0}| - 0.1) \cdot |L_j^i|}{\max(0.1, |u_{ij} y_{j0}|)} \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

این شاخص اندازه نسبت دامنه تحریک مود خطی λ_j را در متغیر حالت i ام سیستم غیرخطی، به دامنه تحریک آن در تحلیل خطی نشان می‌دهد.

برای اینکه این شاخص در هر حالتی قابل محاسبه باشد، بزرگ‌ترین مقدار بین ۰/۱ و $|u_{ij} y_{j0}|$ ، در مخرج کسر انتخاب و برای تشخیص آنکه شاخص نسبت به کدام مقدار محاسبه شده است از تابع علامت استفاده شده است. اگر این شاخص علامت مثبت داشته باشد به این معنی خواهد بود که در مخرج کسر عبارت $|u_{ij} y_{j0}|$ انتخاب شده است و اگر علامت منفی داشته باشد به این معنی خواهد بود در مخرج کسر ۰/۱ انتخاب شده است. بنابراین علامت قراردادی این شاخص برای درک صحیح اندازه شاخص کمک می‌کند.



شکل ۱: سیستم تک ماشین به بای نهایت (SMIB) با یک UPFC

• روابط دینامیکی UPFC

ساختمان UPFC از دو مبدل منبع ولتاژ^۵ (VSC) که به صورت پشت‌به‌پشت از طریق یک خازن به یکدیگر متصل می‌باشند، تشکیل شده است. این دو مبدل توسط دو ترانسفورمر ET^۶ و BT^۷ به شبکه متصل شده‌اند (شکل ۱). روابط دینامیکی UPFC را با صرف‌نظر از مقاومت و حالت گذرای ترانسفورمرها و اعمال تبدیل پارک، برای UPFC می‌توان نوشت [۲۰، ۲۱]:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Ed} \\ \dot{V}_{Eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_E \\ x_E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ed} \\ i_{Eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_E \cos \delta_E V_{DC}}{2} \\ \frac{m_E \sin \delta_E V_{DC}}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Bd} \\ \dot{V}_{Bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_B \\ x_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_B \cos \delta_B V_{DC}}{2} \\ \frac{m_B \sin \delta_B V_{DC}}{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\dot{V}_{DC} = -\frac{3m_E}{4C_{DC}} [\cos \delta_E \sin \delta_E] \begin{bmatrix} i_{Ed} \\ i_{Eq} \end{bmatrix} - \frac{3m_B}{4C_{DC}} [\cos \delta_B \sin \delta_B] \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ i_{Bq} \end{bmatrix} = f_5 \quad (14)$$

$m_E, \delta_E, m_B, \delta_B$ به ترتیب نسبت مدولاسیون اندازه و زاویه فاز، سیگنال‌های کنترلی هر یک از مبدل‌های منبع ولتاژ و در نتیجه سیگنال‌های کنترلی ورودی به UPFC می‌باشند. UPFC جهت کنترل توان اکتیو بر روی خط انتقال و تغذیه AC باس بار E نصب می‌گردد. به منظور عملکرد نرمال UPFC، ولتاژ DC بر روی خازن C_{dc} یعنی V_{DC} می‌بایست توسط یک تنظیم‌کننده ولتاژ کنترل گردد. از طریق الگوریتم مدولاسیون عرض پالس برای مبدل ولتاژ (VSC) تثبیت

۳- ساختار سیستم قدرت به همراه UPFC

مهم‌ترین اجزاء تشکیل‌دهنده یک سیستم قدرت شامل ژنراتورهای سنکرون و ادوات کنترلی FACTS، مانند UPFC است. شکل ۱ دیاگرام تک‌خطی یک سیستم قدرت SMIB به همراه یک UPFC را نشان می‌دهد. روابط حاکم بر این شبکه در قسمت بعدی ارائه می‌گردد.

۳-۱- روابط دینامیکی ژنراتور و UPFC

هر ژنراتور سنکرون را می‌توان با مدل دوجوری و یک سیستم تحریک استاتیکی جایگزین نمود. روابط دیفرانسیل زیر عملکرد یک ژنراتور سنکرون به همراه سیستم تحریک را به صورت دینامیکی مدل می‌کند:

• روابط نوسانی روتور

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega_0 (\omega - 1) = f_1 \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{2H} (P_m - (E'_d I_d + E'_q I_q) - D(\omega - 1)) = f_2 \end{aligned} \quad (9)$$

• روابط داخلی ولتاژ

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - (x_d - x'_d) I_d - E'_q) = f_3 \quad (10)$$

• سیستم تحریک استاتیکی

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} (E_{fd} + K_A (V_{ref} - V_t)) = f_4 \quad (11)$$

به‌طوری‌که:

$$V_t = \sqrt{v_{dt}^2 + v_{qt}^2} = \sqrt{(E'_d + x'_d I_d)^2 + (E'_q - x'_d I_d)^2}$$

به طوری که بردار حالت و متغیر ورودی برای سیستم تک ماشینی به شکل:

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

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

و برای یک سیستم چندماشینه به صورت بلوک های قطری است.

۴-۱- متغیرهای خروجی

روابط خروجی را می توان به شکل استاندارد زیر نوشت:

$$Y = CX + DU + \frac{1}{2} [X^T H_{y_1} X \dots X^T H_{y_{N_1}} X]^T \quad (20)$$

متغیرهای خروجی موردنظر همان گونه که در بخش (۳-۲) بیان گردید شامل ولتاژ لینک DC، ولتاژ باس UPFC و توان حقیقی منتقله از خط انتقال است. پس داریم:

$$Y = [\Delta V_{DC} \quad \Delta V_{Et} \quad \Delta P_t]^T$$

۴-۲- روابط کنترل کننده ها

کنترل کننده های موردنظر در این مطالعه مطابق روابط (۱۵) الی (۱۷)، کنترل کننده های PI مجزا می باشند که می توان به صورت رابطه (۲۱) مرتب شوند:

$$\begin{cases} \dot{X}_C = Y - V \\ U = -K_P(Y - V) - K_I X_C \end{cases} \quad (21)$$

به طوری که V تغییر در مراجع یعنی:

$$V = [\Delta V_{DC-ref} \quad \Delta V_{Et-ref} \quad \Delta P_{t-ref}]^T$$

و K_P و K_I ، ماتریس هایی ثابت و قطری می باشند.

۴-۳- ماتریس حالت مدار بسته

از ترکیب روابط (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) و پس از ساده سازی نتیجه، روابط حالت مدار بسته را می توان به صورت زیر مرتب نمود:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_C \end{bmatrix} = A_{total} \begin{bmatrix} X \\ X_C \end{bmatrix} + B_{total} V + \frac{1}{2} [X \quad X_C] H_{total} \begin{bmatrix} X \\ X_C \end{bmatrix} \quad (22)$$

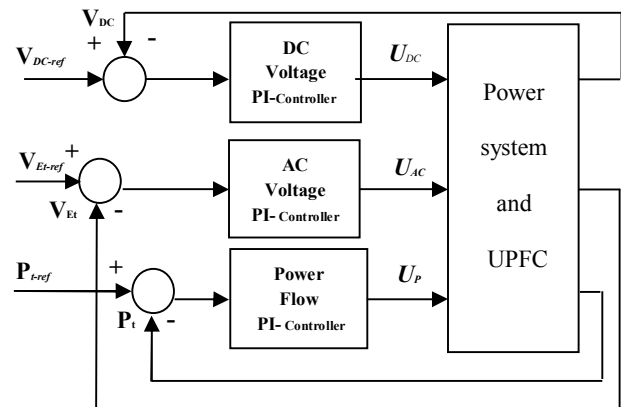
و

$$Y = [MC \quad -DKI_t] \begin{bmatrix} X \\ X_C \end{bmatrix} + DKP_t V + \frac{1}{2} M [X^T H_{y_1} X \dots X^T H_{y_{N_1}} X]^T \quad (23)$$

برای A_{total} ، B_{total} داریم:

$$A_{total} = \begin{bmatrix} A - L_p C & -BK I_t \\ MC & -DK I_t \end{bmatrix}, \quad B_{total} = \begin{bmatrix} L_p \\ -M \end{bmatrix}$$

می گردد، بنابراین فقط سه تابع کنترلی شامل کنترل توان انتقالی، کنترل ولتاژ AC و کنترل ولتاژ DC کافی است.



شکل ۲: دیاگرام شماتیکی UPFC با سه کنترل کننده PI مجزا

جهت اعمال چنین توابع کنترلی می بایست سه کنترلر طراحی گردد. کنترل این پارامترها از طریق سه سیگنال کنترلی از مجموعه UPFC را با سه کانال کنترلی $U_{DC} - V_{DC}$ ، $U_{AC} - V_{Et}$ و $U_P - P_t$ شکل ۲ دیاگرام شماتیکی با کنترل کننده PI مجزا، نشان می دهد. در این مقاله سیگنال های خروجی کنترل کننده های UPFC به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۱۵]:

$$U_{DC} = \delta_B \quad \text{و} \quad U_{AC} = m_E, \quad U_P = m_B$$

بنابراین برای کنترل کننده های UPFC می توان نوشت:

۱- کنترل کننده PI ولتاژ DC

$$\delta_B = \left(K_{DCP} + \frac{K_{DCL}}{s} \right) (V_{DC-ref} - V_{DC}) \quad (15)$$

۲- کنترل کننده PI ولتاژ AC

$$m_E = \left(K_{ACP} + \frac{K_{ACL}}{s} \right) (V_{Et-ref} - V_{Et}) \quad (16)$$

۳- کنترل کننده PI سیلان توان

$$m_B = \left(K_{PP} + \frac{K_{PI}}{s} \right) (P_{t-ref} - P_t) \quad (17)$$

۳- خطی سازی روابط شبکه

روابط دینامیکی سیستم قدرت را به صورت رابطه (۱۸) در نظر بگیرید. مدل خطی این سیستم از خطی نمودن رابطه (۱۸) یعنی روابط (۹) الی (۱۴) حول نقطه کار و با صرف نظر از جملات درجه دوم و بالاتر به شکل رابطه (۱۹) به دست می آید [۱۹].

$$\dot{X} = F(X) = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5]^T \quad (18)$$

$$\dot{X} = AX + BU + \frac{1}{2} [X^T H_1 X \dots X^T H_N X]^T \quad (19)$$

شکل‌ها، دو بعد صفحه مشجر به ترتیب نشان‌دهنده اندیس‌های k و l و بعد عمود بر آن‌ها نشان‌دهنده اندازه شاخص $I2_{kl}^i$ است. شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که میان مدهای نوسانی λ_3 و λ_4 ، به‌خصوص برای E_q' ، تداخل قابل توجهی وجود دارد. اگر تداخل مرتبه دوم میان مود λ_i و λ_j با نماد $\lambda_{i,j} = \lambda_i + \lambda_j$ نشان داده شود، بنابراین داریم:

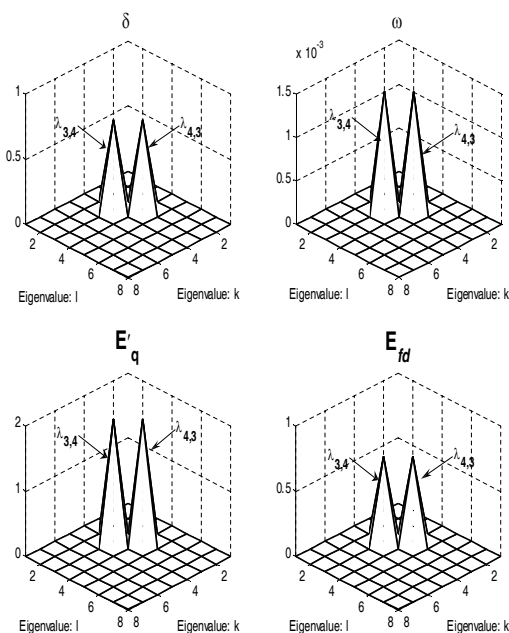
$$\lambda_{3,4} = \lambda_{4,3} = -0.618$$

در نتیجه $\lambda_{3,4}$ و $\lambda_{4,3}$ یک جمله نمایی به‌صورت $2 \times \text{real}(k_{3,4}^i) e^{-0.618 t}$ در پاسخ زمانی حالت i ام ایجاد می‌کند. این جمله نمایی، پاسخ زمانی حالت‌هایی را متأثر می‌سازد که اندازه $I2_{3,4}^i$ و $I2_{4,3}^i$ در آن‌ها مقدار معتنابهی است. این اندازه فقط به ازای $i=3$ بزرگ است. بنابراین باعث می‌شود که پاسخ سیستم غیرخطی با پاسخ حاصل از شبیه‌سازی خطی برای E_q' ، متفاوت باشد. به عبارت دیگر سبب می‌شود که پاسخ سیستم غیرخطی نسبت به سیستم خطی دارای یک نوع کاهش نمایی باشد.

جدول ۱: مقادیر ویژه، فرکانس تشدید و نسبت میرایی مدهای نوسانی در

چهار حالت کنترلی و برای $D=3/52$

فرکانس میرایی (HZ)	نسبت میرایی	مقادیر ویژه	حالت کنترلی
۱/۱۵۳۳	۰/۰۶۴۳	$-0.4668 \pm j7.2463$	حالت ۱
۱/۱۵۳۲	۰/۰۶۴۴	$-0.4675 \pm j7.2456$	حالت ۲
۱/۰۹۳۵	۰/۱۰۴۳	$-0.7207 \pm j6.8709$	حالت ۳
۱/۰۹۳۶	۰/۱۰۳۹	$-0.7178 \pm j6.8714$	حالت ۴



شکل ۳: اندازه شاخص $I2_{kl}^i$ برای متغیرهای حالت

H_{total} ، $(N + N_1)$ ماتریس $(N + N_1) \times (N + N_1)$ خواهد بود که برای $i = 1$ تا N برابر است با:

$$H_{total}(i) = \begin{bmatrix} HH(i) & \text{zeros}(N, N_1) \\ \text{zeros}(N_1, N) & \text{zeros}(N_1, N_1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

به‌طوری‌که:

$$HH(i) = H_i - L_{P_i} H_{y_i}$$

و H_{total} برای $i = N + 1$ تا $N + N_1$ برابر است با:

$$H_{total}(i) = \begin{bmatrix} M_i H_{\Delta y_i} & \text{zeros}(N, N_1) \\ \text{zeros}(N_1, N) & \text{zeros}(N_1, N_1) \end{bmatrix} \quad (25)$$

به‌طوری‌که:

$$M \triangleq [I + DK_p]^{-1}, \quad KP_i \triangleq K_p [I + DK_p]^{-1}$$

$$KI_i \triangleq [I + K_p D]^{-1} K_i, \quad L_{P_i} \triangleq B K_{P_i}$$

۵- سیستم مورد مطالعه

در این بخش روش سری مودال بر روی سیستم نمونه شکل ۱ پیاده‌سازی می‌شود. اگرچه این سیستم ساده به نظر می‌رسد ولی مطالعه تداخل مدهای کنترلی آن با مدهای نوسانی ژنراتور سنکرون کاری پیچیده و دقیق است.

عملکرد نرمال در UPFC کنترل مستمر V_{DC} است، پس می‌توان چهار حالت عملکرد برای کنترل‌کننده‌های UPFC به‌صورت زیر در نظر گرفت [۱۷]:

حالت کنترلی ۱- کنترل‌کننده V_{DC} مدار بسته و کنترل‌کننده V_{AC} و کنترل‌کننده سیلان توان مدار باز باشند.

حالت کنترلی ۲- کنترل‌کننده V_{DC} و کنترل‌کننده V_{AC} مدار بسته و کنترل‌کننده سیلان توان مدار باز باشند.

حالت کنترلی ۳- کنترل‌کننده V_{DC} و کنترل‌کننده سیلان مدار بسته و کنترل‌کننده V_{AC} مدار باز باشند.

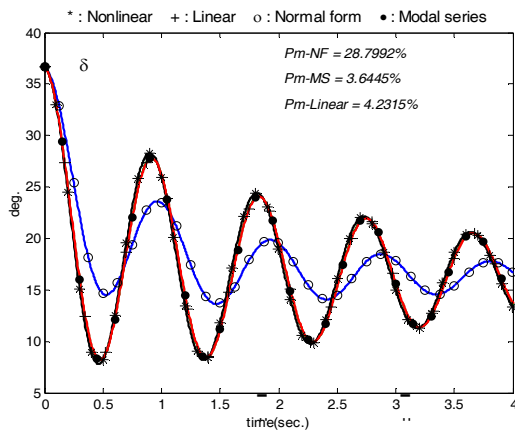
حالت کنترلی ۴- سه کنترل‌کننده V_{DC} ، کنترل‌کننده V_{AC} و کنترل‌کننده سیلان توان مدار بسته باشند.

کنترل‌کننده‌های UPFC برای هر کانال به‌صورت مجزا و بر اساس روش استاندارد در سیستم‌های SISO طراحی گردیده است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ها در ضمیمه آمده است.

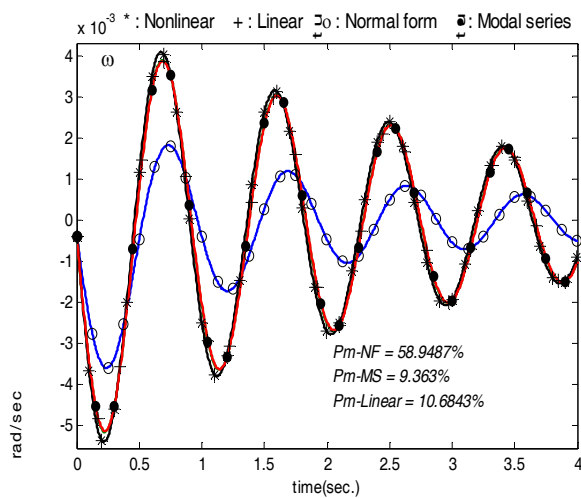
۵-۱- شاخص تداخل

سیستم قدرت مورد مطالعه دارای یک زوج مقدار ویژه مزدوج مختلط با مقادیر حقیقی منفی در هر حالت است (مدهای λ_3 و λ_4). مقادیر ویژه نوسانی سیستم در چهار حالت عملکرد کنترل‌کننده‌های UPFC به همراه نسبت میرایی (ζ) و فرکانس تشدید برای ضریب میرایی $D=3/52$ ، در جدول (۱) آمده است.

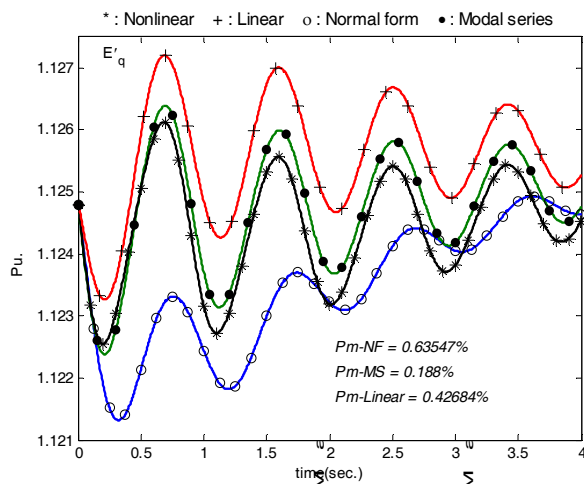
برای آنکه مقادیر $I2_{kl}^i$ برای هر متغیر حالت به‌صورت تجسمی قابل مقایسه باشد، اندازه ۶۴ مقدار $I2_{kl}^i$ ، برای هر متغیر حالت به‌صورت سه‌بعدی در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. در این



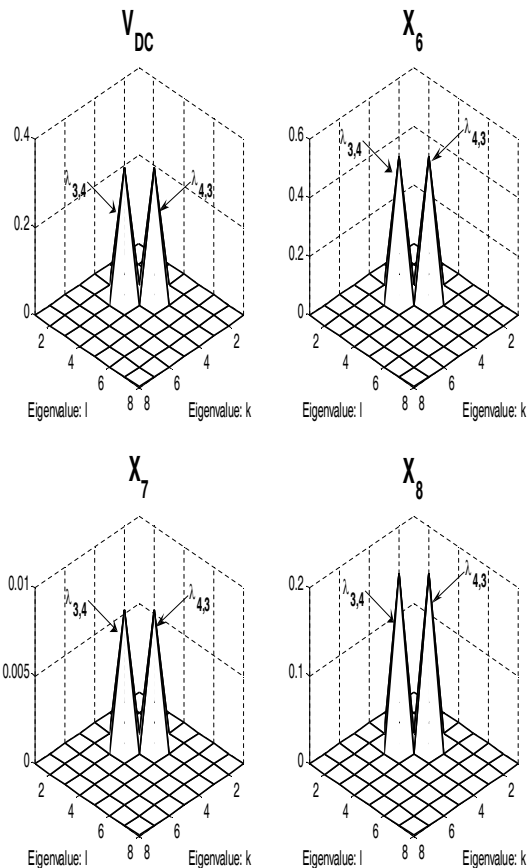
شکل ۵: شبیه‌سازی δ



شکل ۶: شبیه‌سازی ω



شکل ۷: شبیه‌سازی E'_q



شکل ۸: اندازه شاخص $I2_{kl}^i$ برای متغیرهای حالت

به منظور تعیین میزان مشابهت پاسخ حاصل از شبیه‌سازی غیرخطی و سایر پاسخ‌های تقریبی حاصل از روش‌هایی مانند تحلیل خطی، روش شکل نرمال و سری مودال، کمیت میزان مشابهت به صورت زیر تعریف شده است:

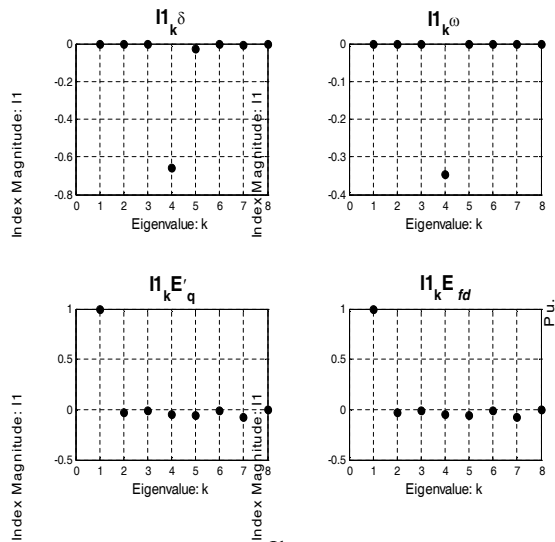
$$Pm_i = \int_0^{\infty} |X_{iN}(\omega) - X_{i_{other}}(\omega)| d\omega \quad (26)$$

$$Pm_{pu,i} = \frac{Pm_i}{\int_0^{\infty} X_{iN}(\omega) d\omega} \quad (27)$$

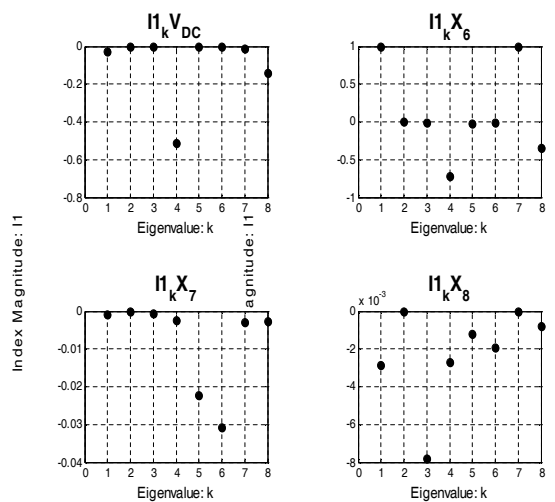
$$Pm = \sum_{i=1}^N Pm_i \quad (28)$$

$x_{iN}(\omega)$ و $x_{i_{other}}(\omega)$ به ترتیب نشان‌دهنده اندازه تبدیل فوریه سیگنال‌های حاصل از تحلیل غیرخطی و سایر روش‌های تقریبی مذکور می‌باشند.

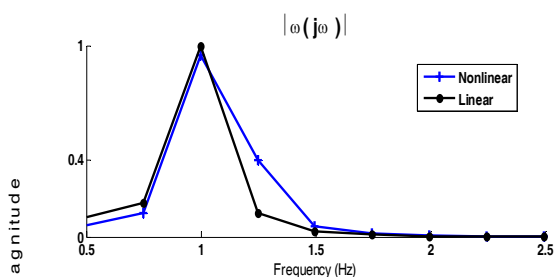
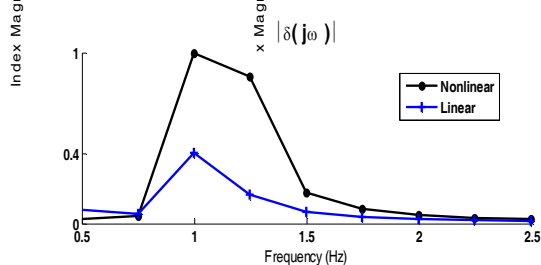
پاسخ حاصل از حل کامل، روش سری مودال، شکل نرمال [۱] و شبیه‌سازی خطی سیستم، در شکل‌های ۵ الی ۹، ارائه شده است. محاسبه کمیت میزان مشابهت نشان می‌دهد که پاسخ حاصل از روش سری مودال نسبت به سایر روش‌ها دارای دقت بیشتری است.



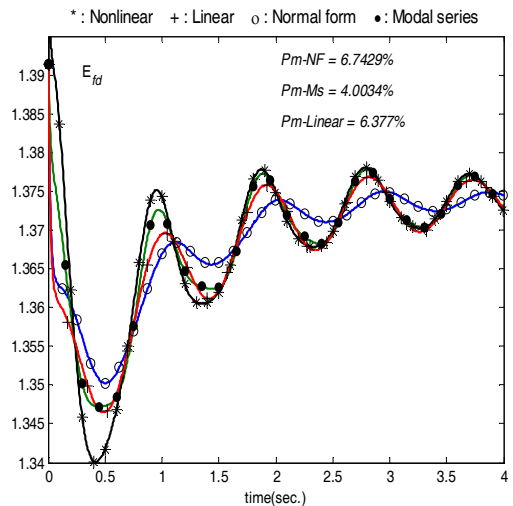
شکل ۱۰: اندازه شاخص I_1 روی چهار مود سیستم



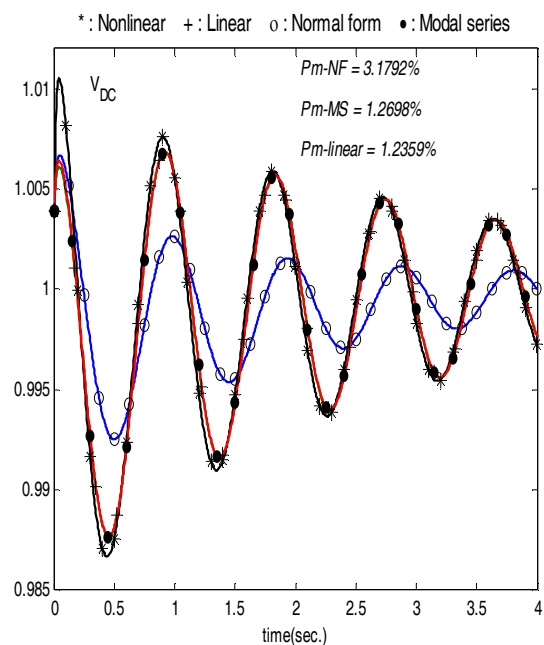
شکل ۱۱: اندازه شاخص I_1 روی چهار مود سیستم



شکل ۱۲: FFT سیگنال های δ و ω



شکل ۸: شبیه سازی E_{fd}

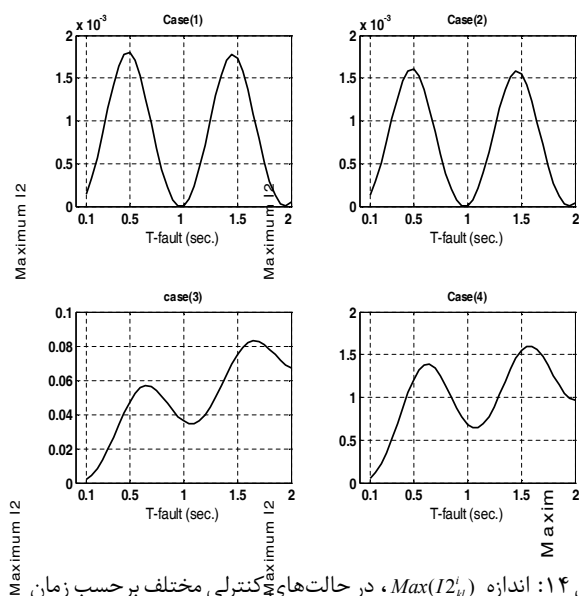


شکل ۹: شبیه سازی V_{DC}

اندازه شاخص I_1 در شکل های ۱۰ و ۱۱ رسم شده است. این شاخص برای مود ۴ در متغیرهای حالت δ و V_{DC} و X_6 منفی است و این نشان می دهد دامنه تحریک مود ۴ در متغیرهای حالت مذکور در سیستم غیرخطی نسبت به آنچه از تحلیل خطی به دست می آید، بزرگتر است. به عبارت دیگر دامنه نوسانات در فرکانس مود ۴ در شبیه سازی غیرخطی در آن متغیرهای حالت، نسبت به آنچه از تحلیل خطی به دست می آید، بزرگتر است. برای ω نیز نشان دهنده همین وضعیت، ولی با دامنه تحریک به مراتب کمتر است.

بنابراین در صورتی که زمان تداوم خطا افزایش یابد، درجه غیرخطی سیستم و در نتیجه میزان استرس وارد شده به آن افزایش می یابد.

در شکل ۱۴ منحنی تغییرات $Max(I_{kl}^i)$ ، در متغیر حالت δ و میان مدهای نوسانی λ_3 و λ_4 در حالت های کنترلی مختلف UPFC، در ضریب میرایی $D=3/52$ بر حسب زمان خطا (T-fault) از ۰/۱ تا ۲ ثانیه رسم شده است. همان گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، شاخص تداخل در حالت کنترلی ۴ یعنی زمانی که تمام کنترل کننده ها در UPFC فعال هستند، به ازای هر زمان خطا، نسبت به سایر حالت ها بزرگتر است. علاوه بر آن اندازه $Max(I_{kl}^i)$ ، با افزایش زمان خطا به تدریج افزایش می یابد.



شکل ۱۴: اندازه $Max(I_{kl}^i)$ ، در حالت های کنترلی مختلف بر حسب زمان خطا برای δ در $D=3/52$

۶- نتیجه گیری

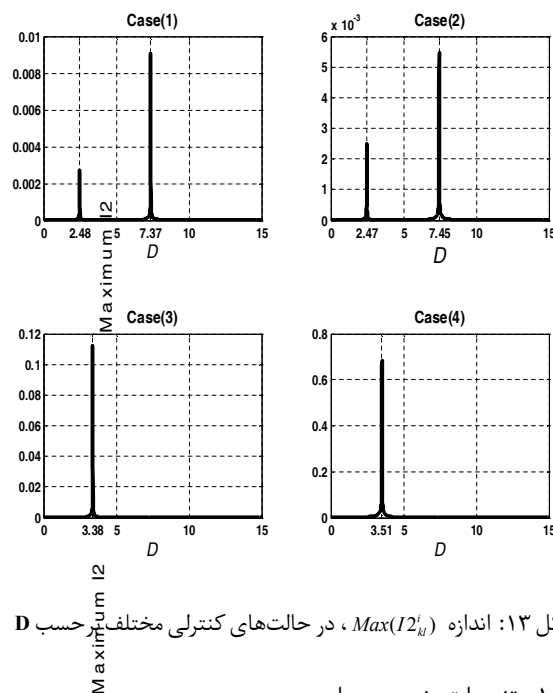
در این مقاله برای اولین بار از روش سری مودال جهت بررسی تداخل های غیرخطی میان کانال های کنترلی یک UPFC و همچنین میان کانال های کنترلی UPFC با سیستم قدرت میان مدهای کنترلی UPFC و شبکه قدرت استفاده شده است. نتایج نشان می دهد، شاخص تداخل در حالت کنترلی که تمام کنترل کننده ها در UPFC فعال هستند، به ازای هر زمان خطا، نسبت به سایر حالت ها بزرگتر است. علاوه بر آن با افزایش زمان خطا به تدریج افزایش می یابد. بعضی از شرایط در حالت کنترلی ۳، شدت تداخل میان مدها ممکن است از حالت کنترلی ۴ بیش تر باشد. همچنین تداخل میان مدها مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج حاصل نشان داد روش سری مودال ابزاری بسیار توانمند و قوی در بررسی تداخل مدهای محلی و بین ناحیه ای سیستم به همراه مدهای کنترلی است. روش پیشنهادی کلی بوده و قابل تعمیم به سیستم های قدرت بزرگ تحت استرس به همراه ادوات مختلف کنترلی مانند PSS و FACTS است. شاخص مشابهت برای پاسخ حاصل از شبیه سازی با روش های مختلف محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد

شکل ۱۲، FFT سیگنال های δ و ω را نشان می دهد. منحنی FFT رسم شده نتایج حاصله از شکل های ۱۰ و ۱۱ را تأیید می کند.

۵-۲- مقایسه شاخص تداخل

در این بخش به بررسی اثر تغییرات ضریب میرایی و درجه غیرخطی سیستم در حالت های کنترلی مختلف بر روی اندازه شاخص تداخل می پردازیم.



شکل ۱۳: اندازه $Max(I_{kl}^i)$ ، در حالت های کنترلی مختلف بر حسب D

۵-۲-۱- تغییرات ضریب میرایی

برای مطالعه تأثیر تغییرات ضریب میرایی (D) بر روی شاخص تداخل (I_{kl}^i)، به طور نمونه منحنی تغییرات $Max(I_{kl}^i)$ ، در متغیر حالت δ و میان مدهای نوسانی λ_3 و λ_4 در حالت های کنترلی مختلف UPFC، برای زمان خطای یک ثانیه در شکل ۱۳ آمده است.

همان گونه که در شکل مشاهده می شود میزان شاخص تداخل در این مدها در حالت کنترلی ۴ نسبت به سه حالت دیگر بزرگتر است. در حالت کنترلی ۳ و ۴ به ترتیب ماکزیمم شاخص تداخل در $D=3/38$ و $D=3/52$ رخ می دهد. همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود بعضی از شرایط در حالت کنترلی ۳، شدت تداخل میان مدها ممکن است از حالت کنترلی ۴ بیش تر باشد و این نتیجه صحت نتایجی که بر اساس ضرایب تعریف شده مبتنی بر روش شکل نرمال میدان برداری که بیان می نماید در تمام شرایط در حالت کنترلی ۴ بیش ترین تداخل وجود دارد ([۱۷]) را دچار اشکال می سازد.

۵-۲-۲- تغییر درجه غیرخطی سیستم

همان طور که در مرجع [۲۲] آمده است، میزان استرس در یک سیستم به شرایط کار و شدت خطای اعمال شده به آن سیستم بستگی دارد.

- [13] A.R. Messina, E. Barocio and J. Arroyo, "Analysis of modal interaction in power systems with facts controllers using normal forms," *IEEE Transaction on Power System*, pp. 2111-2217, 2003.
- [14] Z.Y. Zou, Q.Y. Jiang, Y.J. Cao and H.F. Wang, "Normal form analysis of interaction among multiple svc controllers in power system," *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 4, pp. 469-474, July 2005.
- [15] 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.
- [۱۶] سپهر سلطانی، رضا قاضی و ناصر پریر، «رویکردی جدید در به کارگیری تکنیک اختلال جهت تحلیل تداخل‌های غیرخطی در سیستم‌های قدرت بزرگ تحت استرس»، مجله علمی پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۵۷، صفحه ۱۱-۱، بهار و تابستان ۱۳۸۸.
- [17] Z.Y. Zou, Q.Y. Jiang, Y.J. Cao and H.F. Wang, "Application of the normal forms to analyze the interactions among the multiple-control channel of UPFC," *Electric Power Systems Research*, vol. 27, pp. 584-593, 2005.
- [18] S. Soltani, N. Pariz and R. Ghazi, "Extending the perturbation technique to the modal representation of nonlinear systems," *Electric Power Systems Research (ELSEVIER)*, vol. 79, Issue 8, pp. 1209-1215, August 2009.
- [19] S. Soltani, N. Pariz and R. Ghazi, "Application of modal series method to analyze the nonlinear behavior of power systems equipped with upfc," *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 4, no. 5, pp. 898-906, September-October 2009.
- [20] A. Nabavi and M.R. Irvani, "Steady state and dynamic models of unified power flow controller (upfc) for Power system studies," *IEEE Trans. on PWRs*, no. 4, 1996.
- [21] H.F. Wang, "Application of modeling UPFC into multi-machine power system," *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 146, no. 3, pp. 306-312, May 1999.
- [22] F.X. Wu, H.Wu, Z.X. Han and D.Q. Gan, "Validation of power system non-linear modal analysis methods," *Electric Power Systems Research (ELSEVIER)*, vol. 77, Issue 8, pp. 1414-1428, August 2007.

زیرنویس‌ها

^۱ Normal Form of Vector Fields^۲ Unified Power Flow Controller^۳ Modal Series^۴ Perturbation Technique^۵ Unified Power Flow Controller^۶ Voltage Source Converter^۷ Excitation Transformer^۸ Boosting Transformer

روش سری مودال نزدیک‌ترین پاسخ را به پاسخ غیرخطی در شرایط مختلف کار سیستم ارائه می‌نماید.

پیوست‌ها

کمیت‌های سیستم مورد مطالعه عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} & H=4/0 \quad T_{do}=5/044 \quad T_A=0/02 \quad x_d=1/0 \quad x_q=0/07 \quad x_l=0/01 \\ & V_{Rmin}=-10 \quad V_{Rmax}=10 \quad K_A=2/0 \quad x_d'=0/3 \quad K_{PP}=1 \quad x_B=0/03 \quad x_E=0/3 \quad x_3=0/2 \quad x_2=0/3 \\ & K_{DCI}=10 \quad K_{DCP}=14 \quad K_{PI}=5 \quad K_{ACP}=1/075 \quad K_{ACI}=20 \quad C_{DC}=1 \end{aligned}$$

مراجع

- [1] D.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. Yorino, 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 and 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] IEEE Power Engineering Society/Cigre. *Facts Overview Piscataway, NJ: IEEE Service Center*; 1995. [Special issue, 95TP108].
- [8] L. Gyugyo, "A unified power flow control concept for flexible ac transmission systems," *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 139, no. 4, pp. 323-333, 1992.
- [9] M.J. Gibbard, D.J. Vowles and P. Pourbeik, "Interactions between and effectiveness of power system stabilizers and facts device stabilizers in multi-machine systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 748-755, May 2000.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] A.R. Messina and E. Barocio, "Nonlinear analysis of inter-area oscillation: effect of svc voltage support," *Electric Power Systems Research*, vol. 64, pp. 17-26, 2003.