

بررسی تأثیر محل خطا بر نوسانات بین ناحیه‌یی در سیستم‌های قدرت تحت استرس

علی حسامی نقشبندی (استادیار)

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

احمد کاظمی (دانشیار)

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

حسن مدیرشانه چی (استاد)

گروه مهندسی برق و کامپیوتر، انستیتو فناوری ایلینویز، ایالات متحده آمریکا

سیستم‌های قدرت تحت استرس هنگامی که در معرض اغتشاش‌های مختلف قرار می‌گیرند، رفتارهای دینامیکی پیچیده‌یی نظیر نوسانات بین ناحیه‌یی از خود بروز می‌دهند که با ابزارها و روش‌های مبتنی بر خطی سازی نمی‌توان آنها را به درستی تحلیل و بررسی کرد. ریشه‌ی این رفتارها خصوصیات غیرخطی سیستم‌ها است که با افزایش میزان استرس، تأثیر آنها بر عملکرد دینامیک بیشتر خواهد شد. در این نوشتار با استفاده از روش سری مودال، تأثیر محل خطا و زمان پاک‌سازی آن بر رفتار دینامیک سیستم‌های تحت استرس بررسی می‌شود. با تعریف شاخص‌هایی که شدت و میزان ماندگاری اثر مودهای مختلف را بر رفتار سیستم اندازه‌گیری می‌کنند، تحلیلی کیفی از خصوصیات و تفاوت‌های موجود میان رفتارهای بین ناحیه‌یی و محلی ارائه می‌شود. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان صحت بررسی‌های انجام‌شده بر روی سیستم آزمون ۵^۰ ماشینی IEEE مورد ارزیابی و تأیید قرار می‌گیرند.

واژگان کلیدی: تداخل مودال، دینامیک سیستم قدرت، نوسانات بین ناحیه‌یی، شکل نرمال، سری مودال.

۱. مقدمه

امروزه سیستم‌های قدرت بزرگ به دلیل محدودیت‌های ناشی از ملاحظات زیست محیطی و شرایط اقتصادی تا نزدیک مرزهای پایداری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. تحت چنین شرایطی بارگذاری سیستم سنگین، توان عبوری از خطوط و گریدهای انتقال بالا و تولید بعضی از نیروگاه‌ها نیز به لحاظ مقتضیات اقتصادی زیاد است. سیستم‌هایی را که در چنین شرایطی کار می‌کنند «تحت استرس» می‌نامند. سیستم‌های قدرت تحت استرس در مواجهه با اغتشاش‌های سنگین رفتارهای دینامیکی پیچیده‌یی از خود نشان می‌دهند. این رفتارها را نمی‌توان با روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی معادلات دینامیکی سیستم حول نقطه‌ی کارمانند تحلیل مقادیر ویژه به درستی تحلیل کرد. از جمله‌ی این رفتارها می‌توان به تشدیدهای پارامتری و نوسانات بین ناحیه‌یی اشاره کرد. محققین تشدیدهای پارامتری را در سیستم‌های قدرت تحت استرس به کمک روش چندپیمانه‌یی مورد بررسی قرار دادند.^[۱] همچنین نشان دادند که تداخل غیرخطی میان مودهای اساسی نوسان در یک سیستم قدرت متعاقب بروز یک اغتشاش بزرگ می‌تواند عامل ایجاد نوسانات بین ناحیه‌یی باشد.^[۲] آنها با بسط تیلور معادلات دینامیکی سیستم حول یک نقطه‌ی تعادل تا مرتبه‌ی دوم تأثیر

جملات غیرخطی را بر رفتار دینامیکی سیستم بررسی کردند. از آن زمان به بعد تحقیقات وسیعی در خصوص استفاده از روش شکل نرمال میدان‌های برداری در تحلیل رفتارهای دینامیکی سیستم‌های قدرت تحت استرس به عمل آمده است. از روش شکل نرمال میدان‌های برداری در بررسی تداخل غیرخطی میان مودها و تأثیر آن بر عملکرد سیستم،^[۳-۱۱] در طراحی کنترلی،^[۱۲-۱۵] در پیش‌بینی پدیده‌ی جدایی بین ناحیه‌یی،^[۱۶,۱۷] و در تخمین مرزهای پایداری سیستم^[۱۸-۲۰] استفاده شده است. روش شکل نرمال ابزار ریاضی شناخته شده‌یی از حوزه‌ی سیستم‌های دینامیکی است که به کمک آن رفتار محلی سیستم‌های غیرخطی را می‌توان حول نقاط تعادل مورد نظر مطالعه کرد.^[۲۱-۲۶] این روش با اعمال تبدیلات غیرخطی مختصات به صورت پی‌درپی امکان حذف جملات مرتبه بالا و ساده‌سازی معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده‌ی رفتار دینامیکی سیستم‌ها را تا ساده‌ترین صورت ممکن (همان شکل نرمال) فراهم می‌آورد. با این وجود تبدیل غیرخطی شکل نرمال نه یک به یک است و نه پوشا. علاوه بر این، تعیین شرایط اولیه در حوزه‌ی شکل نرمال برای سیستم‌های تحت استرس حتی با ابعاد متوسط نیز فرایندی زمان‌بر است که در موارد زیادی منجر به واگرایی الگوریتم و عدم دستیابی به جواب می‌شود. از سوی دیگر روش سری مودال، روش ریاضی نسبتاً جدیدی است که همچون روش

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱/۳۱، داوری ۱۳۸۷/۹/۴، پذیرش ۱۳۸۸/۷/۱۹.

رتور: ω ؛ سرعت رتور نسبت به یک مرجع سنکرون؛ δ ؛ زاویه رتور؛ E_{FD} ؛ مؤلفه‌ی EMF استاتور متناظر با ولتاژ میدان؛ X_{E1} و X_{E2} ؛ متغیرهای حالت سیستم تحریک مطابق شکل ۱. با انتخاب یکی از ماشین‌ها به‌عنوان مرجع زاویه، بُعد سیستم برابر $1 - (n - m) * 2 + 7 * m = N$ خواهد بود.

۳. روش سری مودال

توصیف سیستم‌های دینامیکی غیرخطی، نظیر سیستم قدرت تحت استرس، با استفاده از روش سری مودال درک فیزیکی بسیار خوبی از رفتار دینامیکی سیستم فراهم می‌آورد که به‌وسیله‌ی دیگر روش‌ها حاصل نمی‌شود. در واقع روش سری مودال را می‌توان به‌نحوی تعمیم‌یافته‌ی روش‌های خطی رایج برای سیستم‌های غیرخطی دانست. به‌کمک این روش پاسخ تحلیلی متغیرهای حالت سیستم حول یک نقطه‌ی تعادل به‌دست خواهد آمد. این روش حتی تحت شرایط تشدید نیز قادر به ارائه‌ی پاسخ تقریبی برای مجموعه معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار سیستم است. اساس روش مبتنی بر بسط تیلور معادلات دینامیکی سیستم ۱ تا درجه‌ی دلخواه حول یک نقطه‌ی تعادل است. با انجام بسط تیلور میدان برداری $F(X)$ حول نقطه‌ی تعادل X_{EP} و استفاده‌ی مجدد از X و x_i به‌عنوان متغیرهای حالت به‌جای $x - x_i^{EP}$ و $X - X_{EP}$ برای متغیر حالت i ام می‌توان نوشت:

$$\dot{x}_i = A_i X + \frac{1}{\varphi} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N H_{kl}^i x_k x_l + \frac{1}{\varphi} \sum_{P=1}^N \sum_{Q=1}^N \sum_{R=1}^N P_{PQR}^i x_P x_Q x_R + \dots, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

که در آن X متعلق به حوزه‌ی جذب سری تیلور، A_i سطر شماره i از ماتریس ژاکوبین سیستم $A = (\partial F / \partial X) |_{X_{EP}}$ بوده، $H^i = (\partial^2 F_i / \partial X^2) |_{X_{EP}}$ ماتریس هسیان i ام سیستم و $P_{PQR}^i = (\partial^3 F_i / \partial x_P \partial x_Q \partial x_R) |_{X_{EP}}$ است. با این فرض که سیستم دارای N مقدار ویژه‌ی مجزا به‌صورت λ باشد، و نیز U و V به‌ترتیب ماتریس‌های مودال راست و چپ باشند، با استفاده از تبدیل جردن $X = UY$ ، مجموعه معادلات دینامیکی ۲ از حوزه‌ی X به‌شکل مجموعه معادلات ۳ در حوزه‌ی Y تبدیل خواهند شد.

$$\dot{y}_j = \lambda_j y_j + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_k y_l + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{r=1}^N D_{pqr}^j y_p y_q y_r + \dots \quad (3)$$

که در آن:

$$[C_{kl}^j] = \frac{1}{\varphi} \sum_{p=1}^N V_{jp}^T [U^T H^p U] \quad (4)$$

$$[D_{pqr}^j] = \frac{1}{\varphi} \sum_{P=1}^N \sum_{Q=1}^N \sum_{R=1}^N P_{PQR}^j V_P^P V_Q^Q V_R^R \quad (5)$$

V_P^P المان شماره p از بردار ویژه‌ی چپ شماره p است.

در روش سری مودال فرض می‌شود که پاسخ مجموعه معادلات دیفرانسیل ۳ به‌شرایط اولیه‌ی $Y_0 = [y_{10}, y_{20}, \dots, y_{N0}]^T$ را می‌توان به‌شکل شکلیک شده‌ی رابطه‌ی ۶ نوشت: [۲۸، ۲۷]

$$y_j(t) = y_{1j}(t) + y_{2j}(t) + y_{3j}(t) + \dots \quad (6)$$

شکل نرمال، پاسخ تقریبی سیستم‌های غیرخطی را به شرایط اولیه بدون هیچ‌گونه تبدیل غیرخطی مختصات ارائه می‌کند، [۲۸، ۲۷] اگرچه کاربردهای زیادی برای آن عرضه نشده است. در این نوشتار، تأثیر محل خطا و زمان پاک‌سازی آن بر رفتارهای دینامیک سیستم بررسی می‌شود. با استفاده از روش سری مودال شاخص‌هایی تعریف می‌شوند که شدت تداخل و میزان ماندگاری اثر مودهای تداخلی و اساسی را در پاسخ زمانی متغیرهای حالت ارزیابی می‌کنند. با اعمال خطاهای سه‌فاز به نقاط مختلف سیستم مورد مطالعه، روندی کلی در بررسی تأثیر خطا بر نوسانات الکترومکانیکی فوکالس پایین ارائه می‌شود و رفتار کیفی سیستم‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد.

سایر قسمت‌های این نوشتار چنین سازماندهی شده‌اند: در بخش ۲ به مدل‌سازی سیستم قدرت خواهیم پرداخت. در بخش ۳، روش سری مودال به‌اختصار مرور شده است. بخش ۴ معرفی تداخل غیرخطی مودال و شاخص‌های تداخلی اختصاص یافته است. در بخش ۵ نتایج حاصل از سیستم آزمون مورد مطالعه مورد تحلیل، شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفته است، و بالاخره در بخش ۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کارهای انجام شده ارائه می‌شود.

۲. مدل سیستم قدرت

در یک سیستم قدرت n ماشینه، تعداد m ماشین به‌صورت دوماحوری و مجهز به سیستم تحریک و $n - m$ ماشین دیگر به‌صورت کلاسیک مدل می‌شوند. از دینامیک‌های استاتور و شبکه صرف‌نظر می‌شود و روی هر یک از محورهای طولی و عرضی ژنراتورهای m گانه یک سیم‌پیچ میراگر در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب ژنراتورهای مدل‌شده به‌صورت دوماحوری از مرتبه‌ی چهار خواهند بود. [۲۹] مدل سیستم تحریک استاتیکی نصب‌شده روی ماشین‌ها نیز مطابق مدل ارائه‌شده در شکل ۱ است.

بارهای موجود به‌صورت امپدانس ثابت و شبکه در حالت شبه‌ماندگار در نظر گرفته می‌شود. با حذف شین‌های بار، شبکه به شین داخلی ماشین‌ها کاهش داده می‌شود. به این ترتیب معادلات دینامیکی حاکم بر رفتار سیستم را می‌توان مطابق معادله‌ی ۱ توصیف کرد.

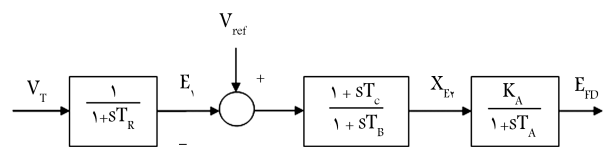
$$\dot{X} = F(x) \quad (1)$$

که در آن F یک میدان برداری تحلیلی و X بردار متغیرهای حالت است که براساس مدل‌های انتخاب‌شده برای ژنراتورها و سیستم‌های کنترل تحریک عبارت خواهد بود از:

$$X = [E_q^1, E_d^1, \omega_1, \delta_1, E_{FD1}, X_{E11}, X_{E21}, \dots, E_{qm}^1, E_{dm}^1, \omega_m, \delta_m, E_{FDm}, X_{E1m}, X_{E2m}, \dots, \omega_n, \delta_n]^T$$

المان‌های بردار متغیرهای حالت عبارت‌اند از:

E_q^i و E_d^i : به‌ترتیب مؤلفه‌های طولی و عرضی EMF استاتور متناظر با شارگذرای



شکل ۱. مدل سیستم تحریک IEEE از نوع AC۴A.

از مجموعه روابط فوق می توان دریافت که روش سری مودال پاسخ تقریبی سیستم های غیرخطی را به شکل بسته و تحلیلی، فقط با استفاده از تبدیل خطی $X = UY$ به دست می آورد. با فرض آن که تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم وجود نداشته باشد (مجموعه R_1^i تهی باشد) پاسخ سیستم را به صورت خلاصه تر می توان نوشت:

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

از سوی دیگر پاسخ آشنای تحلیل مودال خطی این سیستم برای متغیر حالت $x_i(t)$ عبارت است از: [۱۳]

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} y_{j0} e^{\lambda_j t} \quad (14)$$

با مقایسه ی پاسخ خطی سیستم (رابطه ی ۱۴) و پاسخ غیرخطی (رابطه ی ۱۲) شاهد دو تفاوت عمده خواهیم بود: ۱. وجود سومین جمله در رابطه ی ۱۲ که تصحیحی صریح بر پاسخ خطی سیستم است که با لحاظ کردن تأثیر موده های تداخلی مرتبه دوم (تأثیر $e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$) در پاسخ سیستم صورت گرفته است؛ ۲. تفاوت میان پاسخ تقریبی خطی و دو جمله ی اول در رابطه ی ۱۲. این اختلاف نشانگر آن است که موده های خطی تحت شرایط تشدید می توانند با زمان مدوله شوند با این که ممکن است خصوصیات غیرخطی مراتب بالاتر اثر تحریک کنندگی یا فرونشاندگی بر موده های مرتبه اول داشته باشند.

۴. شاخص های تداخل غیرخطی مرتبه دوم در چارچوب سری مودال

پاسخ زمانی مودال مرتبه دوم، $K_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ تحت تأثیر دو عامل قرار دارد. عامل نخست اندازه ی ضریب K_{kl}^i است که مقدار بیشینه ی دامنه را در لحظه ی $t = 0$ تعیین می کند. هرچه این ضریب بزرگتر باشد، اثر مود تداخلی مربوطه چشم گیرتر است. عامل دیگر ثابت زمانی مود تداخلی مرتبه دوم، یعنی $\tau_{kl} = -1/\text{real}(\lambda_k + \lambda_l)$ است که تعیین می کند پاسخ ناشی از این مود چقدر سریع از بین می رود. هرچه این ثابت زمانی بزرگتر باشد، تأثیر این مود بر رفتار سیستم دوام بیشتری خواهد داشت. از این رو به نظر می رسد که حاصل ضرب این دو مقدار، معیار معقولی از میزان تأثیر موده های تداخلی بر پاسخ زمانی سیستم باشد. $I \Psi_{kl}^i$ معیاری است که هم تأثیر دامنه و هم دوام موده های تداخلی را در پاسخ متغیرهای حالت نشان می دهد.

$$I \Psi_{kl}^i = \left| \frac{k_{kl}^i}{\text{real}(\lambda_k + \lambda_l)} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

علاوه بر این برای تحلیل مسئله ی مدولاسیون زمانی، یا بررسی اثر تحریک کنندگی یا فرونشاندگی موده های خطی ناشی از خصوصیات غیرخطی، می توان شاخص هایی را تعریف و مورد استفاده قرار داد:

$$MI_j^i = \left| \frac{M_j^i}{\text{real}(\lambda_j)} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

$$I \lambda_j^i = \frac{\text{sign}(|u_{ij} y_{j0}| - \delta) \cdot |L_j^i|}{\max(\delta, |u_{ij} y_{j0}|)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

یادآور می شود که پوش منحنی $te^{\lambda_j t}$ در جمله ی دوم رابطه ی ۱۲ برابر با $|2e^{-1} M_j^i / \text{real}(\lambda_j)|$ است. از این رو MI_j^i به عنوان معیاری از تأثیر این مؤلفه انتخاب شده است. این مؤلفه اثر تمامی موده های تشدید مرتبه دوم را

در اینجا $y_{mj}(t)$ شامل مجموعه جملاتی به صورت حاصل ضرب های m تایی متغیرهای حالت در فضای جردن است. به عنوان مثال به ازای $m = 3$ جملات y_{rj} به معنی جملاتی نظیر $(y_{p0} y_{q0} y_{r0})$ و برای $p, q, r = 1, \dots, N$ ثابت شده است که با صرف نظر کردن از جملات مرتبه سوم و بالاتر، پاسخ تقریبی مرتبه دوم سیستم در حوزه ی مودال را می توان به صورت رابطه ی ۷ به دست آورد. [۱۳]

$$y_j(t) = y_{1j}(t) + y_{rj}(t) = \left(y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h \Psi_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R_1^j} \right) e^{\lambda_j t} + \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h \Psi_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \notin R_1^j} + \left\{ \left(\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right) t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R_1^j} \quad (7)$$

با اعمال تبدیل $X = UY$ به پاسخ مودال رابطه ی ۷، پاسخ متغیرهای حالت در فضای X (فضای متغیرهای حالت فیزیکی ماشین ها) مطابق رابطه ی ۸ به دست خواهد آمد:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} \left(y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h \Psi_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R_1^j} \right) e^{\lambda_j t} + \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} h \Psi_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \notin R_1^j} + \left\{ \sum_{j=1}^N \left(\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right) t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R_1^j} \quad (8)$$

در این روابط $Y_0 = U^{-1} X_0$ ، $h \Psi_{kl}^j = C_{kl}^j / (\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j)$ و R_1^j نیز مجموعه ی تمام سه تایی هایی است که به ازای آنها شرایط شبه تشدید مرتبه دوم $(\lambda_k + \lambda_l \cong \lambda_j)$ بین موده های متناظر با آنها حادث می شود. با دسته بندی مجدد جملات مرتبه دوم (عبارت دوم) در رابطه ی ۸ و تعریف ضرایب L_j^i ، K_{kl}^i و M_j^i مطابق روابط زیر، پاسخ تقریبی مرتبه دوم سیستم را می توان مطابق معادله ی ۱۲ به دست آورد:

$$L_j^i \triangleq u_{ij} \left(y_{j0} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h \Psi_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right)_{(k,l,j) \notin R_1^j} \quad (9)$$

$$K_{kl}^i \triangleq y_{k0} y_{l0} \sum_{j \in J_{kl}} u_{ij} h \Psi_{kl}^j, \quad J_{kl} = \{j | (k, l, j) \notin R_1^j\} \quad (10)$$

که در آن $J_{kl} = \{j | (k, l, j) \notin R_1^j\}$ مجموعه موده هایی است که با دو مود k و l تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم ایجاد نمی کنند.

$$M_j^i \triangleq \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0}, \quad (k, l, j) \in R_1^j \quad (11)$$

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

۹. با استفاده از نتایج به دست آمده در مراحل ۶، ۷ و ۸ می توان رفتار کیفی سیستم و تفاوت های موجود میان شبیه سازی غیرخطی و خطی را تشریح یا پیش بینی کرد.

۵. مطالعه موردی و شبیه سازی عددی

در بررسی تداخل غیرخطی میان مودها و تأثیری که بر عملکرد دینامیک سیستم قدرت برجای می گذارند - چه با استفاده از روش شکل نرمال و چه به کمک روش سری مودال - ساختار سیستم، شرایط بهره برداری و اغتشاش وارده (ماهیت، محل و زمان دوام) نقش اساسی دارند. تأثیر شرایط بهره برداری تا حد زیاد و ساختار سیستم تا اندازه ای در مقالات و کارهای تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته اند. اما به نظر می رسد نقش فوق العاده مهمی که اغتشاش وارده و به ویژه خطای اعمال شده در تعیین رفتار دینامیک سیستم دارد، بررسی کافی نشده است. این خطاست که جهت حرکت سیستم را در فضای حالت تعیین می کند و در واقع این خطاست که تعیین می کند کدام مودها بیش از سایرین تحریک شده اند. ماهیت خطا شامل نوع خطا، محل وقوع و مدت زمان دیرش آن همراه با ساختار سیستم و نقطه ی کار آن با یکدیگر الگوی آشفته گی ژنراتورها و میزان تحریک مودها را شکل می دهند.

در این بخش به بررسی تأثیر خطاهای سه فاز مختلف بر رفتار دینامیکی سیستم آزمون ۵۰ ماشینه ی IEEE می پردازیم. این سیستم در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است و در مواجهه با اغتشاش های گوناگون گستره ی وسیعی از پدیده های دینامیکی را از خود به نمایش می گذارد. نمودار تک خطی بخشی از این سیستم که مورد توجه بیشتر است در شکل ۲ نشان داده شده است.^[۳۰] این سیستم دارای ۵۰ ژنراتور است که ۶ ژنراتور متصل به شین های ۹۳، ۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۱۰ و ۱۱۱ به صورت دومی محوری و مجهز به سیستم تحریک و ۴۴ ماشین دیگر به صورت کلاسیک در نظر گرفته می شوند. شرایط بهره برداری پایه موقعی در نظر گرفته

در برمی گیرد. همچنین توجه به این نکته حائز اهمیت است که پوش منحنی $te^{\lambda_j t}$ در لحظه ی $T_{max} = -1/\text{real}(\lambda_j)$ به بیشترین مقدار خود می رسد و علی رغم اینکه ممکن است این بیشینه مقدار بزرگی داشته باشد، در زمان شبیه سازی ظاهر نمی شود و اثر آن در نتایج حاصل از شبیه سازی ها نادیده گرفته می شود.

در تحلیل مودال خطی، میزان تحریک مود $e^{\lambda_j t}$ در متغیر حالت i ام به اندازه ی $|u_{ij} y_j^0|$ است. این سطح تحریک چنان که در جملات اول روابط ۸ و ۱۲ مشهود است بر اثر خصوصیات غیرخطی سیستم تغییر کرده، به مقدار $|L_j^i|$ می رسد. با این ترتیب می توان نسبت $|L_j^i| / |u_{ij} y_j^0|$ را به عنوان شاخصی در ارزیابی تأثیر خواص غیرخطی در نظر گرفت. اما مشکل این انتخاب زمانی آشکار می شود که $|u_{ij} y_j^0|$ مقدار بسیار کوچکی باشد. در این شرایط شاخص در نظر گرفته شده مقدار بزرگی به خود می گیرد، حال آن که اساساً $|L_j^i|$ خود مقدار کوچکی داشته است. این تعبیر بیان گر آن است که اثرات غیرخطی تأثیر مود j را در حالت i به شدت دستخوش خود قرار داده اند. به عبارت دیگر، مقداری بزرگ برای شاخص به دست آمده است، بدون این که اثر غیرخطی قابل توجهی در میان بوده باشد. بدیهی است که چنین تفسیرهایی نادرست اند. به منظور اصلاح این نقیصه شاخص $I \lambda_j^i$ تعریف می شود که در آن از یک سطح تحریک آستانه برای تشخیص کم ترین میزان تحریک استفاده شده است. اگر علامت $I \lambda_j^i$ مثبت باشد، یعنی مقدار $|u_{ij} y_j^0|$ خیلی کوچک نیست و اگر علامت آن منفی باشد به معنای آن است که $|u_{ij} y_j^0|$ مقدار خیلی کوچکی دارد. δ عدد مثبت کوچکی مانند $\max_j (|u_{ij} y_j^0|) / 0.1$ است که آستانه ی تغییر را نشان می دهد و در این نوشتار برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. با این توضیحات، هنگامی که مقدار $I \lambda_j^i$ نزدیک به ۱ باشد بدین معناست که شدت تحریک مود خطی j ام چندان تحت تأثیر خصوصیات غیرخطی قرار نگرفته یا اگر تغییری در آن ایجاد شده، تأثیر قابل توجهی در حالت i ام نخواهد داشت. براساس شاخص های به دست آمده $I \lambda_j^i$ ، $I \lambda_{kl}^i$ و MI_j^i - الگوریتم زیر به منظور بررسی تداخل مودال با روش سری مودال پیشنهاد می شود.

۱. برای اغتشاش وارده، با استفاده از شبیه سازی حوزه ی زمان مقادیر متغیرهای حالت در لحظه ی پاک سازی خطا ($X_{t_{cl}}$) تعیین می شود؛

۲. نقطه ی تعادل پایدار سیستم پس از رفع اغتشاش (X_{SEP}) تعیین می شود؛

۳. بسط تیلور معادلات دینامیکی سیستم حول نقطه ی تعادل (X_{SEP}) به دست آورده می شود؛

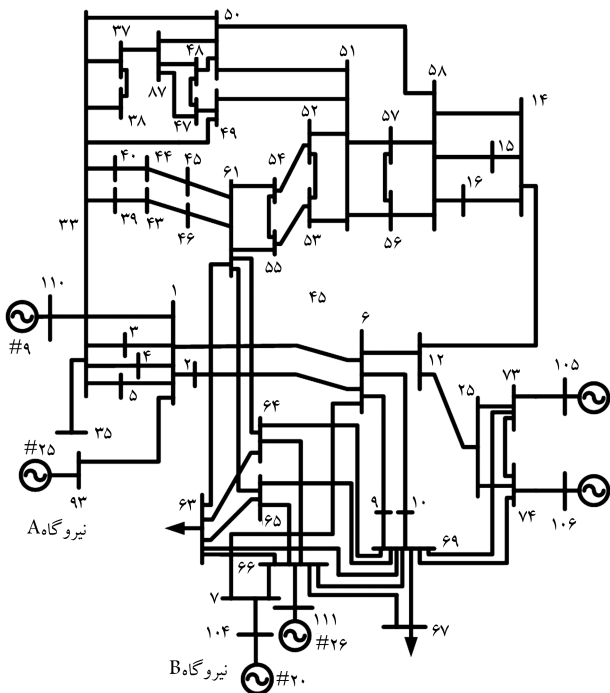
۴. با انجام تحلیل مقادیر ویژه روی قسمت خطی بسط تیلور به دست آمده، ماتریس مودال راست (U) تعیین و به کمک تبدیل جردن $X = UY$ معادلات سیستم به حوزه ی جردن (Y) آورده می شوند (از جملات مرتبه ۳ و بالاتر صرف نظر می شود)؛

۵. شرایط اولیه در فضای متغیرهای فیزیکی ماشین ها یعنی $X^0 = X_{t_{cl}} - X_{SEP}$ با استفاده از تبدیل $Y^0 = U^{-1} X^0$ به حوزه ی جردن تبدیل شده و تحلیل سری مودال روی سیستم انجام می شود؛

۶. برای هر متغیر حالت i ، تعداد N^i شاخص $I \lambda_{kl}^i$ محاسبه و مقایسه می شود تا مودهای غالب داخلی تعیین شوند؛

۷. برای هر متغیر حالت i ، تعداد N شاخص MI_j^i محاسبه می شود تا تحریکات مدوله شده با زمان تعیین شوند؛

۸. برای هر متغیر حالت i ، تعداد N شاخص $I \lambda_j^i$ محاسبه می شود تا میزان تحریک غیرخطی هر مود خطی تعیین شود؛



شکل ۲. نمودار تک خطی سیستم ۵۰ ماشینه ی IEEE.

ناحیه‌ی است و مودهای ۸۳، ۸۵، ۷۵، ۷۹، ۹۹، ... و ۶۳ مودهای محلی مربوط به ژنراتورهای مختلف در دو ناحیه‌اند. از این رو به نظر می‌رسد که سیستم در مواجهه با این دو خطا دچار نوسان بین ناحیه‌ی شده باشد.

۲. به‌ازای وقوع خطا در شین‌های ۱۰۰ و ۱۱۲ عمدتاً مودهای فرکانس بالای محلی تحریک شده‌اند. فرکانس غالب در رفتار سیستم در این دو حالت حدود ۱۱ رادیان بر ثانیه است. مودهای ۵۱، ۵۳، ۷۹، ۴۵، ۵۷ و ۶۱ همگی مودهای محلی مربوط به ماشین‌های متصل به شین‌های ۱۰۰، ۱۱۲، ۹۸ و مناطق نزدیک به محل وقوع خطا هستند. در این شرایط وقوع مود محلی محرز است.

۳. با نگاهی گذرا و با مقایسه‌ی تعداد مودهای بیش‌آشفته به‌هنگام وقوع خطا در شین‌های ۱ و ۷ با موارد مربوط به وقوع خطا در شین‌های ۱۱۲ و ۱۰۰ می‌توان دریافت که در دو حالت اول - یعنی مواردی که منجر به ایجاد مود بین ناحیه‌ی می‌شود - مودهای بیشتری دچار آشفتگی می‌شوند؛ در حالت‌هایی هم که مود محلی ظهور می‌کند، یعنی خطا در شین‌های ۱۰۰ و ۱۱۲ تعداد مودهای کم‌تری آشفته می‌شوند.

اکنون با استفاده از شاخص‌های تعریف‌شده در بخش ۴ و با انجام تحلیل سری مودال، اثر مودهای تداخلی و خواص غیرخطی بر عملکرد دینامیکی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما به‌دلیل محدودیت صفحات و به‌لحاظ اختصار فقط نتایج مربوط به اعمال خطای سه فاز در شین‌های ۷ و ۱۰۰ آورده می‌شوند.

در شکل ۳ و ۴ شاخص‌های تداخلی ($I_{T_{kl}}$) برای متغیرهای حالت زاویه‌ی رتور ماشین ۴۳ و سرعت ماشین ۶، و به‌ترتیب برای خطای سه فاز در شین‌های ۷ و ۱۰۰ رسم شده‌اند. مقادیر عددی متناظر نیز در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

چنان‌که در شکل ۳ و جدول ۲ مشاهده می‌شود به‌ازای خطا در شین ۷ تداخل غیرخطی شدیدی میان مودهای اساسی نوسان رخ خواهد داد که عمدتاً مربوط به مودهای ۱۱۰، ۸۳، ۸۱، ۱۰۳ و ۷۹ است؛ به‌ویژه مودهای تداخلی $\lambda_{111} + \lambda_{110}$ ، $\lambda_{110} + \lambda_{110}$ و $\lambda_{110} + \lambda_{82}$ مقدار شاخص‌های تداخلی بزرگی دارند. علی‌رغم آن‌که مودهای تداخلی حاصل از یک مود اصلی و مزدوج آن در اکثر موارد مقادیر

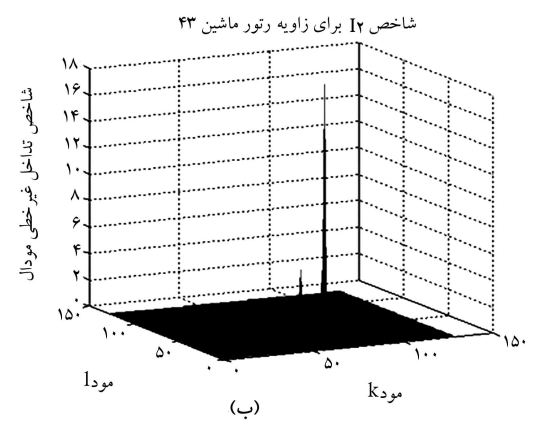
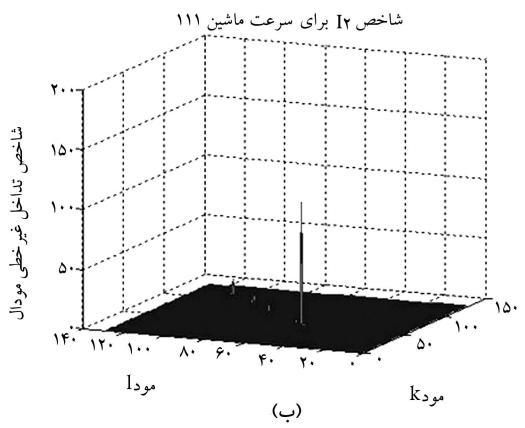
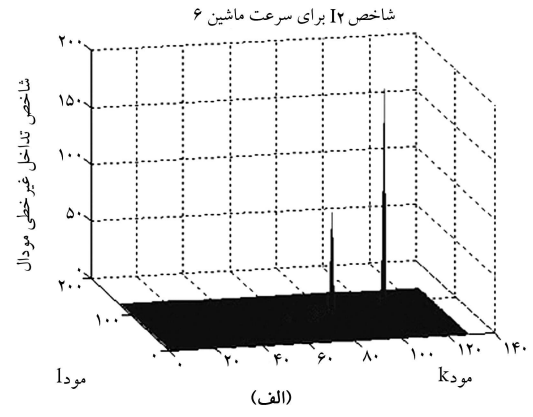
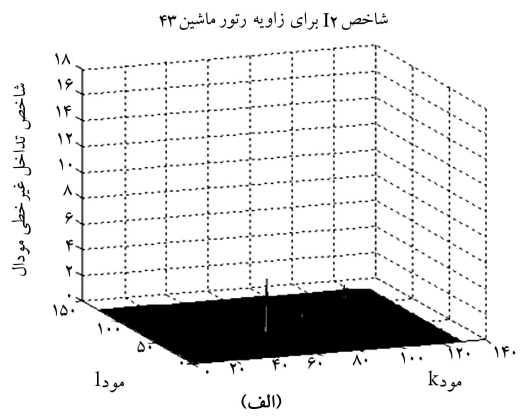
می‌شود که هر یک از ژنراتورهای متصل به شین‌های ۹۳ و ۱۱۰ به‌میزان ۷۰۰ MW تولید داشته باشند. برای قراردادن سیستم در شرایط استرس تولید این دو واحد را می‌توان تا ۱۳۰۰ MW بالا برد و به شین اصلی اجازه داد تا مازاد تولید را جذب کند. با این تدبیر توان‌های عبوری از خطوط جابه‌جا می‌شوند و این راهی برای راندن سیستم به شرایط استرس است (پادآور می‌شود که بارها تغییر داده نمی‌شوند). در این نوشتار تولید واحدهای متصل به شین‌های ۹۳ و ۱۱۰ به ۱۱۰۰ MW رسانیده شده و سیستم تحت این شرایط بهره‌برداری پر استرس، در معرض خطاهای سه‌فاز در شین‌های ۱، ۷، ۱۰، ۱۱۲ و ۱۰۰ قرار داده می‌شود. خطاها بدون این که به خروج خط خاصی بینجامند، برطرف می‌شوند. این فرض اجازه‌ی مقایسه‌ی مودها را در سناریو خطاهای مختلف می‌دهد. هنگامی که سیستم مورد مطالعه در معرض خطاهای خاصی قرار می‌گیرد دچار نوسانات بین ناحیه‌ی شدید می‌شود که در اینجا به تشریح برخی از آنها می‌پردازیم.

اصولاً وقتی سیستم در معرض خطا قرار می‌گیرد، همه‌ی مودهای آن برای تحلیل‌گر یا طراح کنترلی به یک اندازه اهمیت ندارند و همواره تعداد محدودی از آنها دقیق و موثکافانه بررسی می‌شوند. در اینجا به‌ازای هر سناریو خطای مشخص، مقادیر اولیه‌ی قدرمطلق متغیرهای حالت در فضای جردن تعیین و به‌صورت نزولی چیده می‌شوند. از این بین مودهایی را که $|y_{j0}|$ آنها از $|y_{j0}|_{\max} / 2$ بزرگ‌تر باشد نگه می‌دارند و مابقی مودها از گردونه‌ی بررسی‌ها خارج می‌شوند. در میان مودهای باقیمانده معمولاً مودهایی با مقادیر ویژه‌ی حقیقی منفی مشاهده می‌شوند که به‌شدت تحریک شده‌اند، لیکن به‌دلیل ثابت زمانی بسیار کوچک‌شان (میرایی شدید) اهمیت عملی چندانی در بررسی نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پایین با میرایی کم نخواهند داشت. در این میان مودهای نوسانی بین‌ناحیه‌ی و کنترلی فرکانس پایین و برخی از مودهای محلی فرکانس بالاتر حائز اهمیت خواهند بود. برای چهار محل خطای انتخاب شده، مودهایی که بیشتر تحریک شده‌اند و اهمیت بالاتری دارند در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. با توجه به اطلاعات داده شده در جدول ۱ درمی‌یابیم:

۱. وقتی خطا در شین‌های ۱ و ۷ رخ دهد، مجموعه‌ی مودهای فرکانس پایین و بالا هم‌زمان به‌شدت تحریک می‌شوند. در این بین مود ۱۱۰ که مود بین

جدول ۱. مودهای بیش تحریک‌شده‌ی حائز اهمیت در سناریو خطاهای مختلف.

خطا در شین ۷ $t_{cl} = 0.09s$		خطا در شین ۱ $t_{cl} = 0.10s$		خطا در شین ۱۰۰ $t_{cl} = 0.20s$		خطا در شین ۱۱۲ $t_{cl} = 0.20s$	
مود	مقدار ویژه	مود	مقدار ویژه	مود	مقدار ویژه	مود	مقدار ویژه
۱۱۷ (۱۱۸)	$-0.740 \pm j 0.927$	۱۱۰ (۱۱۱)	$-0.002 \pm j 2.555$	۵۳ (۵۴)	$-0.052 \pm j 10.967$	۵۱ (۵۲)	$-0.059 \pm j 11.002$
۸۳ (۸۴)	$-0.054 \pm j 8.087$	۱۱۷ (۱۱۸)	$-0.740 \pm j 0.927$	۷۹ (۸۰)	$-0.050 \pm j 8.364$	۴۵ (۴۶)	$-0.049 \pm j 11.765$
۱۱۰ (۱۱۱)	$-0.002 \pm j 2.555$	۱۰۳ (۱۰۴)	$-0.059 \pm j 5.091$	۵۱ (۵۲)	$-0.059 \pm j 11.002$	۵۳ (۵۴)	$-0.052 \pm j 10.967$
۸۵ (۸۶)	$-0.090 \pm j 8.049$	۱۰۵ (۱۰۶)	$-0.083 \pm j 4.732$	۵۷ (۵۸)	$-0.050 \pm j 10.606$	۱۱۰ (۱۱۱)	$-0.002 \pm j 2.555$
۷۵ (۷۶)	$-0.060 \pm j 9.043$	۱۱۹ (۱۲۰)	$-0.467 \pm j 0.650$	۹۱ (۹۲)	$-0.059 \pm j 7.262$	۶۱ (۶۲)	$-0.053 \pm j 10.490$
۷۹ (۸۰)	$-0.050 \pm j 8.364$	۱۰۷ (۱۰۸)	$-0.242 \pm j 3.370$				
۹۹ (۱۰۰)	$-0.143 \pm j 6.222$	۸۵ (۸۶)	$-0.090 \pm j 8.049$				
۱۰۵ (۱۰۶)	$-0.083 \pm j 4.732$	۸۳ (۸۴)	$-0.054 \pm j 8.087$				
۱۰۳ (۱۰۴)	$-0.059 \pm j 5.091$						
۹۷ (۹۸)	$-0.170 \pm j 6.372$						
۱۰۷ (۱۰۸)	$-0.242 \pm j 3.370$						
۶۳ (۶۴)	$-0.299 \pm j 10.436$						



شکل ۴. شاخص‌های تداخل غیرخطی برای سرعت ماشین ۶ و زاویه رتور ماشین ۴۳ به‌ازای خطا در شین ۱۰۰.

شکل ۳. شاخص‌های تداخل غیرخطی برای سرعت ماشین ۶ و زاویه رتور ماشین ۴۳ به‌ازای خطا در شین ۷.

پاسخ سیستم، بررسی و در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده می‌شوند. چنان‌که مشاهده می‌شود افزایش زمان خطا موجب شدیدتر شدن تداخل غیرخطی میان مودهای غالب به‌ویژه در حالت بین ناحیه‌یی می‌شود.

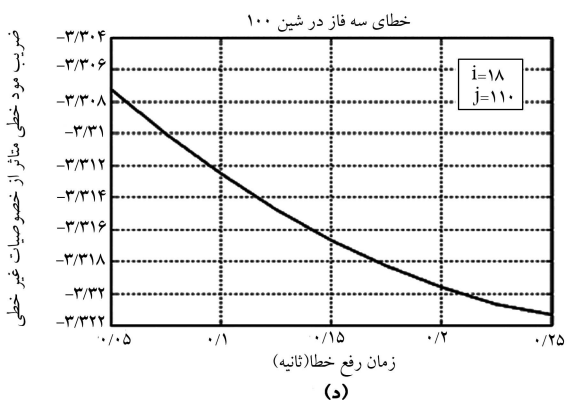
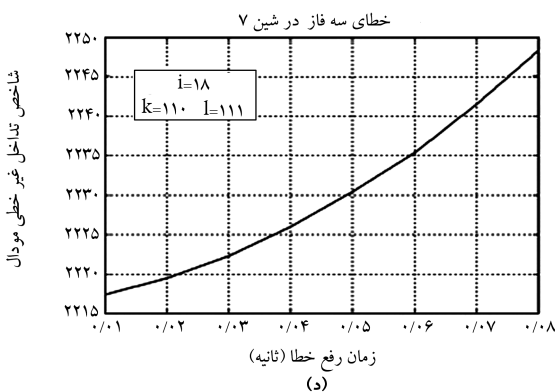
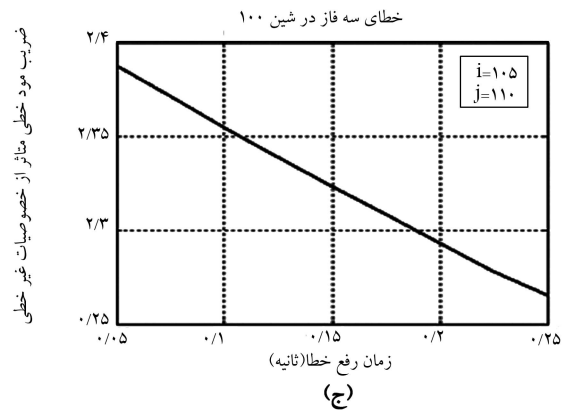
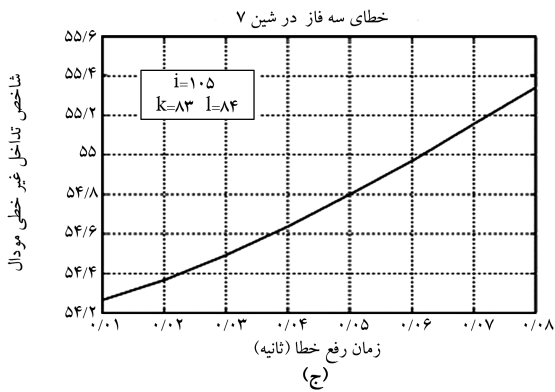
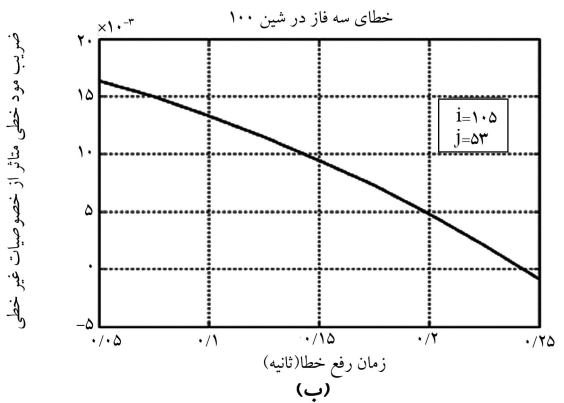
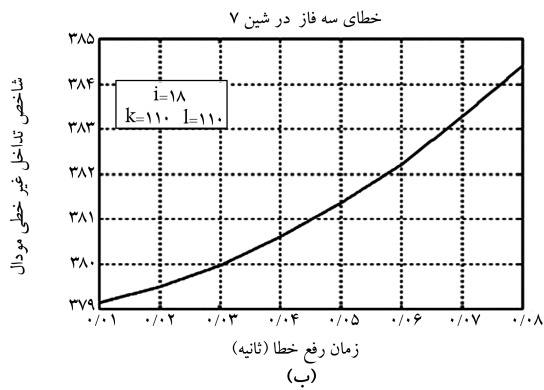
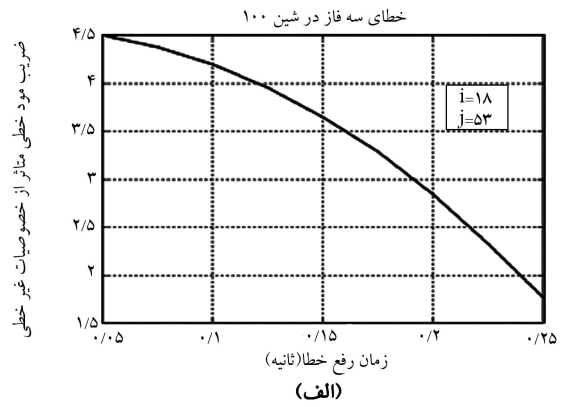
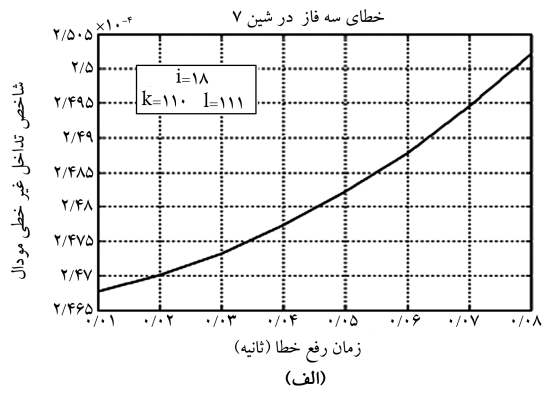
از طرفی برای خطا در شین ۱۰۰ با افزایش زمان پاک‌سازی خطا اثر فرونشاندگی خواص غیرخطی بر متغیرهای حالت مختلف دیده می‌شود. چنان‌که در شکل ۵ برای مود ۱۱۰ و حالت ۱۸ مشاهده می‌شود، اساساً در این سناریوی خطا میزان تأثیر مود بین‌ناحیه‌یی در سرعت ژنراتور ۱۱۱ ناچیز است. از سوی دیگر تأثیر مود ۵۳ در سرعت ژنراتور ۴۳، یعنی متغیر حالت ۱۰۵، اندک است. تمامی این نتایج حاکی از آن است که به‌ازای خطای سه فاز در شین ۱۰۰ (و همین‌طور ۱۱۲)، که برای رعایت اختصار از ذکر نتایج مربوط به آن خودداری شده است) رفتار نوسانی

شاخص‌های بزرگی دارند، اما به‌رحال آنها مودهای حقیقی منفی‌اند و جز اثر کاهشی تأثیر نوسانی دیگری در رفتار سیستم نخواهند داشت. اما مودهای تداخلی $\lambda_{110} + \lambda_{111}$ و $\lambda_{110} + \lambda_{111} + \lambda_{111}$ مودهای نوسانی فرکانس پایینی هستند که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد دینامیکی سیستم دارند. اما هنگامی که خطا در شین ۱۰۰ اتفاق می‌افتد، تداخل غیرخطی قابل توجهی که منجر به ایجاد مودهای نوسانی جدیدی بشود وجود ندارد و عمدتاً تداخل مودال میان مودهای محلی مربوط به ژنراتورهای نزدیک به محل وقوع خطا و مزدوج‌های آنها مشاهده می‌شود که اثر قابل توجهی بر رفتار دینامیکی سیستم ندارند.

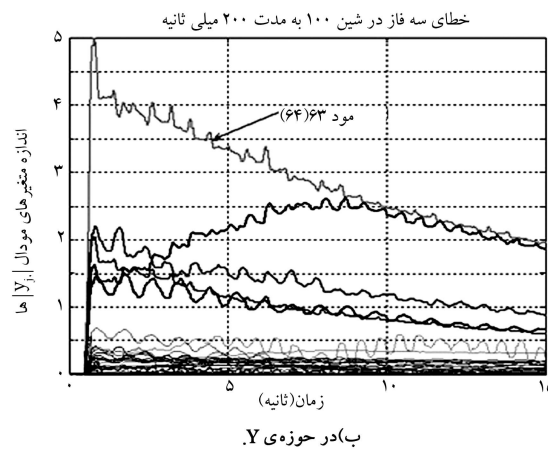
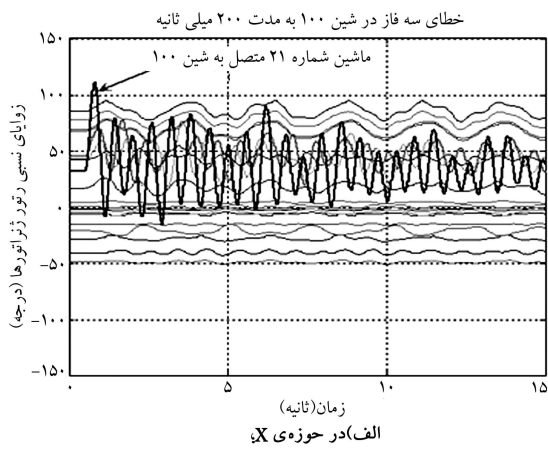
اکنون با تغییر در زمان پاک‌سازی خطا برای هرکدام از محل خطاهای ۷ و ۱۰۰ حساسیت شاخص‌های I_{kl}^i مودهای تداخلی و I_{j}^i مودهای خطی در

جدول ۲. مقادیر شاخص تداخل غیرخطی مرتبه‌دوم به‌ازای وقوع خطای سه فاز در شین‌های ۷ و ۱۰۰.

خطا در شین ۷				خطا در شین ۱۰۰			
سرعت ژنراتور ۶		زاویه ژنراتور ۴۳		سرعت ژنراتور ۶		زاویه ژنراتور ۴۳	
I_{kl}^i	kl	I_{kl}^i	kl	I_{kl}^i	kl	I_{kl}^i	kl
۱۸۲,۵۹۴	۱۱۰ ۱۱۱	۱۶,۴۰۷	۱۱۰ ۱۱۱	۱۰,۹۷۴	۵۳ ۵۴	۴,۱۶۰	۵۳ ۵۴
۱۲۳,۴۵۱	۱۱۰ ۱۱۰	۱۲,۳۹۴	۱۱۰ ۱۱۰	۱۶,۷۸۵	۷۹ ۸۰	۱,۱۱۶	۷۹ ۸۰
۸۵,۴۹۸	۸۳ ۸۴	۳,۴۲۰	۸۳ ۸۴	۱۲,۴۲۲	۹۱ ۹۲	۰,۶۹۵	۹۳ ۹۴
۸,۲۹۸	۸۱ ۸۲	۲,۷۸۵	۸۱ ۸۲	۱۰,۹۷۴	۹۳ ۹۴	۰,۴۴۳	۹۱ ۹۲
۴,۳۸۱	۷۹ ۸۰	۱,۳۲۲	۱۰۴ ۱۱۰	۵,۰۳۳	۱۱۰ ۱۱۱	۰,۱۹۳	۱۱۰ ۱۱۱



شکل ۵. تغییرات شاخص I_j^i نسبت به تغییر در زمان پاک‌سازی خطای سه‌فاز در شین ۱۰۰. شکل ۶. تغییرات شاخص I_k^i نسبت به تغییر در زمان پاک‌سازی خطای سه‌فاز در شین ۷.



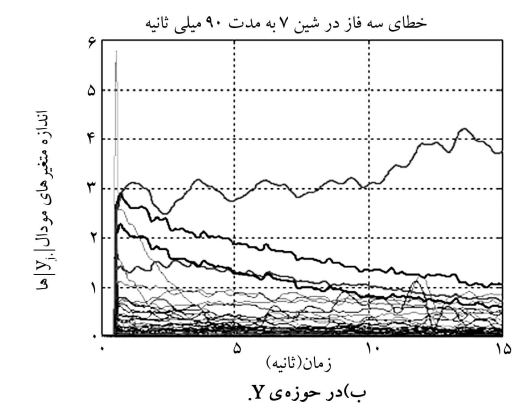
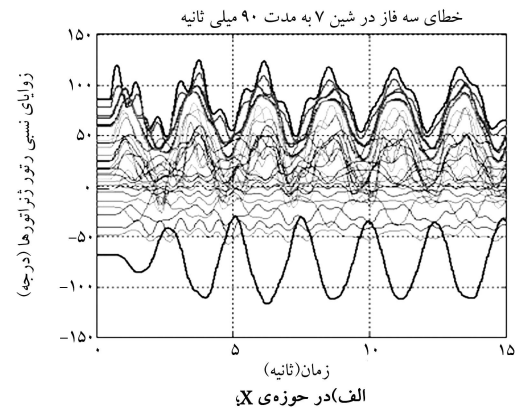
شکل ۸. پاسخ‌های زمانی دقیق متغیرهای حالت، متعاقب وقوع یک خطای سه‌فاز در شین ۱۰۰ به مدت ۲۰۰ میلی ثانیه و ایجاد مود محلی.

مورد بررسی نشان داده شده است. علاوه بر پاسخ‌های زمانی متغیرهای حالت در حوزه‌ی فیزیکی ماشین‌ها، $x_i(t)$ ها، با استفاده از تبدیل $y_{NL}(t) = U^{-1} x_{NL}(t)$ نیز پاسخ‌های زمانی متغیرهای حالت در حوزه‌ی جردن ارائه شده‌اند. با توجه به شکل ۷ الف وقوع نوسانات بین‌ناحیه‌یی به دنبال بروز خطا در شین ۷ محرز است. چنان که در این شکل دیده می‌شود تعداد زیادی از ژنراتورها با دامنه‌ی شدید و فرکانس پایین با یکدیگر به نوسان می‌پردازند. منحنی‌های نوسان زوایای رتور در این حالت عمق و پهناى خاصی دارند. در شکل ۷ ب نیز مشاهده می‌شود که نوسان متغیرهای حالت در فضای جردن نیز دارای فرکانس‌های غالب پایین است. اما در شکل ۸ الف برای وقوع خطا در شین ۱۰۰ مسئله به‌کلی متفاوت است. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود تعداد معدودی از ماشین‌ها دچار نوسان شده‌اند و سایر ماشین‌ها نیز آشفتگی چندان زیادی پیدا نکرده‌اند. این نوسانات در مقایسه با نوسانات نشان داده شده در شکل ۷ الف، آشکارا فرکانس‌های بالاتری دارند؛ شکل کیفی منحنی‌های نوسان زوایای رتور نیز، مخصوصاً به لحاظ عمق و پهنا، با حالت قبل تفاوت قابل توجهی دارند. حضور مؤلفه‌های فرکانس نسبتاً بالاتر در پاسخ‌های زمانی متغیرهای حالت فضای جردن در شکل ۸ ب نیز واضح است. در این وضعیت وقوع مود محلی محرز است، و از این رو شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان نیز مؤید صحت و اعتبار بررسی‌های به‌عمل آمده با تحلیل سری مودال است.

از نوع مود محلی ایجاد می‌شود که مودهای غالب آن عمدتاً ۵۱، ۵۳، ۴۵، ۵۷ و ۷۹ هستند. این مودها دارای فرکانس‌هایی در محدوده‌ی ۱ تا ۲٫۵ هرتز هستند. مودهای محلی مربوط به ژنراتورهای ۱۰۰، ۱۱۲، ۹۸، ۱۰۳ و ۸۹ هستند که در اصل ماشین‌های واقع در همان حوالی محل وقوع خطا هستند. اما به‌زای وقوع خطا در شین ۷ (و همین‌طور شین ۱ که به‌منظور رعایت اختصار از ذکر نتایج مربوط به آن خودداری شده است) مودهای غالب در رفتار سیستم عبارت‌اند از ۱۱۰، ۸۳، ۸۱، ۱۰۳، ۱۰۵، ۱۱۷ و مودهای ترکیبی حاصل از این مودها و مزدوج‌های آنها. در این بین مود ۱۱۰ مود بین‌ناحیه‌یی اصلی است، مود ۱۱۷ یک مود کنترلی مربوط به سیستم کنترل تحریک ژنراتورهای ۱۰۴ و ۱۱۱ است، و مودهای ۸۳ و ۸۱ مودهای محلی همان دو ماشین‌اند. اما مودهای ۱۰۳ و ۱۰۵ مودهای محلی مربوط به ماشین‌های واقع در نواحی دورتر به محل وقوع خطا هستند که مشارکت فعالی در نوسان از خود نشان می‌دهند.

بدیهی است استنتاج نهایی از رفتار سیستم در مواجهه با این دو سناریوی خطا، رفتار بین‌ناحیه‌یی است که در آن ژنراتورهای واقع در نواحی مختلف در نوسان مشارکت جدی خواهند داشت. در ضمن لازم به توضیح است که تحت شرایط موجود تشدید یا شبه تشدید قابل توجهی وجود نداشته و شاخص‌های M^2 برای مودها و متغیرهای حالت مختلف صفر یا ناچیز دیده شده است. از ضرایب مشارکت خطی جهت شناسایی ارتباط مودهای کنترلی با ماشین‌های مربوطه [۳۱] و از ضرایب مشارکت غیرخطی برای شناسایی ارتباط مودهای الکترومکانیکی فرکانس پایین و ماشین‌های مرتبط استفاده شده است. [۳۲]

در شکل‌های ۷ و ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی غیرخطی عددی برای هر دو خطای



شکل ۷. پاسخ‌های زمانی دقیق متغیرهای حالت، متعاقب وقوع یک خطای سه‌فاز در شین ۷ به مدت ۹۰ میلی ثانیه و ایجاد مود بین‌ناحیه‌یی.

از بررسی‌های به عمل آمده می‌توان نتیجه گرفت که محل خطا، نوع و مدت زمان آن نقش اساسی در تعیین رفتارهای دینامیکی سیستم‌های قدرت تحت استرس دارند. به دلیل رشد اثرات غیرخطی، عملکرد دینامیکی سیستم‌های تحت استرس را در مواجهه با اغتشاش‌های گوناگون با روش‌های متداول نظیر تحلیل مقادیر ویژه نمی‌توان به درستی بررسی کرد. هرچند درگام‌های نخست، مشاهده‌ی میزان انحراف متغیرهای حالت از وضعیت تعادل و یا همان شرایط اولیه‌ی سیستم X_0 و Y_0 تا اندازه‌ی رفتار کیفی سیستم را نشان می‌دهند، اما تحلیل‌های شکل نرمال و سری مودال، مودهای تداخلی غالب و تأثیر خواص غیرخطی را بر مودهای خطی را به خوبی شناسایی و ارزیابی می‌کنند. نتایج حاصله در این نوشتار نشان می‌دهند که در مواردی که وقوع خطا منجر به بروز مود محلی می‌شود، تنها تعداد محدودی از مودهای الکترومکانیکی محلی به شدت تحریک می‌شوند که ماشین‌های مشارکت کننده در آنها متعلق به مناطق نزدیک به محل وقوع خطا هستند. علاوه بر این تداخل غیرخطی قابل توجهی نیز میان مودهای اساسی نوسان دیده نمی‌شود. حال آنکه در

مواردی که منجر به مود بین‌ناحیه‌ی می‌شوند، مودهای کنترلی، بین‌ناحیه‌ی محلی مختلفی در میان مودهای به شدت تحریک شده دیده می‌شوند. تداخل غیرخطی میان این مودها و تعلق ماشین‌های مشارکت‌کننده در آنها به نواحی جغرافیایی مختلف نشان‌دهنده‌ی نوسان بین‌ناحیه‌ی است. همچنین ملاحظه شد که تداخل غیرخطی شدیدی میان هر مود و مزدوج آن وجود دارد. مودهای تداخلی ناشی از ترکیب چنین مودهایی به صورت اعداد حقیقی منفی هستند که بر پاسخ‌های زمانی سیستم فقط اثر کاهشی خواهند داشت و علیرغم اختصاص مقادیر بزرگ شاخص‌ها به خود، می‌توان به عنوان یک عامل منفی به لحاظ ایجاد نوسانات با میرایی اندک، از آنها صرف‌نظر کرد. با این وجود تداخل مودهای بین‌ناحیه‌ی، با یکدیگر یا با مودهای کنترلی، ممکن است موجب تشکیل مودهای نوسانی فرکانس پایین با میرایی اندک شود.

از سوی دیگر اثرات غیرخطی موجب کم و زیاد شدن میزان تحریک مودهای خطی نیز می‌شود. لازم است برای احتراز از عملکردهای کنترلی با میرایی نامطلوب این اثرات تحریک‌کنندگی و فرونشاندگی مودهای خطی ناشی از خواص غیرخطی سیستم، مورد توجه طراحان کنترلی قرار گیرند.

منابع

1. Tamora, Y. and Yorino, N. "Possibility of auto- & hetro-parametric resonances in power systems and their relationship with long-term dynamics," *IEEE Transactions on Power Systems*, **2**(4), pp. 890-897 (1987).
2. Yorino, N.; Sasaki, H.; Tamura, Y. and Yokoyama, R. "A general analysis method of auto-parametric resonances in power systems", *IEEE Transactions Power Systems*, **4**(3), pp.1057-1064 (1989).
3. Vittal, V.; Bhatia, N. and Fouad, A.A. "Analysis of the inter-area mode phenomenon in power systems following large disturbances," *IEEE Transactions on Power Systems*, **6**(4), pp. 1515-1521 (1991).
4. Lin, C.M.; Vittal, V.; Kliemann, W. and Fouad, A.A. "Investigation of modal interaction and its effects on control performance in stressed power systems using normal forms of vector fields", *IEEE Transactions on Power Systems*, **11**(2), pp. 781-787 (1996).
5. Ni, Y.; Vittal, V.; Kliemann, W. and Fouad, A.A. "Non-linear modal interaction in HVDC/AC power systems with DC power modulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, **11**(4), pp. 2011-2017 (1996).
6. Thapar, J.; Vittal, V.; Kliemann W. and Fouad, A.A. "Application of normal form of vector fields to predict inter-area separation in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, **12** (2), pp. 844-850 (1997).
7. Starrett, S.K. and Fouad, A.A. "Nonlinear measures of mode-machine participation," *IEEE Transactions on Power Systems*, **13** (2), pp. 389-394 (1998).
8. Zhu, S.; Vittal, V.; Kliemann, W. "Analyzing dynamic performance of power systems over parameter space using normal forms of vector fields," Part I: Identification of vulnerable regions, and Part II: Comparison of system structure, *IEEE Transactions on Power Systems*, **16** (3), pp. 444-455 (2001).
9. Barocio, E. and Messina, A.R. "Analysis of nonlinear modal interaction in stressed power systems with SVCs," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, **2**, pp.1164-1169 (2002).
10. Martinez, I.; Messina, A.R. and Vittal, V. "Normal form analysis of complex system models: A structure-preserving approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**(4), pp.1908-1915 (2007).
11. Sanchez-Gasca, J.J.; Vittal, V.; Gibbard, M.J.; Messina, A.R.; Vowels, D.J.; Liu, S. and Annakkage, U.D. "Inclusion of higher order terms for small-signal (Modal) analysis: Committee report-task force on assessing the need to include higher order terms for small-signal (Modal) analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**(4), pp.1886-1904 (2005).
12. Jang, G.; Vittal, V. and Kliemann, W. "Effect of non-linear modal interaction on control performance: Use of normal forms technique in control design", Part I & II, *IEEE Transactions on Power Systems*, **13**(2), pp. 401-421(1998).
13. Zou, Z.Y.; Jiang, Q.Y.; Cao, Y.J. and Wang, H.F. "Investigation of interactions among the multi-control channels of UPFC using normal forms of vector fields", The 39th International Universities Power Engineering Conference, **1**, pp. 343- 347, Bristol, UK, 6-8 Sept. (2004).
14. Liu, S.; Messina, A.R. and Vittal, V. "Assessing placement of controllers and nonlinear behavior using normal form analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**(3), pp. 1486-1495 (2005).

15. Liu, S.; Messina, A.R. and Vittal, V. "A normal form analysis approach to siting power system stabilizers (PSSs) and assessing power system nonlinear behavior," *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**(4), pp. 1755-1762 (2006).
16. Ni, Y.; Vittal, V. and Kliemann, W. "A study of system separation mechanisms in the neighborhood of a relevant type-n UEP via normal form of vector fields," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gener., Transm., Distrib.*, **145**(2), pp. 139-144 (1998).
17. Vittal, V.; Kliemann, W.; Ni, Y.X.; Chapman, D.G.; Silk, A.D. and Sobajic, D.J. "Determination of generator groupings for an islanding scheme in the manitoba hydro system using the method of normal forms," *IEEE Transactions on Power Systems*, **13**(4), pp. 1345-1351 (1998).
18. Saha, S.; Fouad, A.A.; Kliemann, W. and Vittal, V. "Stability boundary approximation of a power system using the real normal form of vector fields," *IEEE Transactions on Power Systems*, **12**(2), pp. 797-802 (1997).
19. Qi, R. "Visualization of stable manifolds and multidimensional surfaces in the analysis of power system dynamics," *Journal of Nonlinear Science*, **10**, pp.175-195 (2000).
20. Amano, H.; Kumano, T. and Inoue, T. "Nonlinear stability indexes of power swing oscillation using normal form analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**(2), pp.825-834 (2006).
21. Arrowsmith, D.K. and Place, C.M. *An Introduction to Dynamical Systems*, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press (1990).
22. Arnold, V.I. *Geometrical Methods in the Theory of Ordinary Differential Equations*, New York: Springer-Verlag (1998).
23. Guckenheimer, J. and Holmes, P. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcation of Vector Fields*, New York: Springer-Verlag (1986).
24. Wiggins, S. *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, New York: Springer-Verlag (2003).
25. Nayfeh, A.H. *Method of Normal Forms*, New York: John Wiley & Sons, Inc. (1993).
26. Kahn, P.B. and Zarmi, Y. *Nonlinear Dynamics: Exploration through Normal Forms*, New York: John Wiley & Sons, Inc. (1998).
27. Modir Shanechi, H.; Pariz, N. and Vaahedi, E. "General nonlinear modal representation of large scale power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, **18**(3), pp. 1103-1109 (2003).
28. Pariz, N.; Modir Shanechi, H. and Vaahedi, E. "Explaining and validating stressed power systems behavior using modal series," *IEEE Transactions on Power Systems*, **18**(2), pp. 778-785 (2003).
29. Anderson, P.M. and Fouad, A.A. *Power System Control and Stability*, IEEE press, 2nd Edition (2003).
30. Vittal, V. "Transient stability test systems for direct stability method, IEEE committee report," *IEEE Transactions on Power Systems*, **7**(1), pp.37-42 (1992).
31. Perez-Arriaga, I.J.; Verghese, G.C. and Schweppe, F.C. "Selective modal analysis with applications to electric power systems. Part I: heuristic introduction", *IEEE Transactions on Power Systems*, **101**, pp. 3117-3125 (1982).
32. Wu, F.X.; Wu, H.; Han, Z.X. and Gan, D.Q. "Validation of power system non-linear modal analysis methods", *Electric Power Systems Research*, **77**(10), pp. 1418-1424 (2007).