

روشی جدید در جایی مناسب پایدارسازهای سیستم قدرت به منظور میراسازی نوسانهای بین ناحیه‌ای با استفاده از روش سری مدال

علی حسامی نقشبندی^{۱*}، احد کاظمی^۲، حسن مدیر شانه‌چی^۳، ایمان پورفر^۴

۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استاد گروه مهندسی برق و کامپیوتر، انستیتو فن‌آوری ایلینویز، شیکاگو، ایالات متحده آمریکا

۴- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

*سندج، صندوق پستی ۴۱۶

hesami@iust.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۷)

چکیده- در این مقاله به کاربرد روش سری مدال در جایی مناسب پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS) به منظور میراسازی نوسانهای بین ناحیه‌ای پرداخته می‌شود. در سیستم‌های قدرت تحت بارگذاری سنگین، آثار غیرخطی در پاسخهای دینامیکی به میزان قابل توجهی رشد می‌کنند. در نتیجه روشها و فنون خطی، تصویر کاملاً درستی از رفتار واقعی سیستم را در اختیار قرار نمی‌دهند. در این مقاله با تعریف ضرایب مشارکت غیرخطی بر مبنای فرمول‌بندی سری مدال و همچنین با ارائه یک شاخص جدید تداخل غیرخطی، مکان مناسب نصب PSS تعیین و کارایی کنترل‌کننده نصب شده در آن محل مطالعه می‌شود. ابتدا برای دو شرایط بهره‌برداری مختلف، یکی کم‌استرس و دیگری پر استرس به کمک روشهای مرسوم شکل مد، ضرایب مشارکت و مقادیر مانده‌ها و محل مناسب برای نصب PSS تعیین و سپس با نتایج حاصل از ضرایب مشارکت سری مدال مقایسه می‌شوند. در نهایت صحت و اعتبار نتایج حاصل به کمک شبیه‌سازی در حوزه زمان ارزیابی می‌شود. بررسی‌های انجام شده روی سیستم ۵۰ ماشینه IEEE به‌عنوان سیستم آزمون، بیانگر مناسب بودن مکان انتخاب شده بر مبنای ضرایب مشارکت غیرخطی بوده و شاخص تداخل غیرخطی نیز نشان دهنده افزایش میزان تداخل غیرخطی میان مدهای اساسی سیستم است. این موضوع خود به معنای تأثیر بالای کنترل‌کننده نصب شده بر نوسانهای بین ناحیه‌ای است. نتایج شبیه‌سازی‌های حوزه زمان نشان می‌دهند که انتخاب نامناسب مکان نصب PSS بر مبنای روشهای مرسوم می‌تواند به نتایج ضعیف و نامطلوبی منجر شود.

کلید واژگان: نوسانهای بین ناحیه‌ای، سری مدال، پایدارساز سیستم قدرت، تحلیل غیرخطی.

۱- مقدمه

نوسانهای الکترومکانیکی فرکانس پایین شامل نوسانهای محلی و بین ناحیه‌ای، امروز در بسیاری از سیستم‌های قدرت بروز می‌کنند. از این میان نوسانهای بین ناحیه‌ای به دلیل ماهیت و منشأ پیچیده خود و میرایی اندک، مشکلات مهمی را در بهره‌برداری و امنیت سیستم‌ها ایجاد می‌کنند. به منظور بهبود پایداری و برای کنترل و میراسازی این گونه نوسانها، از پایدارساز سیستم قدرت و ادوات FACTS استفاده می‌شود. گام اول در طراحی هر کنترل کننده‌ای مانند PSS تعیین مکان بهینه برای نصب آن است. از حدود چهار دهه پیش که بحث استفاده از پایدارسازهای سیستم قدرت مطرح و اجرا شد روشها و فنون خطی در تحلیل و طراحی کنترلی به فراوانی استفاده شده و در عمل، نتایج قابل قبولی ارائه شده است [۱-۴]. امروز شرایط بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت بسیار تغییر کرده است و بیشتر به دلایل اقتصادی، در نزدیکی مرزهای پایداری از سیستم‌ها بهره‌برداری می‌شود. در چنین شرایطی بارگذاری نیروگاهها سنگین، توان عبوری از خطوط ارتباطی بین نواحی مختلف، زیاد بوده و وضعیت و لذا نیز چندان مساعد نیست. در این وضعیت سیستم تحت استرس تلقی می‌شود و در رویارویی با اغتشاشهای سنگین یا سبک، رفتارهای دینامیکی پیچیده‌ای را نشان می‌دهد که منشأ غیرخطی داشته و بیشتر ناشی از تداخل غیرخطی میان مدهای اصلی سیستم است. در نتیجه به دلیل رشد خصوصیات غیرخطی در پاسخهای دینامیکی سیستم‌های تحت استرس، استفاده از ابزارها و فنون خطی در تحلیل و طراحی کنترلی نتایج دقیق و قابل اطمینانی به بار نمی‌آورند. بر اساس این نگرش محققان از اوایل دهه ۹۰ میلادی به کاربرد روشها و ابزارهای

غیرخطی روی آوردند که حاصل تلاش آنها در این زمینه استفاده از روش شکل نرمال میدانهای برداری در بررسی رفتارهای گذرای الکترومکانیکی سیستم و طراحی کنترلی برای حصول مشخصه‌های دینامیکی مطلوبتر بوده است [۵]. در [۶ و ۷] به استفاده از روش شکل نرمال در بررسی اثرات غیرخطی و جابجایی مناسب پایدارساز پرداخته شده است. اما علی‌رغم قابلیت خوب روش شکل نرمال در ملحوظ کردن سه عامل اساسی در شکلدهی پاسخ دینامیکی هر سیستم قدرت یعنی ساختار سیستم، شرایط بهره‌برداری و اثر اغتشاش، متأسفانه این روش از بعضی نقایص رنج می‌برد. از جمله اینکه، تبدیل غیرخطی شکل نرمال، نه یک به یک است و نه پوشا و این می‌تواند به ارائه بیش از یک پاسخ تحلیلی به ازای شرایط منحصر به فرد در فضای حالت فیزیکی ماشین‌ها منجر شود. علاوه بر این در شرایط وقوع تشدید پارامتری میان مدهای سیستم، روش شکل نرمال توانایی کار ندارد. از این رو استفاده از همتای نسبتاً جدیدتر شکل نرمال یعنی روش سری مدال، [۸ و ۹] برای حصول نتایج بهتر و احتراز از مشکلات فوق لازم بوده و جذاب به نظر می‌رسد. در این مقاله به استفاده از روش سری مدال در بررسی ویژگیها و رفتارهای غیرخطی سیستم‌های قدرت تحت استرس پرداخته می‌شود و به کمک این روش مکانی مناسب برای نصب پایدارساز سیستم قدرت به منظور میراسازی و کنترل نوسانهای بین ناحیه‌ای تعیین می‌شود. نتایج حاصل از اعمال این روش در سیستم مورد مطالعه، با شبیه‌سازی در حوزه زمان مورد آزمون قرار می‌گیرد. سازماندهی مطالب مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ مدل‌سازی سیستم قدرت به منظور تحلیل و کنترل نوسانهای الکترومکانیکی فرکانس پایین معرفی می‌شود. روش سری مدال در

در مطالعات این مقاله، از مدل مرتبه چهار برای ژنراتورهای مدل شده به صورت دو محوری استفاده می‌شود. این مدل اطلاعات لازم را در بررسی پدیده‌های مورد نظر در برداشته و استفاده از مدل‌های مرتبه ۵ یا بالاتر در تکمیل اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی‌ها تأثیر چندانی ندارد، ضمن آنکه بار محاسباتی را نیز سنگین‌تر می‌کنند. بارها به صورت امپدانس ثابت و شبکه نیز به صورت خطی و کاهش یافته به شین داخلی ماشین‌ها در معادلات وارد می‌شود [۱۰]. با این فرضها معادلات دینامیکی سیستم به شکل زیر می‌شود:

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

که در آن $F(X): R^N \rightarrow R^N$ میدان برداری هموار و تحلیلی بوده و X بردار متغیرهای حالت سیستم است که مطابق توضیحات داده شده، در این مطالعه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X = [E'_{q1}, E'_{d1}, \omega_1, \delta_1, E_{FD1}, X_{E1}, X_{E2}, \dots, E'_{qm}, E'_{dm}, \omega_m, \delta_m, E_{FDm}, X_{E1m}, X_{E2m}, \dots, \omega_n, \delta_n]^T$$

که در آن E'_{d}, E'_{q} به ترتیب EMF محورهای طولی و عرضی استاتور، ω سرعت رتور نسبت به دستگاه مرجع سنکرون، δ زاویه رتور، E_{FD} مؤلفه EMF استاتور مربوط به ولتاژ میدان و X_{E1}, X_{E2} متغیرهای حالت مربوط به سیستم تحریک است که در شکل ۱ نشان داده شده. بعد سیستم یا تعداد کل متغیرهای حالت برابر N فرض می‌شود.

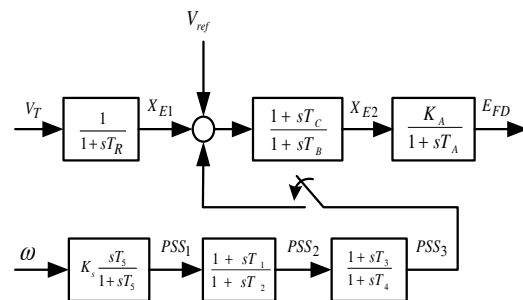
۳- روش سری مدال

توصیف سیستم‌های دینامیکی غیرخطی مانند سیستم قدرت تحت استرس با سری مدال درک فیزیکی بسیار

بخش ۳ معرفی می‌شود. بخش ۴ به ارائه ضرایب مشارکت غیرخطی مبتنی بر روش سری مدال و معرفی شاخص تداخل غیرخطی جدیدی اختصاص یافته است. در بخش ۵ کاربرد روش پیشنهادی در جایابی بهینه PSS در سیستم ۵۰ ماشینه IEEE به عنوان سیستم آزمون ارائه می‌شود و نتایج حاصل از جایابی پایدارساز بر مبنای روشهای مرسوم و بر اساس روش سری مدال با یکدیگر و با شبیه‌سازی‌های حوزه زمان مقایسه می‌شوند.

۲- مدل سازی سیستم قدرت

رفتار دینامیکی سیستم قدرت به وسیله مشخصه‌های دینامیکی تک تک اجزا و عناصر آن مانند ماشین‌های سنکرون، سیستم‌های تحریک، بارها و سیستم انتقال (شبکه) و اثر متقابل آنها بر یکدیگر شکل گرفته و تعیین می‌شود. در یکی از کلی‌ترین روشهای مرسوم در مطالعه دینامیک سیستم قدرت فرض می‌شود که در سیستمی با n ژنراتور، تعداد m ژنراتور به صورت دو محوری و مجهز به سیستم تحریک و $n-m$ ماشین باقیمانده به صورت کلاسیک مدل سازی شده باشند. مدل سیستم تحریک و PSSهای مورد استفاده در این مقاله مطابق شکل است.



شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم تحریک (IEEE type AC/A) و پایدارسازهای مورد استفاده (IEEE type PSS/A)

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

$$[D_{pqr}^j] = \frac{1}{\sqrt{}} \sum_{P=1}^N \sum_{Q=1}^N \sum_{R=1}^N P_{PQR}^j V_p^P V_q^Q V_r^R \quad (5)$$

V_p^P ، المان p بردار ویژه چپ شماره p است. بر اساس درجه جملات غیرخطی نگاهداشته شده در بسط تیلور معادلات دینامیکی سیستم، تقریبهای مختلفی از رفتار واقعی سیستمها حاصل می شود. در مطالعاتی که به روش شکل نرمال انجام شده، از جملات مرتبه دو به بالا صرفنظر شده و ثابت شده است که ملحوظ کردن جملات مرتبه سوم اطلاعات بسیار بیشتری را از رفتار کیفی سیستم در اختیار قرار نمی دهد [۱۱]. در روش سری مدال فرض می شود که پاسخ مجموعه معادلات دیفرانسیل (۳) به شرایط اولیه $Y_0 = [y_{10}, y_{20}, \dots, y_{N0}]^T$ را می توان به شکل تفکیک شده (۶) نوشت [۸ و ۹]:

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

در اینجا $y_{mj}(t)$ شامل مجموعه جملاتی به صورت حاصلضربهای m تایی متغیرهای حالت در فضای جردن است. به عنوان مثال به ازای $m=3$ جملات y_{3j} به معنای جملاتی نظیر (y_p, y_q, y_r) و برای $p, q, r=1, \dots, N$ است. ثابت شده [۹] که با صرفنظر کردن از جملات مرتبه سوم و بالاتر، پاسخ تقریبی مرتبه دوم سیستم در حوزه مدال را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$y_j(t) = y_{1j}(t) + y_{2j}(t) \quad (7)$$

$$= \left(y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R_j'} \right) e^{\lambda_j t}$$

خوبی از رفتار دینامیکی سیستم مورد مطالعه فراهم می آورد که به وسیله سایر روشها حاصل نمی شود. در واقع روش سری مدال را به نحوی می توان تعمیم روشهای خطی رایج برای سیستمهای غیرخطی دانست. به کمک این روش پاسخ تحلیلی متغیرهای حالت سیستم حول نقطه تعادل به دست می آید. این روش حتی در شرایط تشدید نیز پاسخ تقریبی را برای مجموعه معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار سیستم به دست می دهد. اساس این روش، بسط تیلور معادلات دینامیکی سیستم تا درجه دلخواه حول نقطه تعادل است. با بسط تیلور میدان برداری $F(X)$ حول نقطه تعادل X_{EP} و استفاده مجدد از X و x_i به عنوان متغیرهای حالت به جای $x - x_i^{EP}$ برای $X - X_{EP}$ می توان نوشت:

(۲)

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

که در آن X متعلق به حوزه جذب سری تیلور، A_i و $i=1, 2, \dots, N$ نیز سطر i ام ماتریس ژاکوبین سیستم، $A = (\partial F / \partial X)|_{X_{EP}}$ است که حول نقطه تعادل مورد نظر محاسبه شده. $H^i = (\partial^2 F_i / \partial X^2)|_{X_{EP}}$ ، ماتریس هسیان شماره i سیستم و $P_{pqr}^i = (\partial^3 F_i / \partial x_p \partial x_q \partial x_r)|_{X_{EP}}$ تعریف می شوند. با فرض آنکه سیستم N مقدار ویژه مجزای λ_j داشته باشد و V و U به ترتیب ماتریسهای مدال چپ و راست باشند، با استفاده از تبدیل جردن $X=UY$ مجموعه معادلات دینامیکی (۲) از حوزه X به شکل مجموعه معادلات (۳) در حوزه Y تبدیل می شود:

(۳)

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

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

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

از روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت که روش سریهای مدال پاسخ تقریبی سیستم‌های غیرخطی را به شکل بسته و تحلیلی فقط با استفاده از تبدیل خطی $X = UY$ به دست می‌دهد. با فرض آنکه تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم وجود نداشته باشد (مجموعه R'_i تهی) پاسخ سیستم را به شکل خلاصه‌تر زیر می‌توان نوشت:

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

با مقایسه پاسخ خطی سیستم (رابطه (۸) از [۸]) و پاسخ غیرخطی (۱۳) ملاحظه می‌شود که تأثیر ملحوظ کردن ویژگیها غیرخطی سیستم، در دو جا اثر خود را به جا گذاشته است: یکی وارد شدن جملات مراتب بالاتر می‌باشد که به وضوح به عنوان دومین جمله سمت راست رابطه (۱۳) ظاهر شده و دیگری تصحیحی است که توسط عبارت L_j^i در جملات مربوط به ضرایب مدهای اصلی در جمله اول سمت راست همان رابطه ظاهر شده است.

۴- ضرایب مشارکت غیرخطی مبتنی بر سری مدال

ضرایب مشارکت خطی نشان‌دهنده میزان ارتباط میان مدها و متغیرهای حالت سیستم است [۱۲]. مفهوم ضرایب مشارکت خطی با استفاده از روش شکل نرمال میدان‌های برداری به سیستم‌های غیرخطی و به ویژه سیستم‌های قدرت تحت استرس تعمیم داده شده است [۵]. در اینجا به عنوان ایده‌ای جدید مفهوم ضرایب مشارکت غیرخطی بر مبنای روش سری مدال ارائه و

$$+ \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_k y_l e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \notin R'_i}$$

$$+ \left\{ \left(\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_k y_l \right) t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R'_i}$$

که با اعمال تبدیل $X = UY$ به پاسخ مدال در نهایت پاسخ متغیرهای حالت در فضای فیزیکی X مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} \left(y_j - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_k y_l \right\}_{(k,l,j) \notin R'_i} \right) e^{\lambda_j t} \quad (A)$$

$$+ \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} h_{kl}^j y_k y_l e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \notin R'_i}$$

$$+ \left\{ \sum_{j=1}^N \left(\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} C_{kl}^j y_k y_l \right) t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R'_i}$$

در این روابط $Y = U^{-1}X$ و $h_{kl}^j = C_{kl}^j / (\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j)$ و R'_i نیز مجموعه تمام سه تایی‌هایی است که به ازای آنها شرایط شبه تشدید مرتبه دوم بین مدهای متناظر با آنها حادث می‌شود. با دسته‌بندی مجدد جملات مرتبه دوم (عبارت دوم) در رابطه (۸) و تعریف ضرایب L_j^i ، M_j^i و K_{kl}^i مطابق روابط زیر، پاسخ تقریبی مرتبه دوم سیستم را می‌توان به شکل زیر به دست آورد:

$$L_j^i = u_{ij} \left(y_j - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_k y_l \right)_{(k,l,j) \notin R'_i} \quad (9)$$

$$K_{kl}^i = y_k y_l \sum_{j \in J_{kl}} u_{ij} h_{kl}^j \quad (10)$$

که $J_{kl} = \{j | (k,l,j) \notin R'_i\}$ مجموعه مدهایی است که با دو مد k و l تشدید یا شبه تشدید مرتبه دوم ایجاد نمی‌کنند.

$$M_j^i = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} C_{kl}^j y_k y_l, \quad (k,l,j) \in R'_i \quad (11)$$

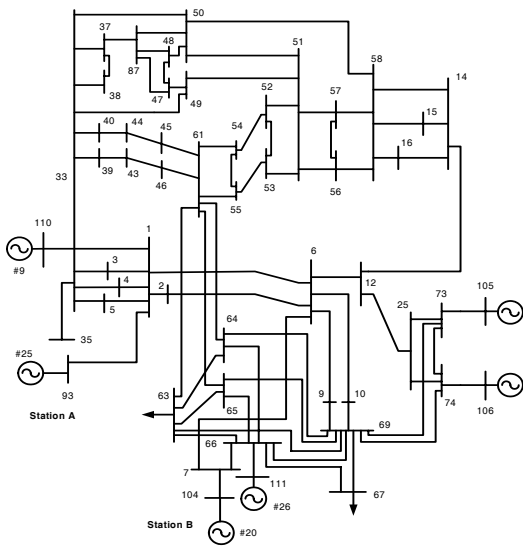
از این شاخص در بررسی کارایی PSS در محل‌های انتخابی استفاده خواهد شد:

$$H(j) = \frac{\text{Max } h_{kl}^j y_k, y_l}{\left| y_j - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j y_k, y_l \right|} \quad (16)$$

۵- جابجایی بهینه PSS در سیستم قدرت ۵۰

ماشین IEEE (مطالعه موردی)

در این قسمت به جابجایی مکان مناسب برای نصب PSS به منظور میراسازی نوسانهای بین‌ناحیه‌ای در سیستم قدرت ۵۰ ماشینه IEEE پرداخته می‌شود. این سیستم ۵۰ ژنراتور و ۴۵۳ خط انتقال دارد و در رویارویی با اغتشاشهای مختلف محدوده وسیعی از پدیده‌های دینامیکی را از خود نشان می‌دهد [۱۳]. شکل ۲ دیاگرام تک خطی بخشهای مورد نظر از سیستم مورد مطالعه و جدول ۱ توان تولیدی ژنراتورها را در دو شرایط بهره‌برداری کم‌استرس و پرسترس نشان می‌دهد.



شکل ۲ دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه

تشریح می‌شود. مشابه روشی که در تعریف ضرایب مشارکت خطی دنبال شد فرض می‌شود که سیستم با شرایط اولیه $X_i = e_i$ تحریک شود که در آن e_i بردار یکه‌ای است که همه درایه‌های آن غیر از درایه i م برابر صفر و درایه شماره i م نیز برابر یک باشد. با اعمال این شرایط اولیه به سری مدال پاسخ متغیر حالت شماره j با توجه به رابطه (۱۳) به صورت زیر می‌شود:

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \sum_{j=1}^N L_j^i \left|_{y_j=v_{ji}} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N K_{kl}^i \left|_{y_j=v_{ji}} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right. \quad (14) \\ &= \sum_{j=1}^N u_{ij} \left(v_{ji} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j v_{ki} v_{li} \right) e^{\lambda_j t} \\ &\quad + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left(v_{ki} v_{li} \sum_{j=1}^N u_{ij} h_{kl}^j e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right) \\ &= \sum_{j=1}^N p_{ij}^2 e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N p_{kl}^2 e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \end{aligned}$$

که در اینجا ضرایب مشارکت غیرخطی p_{ij}^2 و p_{kl}^2 مطابق روابط (۱۵-الف) و (۱۵-ب) تعریف و استخراج می‌شود:

$$p_{ij}^2 = u_{ij} \left(v_{ji} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j v_{ki} v_{li} \right) \quad (15-الف)$$

$$p_{kl}^2 = v_{ki} v_{li} \sum_{j=1}^N u_{ij} h_{kl}^j \quad (15-ب)$$

از طرفی برای بررسی آثار غیرخطی ناشی از جملات مرتبه دوم بر پاسخ دینامیکی سیستم شاخصی به نام شاخص تداخل غیرخطی را می‌توان تعریف کرد که در واقع نسبت بزرگترین ضرایب جملات مربوط به مدهای تداخلی به اندازه ضریب مد اصلی مورد نظر باشد. در چارچوب سری مدال و با توجه به رابطه (۷) چنین شاخصی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

جدول ۲ مدهای نوسانی - رژیم کم‌استرس

شماره مد	مقدار ویژه	فرکانس (هرتز)	میرائی (%)	نوع مد / ماشین مرتبط
۶۱ و ۶۲	$-0.393 \pm z / 10.49$	۱/۶۷	۳/۷۵	محلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۸۹ و ۹۰	$-0.247 \pm z / 7.03$	۱/۲۰	۳/۲۸	محلی (۱۰۶ و ۱۰۵)
۹۳ و ۹۴	$-0.454 \pm z / 7.04$	۱/۱۲	۶/۴۴	محلی (۹۳ و ۱۱۰)
۹۱ و ۹۲	$-0.053 \pm z / 7.31$	۱/۱۶	۰/۷۲	محلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۸۷ و ۸۸	$-0.461 \pm z / 7.90$	۱/۲۶	۵/۸۳	محلی (۱۰۵ و ۱۰۶)
۹۷ و ۹۸	$-0.198 \pm z / 6.42$	۱/۰۲	۳/۰۸	محلی (۹۳ و ۱۱۰)
۱۱۰ و ۱۱۱	$-0.036 \pm z / 2.83$	۰/۴۵	۱/۲۷	بین‌ناحیه‌ای (۹۳ و ۱۱۰ و ۱۴۰ و ۱۳۷)
۱۱۷ و ۱۱۸	$-0.628 \pm z / 0.79$	۰/۱۳	۶۲/۲۶	کنترلی (۱۴۰ و ۱۴۵)
۱۱۹ و ۱۲۰	$-0.461 \pm z / 0.63$	۰/۱۰	۵۹/۱۶	کنترلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۱۲۱ و ۱۲۲	$-0.389 \pm z / 0.56$	۰/۰۹	۵۶/۹۲	کنترلی (۹۳ و ۱۱۰)
۱۲۳ و ۱۲۴	$-0.328 \pm z / 0.46$	۰/۰۷	۵۷/۹۸	کنترلی (۹۳ و ۱۱۰)
۱۲۵ و ۱۲۶	$-0.340 \pm z / 0.39$	۰/۰۶	۶۵/۴۸	کنترلی (۱۰۵ و ۱۰۶)
۱۲۷ و ۱۲۸	$-0.269 \pm z / 0.42$	۰/۰۷	۵۳/۸۲	کنترلی (۱۰۵ و ۱۰۶)

جدول ۳ مدهای نوسانی - رژیم پر استرس

شماره مد	مقدار ویژه	فرکانس (هرتز)	میرائی (%)	نوع مد / ماشین مرتبط
۶۹ و ۷۰	$-0.138 \pm z / 9.74$	۱/۵۵	۱/۴۲	محلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۸۵ و ۸۶	$-0.315 \pm z / 7.91$	۱/۲۶	۳/۹۷	محلی (۱۰۶ و ۱۰۵)
۹۳ و ۹۴	$-0.449 \pm z / 7.10$	۱/۱۳	۶/۳۱	محلی (۹۳ و ۱۱۰)
۸۷ و ۸۸	$-0.023 \pm z / 7.31$	۱/۱۷	۰/۳۲	محلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۸۹ و ۹۰	$-0.124 \pm z / 7.29$	۱/۱۶	۱/۷۱	محلی (۱۰۵ و ۱۰۶)
۹۹ و ۱۰۰	$-0.139 \pm z / 6.15$	۰/۹۸	۲/۲۶	محلی (۹۳ و ۱۱۰)
۱۱۱ و ۱۱۲	$+0.118 \pm z / 2.20$	۰/۳۵	-۵/۳۶	بین‌ناحیه‌ای (۱۴۰ و ۱۳۷ و ۹۳ و ۱۱۰)
۱۱۶ و ۱۱۷	$-1.065 \pm z / 1.25$	۰/۲۰	۶۴/۶۶	کنترلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۱۱۹ و ۱۲۰	$-0.482 \pm z / 0.67$	۰/۱۱	۵۸/۲۳	کنترلی (۹۳ و ۱۱۰)
۱۲۱ و ۱۲۲	$-0.446 \pm z / 0.68$	۰/۱۱	۵۵/۰۷	کنترلی (۱۰۴ و ۱۱۱)
۱۲۳ و ۱۲۴	$-0.337 \pm z / 0.47$	۰/۰۷	۵۸/۲۸	کنترلی (۹۳ و ۱۱۰)
۱۲۵ و ۱۲۶	$-0.303 \pm z / 0.49$	۰/۰۸	۵۲/۶۳	کنترلی (۱۰۵ و ۱۰۶)
۱۲۷ و ۱۲۸	$-0.266 \pm z / 0.40$	۰/۰۶	۵۵/۱۵	کنترلی (۱۰۵ و ۱۰۶)

در اینجا برای دو رژیم کاری کم‌استرس و پر استرس رفتار دینامیکی سیستم و مدهای نوسانی آن مطالعه شود هم با روشهای مرسوم شکل مد، ضرایب مشارکت خطی و مانده‌ها محاسبه شده و هم به وسیله ضرایب مشارکت غیرخطی معرفی شده در این مقاله به جایابی بهینه مکان پایدار ساز پرداخته می‌شود. نظر به آنکه هدف تعیین مکان مناسب برای نصب پایدار ساز به منظور بهبود مشخصه‌های دینامیکی است، نتایج حاصل از روشهای مختلف جایابی با یکدیگر مقایسه و صحت و اعتبار نتیجه گیری‌ها با شبیه‌سازی در حوزه زمان ارزیابی می‌شود.

۱-۵- تحلیل سیگنال کوچک سیستم

برای دو سناریوی کم‌استرس و پر استرس معرفی شده در جدول ۱ مقادیر ویژه مدهای نوسانی سیستم اعم بر مدهای الکترومکانیکی و مدهای کنترلی محاسبه شده و بر اساس ضرایب مشارکت خطی، ماشین‌های بیشتر مرتبط با این مدها شناسایی و در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است با توجه به جدول‌ها ملاحظه می‌شود که در شرایط پر استرس یک مد بین‌ناحیه‌ای ناپایدار وجود خواهد داشت. شکل مدهای متناظر با سرعت ماشین‌ها یا به بیان دیگر اندازه درایه‌های متناظر با سرعت ژنراتورها در بردارهای ویژه راست مدهای بین‌ناحیه‌ای در شکل‌های ۳- الف و ۳- ب نشان داده شده است.

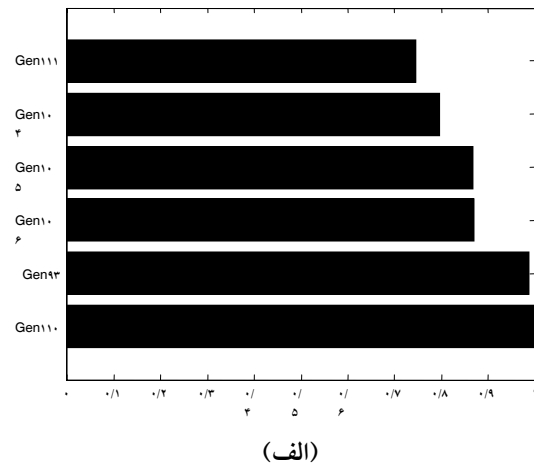
جدول ۱ توان اکتیو تولیدی واحدها در دو رژیم کاری مورد مطالعه

شماره شین	توان اکتیو تولیدی (مگا وات)	
	سناریوی ۱ (کم‌استرس)	سناریوی ۲ (پر استرس)
۹۳	۱۰۸۰	۱۰۸۰
۱۰۴	۱۴۰۰	۲۴۰۰
۱۰۵	۶۲۰	۱۶۲۰
۱۰۶	۱۰۸۰	۱۰۸۰
۱۱۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
۱۱۱	۱۸۰۰	۲۶۰۰

جدول ۴ ضرایب مشارکت خطی مربوط به سرعت ماشینها

متناظر با مد بین ناحیه‌ای

سناریوی ۲ پراسترس	سناریوی ۱ کم‌استرس	شماره شین #
۰/۹۶۴(۲)	۰/۹۷۰(۲)	۹۳
۰/۶۵۱(۳)	۰/۳۹۳(۳)	۱۰۴
۰/۵۸۱(۴)	۰/۳۶۱(۴)	۱۰۵
۰/۳۷۰(۶)	۰/۳۳۹(۶)	۱۰۶
۱/۰۰۰(۱)	۱/۰۰۰(۱)	۱۱۰
۰/۵۲۲(۵)	۰/۳۴۷(۵)	۱۱۱

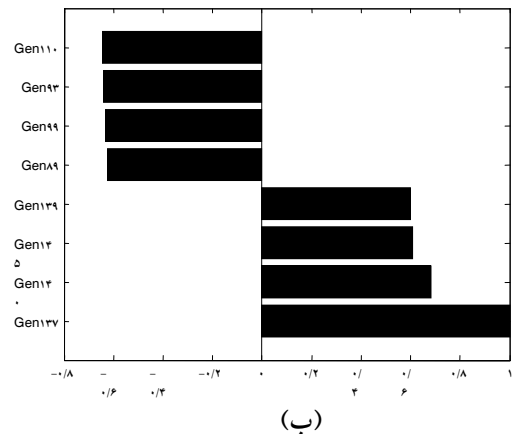


بر اساس نتایج ارائه شده در این جدول یا به بیان دیگر بر مبنای ضرایب مشارکت خطی چنین استنباط می‌شود که ماشین ۱۱۰ مناسب‌ترین گزینه برای نصب پایدارساز است.

جدول ۵ مقادیر مانده‌های مربوط به سرعت ماشینها در مد

بین ناحیه‌ای

سناریوی ۲ پراسترس	سناریوی ۱ کم‌استرس	شماره شین #
۰/۵۰۰۳(۳)	۰/۹۱۰۲(۳)	۹۳
۱/۰۰۰۰(۱)	۰/۹۷۱۳(۲)	۱۰۴
۰/۳۱۱۲(۵)	۰/۴۶۸۵(۵)	۱۰۵
۰/۲۰۴۵(۶)	۰/۳۳۶۴(۶)	۱۰۶
۰/۴۸۸۷(۴)	۰/۸۸۰۱(۴)	۱۱۰
۰/۹۶۱۰(۲)	۱/۰۰۰۰(۱)	۱۱۱



شکل ۳ مدهای مربوط به سرعت ژنراتورها متناظر با مد بین ناحیه‌ای الف) شرایط کم‌استرس؛ ب) شرایط پراسترس

علاوه بر اینها مقادیر مانده‌های مربوط به مد بین ناحیه‌ای در هر دو حالت محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به این اعداد چنین بر می‌آید که محل مناسب‌تر برای نصب پایدارساز سیستم، قدرت در شرایط کم‌استرس، ماشین ۱۱۱ و در شرایط پراسترس، ماشین ۱۰۴ است. به این ترتیب شکل مدها و

با توجه به شکل‌های ۳-الف و ۳-ب یعنی استنتاج بر اساس شکل مدها چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در هر دو رژیم کم‌استرس و پراسترس مکان مناسب برای نصب PSS شین ۵ یا روی ژنراتور ۱۱۰ است. جدول ۴ مشارکت متغیرهای حالت سرعت را در مد بین ناحیه‌ای برای دو رژیم کاری کم‌استرس و پراسترس نشان می‌دهد.

جدول‌های ۴ و ۵ می‌توان مشاهده کرد. با توجه به آنکه وقتی سیستم در رژیم کم‌استرس کار می‌کند، رشد ویژگی‌های غیرخطی در آن زیاد نبوده و رفتار واقعی سیستم به تقریب خطی شده نزدیک است چنین تشابهی در رفتار دینامیکی معقول به‌نظر می‌رسد.

جدول ۷ ضرایب مشارکت غیرخطی به‌دست آمده از تحلیل سری مدال برای رژیم پراسترس

X_{E_2} نرمالیزه شده	X_{E_1} نرمالیزه شده	سرعت ω		شماره شین #
		نرمالیزه شده	نرمالیزه نشده	
۰/۱۴۹۴ (۴)	۰/۲۵۵۸ (۴)	۰/۸۳۳۳ (۳)	۰/۰۴۰ (۳)	۹۳
۰/۸۲۵۰ (۲)	۰/۵۸۱۴ (۲)	۰/۹۷۹۲ (۲)	۰/۰۴۷ (۲)	۱۰۴
۰/۱۸۶۷ (۳)	۰/۳۰۲۳ (۳)	۰/۵۸۳۲ (۵)	۰/۰۲۸ (۵)	۱۰۵
۰/۰۸۲۸ (۶)	۰/۱۶۲۸ (۶)	۰/۳۹۵۸ (۶)	۰/۰۱۹ (۶)	۱۰۶
۰/۱۲۲۵ (۵)	۰/۲۳۲۶ (۵)	۰/۶۰۴۲ (۴)	۰/۰۲۹ (۴)	۱۱۰
۱/۰۰۰۰ (۱)	۱/۰۰۰۰ (۱)	۱/۰۰۰۰ (۱)	۰/۰۴۸ (۱)	۱۱۱

اما نتایج حاصل از بررسیها برای رژیم پراسترس در جدول ۷ حاکی از آن است که ژنراتور ۱۱۱ بهترین گزینه برای نصب پایدارساز سیستم قدرت است. نکته قابل توجهی که در استفاده از روش سری مدال حاصل شده، هماهنگی میان ترتیب رتبه‌بندی ضرایب مشارکت موجود در جدول ۷ برای هر سه متغیر حالت ω ، X_{E_1} و X_{E_2} است که این در عمل، به طراح سیستم کنترلی اطمینان خاطر بیشتری را در انتخاب گزینه مناسب می‌دهد. این هماهنگی و هم‌نوایی در استفاده از روش شکل نرمال حاصل نشده است و در [۷] برای روشن شدن وضعیت مبهم ایجاد شده و انتخاب نهایی یکی از ماشین‌ها به‌عنوان گزینه مناسب، مؤلفان مجبور به تعریف و استفاده از گونه‌ای شاخص حساسیت شده‌اند.

ضرایب مشارکت خطی، ژنراتور ۱۱۰ را به‌عنوان گزینه مناسب برای نصب PSS معرفی می‌کنند در حالی که مقادیر مانده‌ها بر انتخاب ژنراتور ۱۱۱ در رژیم کم‌استرس و ژنراتور ۱۰۴ در رژیم پراسترس تأکید دارند.

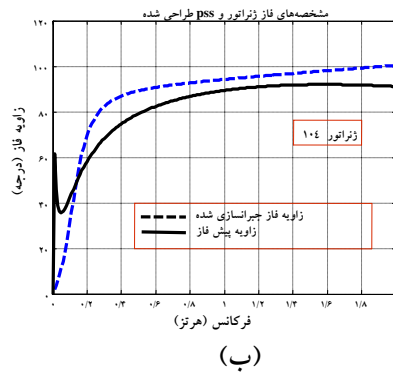
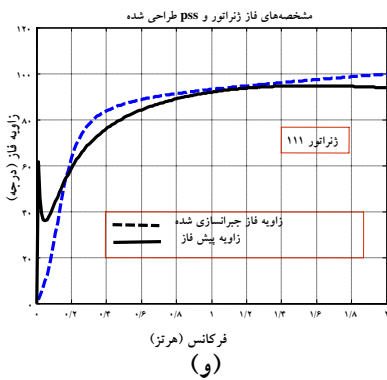
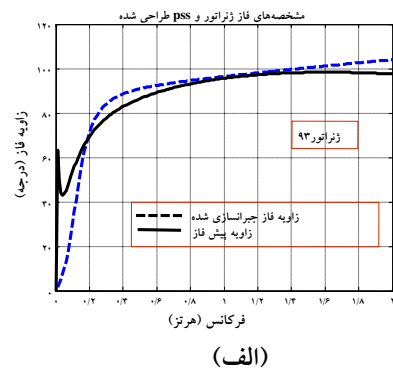
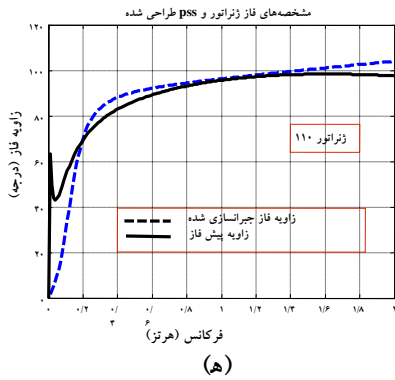
۲-۵- جایابی مناسب مکان نصب PSS به کمک ضرایب مشارکت مبتنی بر سری مدال

اکنون که به‌نحوی هماهنگی لازم در میان روشهای مبتنی بر خطی‌سازی مشاهده نمی‌شود، از ضرایب مشارکت غیرخطی تعریف شده در بخش ۴ استفاده کرده و مکان مناسب را برای نصب پایدار ساز بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از محاسبه ضرایب مشارکت غیرخطی بر اساس روش سری مدال برای دو سناریوی بهره‌برداری کم‌استرس و پراسترس در جدول‌های ۶ و ۷ درج شده است.

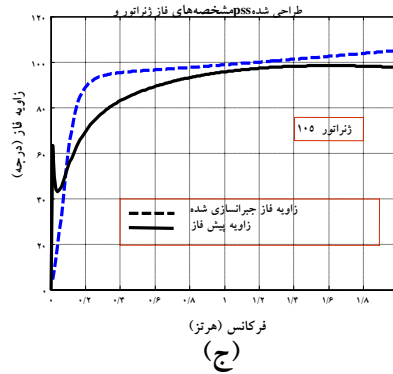
جدول ۶ ضرایب مشارکت غیرخطی به‌دست آمده از تحلیل سری مدال برای رژیم کم‌استرس

X_{E_2} نرمالیزه شده	X_{E_1} نرمالیزه شده	سرعت ω		شماره شین #
		نرمالیزه شده	نرمالیزه نشده	
۰/۹۲۸۹ (۲)	۱/۰۰۰۰ (۱)	۰/۹۷۰۴ (۲)	۰/۰۶۵۶ (۲)	۹۳
۰/۱۳۳۹ (۵)	۰/۶۴۴۴ (۴)	۰/۳۹۸۵ (۳)	۰/۰۲۶۹ (۳)	۱۰۴
۰/۱۲۹۷ (۶)	۰/۲۸۰۳ (۶)	۰/۳۶۶۸ (۴)	۰/۰۲۴۸ (۴)	۱۰۵
۰/۲۰۲۲ (۴)	۰/۳۸۴۹ (۵)	۰/۳۵۰۵ (۶)	۰/۰۲۳۷ (۶)	۱۰۶
۱/۰۰۰۰ (۱)	۰/۹۸۹۶ (۲)	۱/۰۰۰۰ (۱)	۰/۰۶۷۶ (۱)	۱۱۰
۰/۳۱۹۴ (۳)	۰/۷۱۵۵ (۳)	۰/۳۵۲۰ (۵)	۰/۰۲۳۸ (۵)	۱۱۱

همان‌طور که از بررسی اعداد جدول ۶ نتیجه می‌شود، در رژیم کم‌استرس ضرایب مشارکت غیرخطی ژنراتور ۱۱۰ را به‌عنوان انتخاب مناسب برای نصب PSS پیشنهاد می‌کنند. این نتیجه‌گیری مشابه آن است که از روشهای خطی حاصل می‌شد و نتایج آنها را در شکل ۳- الف و

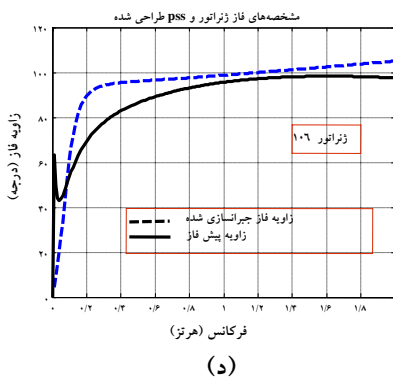


شکل ۴ مشخصه‌های فاز ژنراتورها و PSS های نصب شده بر آنها در شرایط پراسترس برای الف) ژنراتور ۹۳؛ ب) ژنراتور ۱۰۴؛ ج) ژنراتور ۱۰۵؛ د) ژنراتور ۱۰۶؛ و) ژنراتور ۱۱۰؛ ه) ژنراتور ۱۱۱؛



۳-۵- بررسی تأثیر نصب PSS در مکان تعیین شده بر رفتار دینامیکی سیستم

به منظور حصول اطمینان از مناسب بودن مکانی که برای نصب PSS بر اساس ملحوظ کردن تأثیر ویژگیهای غیرخطی تعیین شده، پارامترهای پایدارسازها با روش پیشنهادی در [۱۴ و ۱۵] طراحی و تعیین شده است. در این بررسی هر بار PSS را روی یک ماشین قرار داده و سیستم را مطالعه می‌کنیم. بلوک دیاگرام PSS به کار رفته در شکل ۱ نشان داده شده است. پارامترهای PSS های طراحی شده در جدول ۸ معرفی شده‌اند.



جدول ۸ پارامترهای PSSهای طراحی شده

شماره شین	K_s	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
۹۳	۵۰	۰/۱	۰/۰۳	۱/۵	۰/۰۳	۱۰
۱۰۴	۵۰	۰/۱	۰/۰۲	۱/۰	۰/۰۲	۱۰
۱۰۵	۵۰	۰/۱	۰/۰۳	۱/۵	۰/۰۳	۱۰
۱۰۶	۵۰	۰/۱	۰/۰۳	۱/۵	۰/۰۳	۱۰
۱۱۰	۵۰	۰/۱	۰/۰۳	۱/۵	۰/۰۳	۱۰
۱۱۱	۵۰	۰/۱	۰/۰۳	۱/۰	۰/۰۳	۱۰

جدول ۹ تأثیر نصب PSS بر میرایی مدها در رژیم کم‌استرس

مکان PSS	مقادیر ویژه	فرکانس (هرتز)	میرایی (%)
شین ۹۳	$-۰/۳۵۶۸ \pm j ۳/۰۵۴۶$	۰/۴۹	۱۱/۶۰
	$-۳/۷۱۲۹ \pm j ۴/۷۰۲۳$	۰/۷۵	۶۱/۹۷
شین ۱۰۴	$-۰/۲۵۴۷ \pm j ۲/۹۷۱۱$	۰/۴۷	۸/۵۴
	$-۵/۳۹۴۸ \pm j ۳/۲۸۱۸$	۰/۵۲	۸۵/۴۳
شین ۱۰۵	$-۰/۲۴۷۵ \pm j ۲/۹۰۹۰$	۰/۴۶	۸/۴۸
	$-۳/۰۶۶۴ \pm j ۶/۶۵۴۶$	۱/۰۶	۴۱/۸۵
شین ۱۰۶	$-۰/۱۶۱۵ \pm j ۲/۹۰۷۵$	۰/۴۶	۵/۵۴
	$-۴/۰۶۵۰ \pm j ۵/۵۶۰۹$	۰/۸۹	۵۹/۰۱
شین ۱۱۰	$-۰/۳۶۹۵ \pm j ۳/۰۴۸۳$	۰/۴۹	۱۱/۹۲
	$-۳/۳۳۶۵ \pm j ۴/۹۰۵۴$	۰/۷۸	۵۶/۶۴
شین ۱۱۱	$-۰/۲۴۳۹ \pm j ۲/۹۷۸۴$	۰/۴۷	۸/۱۶
	$-۵/۵۳۵۷ \pm j ۲/۹۳۰۱$	۰/۴۶	۸۸/۳۸

شکل ۴ مشخصه‌های فاز ژنراتورها و PSSهای طراحی و نصب شده برای آنها را به‌عنوان نمونه و فقط برای شرایط پراسترس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود اگر پارامترهای PSS به‌درستی انتخاب شده و طراحی صحیح باشد، مشخصه فاز عقب افتاده تقریباً به‌طور کامل توسط PSS جبران می‌شود. جدول‌های ۹ و ۱۰ نتایج حاصل از تأثیر قرارگرفتن PSS را در هر یک از شین‌های (۹۳، ۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۱۰ و ۱۱۱) در هر دو شرایط کم‌استرس و پراسترس نشان می‌دهند. به‌دلیل کمبود جا و برای رعایت اختصار از یک سو و با توجه به تأکیدی که بر ویژگی‌های غیرخطی در رفتارهای دینامیکی سیستم‌های تحت استرس در این مقاله وجود دارد، از اینجا به بعد فقط نتایج مربوط به تأثیر PSS بر رفتار سیستم تحت استرس، سناریوی ۲ ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. به‌وسیله شاخص تداخل غیرخطی تعریف شده در رابطه (۱۶) در شرایط بهره‌برداری پراسترس و در دو وضعیت مختلف - یکی با در نظرگرفتن PSS روی هر یک از شین‌های ژنراتوری ششگانه و دیگری بدون در نظر گرفتن آن - میزان تداخل غیرخطی از منظر مد بین‌ناحیه‌ای مقایسه می‌شود. با توجه به جدول ۱۱ می‌توان دریافت که به‌ازای نصب PSS در مناسب‌ترین محل، میزان تداخل غیرخطی شدیدتر از سایر حالتها است.

جدول ۱۰ تأثیر نصب PSS بر میرایی مدها در رژیم پراسترس

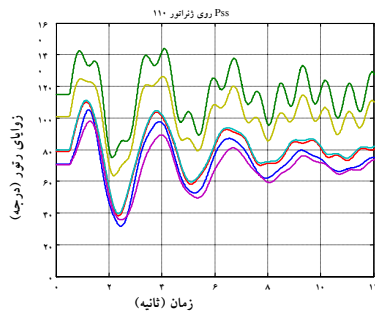
مکان PSS	مقادیر ویژه	فرکانس (هرتز)	میرایی (%)
شین ۹۳	$-۰/۲۷۲۸ \pm j ۲/۲۳۱۳$	۰/۳۶	۱۲/۱۴
	$-۳/۴۸۸۱ \pm j ۴/۹۸۵۱$	۰/۷۹	۵۷/۳۳
شین ۱۰۴	$-۰/۳۸۳۹ \pm j ۲/۴۸۸۶$	۰/۴۰	۱۵/۲۵
	$-۴/۷۴۴۲ \pm j ۱/۸۴۴۹$	۰/۲۹	۹۳/۲۰
شین ۱۰۵	$-۰/۱۰۳۲ \pm j ۲/۲۶۸۸$	۰/۳۶	۴/۵۴
	$-۳/۶۳۶۱ \pm j ۵/۵۱۸۰$	۰/۸۸	۵۵/۰۲
شین ۱۰۶	$-۰/۰۱۹۹ \pm j ۲/۲۵۱۷$	۰/۳۶	۰/۸۸
	$-۳/۹۶۶۲ \pm j ۵/۶۵۲۳$	۰/۹۰	۵۷/۴۲
شین ۱۱۰	$-۰/۲۶۱۲ \pm j ۲/۲۳۵۷$	۰/۳۶	۱۱/۶۱
	$-۳/۲۲۸۱ \pm j ۴/۹۳۱۷$	۰/۷۸	۵۴/۷۷
شین ۱۱۱	$-۰/۴۹۸۷ \pm j ۲/۳۸۲۳$	۰/۳۸	۲۰/۴۹
	$-۴/۷۱۰۸ \pm j ۲/۱۴۴۶$	۰/۳۴	۹۱/۰۱

البته این روند برای بسیاری از مدهای الکترومکانیکی دیگر هم دنبال شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده تقویت تداخل غیرخطی میان مدهای سیستم به‌ویژه میان مدهای لختی^۱ و کنترلی در شرایط حضور PSS است. شدت این

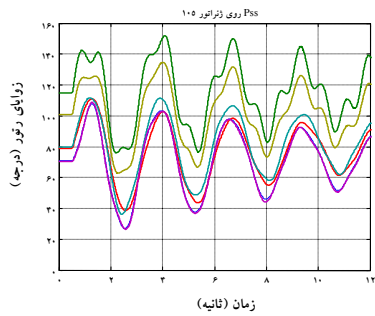
تداخلهای غیرخطی در صورت نصب پایدارساز بر ژنراتور ۱۱۱ در مقایسه با سایر حالتها بیشتر است.

جدول ۱۱ نسبت شاخصهای تداخلی غیرخطی قبل و بعد از نصب PSS در هر یک از شین‌های ژنراتوری شش‌گانه

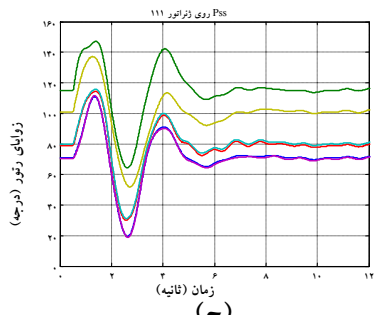
$\frac{II(j)_{withPSS}}{II(j)_{noPSS}}$	l	k	$II(j)$	محل نصب PSS	
۸/۷۷	۹۴	۹۳	۰/۹۳۸	شین ۹۳ بدون PSS	
	۱۳۲	۱۱۲	۸/۲۲۲	شین ۹۳ با PSS	
۱۱/۹۷	۱۱۲	۱۰۵	۰/۴۸۴	شین ۱۰۴ بدون PSS	
	۱۳۲	۱۱۲	۵/۷۹۳	شین ۱۰۴ با PSS	
۶/۱۹	۹۰	۸۹	۰/۹۸۹	شین ۱۰۵ بدون PSS	
	۱۳۲	۱۱۲	۶/۱۲۳	شین ۱۰۵ با PSS	
۵/۸۴	۸۶	۸۵	۰/۹۳۹	شین ۱۰۶ بدون PSS	
	۱۳۲	۱۱۲	۵/۴۸۳	شین ۱۰۶ با PSS	
۹/۶۳	۸۸	۸۷	۰/۷۳۲	شین ۱۱۰ بدون PSS	
	۱۳۲	۱۱۲	۷/۰۴۷	شین ۱۱۰ با PSS	
۱۳/۲۹	۷۰	۶۹	۰/۶۷۵	شین ۱۱۱ بدون PSS	
	۱۳۲	۱۱۲	۸/۹۶۹	شین ۱۱۱ با PSS	



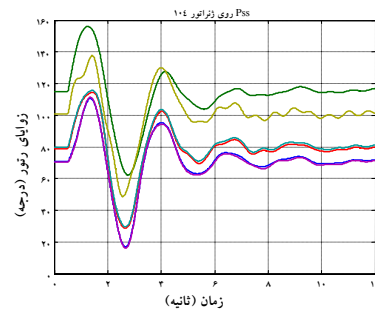
(الف)



(ب)



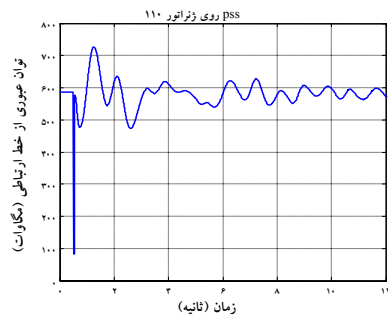
(ج)



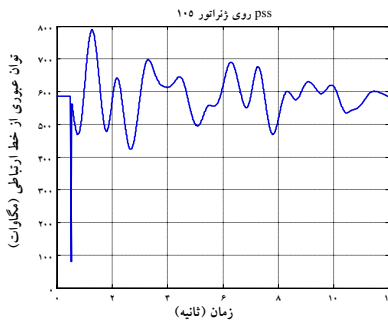
(د)

شکل ۵ نوسانهای زوایای رتور ماشین‌ها در رویارویی با خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در شین ۶ به‌ازای نصب PSS روی ژنراتور در شین: (الف) ۱۱۰؛ (ب) ۱۰۵؛ (ج) ۱۱۱؛ (د) ۱۰۴

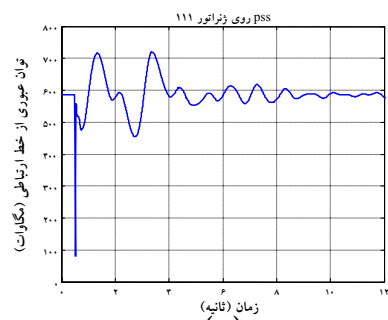
برای حصول اطمینان از صحت پیش‌بینی‌ها، با استفاده از شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان به‌ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در شین ۶ به‌مدت ۶۰ میلی‌ثانیه، رفتار سیستم پراسترس بدون حضور PSS و با در نظر گرفتن آن در شین‌های [۹۳، ۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۱۰ و ۱۱۱] بررسی شده است. نتایج حاصل در شکل‌های [۵ و ۶] نوسانهای زوایای رتور ماشین‌ها و توان عبوری از یکی از خطوط ارتباطی مهم ۵۰۰ کیلوولتی (خط رابط میان دو شین ۱ و ۶) را در سیستم مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، کیفیت مناسب‌تر پاسخ دینامیکی سیستم به‌ازای نصب PSS بر روی ژنراتور ۱۱۱ کاملاً مشهود است.



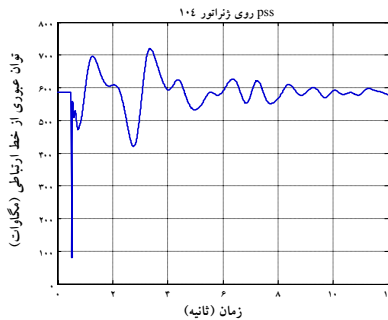
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

بدین ترتیب نتایج حاصل از شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان به روشنی مؤید نتایج به‌دست آمده از تحلیل سری مدال است. با توجه به آنکه کیفیت و شکل پاسخها به‌ازای نصب PSS در شین‌های ۱۰۵ و ۱۰۶ از یک سو و میان پاسخهای حاصل به‌ازای نصب PSS در شین‌های ۹۳ و ۱۱۰ از سوی دیگر، بسیار شبیه به یکدیگر بودند، برای اختصار از هر دو مورد فقط به نمایش نتایج مربوط به یک محل اکتفا شده است.

۶- نتیجه‌گیری

هنگامی که سیستم قدرت تحت استرس باشد، ویژگیهای غیرخطی در پاسخهای دینامیکی رشد قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کنند. در این شرایط روشهای مبتنی بر خطی‌سازی مانند شکل‌مدها، ضرایب مشارکت و مانده‌ها به‌درستی نمی‌توانند مکان مناسب را برای نصب پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS ها) - به‌منظور میراسازی نوسانهای بین‌ناحیه‌ای و بهبود مشخصه‌های دینامیکی سیستم - تعیین کنند. روش سری مدال به‌عنوان یکی از ابزارهای تقریبی در حل تحلیلی سیستم‌های غیرخطی این امکان را فراهم می‌آورد تا با تعریف شاخص‌های مناسب و ضرایب مشارکت غیرخطی تحلیل و طراحی کنترلی سیستم‌های قدرت تحت استرس به‌خوبی میسر شود. روش سری مدال ضمن برخورداری از قابلیت‌های همتای خود، روش شکل‌نرمال میدان‌های برداری، مشکلات آنرا نیز ندارد. در این مقاله با استفاده از ضرایب مشارکت غیرخطی در چارچوب سری مدال، مکان مناسب نصب PSS تعیین و با استفاده از شبیه‌سازی‌های حوزه‌ی زمان صحت و اعتبار نتایج محک زده شد. همچنین با استفاده از شاخص تداخل غیرخطی جدیدی نشان داده شد که به‌ازای طراحی صحیح (تنظیم پارامترها)

شکل ۶ نوسانهای توانهای عبوری از خط ۵۰۰ کیلو ولت رابط میان شین‌های ۱ و ۶ به‌ازای نصب PSS روی ژنراتور در شین (الف) ۱۱۰؛ (ب) ۱۰۵؛ (ج) ۱۱۱؛ (د) ۱۰۴

- multi-modal decomposition,” in UKACC Int. Conf. Control '98, Sep. 1-4, 1998, pp.1005–1010.
- [5] J.J.Sanchez-Gasca, V.Vittal, M.J.Gibbard, A.R. Messina, D. J.Vowels, S. Liu, and U.D. Annakkage, “ 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 Trans. Power Syst., vol. 20, No.4, pp.1886-1904, Nov.2005.
- [6] S. Liu, A. R. Messina, V. Vittal, “ Assessing Placement of Controllers and Nonlinear Behavior Using Normal Form Analysis,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp. 1486–1495, Aug. 2005.
- [7] S. Liu, A. R. Messina, V. Vittal, “ A normal form analysis approach to siting power system stabilizers (PSSs) and assessing power system nonlinear behavior,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1755–1762, Nov. 2006.
- [8] H. Modir Shanechi, N. Pariz, and E. Vaahedi, “General nonlinear modal representation of large scale power systems”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, No. 3, pp. 1103-1109, Aug. 2003.
- [9] N. Pariz, H. Modir Shanechi, and E.Vaahedi, “Explaining and validating
- نصب PSS در محل مناسب، میزان و شدت تداخلهای غیرخطی میان مدهای الکترومکانیکی و کنترلی سیستم به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابند. این نتیجه به روشنی حاکی از آن است که در صورت طراحی و جایابی صحیح PSS در سیستم، تأثیر آن بر نوسانهای بین‌ناحیه‌ای به میزان بسیار زیادی افزایش خواهد یافت. به این ترتیب در مورد سیستم آزمون انتخاب شده در این مقاله، ژنراتور ۱۱۱ به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای نصب PSS تعیین شد. همچنین در صورتی که سیستم قدرت در شرایط کم‌استرس یا بهره‌برداری عادی قرار داشته باشد، نتایج حاصل از روشهای خطی و غیرخطی با یکدیگر سازگاری و هماهنگی کامل خواهند داشت. این نیز به‌دلیل آن است که در چنین شرایطی اثرهای غیرخطی رشد کمی داشته و تأثیر زیادی بر رفتارهای گذرای سیستم ندارند.

۷- منابع

- [1] A. Feliachi and X. Yang, “Identification of power system stabilizers locations,” in Proc. 28th IEEE Conf. Decision and Control, 1989, Tampa, FL, Dec. 1989.
- [2] E. Z. Zhou, O. P. Malik, and G. S. Hope, “Theory and method for selection of power system stabilizer location,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 2, pp. 170–176, Mar. 1991.
- [3] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [4] H. F. Wang, “On the connections among the electric torque, residue, functional sensitivity, participation and partial

- [13] V. Vittal, "Transient stability test systems for direct stability method," IEEE Committee Report, IEEE Trans. PAS, pp. 37-42, Feb.1992.
- [14] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, and M. S. Zywno, "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 2, pp. 614-626, May 1989.
- [15] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy, and P. Kundur, "Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 7, no.4, pp. 382-390, Sept.1992.
- stressed power systems behavior using modal series", IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, No.2, pp. 778-785, May 2003.
- [10] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power Systems Control and Stability, IEEE Press, second edition, 2003.
- [11] S. K. Starrett, W. Kliemann, V. Vittal, and A. A. Fouad, "Power system modal behavior: Significance of second and third order nonlinear terms," in Proc. North American Power Symp., Washington, DC, Oct. 1993, pp.241-255.
- [12] I. J. Perez-Arriaga, G. C. Verghese, and F. C. Schweppe, "Selective modal analysis with applications to electric power systems. Part I: Heuristic introduction," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 101, pp. 3117-3125, Sep. 1982.