



جایابی PSS در سیستمهای قدرت تحت استرس با استفاده از شاخصهای غیرخطی مبتنی بر روش سری‌های مودال

رضا قاضی

استاد گروه برق، rghazi@um.ac.ir

مجید قره‌باقي

دانشجوی کارشناسی ارشد، Gharebaghi@stu.um.ac.ir

گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

واژه‌های کلیدی: پایدارساز سیستم قدرت (PSS)، روش سری‌های مودال، سیستم قدرت تحت استرس.

۱- مقدمه

تحلیل مودال خطی یک روش متداول برای مطالعه رفتار دینامیکی سیستم قدرت است. تقریبهای موجود در این روش باعث کم شدن دقت آن در برخی شرایط سیستم قدرت می‌شود. سیستمهای قدرت جدید به دلیل افزایش روزافزون تقاضا و رشد کنترل سیستمهای انتقال، به طور فزاینده‌ای رو به استرس بیشتر گذاشتند. هنگامی که استرس در سیستم قدرت افزایش می‌یابد، به علت غیرخطی‌تر شدن سیستم، پدیده‌پیچیده‌ای شامل تداخل بین مودهای نوسانی سیستم رخ می‌دهد. این امر باعث کاهش ناحیه اعتبار تحلیل مودال خطی می‌گردد. ممکن است تداخل مودال غیرخطی نقش مهمی در رفتار دینامیکی سیستم قدرت ایفا نماید و تأثیر منفی در عملکرد کنترل کننده‌های سیستم قدرت [۱] و ناپایداری مودهای بین ناحیه‌ای [۲] داشته باشد. بنابراین دستیابی به

چکیده

در این مقاله یک روش غیرخطی مبتنی بر سری‌های مودال به منظور تعیین موثرترین واحدهای تولید برای به کارگیری PSS ارائه شده است. در این روش عوامل مشارکت مرتبه دوم با استفاده از روش سری‌های مودال محاسبه شده و مبنای انتخاب واحدهای تولیدی برای نصب PSS قرار گرفته است. مزیت روش ارائه شده نسبت به روش‌های خطی متداول این است که تأثیر رفتار غیرخطی سیستم قدرت در محاسبات وارد می‌شود و باعث می‌گردد که در شرایط تحت استرس، مکان موثرتری برای PSS انتخاب شود. روش ارائه شده، در سیستم قدرت نمونه دو ناحیه‌ای چهار ماشینه، در دو شرایط کاری مختلف سیستم از نظر مقدار استرس اجرا شده است. نتایج بدست آمده کارآمدی روش ارائه شده را در بهبود عملکرد PSS در جهت افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت تحت استرس نشان می‌دهد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

نوسانی بین ناحیه‌ای در یک سیستم نمونه دو ناحیه‌ای با چهار ماشین سنکرون اجرا شده است. نتایج به دست آمده کارایی بهتر روش ارائه شده را برای شرایط تحت استرس نسبت به روشهای متداول تحلیل خطی نشان می‌دهد.

2- روش سری‌های مودال

فرض کنید معادله (1) دینامیک غیرخطی یک سیستم قدرت را بیان می‌کند. در این رابطه X بردار حالت و $F: R^N \mapsto R^N$ یک میدان برداری هموار است. معادله (2) بسط تیلور (1) حول نقطه تعادل پایدار سیستم است.

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

$$\dot{x}_i = A_i X + \frac{1}{2} X' H^i X + \dots \quad (2)$$

در معادله (2)، جانشین انحراف از نقطه تعادل شده است و $A_i = [\partial F_i / \partial x_j]_{X_{SEP}}$ معرف سطر i ام ماتریس ژاکوبین و $H^i = [\partial^2 F_i / \partial x_k \partial x_l]_{X_{SEP}}$ ماتریس هسیان است. از بسط (2) خواهیم داشت:

$$\dot{x}_i = A_i X + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N H_{kl}^i x_k x_l + \dots \quad (3)$$

فرض کنید که تمامی N مقدار ویژه ماتریس A مجزا از هم بوده و U ماتریس بردارهای ویژه راست ماتریس A باشد. با اعمال عکس تبدیل خطی $X = UY$ به (3) معادلات متغیرهای حالت شکل جردن به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\dot{y}_j = \lambda_j y_j + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_k y_l + \dots \quad j = \{1, \dots, N\} \quad (4)$$

در این رابطه λ_j مقدار ویژه زام ماتریس A و

$$C^j = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^N v_{jp} [U^T H^p U] = [C_{kl}^j] \quad (5)$$

که در آن V^{-1} ماتریس بردارهای ویژه چپ ماتریس A [11] و v_{jp} عنصر j ام از ستون p ام ماتریس V است.

روشهای مناسب‌تر برای مطالعه رفتار دینامیکی سیستمهای قدرت تحت استرس، ضروری است.

روش شکل نرمال² میدانهای برداری، ابزار مفیدی است که در دو دهه اخیر برای تحلیل رفتار غیرخطی سیستمهای قدرت تحت استرس مورد استفاده قرار گرفته است [5-3]. در این روش با اعمال تبدیلات خطی و غیرخطی بر بسط سری تیلور معادلات حالت سیستم، یک تقریب مرتبه دوم از این معادلات بدست می‌آید. اما روش شکل نرمال دارای معایی است. نیاز به تبدیل غیرخطی و حل معادلات جبری غیرخطی پیچیده که گاهی غیریک‌به‌یک یا غیرپوشش‌های نداشتند و نیز نداشتند جواب در شرایط وجود رزونانس مرتبه دوم بین مدهای طبیعی و کاهش ناحیه اعتبار روش در شرایط شبهرزونانس، از جمله معایب این روش می‌باشند [6, 7].

استفاده از سری‌های مودال روش جدیدی است که برای مطالعات مودال غیرخطی سیستم قدرت ارائه شده است [7, 8]. این روش نیز بر مبنای گسترش سری تیلور معادلات حالت سیستم است، با این تفاوت که در آن فقط از تبدیلات خطی استفاده می‌شود و فاقد پیچیدگی‌ها و معایب یاد شده برای روش شکل نرمال است [6, 7].

از جمله مسائل مهم در سیستمهای قدرت تحت استرس، تعیین مکان و طراحی مناسب پایدارساز سیستم قدرت (PSS) به منظور افزایش پایداری سیگنال کوچک مود نوسانی بین ناحیه‌ای است. نتایج مطالعات مراجع [9-10] نشان می‌دهد که تعیین مکان PSS با استفاده از تحلیل شکل نرمال، تأثیر مثبتی بر عملکرد آن در افزایش پایداری‌های سیگنال کوچک و گذراي سیستم قدرت تحت استرس دارد.

در این مقاله با توجه به معایب و دشواری‌های روش شکل نرمال، استفاده از تحلیل غیرخطی مبتنی بر روش سری‌های مودال به منظور تعیین موثرترین واحدهای تولید برای بکارگیری PSS ارائه شده است. به این منظور، ابتدا فرمول‌بندی روش سری‌های مودال و عاملهای مشارکت مبتنی بر این روش معرفی شده است. سپس روش ارائه شده به منظور انتخاب مکان پایدارساز برای افزایش پایداری مود

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

بنابراین، حل شکل بسته^۱ تقریبی معادله (4) وقتی که فقط دو جمله اول سری تیلور در نظر گرفته می‌شود، در غیاب تشدید مرتبه دوم به صورت (11) داده می‌شود.

$$y_j(t) = y_{j0} + y_{2j}(t) \quad (11)$$

$$= (y_{j0} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}) e^{\lambda_j t}$$

$$+ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$$

که در آن

$$h2_{kl}^j = \frac{C_{kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j}$$

با اعمال تبدیل $X = UY$ پاسخ شکل بسته تقریبی مرتبه دوم معادله (3) به صورت زیر بیان می‌شود.

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} (y_{j0} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}) e^{\lambda_j t} \quad (12)$$

$$+ \sum_{j=1}^N u_{ij} [\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}]$$

۱-۲- عوامل مشارکت غیرخطی

به اندازه نوسانهای مربوط به هر مود در یک متغیر حالت ماشین که در اثر اغتشاش همان متغیر حالت ایجاد می‌شود، عامل مشارکت نسبی آن متغیر حالت در آن مود گفته می‌شود. به منظور محاسبه عامل مشارکت متغیر حالت x_i در مود j ، بردار حالت اولیه $x_0 = e_i$ (تمامی عناصر e_i صفراند بجز i امین عنصر که مقدار واحد دارد) را در معادله x_i اعمال می‌کنیم [3].

در تحلیل خطی که از عناصر مرتبه دوم و بالاتر بسط تیلور معادلات سیستم صرفنظر می‌شود، معادلات سیستم به صورت معادلات (13) و (14) تقریب می‌خورد.

$$y_j(t) = y_{j0} e^{\lambda_j t} \quad (13)$$

با استفاده از قضیه سری‌های مودال، در یک همسایگی از نقطه تعادل، پاسخ معادله (4) را می‌توان از طریق حل سری معادله‌های زیر با شرایط اولیه $Y_0 = [y_{10}, \dots, y_{N0}]^T$ بدست آورد [7].

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

قسمت سمت راست (6) از حل معادلات دیفرانسیل (7) با شرایط اولیه $y_{mj}(0) = 0 : m > 1$ و برای $y_{1j}(0) = y_{j0}$ بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \dot{y}_{1j} = \lambda_j y_{1j} \\ \dot{y}_{2j} = \lambda_j y_{2j} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_{1k} y_{l0} \end{cases} \quad (7\text{-الف})$$

$$\begin{cases} \dot{y}_{1j} = \lambda_j y_{1j} \\ \dot{y}_{2j} = \lambda_j y_{2j} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_{1k} y_{l0} \\ \vdots \end{cases} \quad (7\text{-ب})$$

جواب معادله (7-الف) به سادگی و با استفاده از تبدیل لاپلاس یکبعدی به دست می‌آید و به صورت زیر است.

$$y_{1j}(t) = y_{j0} e^{\lambda_j t} \quad (8)$$

جواب معادله (7-ب) با استفاده از تبدیل لاپلاس دو بعدی به دست می‌آید و به صورت زیر است.

$$y_{2j}(t) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} S_{kl}^j(t) \quad (9)$$

که در آن:

$$S_{kl}^j(t) = \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j} (e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} - e^{\lambda_j t}) & \text{for } (k, l, j) \notin R_2 \\ t e^{\lambda_j t} & \text{for } (k, l, j) \in R_2 \end{cases}$$

در این معادله مجموعه R_2 شامل تمام سه‌تایی‌های مرتبی مانند (k, l, j) است که در شرط تشدید مرتبه دوم یعنی $\lambda_k + \lambda_l = \lambda_j$ صدق می‌کند.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

سری‌های مودال با مقایسه روابط (11) و (13)، شاخص غیرخطی مود زام به صورت زیر تعریف شده است.

$$I(j) = \left| \max_{k,l} (h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}) / y_{j0} \right| \quad (19)$$

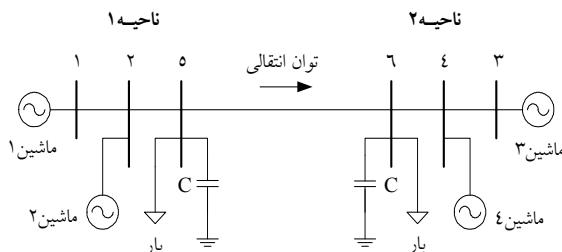
3- روش‌های جایابی PSS

در سیستمهای قدرت معمولاً با استفاده از PSS میرایی مودهای نوسانی محلی و بین ناحیه‌ای را که دارای میرایی ضعیف و یا منفی هستند، افزایش می‌دهند. در PSS‌های متداول، یک مولفه گشتاور الکتریکی همفاز با تغییرات سرعت بر روی روتور ایجاد می‌شود. عموماً این گشتاور از طریق یک بلوک پیش‌فاز و به صورت یک سیگنال کمکی به سیستم تحریک ماشین سنکرون اعمال می‌شود [11].

برای کاربرد PSS در سیستمهای قدرت چند ماشینه، اولین گام، تعیین ماشینهایی است که بکار بردن PSS در آنها بیشترین میرایی را در نوسانات ایجاد کند.

1-3- روش‌های متداول خطی

این روشها بر اطلاعات حاصل از تحلیل مودال خطی سیستم قدرت مبتنی هستند و در مراجع [13، 14] معرفی شده‌اند. برای PSS‌های رایج در سیستمهای قدرت استفاده از تکنیکهای شکل مود^۱، عامل مشارکت خطی، کنترل پذیری و مشاهده‌پذیری مود و مانده‌ها^۲، از جمله روش‌های مرسوم هستند.



شکل ۱: نمای تکخطی سیستم قدرت دو ناحیه‌ای چهار ماشینه.

نقص مشترک روش‌های یاد شده این است که تنها از اطلاعات خطی سیستم قدرت استفاده می‌کند و در شرایط تحت

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

با جایگذاری حالت اولیه $y_{j0} = v_{ij}$ (به طور معادل $x_0 = e_i$) در رابطه (14) خواهیم داشت

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} v_{ij} e^{\lambda_j t} = \sum_{j=1}^N P_{ij} e^{\lambda_j t} \quad (15)$$

در این رابطه، $p_{ij} = u_{ij} v_{ij}$ عامل مشارکت خطی یا مرتبه اول متغیر حالت i ام در مود زام نامیده می‌شود.

به طور مشابه، با استفاده از روش سری مودال می‌توان عوامل مشارکت غیرخطی یا مرتبه دوم را بدست آورد. به این منظور حالت اولیه $y_{j0} = v_{ij}$ در معادله (12) جایگذاری می‌شود.

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N p2_{ij} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N p2_{kl}^j e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (16)$$

که در آن [6]:

$$p2_{ij} = u_{ij} \left(v_{ji} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j v_{ki} v_{li} \right) \quad (17)$$

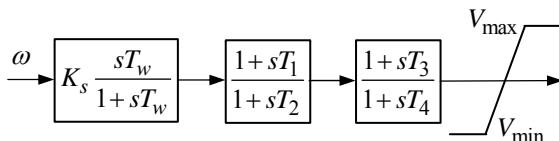
$$p2_{kl}^j = v_{ki} v_{li} \sum_{j=1}^N u_{ij} h2_{kl}^j \quad (18)$$

چنانکه مشاهده می‌شود، دو نوع عامل مشارکت غیرخطی مرتبه دوم قابل تعریف است. $p2_{ij}$ مشارکت مرتبه دوم متغیر حالت i ام در مود مستقل زام را بیان می‌کند و $p2_{kl}^j$ مشارکت مرتبه دوم متغیر حالت i ام در مود ترکیبی از دو مود k ام و l ام را تعیین می‌کند.

2- شاخص غیرخطی

شاخص غیرخطی، رابطه‌ای تقریبی برای سنجش میزان تأثیر عوامل غیرخطی در رفتار مودهای سیستم می‌باشد. مبنای تعریف این شاخص، اختلاف معادلات شکل بسته متغیر حالت شکل جردن (y) است که از دو روش تحلیل غیرخطی و تحلیل خطی بدست می‌آید. مشابه با شاخص غیرخطی پیشنهاد شده برای روش شکل نرمال [12]، در روش

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل 3: بلوک دیاگرام PSS نوع IEEE type PSSIA

۱-۴- مدل اجزای سیستم نمونه

در این مطالعه، برای مدل‌سازی دینامیکی ماشینهای سنکرون از مدل دو محوری استفاده شده است [15]. سیستم تحریک‌کننده ماشینها از نوع استاتیک (IEEE type AC4A) مطابق شکل 2 فرض شده است. PSS ماشینها از نوع متداول (IEEE type PSSIA) نمایش داده شده در شکل 3 در نظر گرفته شده است و بارهای سیستم بصورت اپدانس ثابت مدل شده‌اند. مقادیر پارامترهای اجزای مختلف سیستم نمونه به همراه اطلاعات پخش‌بار، از مرجع [9] انتخاب شده‌است.

۲-۴- حالت‌های کاری سیستم نمونه

به منظور انجام مقایسه‌های لازم بین نتایج تحلیل خطی و تحلیل غیرخطی، دو حالت کاری مختلف از نظر مقدار استرس حاکم بر سیستم نمونه در نظر گرفته شده است. در حالت کاری بدون استرس، مقادیر بارهای سیستم به گونه‌ای است که توان مبادلاتی دو ناحیه برابر 180 مگاوات باشد. در حالت کاری تحت استرس، شرایط بارگذاری باعث تبادل توانی برابر 410 مگاوات بین دو ناحیه می‌شود.

۳-۴- تحلیل خطی سیستم

اطلاعات بدست آمده از تحلیل مodal خطی در مورد مودهای نوسانی الکترومکانیکی سیستم در حالت کاری بدون استرس در جدول 1 و برای حالت کاری تحت استرس در جدول 2 خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش استرس باعث کاهش میرایی مود بین ناحیه‌ای از 13/9 درصد به 4/41 درصد شده است.

جدول 1: مشخصات مودهای الکترومکانیکی غالب سیستم بدون استرس.

شماره مود	مقدار ویژه	فرکانس (Hz)	میرایی (%)	نوع مود
10·9	7/7418 ±j -1/1138	1/232	14/24	محلی ناحیه 1
11·12	7/4563 ±j -1/8126	1/187	23/62	محلی ناحیه 2
16·17	3/0165 ±j -0/4235	0/480	13/90	بین ناحیه‌ای

استرس که خواص غیرخطی سیستم افزایش می‌یابد دچار خطأ می‌شوند.

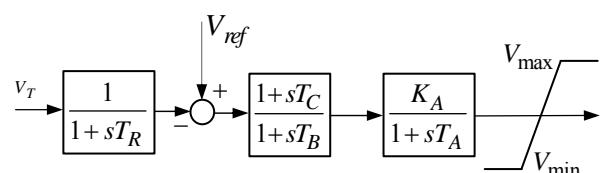
۳-۲- روش مبتنی بر عامل مشارکت غیرخطی

در این روش برای تمامی ماشینهای سیستم قدرت، عامل مشارکت غیرخطی (مرتبه دوم) بین سیگنال ورودی پایدارساز (سیگنال سرعت ماشین برای PSS های رایج) و مودهای نوسانی الکترومکانیکی سیستم قدرت محاسبه می‌شود و اندازه نسبی این عاملها مبنای انتخاب واحدهای تولیدی برای نصب PSS می‌گردد. مزیت این روش نسبت به روشهای خطی متداول این است که تأثیر رفتار غیرخطی سیستم قدرت در محاسبات وارد می‌شود و باعث می‌گردد که در سیستمهای قدرت با تحت استرس، مکانهای مؤثرتری برای پایدارساز انتخاب شود.

در این مقاله، از عامل مشارکت غیرخطی بدست آمده از تحلیل به روش سری‌های مودال معرفی شده در رابطه (17) استفاده شده است. به این منظور متغیر حالت $x_i = \omega_i$ سرعت ماشین i ام و مود z ام، مود بین‌ناحیه‌ای سیستم قدرت انتخاب می‌شود.

۴- نمونه مطالعاتی

روش ارائه شده بر روی سیستم نمونه دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه اجرا شده است. این سیستم در مرجع [11] معرفی شده است که با انجام اصلاحاتی به صورت شکل 1 نمایش داده شده است. این سیستم دارای دو ناحیه است که با یک خط رابط ضعیف متصل شده‌اند. در این سیستم یک مود نوسانی محلی در هر ناحیه و یک مود نوسانی بین‌ناحیه‌ای مشترک وجود دارد. میزان استرس حاکم بر این سیستم با مقدار توان حقیقی مبادله شده بین دو ناحیه سنجیده می‌شود.



شکل 2: بلوک دیاگرام تحریک‌کننده نوع IEEE type AC4A

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول 4: شاخصهای خطی مود بین‌ناحیه‌ای در سیستم تحت استرس.

ماشین	عامل مشارکت خطی	مشاهده پذیری	کنترل پذیری	مانده	زاویه اندازه	شكل مود
ماشین 1	0,979	0/822	0/883	0/728	0/822	⁰ -38
ماشین 2	0,926	0/850	0/857	0/731	0/850	⁰ -35
ماشین 3	0,998	1/000	0/282	0/282	1/000	⁰ -68
ماشین 4	1/000	0/997	1/000	1/000	0/997	⁰ -68

5- مقایسه نتایج تحلیلهای خطی و غیرخطی

با توجه به شباهت بین نتایج انواع مختلف تحلیلهای خطی در جداول 3 و 4، در اینجا تنها به مقایسه نتایج روش عامل مشارکت خطی با روش عامل مشارکت غیرخطی پرداخته می‌شود. به منظور مقایسه آسانتر نتایج این دو روش، نمودارهای مربوط به این نتایج در شکل‌های 4 و 5 نمایش داده شده است.

شکل 4 نمودار مقادیر اندازه عوامل مشارکت خطی و غیرخطی سرعت ماشین‌ها در مود بین‌ناحیه‌ای را در سیستم بدون استرس نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که هر دو روش خطی و غیرخطی به طور مشابه، به ترتیب ماشین‌های 3 و 4 در ناحیه دو سیستم را به عنوان مؤثرترین مکان برای عملکرد PSS تشخیص داده‌اند. شباهت نتایج دو روش همچنین بیانگر این مطلب است که در سیستم بدون استرس خواص غیرخطی سیستم بسیار بندک است.

شکل 5 نمودار مقادیر اندازه عوامل مشارکت خطی و غیرخطی را در سیستم بدون استرس نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که روش خطی در این شرایط نیز (با اختلاف بندک) ماشین‌های ناحیه دو را برای کاربرد PSS پیشنهاد می‌کند.

جدول 5: عامل مشارکت غیرخطی مود بین‌ناحیه‌ای سیستم نمونه.

ماشین	عامل مشارکت غیرخطی	
	سیستم بدون استرس	سیستم تحت استرس
ماشین 1	0/303	0/983
ماشین 2	0/198	1/000
ماشین 3	1/000	0/781
ماشین 4	0/758	0/779

جدول 2: مشخصات مودهای الکترومکانیکی غالب سیستم تحت استرس.

ماشین	فرکانس (Hz)	مقدار وزره	میرایی (%)	نوع مود
9,10	7/7331 ±j -1/1552	1/231	14/77	محلي ناحيه 1
11,12	7/5427 ±j -1/8023	1/201	23/24	محلي ناحيه 2
19,20	1/3133 ±j -0/0579	0/209	4/41	بين ناحيه ای

روشهای متداول خطی یاد شده در قسمت 1-3 برای مود نوسانی بین‌ناحیه‌ای اجرا شده است. نتایج این تحلیلهای برای شرایط بدون استرس در جدول 3 و برای شرایط تحت استرس در جدول 4 آورده شده است. مقادیر مربوط به هر یک از مشخصه‌ها نسبت به بزرگترین مقدار در آن مشخصه نرمالیزه شده است. از مقایسه مقادیر مربوط به ماشینها برای مشخصه‌های مختلف نتیجه می‌شود که در هر دو شرایط با و بدون استرس سیستم، کلیه روشهای متداول خطی بررسی شده، ناحیه دو (ماشین 3 یا 4) را به عنوان بهترین مکان برای نصب PSS برمی‌گزینند.

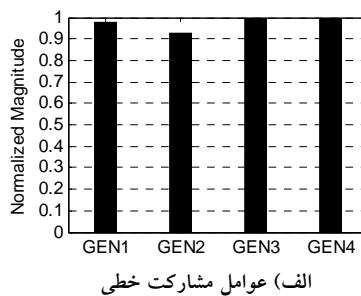
4- تحلیل غیرخطی

تحلیل غیرخطی به روش سری‌های مودال برای محاسبه عوامل مشارکت مرتبه دوم و مطابق توضیحات بخش 2-3 در سیستم نمونه اجرا شده است. نتایج این تحلیل برای هر دو شرایط با و بدون استرس در جدول 5 آورده شده است. مقادیر مربوط به هر ستون نسبت به بزرگترین مقدار در آن ستون نرمالیزه شده است. از مقایسه مقادیر عامل مشارکت غیرخطی مربوط به ماشینها در هر یک از شرایط کاری نتیجه می‌شود که این روش برای شرایط بدون استرس، ماشین 3 در ناحیه دو و برای شرایط تحت استرس، ماشین 1 در ناحیه یک را به عنوان بهترین مکان برای نصب PSS پیشنهاد می‌کند.

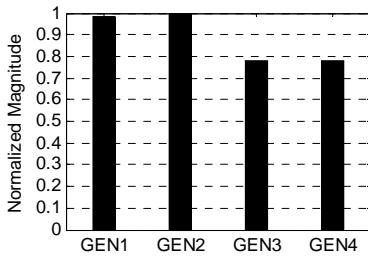
جدول 3: شاخصهای خطی مود بین‌ناحیه‌ای در سیستم بدون استرس.

ماشین	عامل مشارکت خطی	مشاهده پذیری	کنترل پذیری	مانده	زاویه اندازه	شكل مود
ماشین 1	0/342	0/319	0/836	0/281	0/32	⁰ 83
ماشین 2	0/217	0/285	0/648	0/194	0/29	⁰ 75
ماشین 3	1/000	1/000	0/410	0/431	1/000	⁰ -71
ماشین 4	0/783	0/952	1/000	1/000	0/95	⁰ -73

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

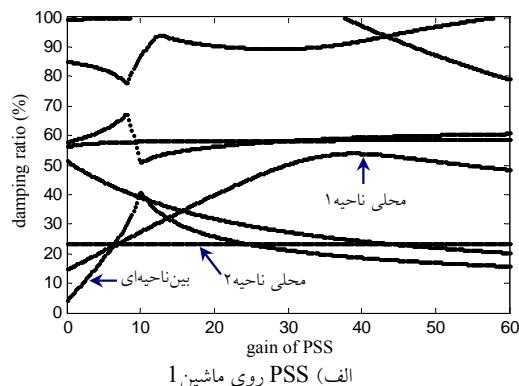


الف) عوامل مشارکت خطی

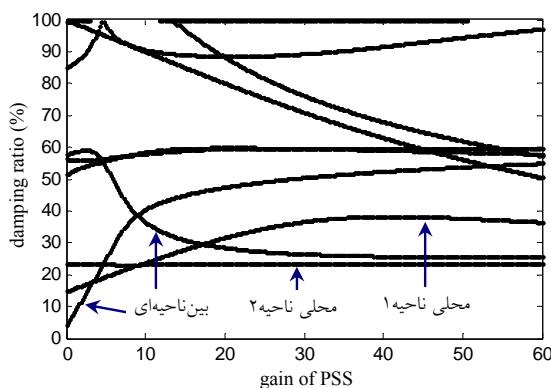


ب) عوامل مشارکت غیرخطی

شکل 5: عوامل مشارکت خطی و غیرخطی سرعت ماشین‌ها در مود بین ناحیه‌ای برای سیستم تحت استرس.



الف) روی ماشین 1



ب) روی ماشین 2

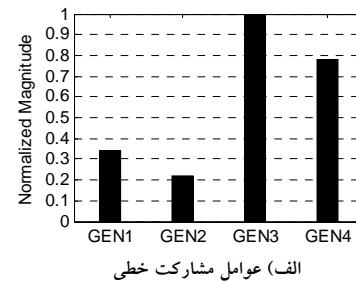
شکل 6: تغییرات درصد میرایی مودهای سیستم تحت استرس بر حسب مقادیر مختلف بهره PSS‌های نصب شده روی ماشینهای ناحیه 1.

جدول 6: شاخص غیرخطی مودها در شرایط با و بدون استرس.

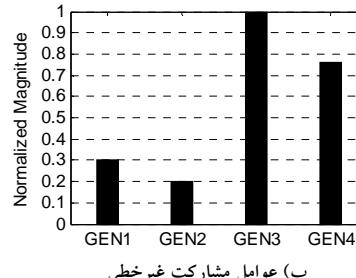
مود j	بدون استرس		تحت استرس	
	$I(j)$	$k_{\cdot l}$	$I(j)$	$k_{\cdot l}$
محلي ناحيه 1	0.0151	16.16	0.0416	19.19
محلي ناحيه 2	0.0110	11.20	0.0448	11.18
بين ناحيه ای	0.0110	16.17	0.1219	19.19

برخلاف آن روش غیرخطی به طور واضح به ترتیب ماشین‌های 2 و 1 در ناحیه یک سیستم را به عنوان مؤثرترین مکان برای عملکرد PSS تشخیص داده است. این اختلاف در نتایج، همچنین بیانگر این مطلب است که در سیستم تحت استرس خواص غیرخطی سیستم افزایش یافته و بر ویژگیهای خطی سیستم غلبه پیدا کرده است. این پدیده با مقایسه شاخص غیرخطی مودهای سیستم در دو شرایط با و بدون استرس (جدول 6 را مشاهده نمایید) قابل اثبات است. مقادیر شاخص غیرخطی با شرایط اولیه حاصل از خطای قطع 15 میلی ثانیه‌ای خط ارتباطی دو ناحیه، محاسبه شده است.

به منظور مقایسه عملکرد PSS در مکانهای پیشنهاد شده توسط روش‌های خطی و غیرخطی برای سیستم تحت استرس، طراحی و جایگذاری PSS برای هر چهار ماشین سیستم نمونه بطور جداگانه انجام شده است. طراحی PSS‌ها بر اساس روش پیشنهادی در مرجع [11] صورت گرفته است. مقادیر ثابت‌های زمانی طراحی شده برای PSS‌ها در ضمیمه آورده شده است.



الف) عوامل مشارکت خطی



ب) عوامل مشارکت غیرخطی

شکل 4: اندازه عوامل مشارکت خطی و غیرخطی سرعت ماشین‌ها در مود بین ناحیه‌ای برای سیستم بدون استرس.

5- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این مطالعه بیان‌گر این واقعیت است که در سیستمهای قدرت تحت استرس، با روش‌های متداول تحلیل خطی و بدون در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سیستم، امکان حصول اطلاعات کاملی از رفتار دینامیکی سیستم قدرت وجود ندارد. خصوصاً کاربرد روش‌های متداول خطی در جایابی PSS‌ها می‌تواند با خطا همراه باشد. استفاده از عامل مشارکت مرتبه دوم بدست آمده از تحلیل غیرخطی به روش سری‌های مودال باعث می‌شود که در سیستمهای قدرت تحت استرس، واحدهای تولیدی مناسب‌تری برای کاربرد PSS انتخاب شود و با بهبود عملکرد PSS‌ها، باعث افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت گردد.

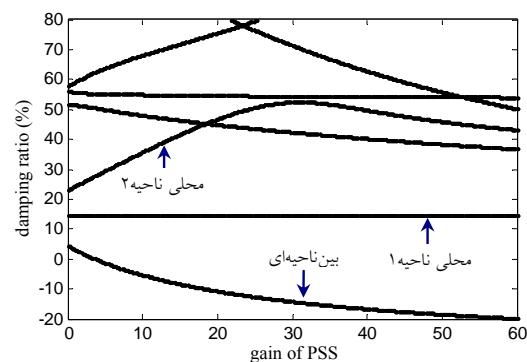
ضمیمه

جدول الف: مقادیر پارامترهای PSS‌های سیستم نمونه [9].

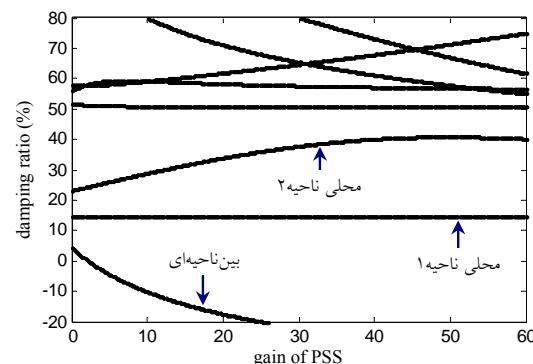
PSS	مکان	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	V_{smax}	V_{smin}
1	ماشین 1	0/1	0/01	0/9	0/07	13	0/1	-0/1
2	ماشین 2	0/1	0/03	1/5	0/03	10	0/1	-0/1
3	ماشین 3	0/1	0/05	1/3	0/03	10	0/1	-0/1
4	ماشین 4	0/3	0/05	0/18	0/03	3	0/1	-0/1

مراجع

- [1] C.M. Lin, V. Vittal, W Kliemann, and A.A. Fouad, "Investigation of modal interaction and its effects on control performance in stressed power systems using normal forms of vector fields," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 11, pp. 781-787, May 1996.
- [2] V. Vittal, N. Bhatia, and A.A. Fouad, "Analysis of the interarea mode phenomena in power systems following large disturbances," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. PS-9, pp. 1515-1521, Apr. 1991.
- [3] S.K. Starret and A.A. Fouad, "Nonlinear measures of mode-machine participation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 389-394, May 1998.
- [4] J. Thapar, V. Vittal, W. Kliemann, and A.A. Fouad, "Application of the normal form of vector fields to predict interarea separation in power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 844-850, May 1997.
- [5] S. Saha, A.A. Fouad, W. Kliemann, V. Vittal, "Stability boundary approximation of a power system using the real normal form of vector fields," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 797-802, 1997.
- [6] F.X. Wu, H. Wu, Z.X. Han, D.Q. Gan, "Validation of power system non-linear modal analysis methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, Issue 10, pp. 1418-1424, August 2007.



الف) روی ماشین 3



ب) روی ماشین 4

شکل 7: تغییرات درصد میرایی مودهای سیستم تحت استرس بر حسب مقادیر مختلف بهره PSS‌های نصب شده روی ماشینهای ناحیه 2

شکلهای 6 و 7 نحوه تأثیر PSS‌های نصب شده بر روی ماشینهای سیستم را بر میرایی مودهای مختلف سیستم، بر حسب مقادیر مختلف بهره PSS‌ها نمایش می‌دهد. در شکل 6 که مطابق با پیشنهاد روش غیرخطی، PSS در ناحیه یک نصب شده است، عملکرد مناسب PSS در افزایش میرایی مود محلی ناحیه 1 و مود بین‌ناحیه‌ای به وضوح دیده می‌شود. برخلاف آن، چنانکه در شکل 7 مشاهده می‌شود، قرار دادن PSS در ناحیه دو (مطابق با پیشنهاد روش خطی) اگر چه باعث افزایش میرایی مود محلی این ناحیه می‌شود، اما باعث کاهش میرایی و ناپایداری مود بین‌ناحیه‌ای به ازای مقادیر مختلف بهره PSS می‌گردد. این امر نشانگر خطا و عدم کارایی روش‌های متداول خطی به منظور تعیین مکان مناسب PSS در شرایط تحت استرس است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [7] N. Pariz, H.M. Shanechi, E. Vaahedi, "Explaining and validating stressed power systems behavior using modal series," *IEEE Trans. Power Systems*, vol.18, no.2, pp 778-785, Aug. 2003.
- [8] H.M. Shanechi, N. Pariz, E. Vaahedi, "General nonlinear modal representation of large scale power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol.18, no.3, pp 1103-1109, Aug. 2003.
- [9] Shu Liu, A.R. Messina, V. Vittal, "Assessing placement of controllers and nonlinear behavior using normal form analysis," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1489-1495, August 2005.
- [10] Shu Liu, A. R. Messina, V. Vittal, "A normal form analysis approach to sitting power system stabilizers (PSSs) and assessing power system nonlinear behavior," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1755-1792, November 2006.
- [11] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [12] A.R. Messina and E. Barocio, "Assessment of non-linear modal interaction in stressed power networks using the method of normal forms," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 25, pp. 21–29, 2003.
- [13] M. Klein, G.J. Rogers, S. Moorty, and P. Kundur, "Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 7, no. 3, pp. 382–390, Sep. 1992.
- [14] E. Zhou, O.P. Malik, and G.S. Hope, "Theory and method for selection of power system stabilizer location," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 9, no. 1, pp. 170–179, 1991.
- [15] Anderson, P.M., and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*. Iowa State University Press, 1977.