مدل‌سازی نامعین خطی پارامتر متغیر سیستم‌های قدرت با به‌کارگیری نگاشت مجموعه پارامتر بر پایه الگوریتم تحلیل مولفه‌های اصلی جهت طراحی پایدارساز مقاوم

محمدباقر ابوالحسنی جبلی[۱]، دانشجوی دکتری؛ محمدحسین کاظمی[۲]، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران – abolhasani@shahed.ac.ir
۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران – kazemi@shahed.ac.ir

چکیده: در این مقاله رو شی نوین برای مدل سازی خطی پارامتر-متغیر[۱] (LPV) پلی‌تاپیک[۲] نامعین سیستم‌های قدرت بر ا ساس رویکرد نگا شت مجموعه پارامتر[۳] (PSM) بر پایه الگوریتم تحلیل مولفه‌های اصلی[۴] (PCA) ارائه شده است. ابتدا با خطی‌سازی معادلات سیستم حول مجموعه نقاطی از پاســخ گذرای دینامیکی، یک مدل LPV اولیه تولید می‌شــود، ســپس با به‌کارگیری تکنیک PSM برپایه الگوریتم PCA، تعداد مدل‌های خطی کاهش‌یافته و یک مدل پلی‌تاپیک کاهش‌یافته شکل می‌گیرد. برای پو شش اثرات غیرخطی سیستم و همچنین خطاهای نا شی از کاهش مدل‌ها، برای هر یک از مدل‌ها مقداری نامعینی در نظر گرفته می‌شــود. یک کنترل‌کننده جایابی قطب مقاوم طراحی می‌شــود تا قطب‌های مدل پلی‌تاپیک کاهش‌یافته را در یک ناحیه نامعادله ماتریسی خطی[۵] (LMI) قرار دهد، به‌طوری‌که سیستم از ضریب میرایی مناسبی برخوردار شود. یک شرط کافی به‌منظور تضمین پایداری مجانبی برای سیستم حلقه بسته، در برابر نامعینی‌ها نیز ارائه می‌شود. در انتها، کنترل‌کننده پیشنهادی، جهت طراحی یک PSS برای یک سیستم قدرت تک-ماشینه و نیز در شرایط چند-ماشینه استفاده و شبیه‌سازی می‌شود. و نتایج آن با پاسخ PSS رایج استاندارد مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی رفتار مقاوم کنترل‌کننده پیشنهادی را در شرایط مختلف بهره‌برداری و در برابر خطاهای متفاوت نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایدارساز سیستم قدرت، مدل‌سازی LPV، الگوریتم PCA، نواحی LMI.

Uncertain LPV Modeling of Power Systems using PCA-Based Parameter Set Mapping for Robust PSS Designing

M. Abolhasani Jabali[1], PhD Student; M. Kazemi[2], Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: abolhasani@shahed.ac.ir
2- Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: kazemi@shahed.ac.ir

Abstract: This paper presents a new methodology for uncertain polytopic linear parameter-varying (LPV) modeling of power systems based on parameter set mapping (PSM) with principle component analysis (PCA). At first, an LPV representation of the system dynamics is generated by linearization of its usual differential-algebraic equations about the transient operating points. Then, the PCA-based PSM algorithm is used to reduce the number of models and generate a reduced polytopic LPV model. Because of the system nonlinearity and approximations of model reduction, some uncertainties are considered for each model. A robust pole placement controller is designed to assign the poles of polytopic model in a linear matrix inequality (LMI) region such that the response of the system has a proper damping ratio. A sufficient condition is also proposed to guarantee the asymptotic stability of the closed loop model against the uncertainties. Finally, the proposed controller is synthesized as a power system stabilizer (PSS). It is considered for a single-machine power system and then it is simulated in multi-machine case and compared its performance with a tuned standard conventional PSS and other cases of the controller. The results show the robust performance of the proposed controller especially in different operation conditions and faults.

Keywords: PSS, LPV modeling, PCA algorithm, LMI regions.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹
نام نویسنده مسئول: محمدحسین کاظمی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران – روبروی مرقد امام خمینی(ره) - دانشگاه شاهد – دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

تاکنون و به‌ویژه در سال‌های اخیر، بسیاری از تئوری‌های مدل سازی، کنترلی و نیز روش‌های بهینه‌سازی در حل مسائل مختلف سیستم‌های قدرت به کار گرفته شده‌اند، نظیر تئوری کنترل‌کننده‌های تطبیقی، مقاوم، تئوری بازی[۶]، الگوریتم‌های هو شمند، مدل پیش‌بین[۷] و جدول‌بندی بهره[۸] [۱۱-۱]، اما در این مقاله سعی بر آن است تا مدل‌سازی LPV با درنظرگیری نامعینی در رئوس به‌منظور کنترل سیستم‌های قدرت به‌کاررفته شود.

کارایی بالای سیستم‌های خطی در تو سعه مفاهیم کنترلی سبب شده است که محققین به دنبال روش‌هایی باشند که بتوانند سیستم‌های غیرخطی و پیچیده را به نحوی در قالب سیستم‌های خطی مدل نمایند. به همین جهت تمایل زیادی در به‌کارگیری مدل‌های هایبرید، LPV و پلی‌تاپیک به وجود آمده است. ساخت یک مدل خطی پلی‌تاپیک براساس LPV، می‌تواند راه‌حلی برای غلبه بر اختلالات وارده از اثرات غیرخطی ناشی از تغییرات نقاط کار، نامعینی پارامترها و یا وقوع خطاهای احتمالی با شد. مسئله پایداری سیستم‌های پلی‌تاپیک هنوز یکی از موضوعات مورد بحث می‌باشد[۸، ۱۵-۱۲] و تحقیقات زیادی روی پایداری این سیستم‌ها از طریق سوئیچ بین کنترل‌کننده‌ها متمرکز شده است[۲۰-۱۶].

در مرجع [۲۱] ، مروری کامل از نتایج عملی کنترل LPV صورت پذیرفته است و چندین روش طراحی کنترل‌کننده LPV مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. این روش‌ها شامل پلی‌تاپیک، تبدیل کسری خطی (LFT)[۹] و روش‌های مبتنی بر خانه‌بندی[۱۰] می‌باشد و نشان داده شده است که چگونه می‌توان در هر یک از این روش‌ها طراحی را بر اساس LMI انجام داد. مدل‌های LPV مدل‌هایی در فضای حالت هستند که دارای ماتریس‌هایی وابسته به پارامترهای متغیر با زمان می‌باشند. دینامیک آن‌ها خطی است ولی نه خطی ثابت و بدون تغییر [۲۲]. در حقیقت، مدل LPV یک سیستم غیرخطی، می‌تواند خواص غیرخطی آن را با تغییر پارامترها توصیف نماید. این نگاه، راه‌حل ساده‌ای را برای نمایش سیستم‌ها، علی‌الخصوص هنگامی‌که تغییرات سیستم وابسته به متغیرهای حالت باشد، ارائه می‌دهد [۱۱، ۲۶-۲۳]. طراحی کنترل‌کننده با کارایی بالا و بار محاسباتی پایین و برخط برای سیستم‌های غیرخطی هنوز یکی از مسائل باز تحقیقاتی می‌باشد [۲۷]. در [۹] مسئله طراحی کنترل‌کننده جدول‌بندی-بهره H_2 برای سیستم‌های زمان-پیوسته LPV مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسئله، فرض می شود که پارامترها در یک فضای پلی‌تاپیک، به صورت برخط قابل‌اندازه‌گیری هستند. سپس با استفاده از یک تابع لیاپانف وابسته به پارامترهای پایه، شرایط کافی برای وجود فیدبک حالت جدول‌بندی-بهره H_2 و کنترل‌کننده‌های دینامیکی فیدبک خروجی در ساختار LMI فرمول‌بندی می‌شود. در [۱۰] طراحی کنترل‌کننده جدول‌بندی-بهره تحت شرایط رفتاری H_∞ ارائه شده است. مروری بر تاریخچه روش‌های جدول‌بندی-بهره را می‌توان در [۲۸] دنبال نمود.

نوعی از فرمول‌بندی کنترل‌کننده با رفتار چندهدفه H_2/L_2 به‌صورت نامعادلات ماتریسی برای سیستم‌های LPV، در [۲۹] معرفی شده است. با نگاهی بر تحقیقات صورت گرفته، یکی از روش‌های کلی جهت به دست آوردن مدل LPV برای یک سیستم غیرخطی، خطی‌سازی ژاکوبین سیستم حول مجموعه‌ای از نقاط کار یا شرایط دینامیکی می‌باشد، که در نتیجه خانواده‌ای از سیستم‌های خطی شده پارامتری تولید می‌شوند که اساس خطی‌سازی جدول‌بندی شده را تشکیل می‌دهند [۲۸].

اکثر روش‌های مرسوم در طراحی PSS برای سیستم‌های قدرت بر پایه مدل‌های خطی بنا شده‌اند. مقاوم بودن PSSهای طراحی شده درمقابل تغییرات نقطه کار سیستم بسیار محدود است زیرا مدل خطی شده، معمولاً تنها در نزدیکی نقطه کار پیش‌فرض که در خطی‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، معتبر می‌باشد. بنابراین ممکن است که یک PSS مرسوم (سنتی) (CPSS) نتواند نوسانات سیستم را در دامنه وسیعی از شرایط بهره‌برداری به‌خوبی میرا نماید و یا این‌که حداقل ممکن است رفتار غیرقابل‌قبولی را از خود نشان دهد. در نتیجه، برای مقابله با نامعینی‌های وارده ناشی از تغییرات احتمالی در نقاط کار و یا عملکرد غیرخطی سیستم، طراحی PSSهای مقاوم اولویت پیدا می‌کند. تئوری‌های اصلی و روش‌های کاربردی کنترل مقاوم در سیستم‌های قدرت را می‌توان در [۳۰] مرور کرد. توجه به این نکته نیز مهم است که PSS باید در شرایط بهره‌برداری متفاوت، مناسب عمل کند و پایداری سیستم را تضمین نماید [۳۱]. یک مدل‌سازی پلی‌تاپیک می‌تواند راه‌کار مؤثری برای حل این مسئله باشد [۳۲].

در این تحقیق، رفتار غیرخطی سیستم قدرت از طریق مدل سازی LPV، [۳۷-۳۳]، لحاظ می‌شود. مجموعه‌ای از داده‌های شبیه‌سازی، همانند [۳۸،۳۷]، جهت مدل سازی سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض بر آن است که این مجموعه از داده‌ها به‌اندازه کافی اطلاعات رفتار گذرای سیستم را در برداشته باشد. بنابراین ایده اصلی، استفاده از نمونه‌های پاسخ حوزه زمان در ساخت یک مدل پلی‌تاپیک می‌باشد. سپس از تکنیک PSM برپایه الگوریتم PCA، ارائه‌شده در[۳۶]، استفاده می‌شود تا یک مدل LPV با مجموعه پارامتر کم‌تر حاصل شود. ایده اصلی این الگوریتم بر این است که جهت‌های کم‌ارزش در فضای پارامتر تشخیص داده می‌شوند و بدون این‌که اطلاعات چندانی از سیستم از دست داده شود، حذف می شوند و یک مدل پلی‌تاپیک کاهش‌یافته به دست می‌آید. تا این مرحله مشابه با مقاله [۳۷] عمل می شود که البته تا این مرحله نیز نوآوری‌هایی نسبت به سایر روش‌های مرسوم وجود دارد که از آن جمله می‌توان به در نظر گرفتن تعداد زیادی نقاط نمونه‌برداری[۱۱] از پاسخ دینامیکی سیستم قدرت برای استخراج مدل LPV و نیز کاهش تعداد مدل‌ها براساس PSM برپایه الگوریتم PCA اشاره نمود. درعین‌حال، نوآوری مقاله حاضر، نسبت به مقاله [۳۷] در مراحل بعدی است، جایی که با در نظر گرفتن نامعینی‌هایی در رئوس مدل پلی‌تاپیک به‌دست‌آمده، تعریف

جدیدی از سیستم پلی‌تاپیک نامعین ارائه می‌شود. این تعریف در مقاله [۳۹] نیز فقط برای طراحی یک کنترل‌کننده فیدبک حالت ثابت ارائه شده است لیکن در این مقاله طراحی بر اساس فیدبک خروجی صورت می‌گیرد. قدم بعدی طراحی یک کنترل‌کننده براساس جایابی قطب می‌باشد که نسبت به نامعینی‌های در نظر گرفته شده مقاوم باشد. با ارائه یک شرط کافی، تضمین پایداری مجانبی سیستم پلی‌تاپیک حلقه بسته در برابر نامعینی‌های رئوس، معرفی انجام می‌شود. ارزیابی روش پیشنهادی در این مقاله، با طراحی پایدار ساز در سیستم‌های قدرت، صورت گرفته است که البته از نظر معادلات و ساختار بلوک‌های کنترلی با پایدارسازهای مرسوم تفاوت دارد.

ساختار این مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش بعد مدل سازی و تعریف مسئله بیان خواهد شد. سپس در بخش ۳، الگوریتم پیشنهادی جهت طراحی کنترل‌کننده و بررسی شرایط پایداری ارائه می‌شود. در بخش ۴، کاربرد کنترل‌کننده پیشنهادی در طراحی PSS برای یک سیستم قدرت ساده و همچنین مطالعه و تحلیل آن در یک سیستم قدرت چندماشینه صورت می‌پذیرد و کارآیی مقاوم آن با یک CPSS با ساختار استاندارد که به صورت مناسب تنظیم شده است و همچنین با حالات کنترلی دیگر، مقایسه می‌شود. در انتها نیز جمع‌بندی نتایج آورده خواهد شد.

۲- مدل‌سازی و تعریف مسئله

تنوع اجزاء متفاوت موجود در سیستم‌های قدرت و تأثیرات متقابل آن‌ها با یکدیگر سبب شده است که رفتار دینامیکی غیرخطی و پیچیده‌ای را در شرایط غیر حالت ماندگار از خود نشان دهند. در صورت وقوع یک خطا و یا وارد شدن اغتشاشات ناگهانی، دینامیک غیرخطی سیستم کاملاً مشهود می‌شود، علی‌الخصوص در پاسخ دینامیکی و گذرای سیستم. مدل ریاضی یک سیستم قدرت را می‌توان با دو دسته معادلات زیر بیان نمود [۳۸]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,\xi,u) \\ 0 &= g(x,\xi) \end{aligned} \qquad (۱)$$

که $x \in \Re^n$ بردار متغیرهای حالت، $\xi \in \Re^q$ بردار متغیرهایی غیر از متغیرهای حالت شبکه (نظیر متغیرهای محاسبات پخش بار) و $u \in \Re^p$ بردار ورودی‌های کنترل می‌باشد. فرض می‌شود توابع f و g با مرتبه کافی مشتق‌پذیر باشند. در این صورت پاسخ معادلات (۱) برای ورودی مشخص $\bar{u}(t)$ را می‌توان با بردار $\rho(t) := \begin{bmatrix} \bar{x}(t)^T & \bar{\xi}(t)^T & \bar{u}(t)^T \end{bmatrix}^T$ به‌عنوان بردار مسیر گذرای سیستم نمایش داد. با در نظر گرفتن $x = \bar{x} + \delta x$، $\xi = \bar{\xi} + \delta y$، و $u = \bar{u} + \delta u$، از خطی‌سازی معادلات (۱) حول مسیر گذرای $\rho(t)$، دسته معادلات زیر که نمایش یک مدل LPV بنام $P(\theta)$ می‌باشد، برای سیستم قدرت موردنظر حاصل خواهد شد.

$$\begin{aligned} \delta\dot{x} &= A(\theta(t))\delta x + B(\theta(t))\delta u \\ \delta y &= C(\theta(t))\delta x + D(\theta(t))\delta u \end{aligned} \qquad (۲)$$

که؛

$$\begin{aligned} A(\theta(t)) &:= \left[\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial \bar{\xi}} \left(\frac{\partial g}{\partial \bar{\xi}} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \right]_{\substack{x=\bar{x} \\ \xi=\bar{\xi} \\ u=\bar{u}}} \\ B(\theta(t)) &:= \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right]_{\substack{x=\bar{x} \\ \xi=\bar{\xi} \\ u=\bar{u}}} \end{aligned} \qquad (۳)$$

و $\delta y \in \Re^m$ بردار تغییرات خروجی حول پاسخ دینامیکی و گذرای $\bar{y}$ می‌باشد. بردار متغیر بازمان پارامتر $\theta(t) \in \Re^l$ مطابق با رابطه $\theta(t) = h(\rho(t))$، که h یک نگاشت پیوسته می‌باشد، وابسته به سیگنال‌های قابل‌اندازه‌گیری $\rho(t) \in \Re^k$ می‌باشد ($k := n + p + q$) و تحت عنوان سیگنال جدول‌بندی[۱۲] نامیده می‌شود. در این صورت $\theta \in \mathcal{P}_\theta, \forall t > 0$، که $\mathcal{P}_\theta \subset \Re^l$ یک مجموعه محدب پلی‌تاپیک است که توسط پوش محدب[۱۳] زیر تعریف می‌شود.

$$\mathcal{P}_\theta := Co\{\theta_{v1}, \theta_{v2}, \ldots, \theta_{vN}\} \qquad (۴)$$

که N تعداد رئوس است. این بدان معناست که سیستم قدرت موردنظر توسط ترکیب خطی از مدل‌های خطی واقع در رئوس سیستم پلی‌تاپیک زیر قابل نمایش است.

$$P(\theta) \in Co\{P(\theta_{v1}), P(\theta_{v2}), \ldots, P(\theta_{vN})\} = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i P(\theta_{vi}) \qquad (۵)$$

که $\sum_{i=1}^{N} \alpha_i = 1$ و $\alpha_i \geq 0$ مولفه‌های محدب هستند. رأس i-ام این پلی‌تاپ محدب به‌صورت $P_i := (A_i, B_i, C_i)$ تعریف می‌شود که هر یک از ماتریس‌ها ثابت و مشخص هستند. مدل‌ها در نقاط نمونه‌ای از مسیر گذرای سیستم محاسبه می‌شوند. تعداد این نقاط براساس محدوده عملکرد سیستم، پاسخ گذرا و اثرات غیرخطی انتخاب می‌شود.

از آنجاکه تعداد نقاط زیاد می‌باشد، این نکته باعث ازدیاد LMIها و درنتیجه طولانی شدن و پیچیده شدن حجم محاسبات سیگنال کنترل خواهد شد. از طرفی برخی از این نقاط ممکن است رفتار یکسانی را از سیستم معرفی نمایند، یعنی بعضی از رئوس بدون آن‌که اطلاعات اضافه‌ای از سیستم در برداشته باشند فقط موجب افزایش حجم محاسبات می‌شوند. بنابراین الگوریتمی که بتواند تعداد رئوس مدل پلی‌تاپیک را به حداقل تعداد ممکن کاهش دهد، بایستی ارائه شود. این الگوریتم همان تکنیک PSM بر پایه PCA می‌باشد که در [۳۶] ارائه شده است و نحوه به‌کارگیری آن در سیستم‌های قدرت در [۳۷] بیان شده است. دراینجا این الگوریتم به‌طور خلاصه عنوان می‌شود و توضیحات مفصل آن به مقالات ذکر شده ارجاع داده می‌شود.

تکنیک PSM به‌طور خلاصه یک نگاشت $r:\Re^k \to \Re^s$ که $s \le l$، یعنی $\phi(t)=r(\rho(t))$، برای سیستم LPV رابطه (۲) ارائه می‌دهد، به‌طوری‌که مدل

$$\begin{aligned}\delta\dot{x} &= \hat{A}(\phi(t))\delta x+\hat{B}(\phi(t))\delta u\\ \delta y &= \hat{C}(\phi(t))\delta x+\hat{D}(\phi(t))\delta u\end{aligned} \qquad (۶)$$

تقریب خوبی از (۲) را ارائه دهد. در این تقریب از الگوریتم PCA استفاده می‌شود که توضیحات مفصل آن در [۳۸] آمده است. با استفاده از داده‌های نمونه‌برداری شده در لحظات $t=1,2,\dots,N$، ماتریس داده‌های $\Xi=[\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_N]$ با ابعاد $l\times N$ تشکیل می شود. سپس هر سطر Ξ_i از این ماتریس تحت یک قانون آفین[۱۴] Π_i نرمالایز می‌شود، یعنی $\Xi_i^n=\Pi_i(\Xi_i)$، تا اینکه داده های مقیاس شده $\Xi^n=\Pi(\Xi)$ با میانگین صفر و انحراف استاندارد واحد به دست می‌آید. حال می‌توان با تجزیه به مقادیر استثنایی[۱۵] آن، یعنی

$$\Xi^n=\begin{bmatrix}\hat{U}^T & U^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\Sigma} & 0 & 0\\ 0 & \Sigma & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{V}\\ V\end{bmatrix} \qquad (۷)$$

و تقسیم‌بندی آن به دو بخش بااهمیت و کم‌اهمیت، تعداد s مقدار استثنایی بااهمیت را نگه داشت و از بخش‌های مربوط به مقادیر استثنایی کم‌اهمیت‌تر صرف‌نظر کرد تا به داده‌های $\hat{\Xi}^n=\hat{U}\hat{\Sigma}\hat{V}^T$ رسید که تقریبی از داده‌های Ξ^n می‌باشد. از ماتریس $\hat{U}$ به‌عنوان یک پایه برای فضای ستون‌های بخش بااهمیت می‌توان استفاده کرد و نگاشت کاهش دهنده r را از $\rho(t)$ به $\phi(t)$ به صورت زیر به دست آورد:

$$\phi(t)=r(\rho(t))=\hat{U}^T\Pi(h(\rho(t)))=\hat{U}^T\Pi(\theta(t)) \qquad (۸)$$

به‌عبارت‌دیگر تحقق $\hat{A}(\cdot),\hat{B}(\cdot),\hat{C}(\cdot),\hat{D}(\cdot)$ در مدل تقریبی (۶) توسط رابطه زیر با مدل (۲) مرتبط می‌شود:

$$\hat{P}(\phi)=\begin{bmatrix}\hat{A}(\phi(t)) & \hat{B}(\phi(t))\\ \hat{C}(\phi(t)) & \hat{D}(\phi(t))\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A(\hat{\theta}(t)) & B(\hat{\theta}(t))\\ C(\hat{\theta}(t)) & D(\hat{\theta}(t))\end{bmatrix} \qquad (۹)$$

که،

$$\hat{\theta}(t)=\Pi^{-1}(\hat{U}\phi(t))=\Pi^{-1}(\hat{U}\hat{U}^T\Pi(\theta(t))) \qquad (۱۰)$$

در نتیجه سیستم پلی‌تاپیک LPV زیر با تعداد $\bar{N}=2^s$ رأس حاصل می‌شود:

$$\hat{P}(\hat{\theta})\in Co\left\{\hat{P}(\hat{\theta}_{v1}),\hat{P}(\hat{\theta}_{v2}),\dots,\hat{P}(\hat{\theta}_{v\bar{s}})\right\}=\sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\hat{P}(\hat{\theta}_{vi}) \qquad (۱۱)$$

دقت تقریب را می‌توان توسط نسبت تغییرات کل[۱۶] و به‌صورت زیر اندازه‌گیری کرد:

$$v_s=\frac{\sum_{i=1}^{s}\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^{l}\sigma_i^2} \qquad (۱۲)$$

تعریف ۱ (ناحیه LMI) [۴۰]: سطح $\mathcal{D}$ زیرمجموعه‌ای از صفحه مختلط را یک ناحیه LMI گویند اگر ماتریس‌های $L=L^T$ و M در $\Re^{m\times m}$ وجود داشته باشند که؛

$$\begin{aligned}&\mathcal{D}=\{z\in\mathcal{C}: f_{\mathcal{D}}(z)<0\}\\ &f_{\mathcal{D}}(z)=L+zM+\bar{z}M^T\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

معمولاً زیرمجموعه $\mathcal{D}$ را به‌صورت ناحیه‌ای از صفحه مختلط تعریف می‌کنند که دارای شکل هندسی خاصی نظیر دیسک، باند عمودی، قطاع مخروطی، و غیره، داشته باشد. در این مقاله مشابه اکثر مقالات ناحیه $\mathcal{D}$ به‌صورت یک قطاع مخروطی با زاویه داخلی α در نظر گرفته شده است که رأس آن در مبدأ قرار گرفته است. این ناحیه تضمین حداقل ضریب دمپینگ را برای قطب‌های حلقه بسته داراست و تابع مشخصه آن به‌صورت زیر است:

$$f_\alpha(z)=\begin{bmatrix}\sin\frac{\alpha}{2}(z+\bar{z}) & \cos\frac{\alpha}{2}(z-\bar{z})\\ \cos\frac{\alpha}{2}(\bar{z}-z) & \sin\frac{\alpha}{2}(z+\bar{z})\end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

قضیه ۱ (پایداری- $\mathcal{D}$) [۴۰]: ماتریس A را پایدار- $\mathcal{D}$ گویند اگر و فقط اگر ماتریس متقارن X وجود داشته باشد، به‌طوری‌که؛

$$M_{\mathcal{D}}(A,X)<0,\quad X>0 \qquad (۱۵)$$

که؛ $M_{\mathcal{D}}(A,X)$ یک ماتریس $m\times m$ بلوک می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M_{\mathcal{D}}(A,X):=L\otimes X+M\otimes(AX)+M^T\otimes(AX)^T \qquad (۱۶)$$

علامت $\otimes$ نشان‌گر ضرب رونکر[۱۷] می‌باشد.

با استفاده از این قضیه می‌توان گفت که مقادیر ویژه‌ماتریس A در داخل ناحیه LMI متناظر با تابع مشخصه (۱۴) قرار می‌گیرند اگر و فقط اگر وجود داشته باشد $X>0$ که؛

$$\begin{bmatrix}\sin\frac{\alpha}{2}(AX+XA^T) & \cos\frac{\alpha}{2}(AX-XA^T)\\ \cos\frac{\alpha}{2}(XA^T-AX) & \sin\frac{\alpha}{2}(AX+XA^T)\end{bmatrix}<0 \qquad (۱۷)$$

اکنون می‌توان هدف کنترلی مد نظر را چنین بیان کرد:

یافتن قانون کنترل

$$\delta u = K(s)\delta y \qquad (۱۸)$$

برای مدل LPV کاهش یافته (۶) تحت عنوان یک PSS مقاوم که قطب‌های سیستم حلقه بسته را در ناحیه $\mathcal{D}$ قرار دهد.

۳- طراحی کنترل‌کننده

در این بخش چگونگی طراحی قانون کنترل (۱۸) برای سیستم LPV کاهش‌یافته (۶) بیان خواهد شد و همین‌طور یک شرط کافی ارائه خواهد شد که پایداری مجانبی آن را تحت کنترل پیشنهادی تضمین نماید. سیستم خطی (۲) توصیف‌کننده سیستم غیرخطی (۱) حول مسیر گذرای $\rho(t)$ می‌باشد. با به‌کارگیری تکنیک PSM تحت الگوریتم PCA، سیستم LPV کاهش‌یافته (۶) به دست می‌آید. اما جهت پوشش خطاها و تفاوت‌های محتمل میان مدل طراحی شده و مدل واقعی که ممکن است ناشی از خطی‌سازی، کاهش مدل، اغتشاشات خارجی و اثرات ناشی از ماهیت غیرخطی سیستم قدرت علی‌الخصوص هنگام رخداد خطا باشد، نامعینی‌های $(\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta C_i)$ روی رئوس $\hat{P}_i := (\hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i)$ برای $i = 1, 2, \ldots, \bar{N}$، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} A_i &= \hat{A}_i + \Delta A_i \\ B_i &= \hat{B}_i + \Delta B_i \\ C_i &= \hat{C}_i + \Delta C_i \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

که $(\hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i)$ رئوس نامی سیستم پلی‌تاپیک حاصل از به‌کارگیری الگوریتم PCA روی مدل LPV اولیه می‌باشند. اکنون هدف یافتن PSS مقاوم، $K(s)$، می‌باشد به‌طوری‌که، قطب‌های سیستم حلقه بسته (۶) و (۱۸) در ناحیه LMI تعریف شده قرار گیرند. فرض کنید که نمایش فضای حالت کنترل‌کننده $K(s)$ به‌صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) &= A_k x_k(t) + B_k \delta y \\ u(t) &= C_k x_k(t) + D_k \delta y \end{aligned} \qquad (۲۰)$$

با اعمال این کنترل‌کننده به سیستم (۶)، معادله فضای حالت سیستم حلقه بسته چنین خواهد شد:

$$\dot{x}_{cl} = A_{cl}\left(\hat{\theta}(t)\right) x_{cl} \qquad (۲۱)$$

که؛ $x_{cl} := [\delta x^T \;\; x_k^T]^T$ بردار متغیرهای حالت سیستم حلقه بسته می‌باشد و

$$A_{cl}\left(\hat{\theta}(t)\right) := \begin{bmatrix} A(\hat{\theta}(t)) + B(\hat{\theta}(t)) D_k C(\hat{\theta}(t)) & B(\hat{\theta}(t)) C_k \\ B_k C(\hat{\theta}(t)) & A_k \end{bmatrix} \qquad (۲۲)$$

با به‌کارگیری نمایش پلی‌تاپیک (۱۱)، سیستم حلقه بسته (۲۱) به‌صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\dot{x}_{cl} = \sum_{i=1}^{\bar{N}} \alpha_i A_{cli} x_{cl} \qquad (۲۳)$$

که؛ A_{cli}، ماتریس سیستم حلقه بسته i-امین مدل، برابر است با:

$$A_{cli} := \begin{bmatrix} A_i + B_i D_k C_i & B_i C_k \\ B_k C_i & A_k \end{bmatrix} \qquad (۲۴)$$

نامعینی‌های در نظر گرفته شده برای رئوس توسط رابطه (۱۹)، در معادله (۲۳) تأثیر داده می‌شوند و سیستم زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{x}_{cl} = \left(\sum_{i=1}^{\bar{N}} \alpha_i \hat{A}_{cli} + \mathbf{\Delta}\right) x_{cl} \qquad (۲۵)$$

که در آن $\mathbf{\Delta} := \sum_{i=1}^{\bar{N}} \alpha_i \Delta_i$ به‌عنوان نامعینی پارامتری پلی‌تاپیک تعریف می شود که به سیستم حلقه بسته کل وارد می شود، و Δ_i نامعینی پارامتری وارده به سیستم حلقه بسته i-ام می‌باشد و چنین تعریف می‌شود:

$$\Delta_i := \begin{bmatrix} \Delta A_i + B_i D_k \Delta C_i + \Delta B_i D_k C_i & \Delta B_i C_k \\ B_k \Delta C_i & 0 \end{bmatrix} \qquad (۲۶)$$

و $\hat{A}_{cli}$ ماتریس سیستم حلقه بسته i-امین مدل نامی، $\hat{P}_i := (\hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i)$، است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{A}_{cli} := \begin{bmatrix} \hat{A}_i + \hat{B}_i D_k \hat{C}_i & \hat{B}_i C_k \\ B_k \hat{C}_i & A_k \end{bmatrix} \qquad (۲۷)$$

تعریف ۲: سیستم LPV پلی‌تاپیک (۲۵) که تحت تأثیر نامعینی $\mathbf{\Delta}$ قرار گرفته است، سیستم *LPV پلی‌تاپیک نامعین*[۱۸] نامیده می‌شود.

با توجه به تعریف فوق، اکنون ناحیه LMI جدیدی را با مجموعه $\hat{\mathcal{D}}$ در صفحه مختلط با ماتریس متقارن $L = L^T$ و ماتریس M با ابعاد مناسب، به‌صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \hat{\mathcal{D}} &= \left\{ z \in \mathcal{C} : f_{\hat{\mathcal{D}}}(z) < 0 \right\} \\ f_{\hat{\mathcal{D}}}(z) &= (L + \gamma I) + zM + \bar{z} M^T \end{aligned} \qquad (۲۸)$$

قضیه زیر، یک شرط کافی برای پایداری- $\mathcal{D}$ مقاوم سیستم LPV پلی‌تاپیک نامعین (۲۵) ارائه می‌دهد.

قضیه ۲: سیستم LPV پلی‌تاپیک نامعین (۲۵) پایدار- $\mathcal{D}$ است اگر ماتریس سیستم حلقه بسته نامی $\hat{A}_{cli}$ برای تمام $i = 1, \ldots, \bar{N}$ پایدار- $\hat{\mathcal{D}}$ باشد با ماتریس متقارن مشترک X به‌طوری‌که؛

$$M_{\hat{\mathcal{D}}}(\hat{A}_{cli}, X) < 0,\ \ X > 0 \tag{۲۹}$$

برای مقدار به‌اندازه کافی بزرگ پارامتر γ که رابطه زیر را ارضا نماید:

$$(MM^T)\otimes(\mathbf{\Delta\Delta}^T) < I\otimes\left(\gamma X - X^2\right) \tag{۳۰}$$

اثبات: محاسبه تابع ماتریسی $M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X)$ برای سیستم LPV پلی‌تاپیک نامعین (۲۵)، نتیجه می‌دهد:

$$\begin{aligned} M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X) &= L\otimes X + M\otimes\left(\sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\hat{A}_{cli} + \mathbf{\Delta}\right)X \\ &\quad + M^T\otimes X^T\left(\sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\hat{A}_{cli} + \mathbf{\Delta}\right)^T \end{aligned} \tag{۳۱}$$

با استفاده از خواص ضرب رونکر و رابطه $\sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i = 1$، معادله (۳۱) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X) &= \sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\left\{M\otimes\hat{A}_{cli}X + M^T\otimes(\hat{A}_{cli}X)^T\right\} \\ &\quad + L\otimes X + M\otimes\mathbf{\Delta}X + M^T\otimes\left(\mathbf{\Delta}X\right)^T \\ &= \sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\left\{M_{\mathcal{D}}(\hat{A}_{cli}, X)\right\} + M\otimes\mathbf{\Delta}X \\ &\quad + M^T\otimes\left(\mathbf{\Delta}X\right)^T \end{aligned} \tag{۳۲}$$

به‌راحتی می‌توان دریافت که؛

$$M_{\hat{\mathcal{D}}}(\hat{A}_{cli}, X) = M_{\mathcal{D}}(\hat{A}_{cli}, X) + \gamma I\otimes X \tag{۳۳}$$

با جایگذاری معادله (۳۳) در معادله (۳۲)، و رابطه $M^T\otimes\left(\mathbf{\Delta}X\right)^T = (M\otimes\mathbf{\Delta}X)^T$ که از خواص ضرب رونکر است، رابطه زیر نتیجه خواهد شد:

$$\begin{aligned} M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X) &= \sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\left\{M_{\hat{\mathcal{D}}}(\hat{A}_{cli}, X)\right\} \\ &\quad - \gamma I\otimes X + M\otimes\mathbf{\Delta}X + (M\otimes\mathbf{\Delta}X)^T \end{aligned} \tag{۳۴}$$

با انجام چند عملیات جبر ماتریسی و خواص ضرب رونکر، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X) &= \sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\left\{M_{\hat{\mathcal{D}}}(\hat{A}_{cli}, X)\right\} - \gamma I\otimes X \\ &\quad + (M\otimes\mathbf{\Delta})(I\otimes X) + (I\otimes X)^T(M\otimes\mathbf{\Delta})^T \\ &\le \sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\left\{M_{\hat{\mathcal{D}}}(\hat{A}_{cli}, X)\right\} - \gamma I\otimes X + \\ &\quad + (M\otimes\mathbf{\Delta})(M\otimes\mathbf{\Delta})^T + (I\otimes X)^T(I\otimes X) \end{aligned} \tag{۳۵}$$

در این رابطه، دو جمله آخر مثبت معین هستند و جمله $I\otimes X$ نیز مثبت معین است چون $X > 0$، بنابراین می‌توان با انتخاب γ به‌اندازه کافی بزرگ کاری کرد که هر سه جمله انتهایی معادله (۳۵) روی‌هم‌رفته منفی شود، یعنی؛

$$\begin{aligned} -\gamma I\otimes X &+ (M\otimes\mathbf{\Delta})(M\otimes\mathbf{\Delta})^T \\ &+ (I\otimes X)^T(I\otimes X) < 0 \end{aligned} \tag{۳۶}$$

و یا

$$\begin{aligned} (M\otimes\mathbf{\Delta})(M\otimes\mathbf{\Delta})^T &= (MM^T)\otimes(\mathbf{\Delta\Delta}^T) \\ &< \gamma I\otimes X - I\otimes X^2 \\ &= I\otimes\left(\gamma X - X^2\right) \end{aligned} \tag{۳۷}$$

که این معادل همان شرط (۳۰) می‌باشد. این شرط به همراه رابطه (۳۵) نتیجه می‌دهد که؛

$$M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X) < \sum_{i=1}^{\bar{N}}\alpha_i\left\{M_{\hat{\mathcal{D}}}(\hat{A}_{cli}, X)\right\} < 0 \tag{۳۸}$$

یعنی پایداری-$\mathcal{D}$ سیستم (۲۵) نتیجه شده است. با توجه به قضیه ۲، مسئله موردنظر را می‌توان چنین بازتعریف نمود: یافتن $X > 0$ و یک کنترل‌کننده $K(s)$، تعریف شده در (۲۰)، به‌طوری‌که نامعادله (۲۹) در عوض نامعادله $M_{\mathcal{D}}(A_{cl}, X) < 0$ ارضا شود. مسئله (۲۹)، یا معادل آن مسئله (۳۳)، یک مسئله معمولی جایابی قطب است که پاسخ آن را می‌توان از مرجع [۴۰] دنبال نمود. با یک تغییر متغیر در پارامترهای کنترل‌کننده، می‌توان مسئله را به مجموعه‌ای از LMIها تبدیل نمود.

با تقسیم‌بندی X و معکوس آن به‌صورت زیر:

$$X = \begin{bmatrix} R & T \\ T^T & U \end{bmatrix},\ X^{-1} = \begin{bmatrix} S & N \\ N^T & V \end{bmatrix} \tag{۳۹}$$

پارامترهای جدید کنترل‌کننده به‌صورت زیر خواهند شد:

$$\begin{aligned} \hat{A}_k &= NA_kT^T + NB_k\hat{C}_iR + S\hat{B}_iC_kT^T \\ &\quad + S(\hat{A}_i + \hat{B}_iD_k\hat{C}_i)R \\ \hat{B}_k &= NB_k + S\hat{B}_iD_k \\ \hat{C}_k &= C_kT^T + D_k\hat{C}_iR \\ \hat{D}_k &= D_k \end{aligned} \tag{۴۰}$$

توجه داشته باشید که در سیستم موردنظر در این مقاله، $\hat{D}_i = 0$ برای تمام $i = 1, \ldots, \bar{N}$، و بنابراین $\hat{D}_k = D_k = 0$ خواهد شد. اگر ماتریس‌های T و N دارای رتبه کامل سطری باشند (هنگامی‌که درجه کنترل‌کننده با درجه سیستم برابر است)، آن‌گاه پارامترهای اولیه کنترل‌کننده یعنی (A_k, B_k, C_k) همواره از دستگاه معادلات (۴۰)

قابل محاسبه هستند. بعلاوه، اگر ماتریس‌های T و N به‌صورت مربعی و نامنفرد انتخاب شوند، در این صورت پارامترهای کنترل‌کننده به‌صورت منحصربه‌فرد برای هر رأس مشخص خواهند شد. نکته چالش‌برانگیز این بحث، منحصربه‌فرد بودن پاسخ در تمام رئوس می‌باشد. مشکلی برای یافتن B_k و C_k وجود ندارد زیرا مطابق با معادلات (۴۰)، ازآنجاکه $D_k=0$ می‌باشد، آن‌ها هیچ وابستگی به پارامترهای رئوس ندارند و بنابراین برای تمامی رئوس پاسخ واحدی برای B_k و C_k به دست می‌آید. اما محاسبه A_k بستگی به پارامترهای رئوس دارد و بنابراین در هر رأس، مقدار متفاوتی خواهد داشت. علی‌رغم پاسخ‌های متفاوت، به علت وجود محدودیت ناحیه LMI، می‌توان گفت که قطب‌های سیستم حلقه بسته هر رأس و در نتیجه کل سیستم مجبورند که در ناحیه تعریف شده LMI قرار گیرند. به‌عبارت‌دیگر، هرچند پاسخ A_k در هر رأس متفاوت است اما برای قرار گرفتن قطب‌های حلقه بسته در ناحیه تعریف شده تضمین وجود دارد. بنابراین ماتریس A_k را می‌توان از معادلات (۴۰) و در هر رأس دلخواه محاسبه کرد. اما در این مقاله برای آن‌که بهترین پاسخ از نظر کم‌ترین خطا در مقایسه با دیگر پاسخ‌ها به دست آید، پیشنهاد می‌شود متوسط پاسخ‌ها مورد استفاده قرار گیرد، یعنی؛ استفاده از $\bar{A}=\frac{1}{\bar{N}}\sum_{i=1}^{\bar{N}}\hat{A}_i$، $\bar{B}=\frac{1}{\bar{N}}\sum_{i=1}^{\bar{N}}\hat{B}_i$، و $\bar{C}=\frac{1}{\bar{N}}\sum_{i=1}^{\bar{N}}\hat{C}_i$ به ترتیب به‌جای $\hat{A}_i$، $\hat{B}_i$ و $\hat{C}_i$ در دستگاه معادلات (۴۰). بنابراین در نهایت می‌توان مسئله طراحی کنترل‌کننده نهایی را چنین بیان کرد:

قدم اول: ماتریس های $R=R^T$، $S=S^T$، و $(\hat{A}_k,\hat{B}_k,\hat{C}_k)$ را چنان بیابید که LMIهای زیر برای $i=1,...,\bar{N}$ ارضا شوند:

$$\begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} > 0 \tag{۴۱}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\Phi}_i \sin\frac{\alpha}{2} + \gamma\begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} & \underline{\Phi}_i \cos\frac{\alpha}{2} \\ -\underline{\Phi}_i \cos\frac{\alpha}{2} & \bar{\Phi}_i \sin\frac{\alpha}{2} + \gamma\begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} \end{bmatrix} < 0 \tag{۴۲}$$

که؛

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_i &:= \Phi_i + \Phi_i^T \\ \underline{\Phi}_i &:= \Phi_i - \Phi_i^T \\ \Phi_i &:= \begin{bmatrix} \hat{A}_i R + B_i \hat{C}_k & \hat{A}_i \\ \hat{A}_k & S\hat{A}_i + \hat{B}_k \hat{C}_i \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{۴۳}$$

قدم دوم: حل دستگاه معادلات زیر برای محاسبه ماتریس‌های (A_k,B_k,C_k) که قبلاً به‌عنوان پارامترهای کنترل‌کننده نام برده شده است:

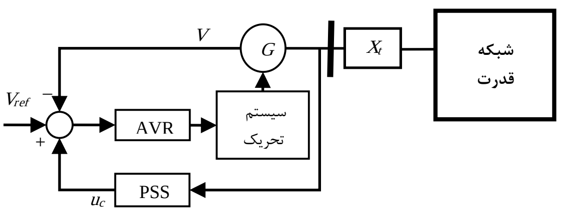
$$\begin{aligned} \hat{A}_k &= NA_kT^T + NB_k\bar{C}R + S\bar{B}C_kT^T \\ &\quad + S(\bar{A} + \bar{B}D_k\bar{C})R \\ \hat{B}_k &= NB_k + S\bar{B}D_k \\ \hat{C}_k &= C_kT^T + D_k\bar{C}R \\ \hat{D}_k &= D_k \end{aligned} \tag{۴۴}$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش دو سیستم نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا روش پیشنهادی بروی یک سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت پیاده سازی می شود و نتایج حاصله با یک پایدار ساز مرسوم استاندارد دارای تنظیم مناسب و نیز روش پیشنهاد شده در [۳۷] مقایسه می‌گردد. سپس کنترل‌کننده به‌دست‌آمده، بروی یک سیستم قدرت چندماشینه شبیه‌سازی شده و نتایج ارائه می‌شود.

۴-۱- سیستم قدرت ساده‌شده

در این قسمت، یک سیستم قدرت ساده شده شامل یک ژنراتور که به شین بی‌نهایت متصل شده است در نظر گرفته می شود. این سیستم نمونه، مدل ساده‌شده یک سیستم قدرت 612MVA است که از مرجع [۴۱] گرفته شده و همچنین در مرجع [۳۷] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم مجهز به یک سیستم تحریک استاندارد EXST3 و یک PSS استاندارد از نوع IEEEST می‌باشد که در آن، پارامترهای پایدار ساز مرسوم (شامل صافی و بلوک‌های کنترلی جبران‌کننده فاز) براساس روش و نتایج ارائه شده در [۴۱] تنظیم شده‌اند. شبیه سازی این سیستم با استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت صورت گرفته است. هدف، طراحی کنترل پیشنهادی جهت کنترل میرایی نوسانات سیستم تحت بلوک PSS نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱: یک سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شبکه قدرت به همراه AVR و PSS

بنابراین u_c خروجی کنترل‌کننده، و معمولاً ω سرعت ژنراتور (و یا در این مقاله توان تولیدی) به ترتیب به‌عنوان ورودی و خروجی سیستم تحت مطالعه جهت مدل سازی LPV در نظر گرفته می شوند. متغیرهای حالت ژنراتور عبارتند از: شار الکتریکی تحریک، شار سیم‌بندی میراگر-D، شار سیم‌بندی میراگر-Q، سرعت روتور ω برحسب p.u. و زاویه موقعیت روتور δ بر حسب رادیان.

برای تولید مدل LPV می‌توان شرایط مختلف سیستم قدرت را منظور نمود از جمله رخدادها یا تغییرات پاره‌ترهایی مانند بار، تولید،

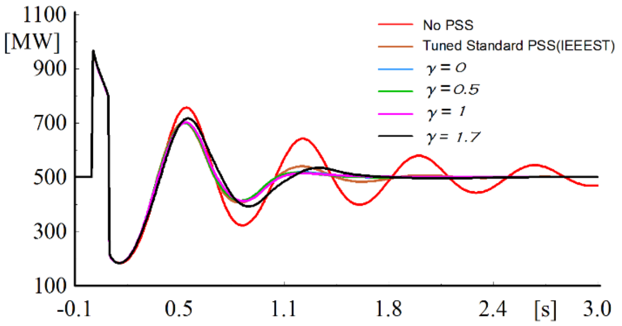
و... که در این مقاله، برای ساخت یک مدل اولیه LPV، از پاسخ سیستم بدون PSS بعد از یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در سمت شین اصلی ژنراتور (در لحظه ۰ ثانیه و با زمان رفع ۱۰۰ میلی ثانیه) استفاده می شود. در نقطه کار نامی حالت ماندگار، مشابه حالت شرایط مبنای مرجع [۴۱]، فرض می شود که سیستم دارای شرایط بار ۵۰۰MW و ۰/۰MVAR باشد. خطی‌سازی در طول زمان ۱۰ ثانیه پس از وقوع خطا در نقاط کاری گذرا به فواصل زمانی ۳۰۰ میلی ثانیه (نرخ نمونه‌برداری ۳/۳۳Hz) صورت می‌پذیرد. پارامترهای مدل LPV به فرم معادله (۲) تولید شده و سپس داده‌های آن در ماتریس Ξ شکل‌دهی می‌شود. بعد از نرمالیزه کردن، الگوریتم PCA روی آن پیاده شده و نهایتاً مشابه با مرجع [۳۷] مدل پلی‌تاپیک کاهش‌یافته با تعداد رئوس 2^3 به دست خواهد آمد.

اکنون می‌توان کنترل‌کننده پیشنهادی را برای مدل پلی تاپیک کاهش یافته طراحی نمود. هدف، طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم جهت بهبود ضریب میرایی، ζ، مودهای نوسانی سیستم به ۱۵ درصد می‌باشد، یعنی انتخاب ناحیه LMI به‌صورت قطاع مخروطی با زاویه داخلی $2\cos^{-1}(0.15)$ که رأس آن در مبدأ قرار دارد. درجه کنترل‌کننده برابر با درجه سیستم انتخاب می‌شود و LMIهای (۴۱) و (۴۲) ابتدا برای $\gamma =$ ۰ حل می شوند و سپس به‌تدریج γ افزایش پیدا می‌کند تا جایی که LMIها دارای پاسخ همگرا نداشته باشند؛ مقدار بهینه $\gamma =$ ۱/۷ نتیجه خواهد شد. بعد از هر مرحله حل مسائل LMI، پارامترهای کنترل‌کننده از حل دستگاه معادلات (۴۴) به دست خواهند آمد.

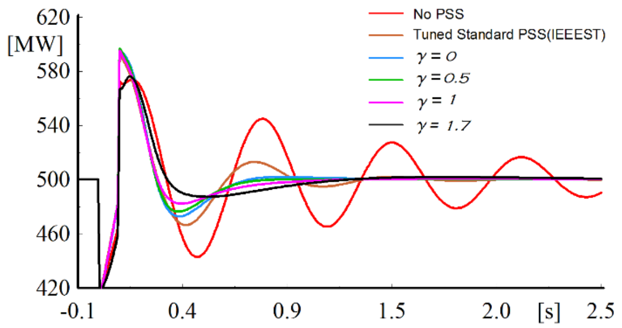
نکته قابل توجه در مقایسه روش پیشنهاد شده در این مقاله با روش ارائه شده در مرجع [۳۷] این است که کنترل‌کننده به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی در حالت $\gamma =$ ۰ همان کنترل‌کننده پیشنهادی مرجع [۳۷]، می‌با شد که حالت بدون نامعینی در رئوس در طراحی آن فرض شده است. به‌عبارت‌دیگر کنترل‌کننده پیشنهادی مرجع [۳۷] حالت خاصی از کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله است که در طراحی آن، رئوس مدل پلی‌تاپیک سیستم بدون نامعینی فرض شده است.

کنترل‌کننده پیشنهادی به ازای مقادیر ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۷ برای پارامتر γ طراحی شده و به سیستم قدرت موردنظر اعمال می شود و پاسخ آن‌ها با یکدیگر و همچنین با پاسخ‌های PSS مرسوم و تنظیم شده توسط [۴۱]، حالت بدون PSS، و پاسخ کنترل‌کننده پیشنهادی مرجع [۳۷] (که مشابه همان حالت $\gamma =$ ۰ می‌باشد)، مقایسه می‌شود. برای تمام کنترل‌کننده‌ها از محدودکننده، مشابه آنچه در مرجع [۴۱] به کار رفته، استفاده شده است. پس از انجام شبیه سازی‌ها در حوزه زمان و با استفاده از نرم‌افزار دیگ سایلنت، شکل ۲ پاسخ ژنراتور (توان اکتیو) را بعد از خطای سه‌فاز که در لحظه ۰ ثانیه رخ داده و در لحظه ۰/۱ ثانیه خودبخود برطرف می‌شود، نشان می‌دهد. در این شکل به نظر می‌رسد که بهبود اندکی در پاسخ کنترل‌های پیشنهادی نسبت به مرسوم حاصل شده باشد چرا که تنظیم پایدارساز مرسوم که در مرجع [۴۱] پیشنهاد شده، براساس شرایط نقطه کاری مبنا (بار ۵۰۰MW و ۰/۰MVAR) به‌دست‌آمده است و به‌طور طبیعی، پایدارساز مرسوم عملکرد خوبی را در این شرایط خواهد داشت. اما نکته مهم مقاوم بودن پاسخ می‌باشد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

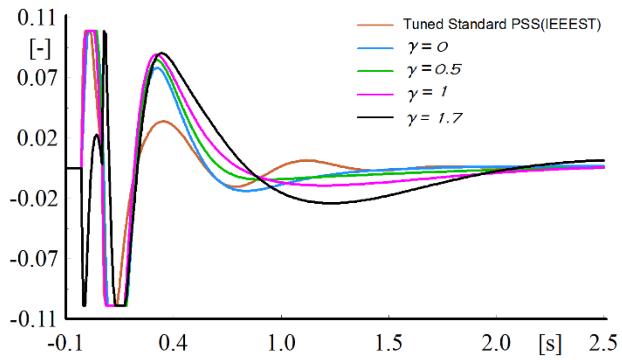
برای بررسی مقاوم بودن کنترل‌کننده پیشنهادی، یک رخداد غیرمتقارن در شرایط اولیه متفاوت شبیه سازی می شود. در این حالت، مقدار تولید ۵۰۰MW و ۱۸۰MVAR- در نظر گرفته می شود و فاز "a" شین بی‌نهایت در لحظه ۰ ثانیه باز شده و در لحظه ۰/۱ ثانیه بسته می‌شود. شکل ۳ پاسخ ژنراتور (توان اکتیو) را در این حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل پیداست، پاسخ کنترل‌کننده پیشنهادی از رفتار مقاوم‌تری در برابر اختلالات و تغییرات وارد شده برخوردار است.



شکل ۲: تغییرات توان اکتیو ژنراتور بعد از یک خطای سه‌فاز در شرایط بهره‌برداری مبنا



شکل ۳: تغییرات توان بعد از بازشدن فاز a در شرایط متفاوت



شکل ۴: خروجی کنترل‌کننده بعد از بازشدن فاز a در شرایط متفاوت

برای مقایسه بیش‌تر، رفتار سیگنال کنترل نیز در شکل ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل وجود محدودکننده تمامی سیگنال‌های کنترل در محدوده قابل قبول قرار دارند و نوسانات سیستم با حضور کنترل پیشنهادی، میرایی مناسب و مقاوم‌تری به خود گرفته است.

۲-۴- سیستم قدرت چندماشینه ۳۹ شینه

در این بخش یک سیستم قدرت چندماشینه جهت بررسی کارایی کنترل پیشنهادی انتخاب شده است. این سیستم از تعداد ۳۹ شین، ۱۰ ژنراتور، ۱۹ بار، ۳۴ خط و ۱۲ ترانسفورماتور تشکیل شده است. شکل ۵ دیاگرام تک خطی آن را نشان می‌دهد. این سیستم، مدل ساده شده سیستم انتقال منطقه نیوانگلند واقع در شمال شرق آمریکا می‌باشد و از مرجع [۴۲] اقتباس شده است البته یک تغییر کوچک در آن داده شده تا بتوان کنترل پیشنهادی را در شرایطی یکسان با نتایج مقالات [۳۷ و ۴۱] مقایسه نمود. ژنراتور G08 با یک ژنراتور ۶۱۲MVA که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته است، جایگزین می‌شود. همچنین سیستم تحریک نوع EXST3 برای این ژنراتور در نظر گرفته می‌شود. کنترل‌کننده پیشنهادی در حالت $\gamma = ۱/۷$ (کنترل مقاوم)، حالت $\gamma = ۰$ (معادل با کنترل پیشنهادی [۳۷]) و PSS مرسوم با تنظیم استاندارد، همگی به‌طور جداگانه روی این ژنراتور توسط نرم‌افزار دیگسایلنت پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده‌اند. در این زمینه فرض می‌شود بقیه ژنراتورها فاقد PSS باشند. سیستم قدرت موردنظر، تحت رخدادهای زیر قرار می‌گیرد.

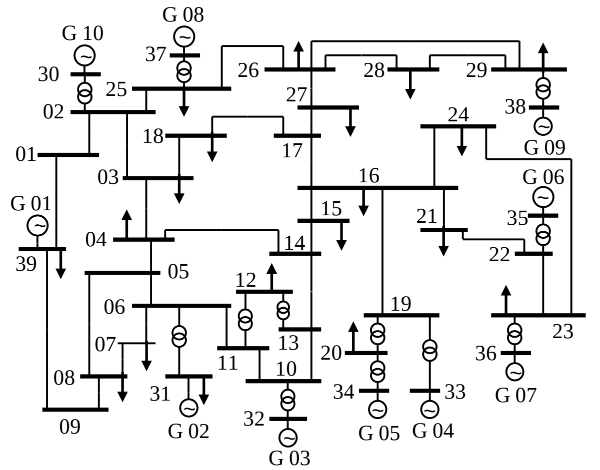
۱) شرایط اولیه تولید G08 برابر با ۵۴۰MW و ۱۹MVAR- در نظر گرفته می‌شود و یک خطای سه‌فاز در لحظه ۰ ثانیه روی شین۱۷ رخ می‌دهد و در پی آن خروج خطوط متصل به این شینه در لحظه ۰/۱۶۷ ثانیه صورت می‌پذیرد.

۲) شرایط تولید G08 برابر با ۵۰۰MW و ۱۰۷MVAR- در نظر گرفته می‌شود و یک خطای سه‌فاز در لحظه ۰ ثانیه روی خط ۲۵-۰۲ در نزدیکی شین ۲۵ رخ می‌دهد که در نتیجه، خروج خط در لحظه ۰/۱۴۸ ثانیه انجام می‌پذیرد.

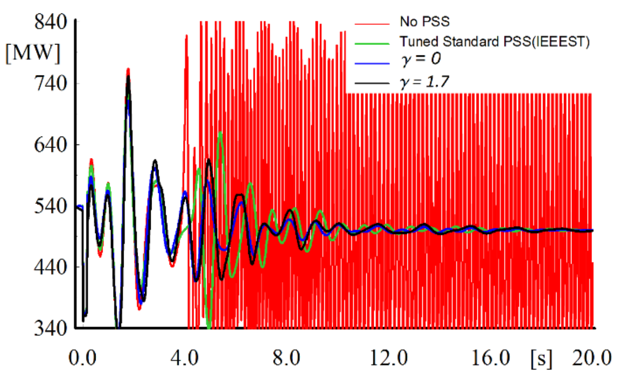
در این بررسی‌ها، توان تولیدی ژنراتور G08 به‌عنوان پاسخ سیستم مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۶ و ۷ پاسخ سیستم به رخدادهای فوق به ازای کنترل‌کننده‌های مختلف و همچنین حالت بدون PSS ارائه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در شبیه سازی رخداد اول، کلیه کنترل‌کننده‌ها موجب پایداری سیستم شده‌اند و البته کنترل‌کننده‌ای که در مرجع [۳۷] ارائه شده است (و با $\gamma = ۰$ و رنگ آبی مشخص شده)، موجب رفتاری نزدیک به کنترل‌کننده مقاوم پیشنهادی در این مقاله شده است (که با $\gamma = ۱/۷$ و رنگ مشکی مشخص می‌باشد). از طرفی هردو حالت $\gamma = ۰$ و $\gamma = ۱/۷$ از پایدارساز مرسوم با تنظیم پیشنهاد شده در مرجع [۴۱] (PSS استاندارد، مشخص شده با رنگ سبز) بهتر موجب میرایی نوسانات شده‌اند و سیستم فقط در حالت بدون PSS (معین شده با رنگ قرمز) دچار ناپایداری شده است.

این در حالی است که با توجه به شکل ۷، اختلالات وارده در رخداد دوم در عین این‌که موجب ناپایداری کنترل‌کننده‌های مختلف شده اما نتواسته است کنترل‌کننده مقاوم پیشنهادی در این مقاله (حالت $\gamma = ۱/۷$ مشخص شده با رنگ مشکی) را دچار ناپایداری نماید و این نشان دهنده مقاوم‌تر بودن کنترل پیشنهادی در این مقاله به‌ویژه نسبت به مراجع [۳۷ و ۴۱] است، هرچند ممکن است میرایی نوسانات در این حالت، چندان مطلوب به نظر نرسد. به‌منظور بررسی اثر کنترل پیشنهادی بر مقادیر ویژه سیستم، نتایج تحلیل مودال[۱۹] در شکل ۸ نشان داده شده است. این تحلیل در لحظه ۲ ثانیه پس از رخداد دوم صورت گرفته و نشان می‌دهد در حالت کنترل پیشنهادی، کلیه مقادیر ویژه سیستم پایدار می‌باشند اما در سایر حالات، سیستم قدرت دارای قطب ناپایدار می‌باشد.

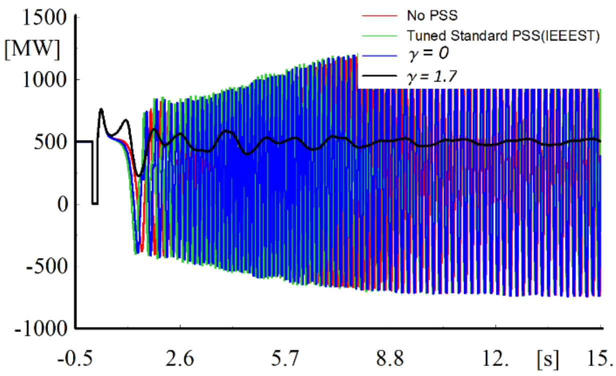
لازم به ذکر است که شبیه سازی کنترل‌کننده‌های اشاره شده در حالات متعددی از شرایط سیستم نیز صورت پذیرفته است اما به دلیل مشابهت اکثر موارد، برای جلوگیری از افزایش تعداد شکل‌ها، از نمایش بسیاری از نتایج و شکل‌های به‌دست‌آمده، صرف‌نظر شده است.



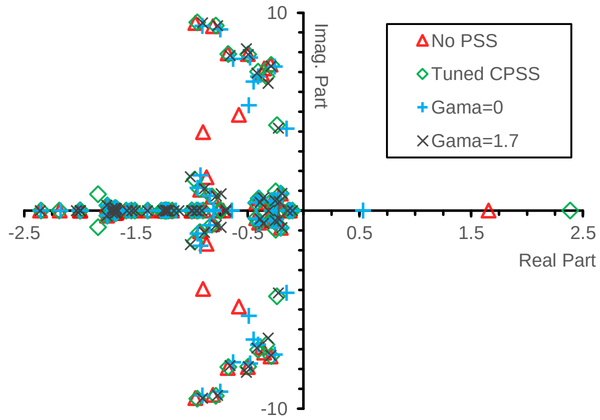
شکل۵: دیاگرام سیستم قدرت ۳۹-شینه



شکل ۶: تغییرات توان اکتیو ژنراتور G08 با شرایط تولید ۵۴۰MW و ۱۹MVAR- و خطای سه‌فاز روی باس۱۷ و خروج خطوط آن در لحظه ۰/۱۶۷ ثانیه.



شکل ۷: تغییرات توان اکتیو ژنراتور G08 با شرایط تولید ۵۰۰MW و ۱۰۷MVAR- و خطای سه‌فاز روی خط ۲۵-۰۲ و خروج خط در لحظه ۰/۱۴۸ ثانیه.



شکل ۸: موقعیت مقادیر ویژه سیستم قدرت چندماشینه درحالات کنترلی مختلف در لحظه ۲ ثانیه پس از رخداد دوم

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی کنترل‌کننده فیدبک خروجی مقاوم جهت PSS در سیستم‌های قدرت، براساس مدل سازی LPV و استخراج یک مدل پلی‌تاپیک کاهش یافته همراه با نامعینی در رئوس، ارائه شـــده است. در نظر گرفتن نامعینی برای رئوس پلی‌تاپیک پیشنهادی و ارائه یک شـرط کافی برای پایداری مقاوم، سـبب شـده اسـت که کنترل پیشـنهادی نسـبت روش‌های پیشـین مقاوم‌تر شـود و این به عینه در شبیه‌سازی سیستم قدرت ۳۹-شینه مشاهده شد؛ به‌طوری‌که برای یک خطای نمونه، روش های پیشـــین همچون حالت بدون PSS دچار ناپایداری می‌شـدند درحالی‌که روش پیشـنهادی دچار ناپایداری نشـده است. از روش پیشنهادی برای پیاده سازی برخط نیز می‌توان استفاده نمود، زیرا هرچند تعداد LMIها با افزایش تعداد رئوس بالا می‌رود، اما ازآنجاکه محاســبات طراحی کنترل‌کننده براســاس اطلاعات قبلی (شبیه سازی یا نمونه‌های عملی) و به صورت برون‌خط انجام می شود تأثیری بر تأخیر در فرمان سیگنال کنترل ندارد. یکی دیگر از مزیت‌های کنترل پیشنهادی این است که چون طراحی کنترل‌کننده براساس حل مجموعه‌ای از LMIها صـورت می‌گیرد، اضـافه کردن شـرایط جدید، به‌ســادگی قابل انجام اســت، به‌این‌ترتیب که بر اثر مرور زمان و وقوع خطاهای پیش‌بینی نشـــده جدید، می‌توان اطلاعات آن را ذخیره و به‌صـورت افزایش رئوس جدید برای مدل پلی‌تاپیک قبلی آن‌ها را تأثیر داد تا کنترل‌کننده قوی‌تری حاصل آید.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری و نظرات ارزشمند داوران محترم و اعضای محترم هیئت تحریریه مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

[۱] سعید تیمورزاده، فرخ امینی‌فر و مجید صنایع پسند، «میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای: طرح گسترده هماهنگی حذف بار و تولید مبتنی بر منطق Fuzzy » مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره۱، سال ۱۳۹۶.

[۲] عادل اکبری مجد، حسین شایقی، حمید محمدنژاد و عبداله یونسی، «کنترل کننده مقاوم تطبیقی بار فرکانس مبتنی بر یادگیری تقویتی برای یک سیستم قدرت به هم پیوسته شامل SMES»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، سال ۱۳۹۶.

[3] M. Marzband, S. S. Ghazimirsaeid, H. Uppal, and T. Fernando, “A real-time evaluation of energy management systems for smart hybrid home Microgrids,” Electr. Power Syst. Res., vol. 143, pp. 624–633, Feb. 2017.

[4] M. Marzband, M. M. Moghaddam, M. F. Akorede, and G. Khomeyrani, “Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids,” Electr. Power Syst. Res., vol. 140, pp. 78–86, Nov. 2016.

[5] M. Marzband, R. R. Ardeshiri, M. Moafi, and H. Uppal, “Distributed generation for economic benefit maximization through coalition formation-based game theory concept,” Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 27, no. 6, e2313, 2017.

[6] M. Marzband, M. Javadi, J. L. Domínguez-García, and M. Mirhosseini Moghaddam, “Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 10, no. 12, pp. 2999–3009, Sep. 2016.

[7] M. Marzband, F. Azarinejadian, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, “An optimal energy management system for islanded microgrids based on multiperiod artificial bee colony combined with markov chain,” IEEE Syst. J., vol. 100, no. 99, pp. 1–11, 2015.

[8] F. Amato, F. Garofalo, L. Glielmo, and A. Pironti, “Robust and Quadratic Stability Via Polytopic Set,” Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 5, no. 8, pp. 745–756, 1995.

[9] G. Cai, C. Hu, B. Yin, H. He, and X. Han, “Gain-Scheduled $\mathcal{H}$ 2 Controller Synthesis for Continuous-Time Polytopic LPV Systems,” Math. Probl. Eng., vol. 2014, no. 2014, pp. 1–14, 2014.

[10] C. C. Ku and C. I. Wu, “Gain-scheduled H∞ control for linear parameter varying stochastic systems,” ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 137, no. 11, pp. 1–12, 2015.

[11] A. Hajiloo and W. F. Xie, “The Stochastic Robust Model

Predictive Control of Shimmy Vibration in Aircraft Landing Gears," Asian J. Control, vol. 17, no. 2, pp. 476–485, Mar. 2015.

[12] R. H. Ordóñez-Hurtado and M. A. Duarte-Mermoud, "Finding common quadratic Lyapunov functions for switched linear systems using particle swarm optimisation," Int. J. Control, vol. 85, no. 1, pp. 12–25, 2012.

[13] Y. Tong, L. Zhang, P. Shi, and C. Wang, "A common linear copositive Lyapunov function for switched positive linear systems with commutable subsystems," Int. J. Syst. Sci., vol. 44, no. 11, pp. 1994–2003, 2013.

[14] W. Xiang and J. Xiao, "Finite-time stability and stabilisation for switched linear systems," Int. J. Syst. Sci., pp. 1–17, 2011.

[15] B. P. Rasmussen and Y. J. Chang, "Stable controller interpolation and controller switching for LPV systems," ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 132, no. 1, pp. 1–12, 2009.

[16] S. D. Ramos, A. C. J. Domingos, and E. Vazquez Silva, "An algorithm to verify asymptotic stability conditions of a certain family of systems of differential dquations," Appl. Math. Sci., vol. 8, no. 31, pp. 1509–1520, 2014.

[17] H. Lin and P. J. Antsaklis, "Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 54, no. 2, pp. 308–322, 2009.

[18] J. Xiong, J. Lam, Z. Shu, and X. Mao, "Stability Analysis of Continuous-Time Switched Systems With a Random Switching Signal," IEEE Trans. Autom. Contr., vol. 59, no. 1, pp. 180–186, 2014.

[19] Z. She and B. Xue, "Discovering multiple Lyapunov functions for switched hybrid systems," SIAM J. Control Optim., vol. 52, no. 5, pp. 3312–3340, 2014.

[20] W. a. De Souza, M. C. M. Teixeira, M. P. a Santim, R. Cardim, and E. Assunção, "On switched control design of linear time-invariant systems with polytopic uncertainties," Math. Probl. Eng., vol. 2013, 2013.

[21] C. Hoffmann and H. Werner, "A Survey of Linear Parameter-Varying Control Applications Validated by Experiments or High-Fidelity Simulations," IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2014.

[22] J. S. Shamma, "An overview of LPV systems," in Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications, J. Mohammadpour and C. W. Scherer, Eds. Springer US, pp. 3–26, 2012.

[23] C. Hoffmann and H. Werner, "LFT-LPV modeling and control of a Control Moment Gyroscope," in 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 5328–5333, 2015.

[24] F. R. López-Estrada, J.-C. Ponsart, D. Theilliol, Y. Zhang, and C.-M. Astorga-Zaragoza, "LPV Model-Based Tracking Control and Robust Sensor Fault Diagnosis for a Quadrotor UAV," J. Intell. Robot. Syst., vol. 84, no. 1–4, pp. 163–177, Nov. 2016.

[25] F. Blanchini, D. Casagrande, S. Miani, and U. Viaro, "Robust linear parameter-varying control of induction motors," Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 25, no. 12, pp. 1783–1800, Aug. 2015.

[26] Y. Huang, C. Sun, and C. Qian, "Linear Parameter Varying Switching Attitude Tracking Control for a Near Space Hypersonic Vehicle Via Multiple Lyapunov Functions," Asian J. Control, vol. 17, no. 2, pp. 523–534, Mar. 2015.

[27] C. Hoffmann, S. M. Hashemi, H. S. Abbas, and H. Werner, "Benchmark problem - nonlinear control of a 3-DOF robotic manipulator," in 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 5534–5539, 2013.

[28] W. J. Rugh and J. S. Shamma, "Research on gain scheduling," Automatica, vol. 36, no. 10, pp. 1401–1425, 2000.

[29] W. Xie, "Multi-objective H2/L2 performance controller synthesis for LPV systems," Asian J. Control, vol. 14, no. 5, pp. 1273–1281, Sep. 2012.

[30] B. Pal and B. Chaudhuri, Robust Control in Power Systems. London, UK: Springer, 2005.

[31] R. A. Jabr, B. C. Pal, and N. Martins, "A Sequential Conic Programming Approach for the Coordinated and Robust Design of Power System Stabilizers," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 3, pp. 1627–1637, 2010.

[32] M. Soliman, a. L. Elshafei, F. Bendary, and W. Mansour, "Robust decentralized PID-based power system stabilizer design using an ILMI approach," Electr. Power Syst. Res., vol. 80, no. 12, pp. 1488–1497, 2010.

[33] A. Pal, J. S. Thorp, S. S. Veda, and V. A. Centeno, "Applying a robust control technique to damp low frequency oscillations in the WECC," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 44, no. 1, pp. 638–645, 2013.

[34] H. M. Soliman, M. H. Soliman, and M. F. Hassan, "Resilient guaranteed cost control of a power system," J. Adv. Res., vol. 5, no. 3, pp. 377–385, 2014.

[35] R. Bos, X. Bombois, and P. M. J. Van den Hof, "Accelerating simulations of computationally intensive first principle models using accurate quasi-linear parameter varying models," J. Process Control, vol. 19, no. 10, pp. 1601–1609, 2009.

[36] A. Kwiatkowski and H. Werner, "PCA-based parameter set mappings for LPV models with fewer parameters and less overbounding," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 16, no. 4, pp. 781–788, 2008.

[37] M. B. A. Jabali and M. H. Kazemi, "A new LPV modeling approach using PCA-based parameter set mapping to design a PSS," J. Adv. Res., vol. 8, no. 1, pp. 23–32, 2017.

[38] I. T. Jolliffe, Principal Component Analysis, 2nd ed. New York: Springer, 2002.

[39] M. B. A. Jabali and M. H. Kazemi, "Uncertain Polytopic LPV Modelling of Robot Manipulators and Trajectory Tracking," Int. J. Control. Autom. Syst., vol. 15, no. 2, pp. 883-891, 2017.

[40] M. Chilali and P. Gahinet, "H∞ design with pole placement constraints: An LMI approach," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 41, no. 3, pp. 358–367, 1996.

[41] J. Shin, S. Nam, J. Lee, S. Baek, Y. Choy, and T. Kim, "A Practical Power System Stabilizer Tuning Method and its Verification in Field Test," J. Electr. Eng. Technol., vol. 5, no. 3, pp. 400–406, 2010.

[42] DIgSILENT, "39 Bus New England System." DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, 2015.

زیرنویس‌ها

۱ Linear Parameter-Varying

۲ Polytopic

۳ Parameter Set Mapping

۴ Principle Component Analysis

۵ Linear Matrix Inequality

۶ Game Theory

[۷] Predictive Control

[۸] Gain-Scheduled

[۹] Linear Fractional Transformation

[۱۰] Gridding

[۱۱] Sample Points

[۱۲] Scheduling Signal

[۱۳] Convex Hull

[۱۴] Affine

[۱۵] Singular Value Decomposition

[۱۶] Fraction of Total Variation

[۱۷] Kronecker Product

[۱۸] Uncertain Polytopic LPV System

[۱۹] Modal Analysis