

طراحی کنترل کننده میراگر بر پایه مدل شناسایی شده با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیرهای فازوری حوزه وسیع

آذین عطاردی، هیمین گل‌پیرا و حسن بیورانی

سیگنال‌های بازخورد محلی مانند انحراف سرعت ژنراتور) بهبود بخشید. در حالی که این رویکرد برای میراسازی مدهای محلی مناسب است، اما بهبود نوسانات بین ناحیه‌ای همواره از طریق به کارگیری سیگنال‌های محلی امکان‌پذیر نیست [۲]. با توسعه سیستم‌های پایش و کنترل حوزه وسیع (WAMS)، داده‌های نقاط مختلف سیستم در دسترس قرار گرفته‌اند و پایش زمان حقیقی سیستم‌های قدرت بر اساس اندازه‌گیری‌های حوزه وسیع برای تخمین حالت و حفاظت سیستم بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. سیستم اندازه‌گیری حوزه وسیع مبتنی بر سنکروفازور در شبکه‌های قدرت، رؤیت‌پذیری دینامیک‌های سیستم قدرت را به صورت چشم‌گیری افزایش می‌دهد و شرایط مناسبی را برای مشاهده، شناسایی و میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای فراهم می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که مشخصات دینامیکی مدهای نوسانی، به ویژه مدهای بین ناحیه‌ای فرکانس پایین با میرایی ضعیف، با اندازه‌گیری‌های فازوری قابل شناسایی است [۳]. مدهای ناپایدار شناسایی شده می‌توانند به صورت تطبیقی با تنظیم پارامترهای کنترلی سیستم قدرت بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده میرا شوند.

به دلیل تغییرات پیوسته در سیستم‌های قدرت پیشرفته و پیچیدگی و توسعه آنها، مدل‌سازی سیستم‌های قدرت به امری دشوار تبدیل شده است. سیستم‌های اندازه‌گیری حوزه وسیع می‌توانند در این زمینه خاص نیز راهگشا باشند. در سال‌های اخیر، روش‌های زیادی برای تخمین مدهای نوسانی سیستم با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری حوزه وسیع توسعه یافته‌اند [۴]. این روش‌ها مدل دینامیکی سیستم را با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و به دو فرم فضای حالت فرعی [۵] و تابع تبدیل [۶] شناسایی می‌کنند. در مقایسه با مدل فضای حالت فرعی، مدل تابع تبدیل چندرودی- چندخروجی کارایی محاسباتی بیشتری دارد. با داشتن مدل دینامیکی سیستم و تعیین مدهای نوسانی با میرایی ضعیف، می‌توان به سوی طراحی کنترل کننده میراساز مناسب گام برداشت. در این راستا در سال‌های اخیر، محققان تکنیک‌های کنترلی مختلفی را معرفی کرده‌اند. در [۷] یک کنترل کننده تطبیقی بر اساس الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی برای شبکه قدرت با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. با وقوع اغتشاش در سیستم، یک تابع تبدیل چندرودی- چندخروجی با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری شناسایی شده و سپس کنترل کننده طراحی شده با کنترل کننده‌های محلی منابع تجدیدپذیر ادغام شده است. در [۸] برای دستیابی به روشی سریع و برخط، مدل چندرودی- چندخروجی شناسایی شده با روش مانده به یک مدل تک‌رودی- تک‌خروجی تبدیل شده است. این مدل می‌تواند با دقت مناسبی، دینامیک‌های سیستم قدرت را به صورت تابع تبدیلی ارائه کند که دربرگیرنده رفتارهای نوسانی غالب در مد مورد نظر است.

چکیده: تغییرات مداوم و پیچیدگی سیستم‌های قدرت مدرن، باعث بروز چالش‌هایی در زمینه مدل‌سازی آنها شده است. امروزه با پیشرفت سیستم‌های پایش حوزه وسیع، داده‌های حاصل از این سیستم‌ها می‌توانند در شناسایی و تخمین مدل سیستم‌های قدرت به کار روند. این مقاله بر تنظیم پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از مدل شناسایی شده به کمک اندازه‌گیری‌های فازوری حوزه وسیع تمرکز دارد. مدل مرتبه پایین شناسایی شده بر اساس اندازه‌گیری‌ها دربرگیرنده خصوصیات دینامیکی مدهای غالب بین ناحیه‌ای بوده و می‌تواند برای طراحی کنترل کننده میراگر و ارزیابی اثربخشی آن در سیستم قدرت واقعی استفاده شود. کنترل کننده از نوع پایدارساز سیستم قدرت انتخاب شده و به دو روش مقاوم و زیگلر- نیکولز طراحی شده است. نتایج عددی، اثربخشی این رویکرد را در بهبود میرایی مد بین ناحیه‌ای سیستم دوناخیه‌ای ۴ماشینه با استفاده از داده‌های فازوری و دینامیکی به دست آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد.

کلیدواژه: سیستم‌های پایش و کنترل حوزه وسیع، کنترل کننده میراگر، مد بین ناحیه‌ای، مدل مرتبه پایین.

۱- مقدمه

امروزه دلایلی همچون بهبود قابلیت اطمینان و بهره‌وری اقتصادی، توجه بهره‌برداران را به سمت اتصال سیستم‌های قدرت و تشکیل سیستم‌های بهم‌پیوسته سوق داده است. از طرف دیگر، ارتباط و بهم‌پیوستگی سیستم‌های قدرت، باعث به وجود آمدن چالش‌هایی در کنترل و پایداری سیستم مانند بروز نوسانات بین ناحیه‌ای فرکانس پایین با میرایی ضعیف می‌شوند. این نوسانات با میرایی ضعیف به نوبه خود باعث به خطر افتادن پایداری سیگنال کوچک سیستم می‌شوند. از این رو، روش‌های متنوعی برای طراحی کنترل کننده‌های میراگر مانند پایدارساز سیستم قدرت (PSS)، ادوات FACTS و یا مکانیزم‌هایی برای عملکرد هماهنگ این دو به منظور بهبود نوسانات بین ناحیه‌ای و محلی توسعه یافته‌اند [۱].

میرایی نوسانات فرکانس پایین را می‌توان از طریق پایدارساز سیستم قدرت و با ایجاد گشتاور میراکننده اضافی با کنترل محلی (با استفاده از

این مقاله در تاریخ ۶ مهر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

آذین عطاردی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران، (email: a.atarodi@uok.ac.ir).

هیمین گل‌پیرا (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران، (email: hemin.golpira@uok.ac.ir).

حسن بیورانی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران، (email: bevrani@uok.ac.ir).

محیطی به حوزه پردازش سیگنال تصادفی مرتبط بوده و شامل روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی، روش‌های سری‌های زمانی (مدل ARMA)، تجزیه حوزه فرکانس، حداقل مربعات بازگشتی، حداقل مربعات میانگین و ... است [۲۴].

از دیگر موارد مورد بحث در زمینه کنترل حوزه وسیع، انتخاب سیگنال ورودی است که عمده‌تاً طبق روش‌های مبتنی بر شاخص‌های کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری صورت می‌گیرد. به عنوان مثال در [۲۵] سیگنال انحراف سرعت به عنوان سیگنال ورودی به کنترل‌کننده انتخاب شده است. بخشی از نتایج [۲۶] نشان می‌دهند که با توجه به میرایی و بهره کنترل‌کننده مورد نظر، اختلاف زوایای ولتاژ در مقایسه با مقدار ولتاژ و یا سرعت ژنراتور می‌تواند سیگنال‌های بازخورد کاراتری باشند.

در حالی که اکثر روش‌های شناسایی ذکر شده به اطلاعات سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم نیاز دارند، مزیت روش به کار رفته در این مقاله آن است که فرایند شناسایی سیستم نیاز به اطلاعات مربوط به ورودی اغتشاش ندارد. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی صرفاً نیازمند اطلاعات فازوری ولتاژ حالت ماندگار است. مزیت دیگر آن است که در فرایند آماده‌سازی سیگنال مناسب برای شناسایی مدل از روش ساده برازش منحنی استفاده می‌شود. مدل به دست آمده، یک مدل مرتبه پایین بوده که برای طراحی کنترل‌کننده بسیار مناسب است. در مرحله بعد، پایداری مدهای نوسانی غالب مستقیماً با استفاده از مقادیر ویژه مدل شناسایی شده بررسی می‌شود. پس از تخصیص یک مدل مرتبه پایین تقریبی به سیستم، پایدارساز سیستم قدرت به دو روش H_∞ و زیگلر- نیکولز برای میرا کردن مد بین ناحیه‌ای غالب شناسایی شده طراحی و تنظیم می‌شود.

۲- مدل‌سازی مرتبه پایین سیستم با استفاده از داده‌های فازوری

این بخش به کمک اندازه‌گیری‌های فازوری حوزه وسیع، یک روش شناسایی سیستم قدرت را معرفی می‌کند. به عبارت دیگر یک مدل مرتبه پایین- که دربرگیرنده مدهای نوسانی غالب است- که در طراحی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، به سیستم اختصاص داده می‌شود. با فرض سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت، نوسانات دینامیکی بین ناحیه‌ای می‌تواند توسط پارامترهای زاویه فاز δ و سرعت زاویه‌ای ω به صورت زیر بیان شود [۲۷]

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= f(\Delta\omega, \Delta\delta) \\ \dot{\delta} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن $\Delta\omega$ و $\Delta\delta$ اختلاف زاویه فاز و سرعت زاویه‌ای نواحی سیستم بوده و مقادیر آنها با استفاده از فازور ولتاژ به دست آمده از داده‌های PMU در دسترس است. حال چنانچه x_1 را تفاضل سرعت زاویه‌ای دو ناحیه انتخابی a و b و x_2 را تفاضل زاویه فاز دو ناحیه در نظر بگیریم، آن‌گاه خواهیم داشت

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta\omega = \omega_a - \omega_b = \dot{\delta}_a - \dot{\delta}_b \\ x_2 &= \Delta\delta = \delta_a - \delta_b - (\delta_{ae} - \delta_{be}) \end{aligned} \quad (2)$$

در (۲) زیروند e نشانگر زاویه فاز اولیه نواحی a و b در زمان $t=0$ است. با مشتق‌گیری از عبارات فوق خواهیم داشت

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{\omega}_a - \dot{\omega}_b = f(\Delta\omega, \Delta\delta) \\ &= a_1\Delta\omega + a_2\Delta\delta = a_1x_1 + a_2x_2 \\ \dot{x}_2 &= \dot{\delta}_a - \dot{\delta}_b - (\dot{\delta}_{ae} - \dot{\delta}_{be}) = a\Delta\omega = ax_1 \end{aligned} \quad (3)$$

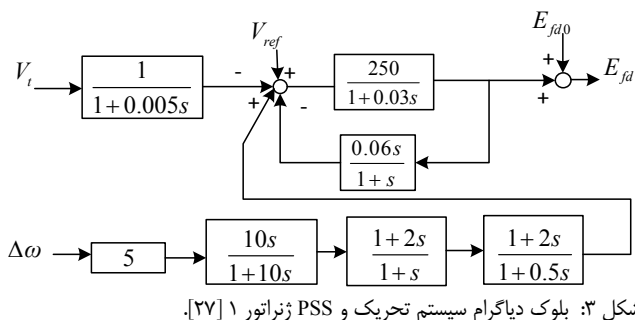
رویکردهای بسیاری برای طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر اندازه‌گیری از جمله تکنیک شناسایی مرتبه پایین به همراه روش مقاوم تنظیم PSS بر اساس الگوریتم ژنتیک [۹] و شناسایی مدل دوورودی- دوخروجی برای ژنراتور با بیشترین مشارکت در مد و طراحی کنترل‌کننده مقاوم به روش H_∞ [۱۰] بررسی شده‌اند. در [۱۱] مسئله تنظیم PSS که به عنوان یک مشکل بهینه‌سازی چندهدفه فرموله شده است، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک حل شده است. روش پیشنهادی به شبکه چندماشینه اعمال گردیده و شبیه‌سازی‌های غیر خطی برای تحلیل پایداری سیستم قدرت انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی حوزه زمانی نیز نشان می‌دهد که روش ارائه شده توانسته تا میرایی قابل قبولی را فراهم آورد. در [۱۲] با استفاده از روش حساسیت مرکب H_∞ و با دو هدف حذف اثر اغتشاش و بهینه‌سازی اثر کنترلی، کنترل‌کننده حوزه وسیع مقاوم جهت اعمال سیگنال اضافی پایدارساز به SVC برای میرا کردن نوسانات بین ناحیه‌ای طراحی شده و از روش نامعادلات ماتریسی خطی (LMI) برای حل مسئله استفاده شده است.

همچنین تکنیک‌های تطبیقی متعددی مانند کنترل تطبیقی مدل مرجع [۱۳]، کنترل خودتنظیم [۱۴]، منطبق فاز [۱۵]، کنترل عصبی- فازی [۱۶] و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند تجمیع ذرات [۱۷] در طراحی کنترل‌کننده‌های میرایی حوزه وسیع مطرح شده‌اند. در روش خودتنظیم، یک مدل ساده‌شده خطی به صورت برخط برای سیستم قدرت شناسایی می‌شود و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده بر اساس مدل شناسایی شده با استفاده از روش‌هایی مانند جایابی قطب صورت می‌گیرد. در [۱۸] فاز مانده مد بین ناحیه‌ای مورد نظر نسبت به حلقه کنترل به صورت برخط از طریق تحلیل سیگنال‌های محیطی مشخص شده و سپس کنترل‌کننده تطبیقی به کمک روش مانده‌ها تنظیم شده است.

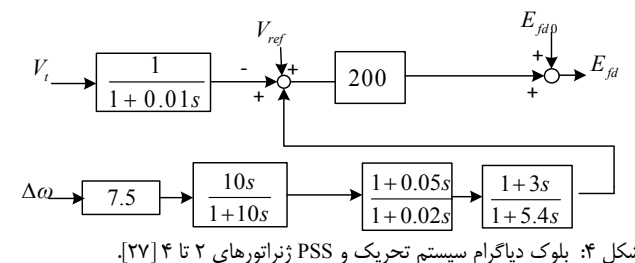
در دهه اخیر، روش‌های کنترل داده‌محور برای سیستم‌های پیچیده غیر خطی پیشنهاد شده‌اند تا مشکلات ناشی از تکنیک‌های مدل‌محور را حل کنند [۱۹] تا [۲۳]. در [۲۱] یک روش کنترل داده‌محور مجزا از مدل معرفی شده که با در نظر گرفتن اغتشاشات سیستم، میرایی سیستم را بهبود می‌بخشد. در [۲۲] کنترل حوزه وسیع مجزا از مدل و با استفاده از روش آموزش تقویتی (RL) طراحی شده است. همچنین یک روش بازخورد خروجی با استفاده از اندازه‌گیری فرکانس ژنراتورها پیشنهاد شده که در برابر تغییرات قابل توجه بار به خوبی پاسخ می‌دهد. در [۲۳] یک کنترل‌کننده برخط بازخورد حالت بهینه مبتنی بر تنظیم‌کننده خطی درجه دوم (MLQR) پیشنهاد شده که می‌تواند چندین مد بین ناحیه‌ای نامطلوب را به طور هم‌زمان با حداقل تلاش کنترلی خنثی کند. کارایی رویکرد پیشنهادی علی‌رغم نویز اندازه‌گیری، تلفات PMU و محدودیت‌های شبکه ارتباطی تأیید شده است.

بیشتر این روش‌ها علی‌رغم این که وابستگی به مدل سیستم ندارند، به اغتشاشات بزرگ برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده بستگی دارند و فرایند آموزش ممکن است با مشکل همگرایی مواجه شود. در زمینه تحلیل مد نوسانی، رویکردهای مبتنی بر تجزیه و تحلیل پاسخ خروجی سیستم پس از اغتشاش از جمله تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت- هوانگ، تجزیه و تحلیل پرونی و فیلتر کالمن پرکاربرد هستند [۲۳].

تغییرات تصادفی و پیوسته بار سیستم قدرت در شرایط عادی منبع اصلی تحریک دینامیک‌های الکترومکانیکی هستند. این محرک‌ها به نوبه‌های محیطی در سیگنال‌ها و داده‌های اندازه‌گیری شده معروف هستند. نظارت و تحلیل پایداری سیستم قدرت با استفاده از سیگنال‌های محیطی ثبت‌شده از طریق WAMS قابل انجام است. تحلیل سیگنال



شکل ۳: بلوک دیگرام سیستم تحریک و PSS ژنراتور ۱ [۲۷].



شکل ۴: بلوک دیگرام سیستم تحریک و PSS ژنراتورهای ۲ تا ۴ [۲۷].

گام ۳) محاسبه بهره K_F در راستای حداقل کردن مربعات خطا بین اختلاف فاز فیلترشده و خروجی مدل تقریبی.

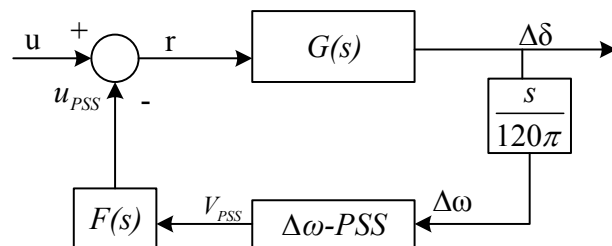
۳- شناسایی سیستم و طراحی کنترل کننده

به منظور درک بهتر رویکرد ارائه‌شده، روش پیشنهادی بر روی سیستم قدرت دوناچه‌ای شکل ۲ اعمال شده است. اطلاعات مربوط به این سیستم شامل اطلاعات ژنراتورها، بارها، خطوط و باس‌ها در [۲۸] آمده است. ژنراتور ۱ با AVR و PSS نشان داده شده در شکل ۳ برای میراکردن نوسانات بین ناحیه‌ای مجهز شده است. سایر ژنراتورها با AVR و PSS یکسان نشان داده شده در شکل ۴ مجهز شده‌اند.

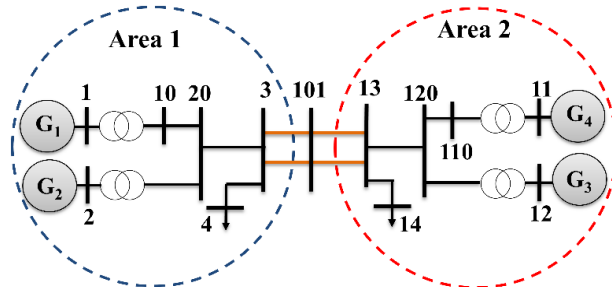
۳-۱ شناسایی سیستم

برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، در گام اول رفتار سیستم بدون در نظر گرفتن PSS برای ژنراتور ۱ بررسی می‌شود. از آنجایی که به منظور شناسایی مدل نیازی به اعمال اغتشاش وجود ندارد، تغییرات کوچک بار در باس ۴ برای شبیه‌سازی نوسانات فازورهای اندازه‌گیری شده در شرایط عادی سیستم قدرت در نظر گرفته شده است. با توجه به آنچه در بخش مقدمه آمده است، فازور ولتاژ اطلاعات مناسبی برای شناسایی سیستم به دست می‌دهد. با توجه به این نکته و همچنین نیاز به جمع‌آوری داده از دو ناحیه سیستم، دو PMU در باس‌های ۱ و ۱۱ برای اندازه‌گیری تغییرات فازور ولتاژ در دو ناحیه در نظر گرفته شده است. شکل ۵ اختلاف بین زاویه فاز ولتاژ باس‌های ۱ و ۱۱ را نشان می‌دهد. تغییرات ناگهانی دیده‌شده در این شکل به دلیل کلیدزنی‌های حین شبیه‌سازی به منظور افزایش یا کاهش بار به وجود آمده است. در شکل ۶ طیف فرکانسی موجود در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که سیستم مورد مطالعه دارای مد نوسانی بین ناحیه‌ای غالب با فرکانس حدود ۰/۶ هرتز است.

با استفاده از فیلتری با فرکانس مرکزی ۰/۶ هرتز با پهنای باند مناسب و سپس تبدیل معکوس فوریه، داده‌های اختلاف فاز فیلترشده به دست می‌آیند. سپس می‌توان با اعمال روش حداقل مربعات بر روی داده‌های اختلاف فاز فیلترشده، یک مدل مرتبه پایین به سیستم اختصاص داد. در این مقاله به جای استفاده از فیلتر بر پایه تبدیل فوریه، از برازش منحنی داده‌های اختلاف فاز استفاده شده است. به این ترتیب که با در نظر گرفتن



شکل ۱: مدل مرتبه پایین تقریبی برای تنظیم پایدارساز سیستم قدرت جهت میراکردن مد نوسانی بین ناحیه‌ای [۲۷].



شکل ۲: سیستم قدرت دوناچه‌ای.

بنابراین، یک مدل نوسان مرتبه دوم برای مد نوسانی غالب می‌تواند به شکل زیر تعریف شود

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

حال با در دست داشتن داده‌های زاویه فاز و سرعت زاویه‌ای گرفته‌شده از PMUها و تشکیل بردارهای x_1 و x_2 و مشتقات آنها، ضرایب a_1 و a_2 را می‌توان به روش حداقل مربعات خطا مشخص نمود. ویژگی‌های مد استخراج شده می‌تواند با مقادیر ویژه ماتریس ضرایب A ارزیابی شود. با فرض مقادیر ویژه به صورت $\alpha \pm j\beta$ ، مدل نوسانی مرتبه پایین تقریبی برای مد مورد نظر به صورت زیر به سیستم اختصاص داده می‌شود

$$G(s) = \frac{1}{s^2 - 2\alpha s + (\alpha^2 + \beta^2)} \quad (5)$$

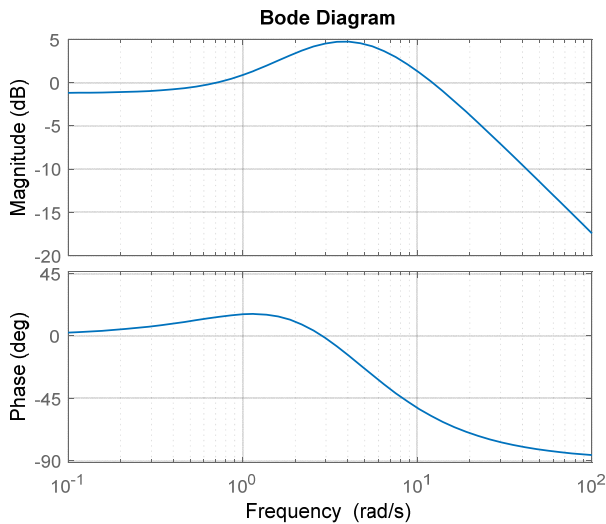
در گام بعدی هدف، طراحی کنترل کننده‌ای برای میراکردن مد بین ناحیه‌ای نوسانی موجود در مدل شناسایی شده $G(s)$ در (۵) است. با در نظر گرفتن یک کنترل کننده میراگر، حلقه کنترلی با مدل نوسانی $G(s)$ را می‌توان با استفاده از شکل ۱ در نظر گرفت. کنترل کننده میراگر که در اینجا پایدارساز سیستم قدرت انتخاب شده است، شامل ساختار اصلی کنترل کننده و مدل $-F(s)$ که بیانگر تأثیر کنترل کننده روی مد نوسانی $G(s)$ است- خواهد بود. برای ساده‌تر کردن روند طراحی کنترل کننده، مرتبه $F(s)$ باید تا حد ممکن کاهش داده شود. در این مقاله، مدل $F(s)$ به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۷]

$$F(s) = K_F \cdot \frac{(1+T_a s)(1+T_b s)}{(1+T_c s)(1+T_d s)(1+T_e s)} \quad (6)$$

با توجه به توضیحات فوق، فرایند تعیین $F(s)$ به صورت زیر است:

گام ۱) تعیین ثابت‌های زمانی T_a تا T_d به نحوی که بهره حول فرکانس مورد نظر که همان بخش موهومی مقدار ویژه تخمین زده شده است، حداکثر شود.

گام ۲) تعیین ثابت زمانی T_e در حدود صفر درجه پاسخ فرکانس $F(s)$ حول فرکانس مورد نظر β .



شکل ۷: دیاگرام بود مدل $F(s)$.

جدول ۱: مقایسه مدهای نوسانی مدل استخراج شده و [۲۹].

روش شناسایی	فرکانس مد غالب	درصد خطا	ضریب میرایی (%)	درصد خطا
روش پیشنهادی	۰٫۶	۰	۰٫۹۴	۵
[۲۹]	۰٫۵۸	۳٫۴	۰٫۹۹	۰

$$F(s) = 0.87 \cdot \frac{(1 + 0.82s) + (1 + 0.58s)}{(1 + 0.45s)(1 + 0.31s)(1 + 0.22s)} \quad (10)$$

شکل ۷ که دیاگرام بود (Bode) مدل $F(s)$ در (۱۰) را نمایش می‌دهد، بیانگر این نکته است که پیک بهره در فرکانس ۳/۷۷ رادیان بر ثانیه اتفاق می‌افتد. در نهایت جدول ۱ به ارزیابی کارایی روش شناسایی ارائه شده از طریق مقایسه با روش ارائه شده در [۲۹] می‌پردازد.

۲-۳ طراحی کنترل کننده

همان گونه که قبلاً اشاره شد، سیستم قدرت مدرن روزبه‌روز در حال تغییر است. به همین دلیل، حضور عدم قطعیت‌ها مانند تغییرات پارامتری در فرایند مدل‌سازی غیر قابل اجتناب است. روش‌های مقاوم و تطبیقی، دو رویکرد رایج برای مواجهه با نامعینی‌های سیستم هستند. در این مقاله، با در نظر گرفتن سیگنال PSS ژنراتور شماره ۱ به عنوان ورودی کنترل، طراحی و تنظیم یک کنترل کننده به روش H_∞ و یک کنترل کننده PID به روش زیگلر-نیکولز برای سیستم شناسایی شده جهت میرا کردن مد بین ناحیه‌ای غالب مورد بررسی قرار گرفته است.

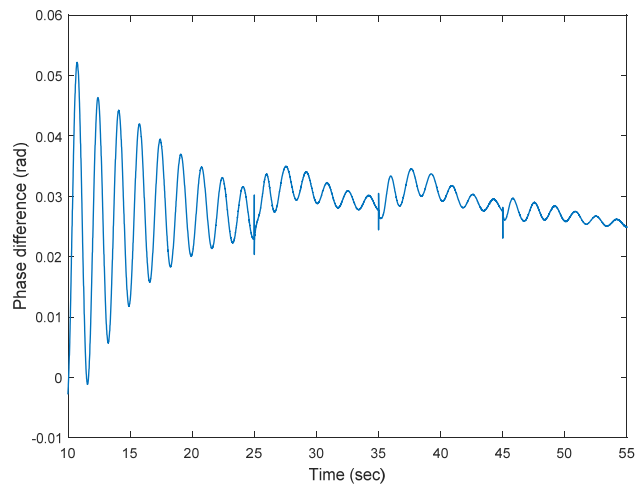
۱-۲-۳ کنترل کننده مقاوم

در [۲۷] پایدار ساز سیستم قدرت به روش مقاوم و با تئوری H_∞ برای مدل مرتبه پایین طراحی شده است. بدین منظور، مدل تعمیم یافته به صورت شکل ۸ در نظر گرفته شده و دو تابع وزنی به شرح زیر تعریف شده‌اند

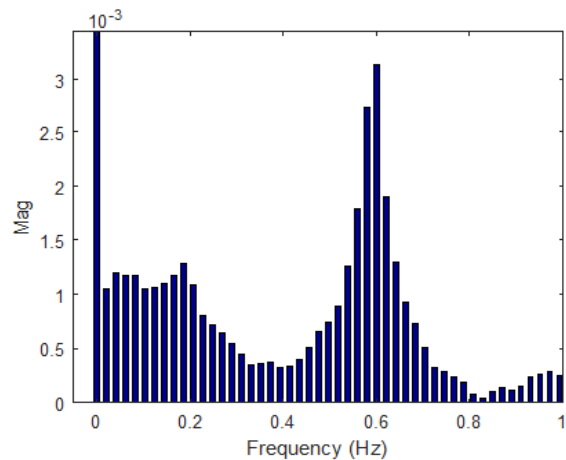
$$W_s(s) = 15 \frac{1 + 0.0003s}{1 + 0.05s} \quad (11)$$

و

$$W_t(s) = 0.1 \frac{1 + 10s}{1 + 0.1s} \quad (12)$$



شکل ۵: اختلاف فاز بین ولتاژ باس‌های ۱ و ۱۱.



شکل ۶: طیف فرکانسی حاصل از تبدیل فوریه.

یک پنجره زمانی، اختلاف فاز ولتاژهای دو شین مورد نظر به شکل سیگنالی از مجموع چند تابع سینوسی به صورت زیر تقریب زده شده است

$$f(t) = 0.3 \sin(0.18t - 0.62) + 0.6 \sin(3.77t - 0.4622) + 0.1 \sin(0.55t - 4.31) + 0.59 \sin(3.37t - 1.88) \quad (7)$$

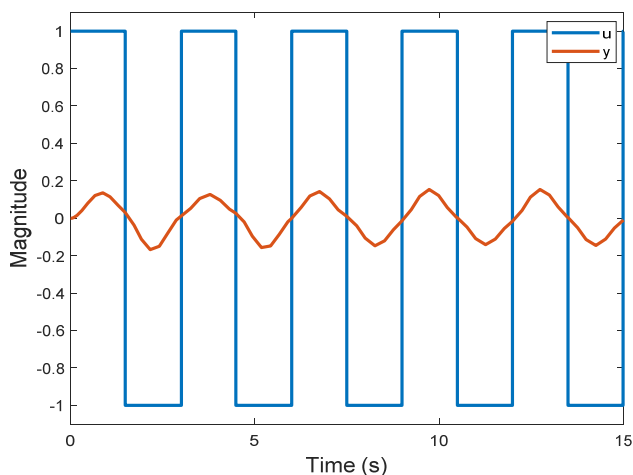
همان طور که ملاحظه می‌شود، فرکانس مد مورد نظر (حدود ۰٫۶ هرتز برابر رادیان بر ثانیه) در جملات دوم و چهارم ظاهر شده است. در ادامه، از تابع حاصل مشتقات متوالی گرفته شده تا داده‌های اختلاف سرعت و مشتق آن به دست آیند. سپس این داده‌ها در (۴) قرار داده شده و ماتریس ضرایب به کمک روش حداقل مربعات محاسبه شده است. بر این اساس ماتریس حالت به دست آمده به قرار زیر است

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.2674 & -14.3106 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

مقادیر ویژه این ماتریس برابر با $\alpha \pm j\beta = -0.1334 \pm j3.78$ است. با جایگذاری مقادیر ویژه فوق در (۵)، مدل نوسان به صورت زیر به دست آمده است

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 0.27s + 14} \quad (9)$$

با بهره‌گیری از گام‌های ۱ تا ۳ در بخش ۲ این مقاله مدل $F(s)$ به صورت زیر مشخص می‌شود



شکل ۱۰: ورودی و خروجی سیستم $G(s)$ با فیدبک رله‌ای.

جدول ۳: تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID با استفاده از روش زیگلر-نیکولز حلقه بسته [۳۰].

نوع کنترل کننده	بهره بخش K_c تناسبی	بهره بخش T_i انتگرالی	بهره بخش T_d مشتق‌گیر
P	$0.5 \times K_u$	-	-
PI	$0.4 \times K_u$	$0.8 \times T_u$	-
PID	$0.6 \times K_u$	$0.5 \times T_u$	$0.12 \times T_u$

۳-۲-۲ کنترل کننده PID

در این مقاله، جهت طراحی کنترل کننده PID از روش زیگلر-نیکولز مبتنی بر فیدبک رله‌ای استفاده شده است. ایده اساسی، این نگرش است که بسیاری از فرایندها تحت فیدبک رله‌ای دارای نوسانات سیکل حدی هستند. در این روش با استفاده از یک فیدبک رله‌ای و ورودی سینوسی، سیستم به نوسان درآمده و سپس دو پارامتر بهره و دوره تناوب بحرانی محاسبه می‌شوند [۳۰]. شکل ۹ نمودار بلوکی مربوط به این روش را نشان می‌دهد.

اگر دامنه خروجی رله با d و دامنه خروجی فرایند با a نمایش داده شوند، بهره بحرانی K_u از رابطه زیر به دست می‌آید

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} \quad (16)$$

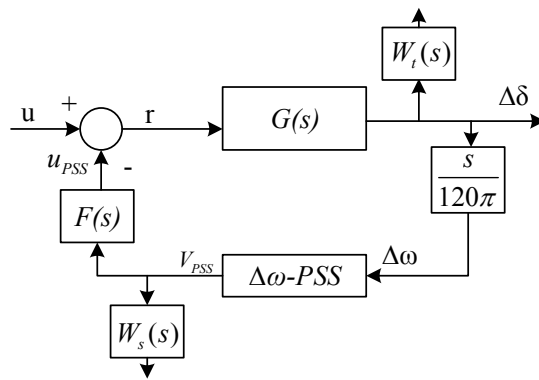
با در نظر گرفتن T_u به عنوان دوره تناوب خروجی سیستم، برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده می‌توان از جدول ۳ استفاده کرد. با اعمال روش فوق روی مدل مرتبه پایین $G(s)$ و ورودی سینوسی با دامنه واحد و فرکانس ۶۰ هرتز، شکل ۱۰ خروجی y را نشان می‌دهد. پس از اندازه‌گیری دامنه و دوره تناوب خروجی سیستم، کنترل کننده PID به فرم زیر حاصل می‌شود

$$K(s) = K_c \left(1 + T_i s + \frac{1}{T_d s} \right) = 5.02 \left(1 + 0.375s + \frac{1}{1.5s} \right) \quad (17)$$

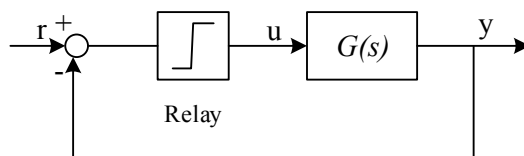
با در نظر گرفتن حلقه کنترلی شکل ۱، تابع تبدیل مربوط به بخش پایدارساز سیستم قدرت از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$P_r(s) = \frac{12\pi}{s} K(s) F^{-1}(s) \quad (18)$$

تابع تبدیل حاصل از مرتبه ۵ بوده و پس از دو درجه کاهش مرتبه عبارت است از



شکل ۸: ساختار سیستم حلقه بسته جهت طراحی کنترل کننده مقاوم.



شکل ۹: نمودار بلوکی روش زیگلر-نیکولز مبتنی بر فیدبک رله‌ای.

جدول ۲: ضرایب کنترل کننده H_{∞} .

a_6	1.39×10^6	b_6	۳۱۶۱
a_5	1.64×10^8	b_5	4.88×10^5
a_4	4.03×10^9	b_4	2.02×10^7
a_3	3.03×10^{10}	b_3	1.85×10^8
a_2	8.94×10^{10}	b_2	5.93×10^8
a_1	9.46×10^{10}	b_1	7.10×10^8
a_0	1.20×10^{11}	b_0	2.06×10^7
a	3.43×10^8	b	1.40×10^7

در معادلات فوق $W_s(s)$ به صورت یک فیلتر پایین‌گذر برای لحاظ کردن خطای مدل‌سازی و پایداری مقاوم و $W_t(s)$ به صورت یک فیلتر بالاگذر برای لحاظ کردن تأثیر سایر مدها در نظر گرفته شده است.

نرم بی‌نهایت سیستم به صورت زیر قابل تعریف است

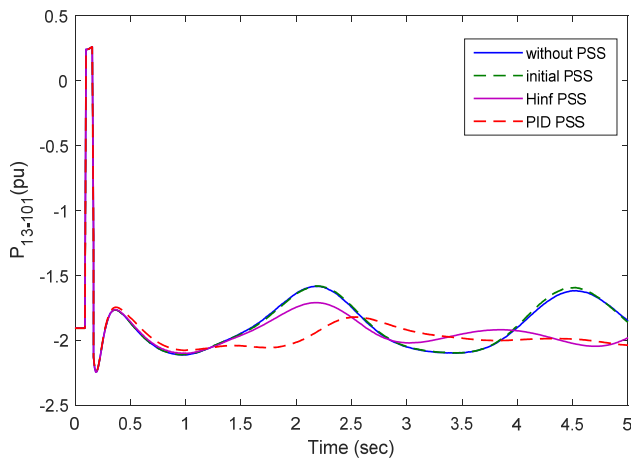
$$\left\| \frac{W_s(s) \frac{P(s)T_g(s)}{1+P(s)T_g(s)}}{W_t(s) \frac{P(s)T_g(s)}{1+P(s)T_g(s)}} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (13)$$

که در آن $T_g(s)$ تابع تبدیل کلی سیستم شامل $F(s)$ و $G(s)$ بوده و $P(s)$ تابع تبدیل کنترل کننده است. ورودی u برای مدل تقریبی از حاصل ضرب معکوس (۹) و داده‌های اختلاف فاز تخمین زده می‌شود. کنترل کننده H_{∞} برای مدل مرتبه پایین شناسایی شده مربوط به حداقل γ که قید (۱۳) را برآورده می‌کند بر اساس مدل نشان داده شده در شکل ۸ به دست آمده است. کنترل کننده حاصل از مرتبه ۷ و به صورت زیر بوده و ضرایب آن در جدول ۲ آمده است

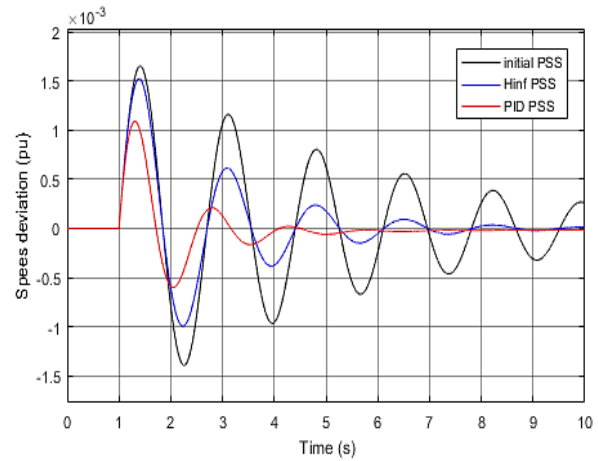
$$P(s) = \frac{a_6 s^6 + \dots + a_1 s + a_0}{s^6 + b_6 s^6 + \dots + b_1 s + b_0} \quad (14)$$

پس از ۴ درجه کاهش مرتبه، تابع تبدیل پایدارساز سیستم قدرت عبارت است از

$$P_r(s) = \frac{1.39 \times 10^6 s^2 + 3.05 \times 10^7 s + 1.48 \times 10^6}{s^2 + 3.068 s^2 + 1.86 \times 10^5 s + 5.47 \times 10^4} \quad (15)$$



شکل ۱۰: توان عبوری از باس ۱۳ به ۱۰۱.



شکل ۱۱: پاسخ پله مدل تقریبی مرتبه پایین.

جدول ۴: مدهای نوسانی سیستم دوتاحیه‌ای.

مد	مد بین ناحیه‌ای	مد محلی ناحیه ۱	مد محلی ناحیه ۲
PSS	$-0.1226 \pm j3.703$	$-0.9526 \pm j6.845$	$-1.1710 \pm j7.723$
PSS بدون	$f = 0.5894$ $\xi = 0.331$	$f = 1.0894$ $\xi = 0.1378$	$f = 1.2292$ $\xi = 0.1499$
PSS اولیه	$-0.206 \pm j3.8131$	$-0.9105 \pm j7.247$	$-1.1706 \pm j7.729$
PSS با روش H_∞	$f = 0.6069$ $\xi = 0.539$	$f = 1.1533$ $\xi = 0.1247$	$f = 1.2295$ $\xi = 0.1498$
PSS با روش زیگلر-نیکولز	$-0.3225 \pm j4.079$	$-0.8351 \pm j8.506$	$-1.1680 \pm j7.720$
PSS با روش زیگلر-نیکولز	$f = 0.6492$ $\xi = 0.540$	$f = 1.3537$ $\xi = 0.1247$	$f = 1.2287$ $\xi = 0.1496$
PSS با روش زیگلر-نیکولز	$-0.6780 \pm j4.406$	$-1.8516 \pm j10.67$	$-1.1702 \pm j7.721$
PSS با روش زیگلر-نیکولز	$f = 0.7012$ $\xi = 0.1521$	$f = 1.6982$ $\xi = 0.8664$	$f = 1.2289$ $\xi = 0.1498$

نوسانات فرکانس پایین سیستم اصلی می‌تواند به صورت تقریبی توسط مدل مرتبه پایین نشان داده شود.

بدون قرارداد PSS برای ژنراتور ۱، این مد دارای ضریب میرایی ضعیف برابر با ۰/۰۳ است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که PSSهای طراحی‌شده، ضریب میرایی مد بین ناحیه‌ای را به ترتیب حدود ۱/۶ و ۵ برابر افزایش داده‌اند. از آنجا که مدل مرتبه پایین شناسایی شده تنها بر اساس مد بین ناحیه‌ای بوده و کنترل‌کننده‌ها برای فرکانس خاصی تنظیم شده‌اند، ارزیابی اثر آن بر مدهای دیگر ساده نیست. این نتایج، کارایی روش پیشنهادی طراحی کنترل‌کننده بر اساس اندازه‌گیری‌های فازوری حوزه وسیع را با در نظر گرفتن جبران‌سازی خطا با تئوری H_∞ و PID نشان می‌دهند.

نکته قابل توجه این است که کنترل‌کننده طراحی‌شده به روش H_∞ در مقابل خطاهای مدل‌سازی ناشی از تغییرات ساختار سیستم قدرت مقاوم بوده و تا حدی قابلیت مهار تأثیر سایر مدها را نیز دارا است.

شکل ۱۱ پاسخ پله مدل تقریبی و شکل ۱۲ توان عبوری از باس ۱۳ به ۱۰۱ را پس از وقوع خطای سه‌فاز در خط ۳ به ۱۰۱ در ثانیه ۱ و رفع آن در ۰/۰۶ ثانیه بعد از وقوع در حضور کنترل‌کننده‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، PSSهای طراحی‌شده می‌توانند باعث کاهش نوسانات فرکانس پایین شده و نسبت به PSS اولیه میرایی بیشتری ایجاد کنند.

در مورد سیستم‌های قدرت با مقیاس بزرگ‌تر با توجه به لزوم جمع‌آوری داده از تمام نواحی برای رؤیت مدهای بین ناحیه‌ای متعدد،

$$P_r(s) = \frac{54.03s^3 + 5.7222 \times 10^4 s^2 + 1.581 \times 10^5 s + 1.745 \times 10^5}{s^3 + 10.0s^2} \quad (19)$$

تا زمانی که عملگر اشباع نشود، این کنترل‌کننده با وجود تغییر در پارامترهای سیستم شناسایی‌شده می‌تواند وظیفه خود را انجام دهد. در صورت لزوم می‌توان سیستم را با داده‌های زمان حقیقی شناسایی کرد و سپس پارامترهای کنترل‌کننده، طبق شرایط جدید محاسبه و تنظیم شوند.

۴- ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها

اکنون عملکرد PSSهای طراحی‌شده به روش مقاوم و زیگلر-نیکولز در سیستم ارزیابی می‌شوند. در این مرحله از جعبه‌ابزار PST در نرم‌افزار MATLAB برای ارزیابی سیگنال کوچک و محاسبه مدهای نوسانی سیستم استفاده شده است. شایان ذکر است که به دلیل محدودیت مرتبه PSS در این جعبه‌ابزار، مرتبه کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده به ۲ کاهش یافته است.

جدول ۴ مقادیر ویژه مد بین ناحیه‌ای فرکانس پایین و دو مد محلی سیستم را به همراه فرکانس و میرایی آنها با اعمال PSSهای مختلف نشان می‌دهد. در حالتی که PSS ژنراتور شماره ۱ غیر فعال باشد، مقدار متناظر با مد بین ناحیه‌ای غالب به دست آمده از شبیه‌سازی برابر است با $-0.1226 \pm j3.703$ که به مقدار تخمین زده شده در بخش قبل توسط داده‌های PMU یعنی $-0.1334 \pm j3.78$ نزدیک بوده و دقت مناسب و اعتبار فرایند شناسایی را تأیید می‌کند. قابل مشاهده است که مشخصات

- [9] A. Hasanovic, A. Feliachi, N. Bhatt, and A. DeGross, "Practical robust PSS design through identification of low-order transfer functions," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1492-1500, Aug. 2004.
- [10] N. Kishor, L. Haarla, J. Turunen, M. Larsson, and S. R. Mohanty, "Controller design with model identification approach in wide area power system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 8, pp. 1430-1443, Aug. 2014.
- [11] T. Prakash, V. P. Singh, and S. R. Mohanty, "A synchrophasor measurement based wide-area power system stabilizer design for inter-area oscillation damping considering variable time-delays," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, pp. 131-141, Feb. 2019.
- [۱۲] س. ابادزی، ع. عرب دردی، م. برخورداری یزدی و م. ص. پیام، "طراحی کنترل کننده مقاوم محدوده وسیع SVC جهت میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای در سیستم قدرت،" *مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران- الف مهندسی برق*، سال ۱۳، شماره ۱، صص. ۴۶-۳۶، بهار ۱۳۹۴.
- [13] A. Nayak, S. Mishra, J. Hossain, and M. Nizami, "Output feedback adaptive control for inter-area oscillation damping under power system uncertainties," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/ICPS Europe '19*, 6 pp., Genova, Italy, 11-14 Jun. 2019.
- [14] A. Nayak, S. Mishra, and S. Mudaliyar, "Adaptive wide area damping control for renewable integrated system," in *Proc. IEEMA Engineer Infinite Conf. (eTechNxT)*, 6 pp., New Delhi, India, 13-14 Mar. 2018.
- [15] K. M. Sreedivya, P. Aruna Jeyanthi, and D. Devaraj, "Improved design of interval type-2 fuzzy based wide area power system stabilizer for inter-area oscillation damping," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 83, Article ID: 103957, Jan. 2021.
- [16] I. Abdulrahman and G. Radman, "Wide-area-based adaptive neuro-fuzzy SVC controller for damping interarea oscillations," *Canadian J. of Electrical and Computer Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 133-144, Summer. 2018.
- [17] M. E. Bento, "A hybrid particle swarm optimization algorithm for the wide-area damping control design," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 592-599, Jan. 2022.
- [18] J. Zhang, C. Chung, C. Lu, K. Men, and L. Tu, "A novel adaptive wide area PSS based on output-only modal analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2633-2642, Sept. 2014.
- [19] I. Zenelis and X. Wang, "Wide-area damping control for interarea oscillations in power grids based on PMU measurements," *IEEE Control Systems Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 719-724, Oct. 2018.
- [20] L. Zeng, et al., "Design and real-time implementation of data-driven adaptive wide-area damping controller for back-to-back VSC-HVDC," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 558-574, Jul. 2019.
- [21] C. Lu, Y. Zhao, K. Men, L. Tu, and Y. Han, "Wide-area power system stabiliser based on model-free adaptive control," *IET Control Theory & Applications*, vol. 9, no. 13, pp. 1996-2007, 27 Aug. 2015.
- [22] S. Mukherjee, A. Chakraborty, H. Bai, A. Darvishi, and B. Fardanesh, "Scalable designs for reinforcement learning-based wide-area damping control," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 2389-2401, May 2021.
- [23] I. Zenelis and X. Wang, "A model-free sparse wide-area damping controller for inter-area oscillations," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, Article ID: 107609, Mar. 2022.
- [24] X. Zhang, C. Lu, S. Liu, and X. Wang, "A review on wide-area damping control to restrain inter-area low frequency oscillation for large-scale power systems with increasing renewable generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 45-58, May 2016.
- [25] J. C. Mantzaris, A. Metsiou, and C. D. Vournas, "Analysis of inter area oscillations including governor effects and stabilizer design in South-Eastern Europe," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4948-4956, Nov. 2013.
- [26] Y. Chompoobutgool, Concepts for Power System Small Signal Stability Analysis and Feedback Control Design Considering Synchrophasor Measurements, Diss. KTH Royal Institute of Technology, 2012.
- [27] H. Bevrani, M. Watanabe, and Y. Mitani, *Power System Monitoring and Control*, John Wiley & Sons, 2014.
- [28] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill New York, 1994.
- [29] C. Rergis, I. Kamwa, R. Khazaka, and A. R. Messina, "A Loewner interpolation method for power system identification and order

ضروری است که مسئله تأخیر در ارسال و دریافت داده از PMU مد نظر قرار گیرد. این تأخیر ناشی از 0.2 ثانیه تأخیر کانال مخابراتی، 0.2 ثانیه تأخیر کانال کنترلی، N_s/f_s تأخیر زمان تشخیص خطا و $N-1/f_s$ ثانیه تأخیر فیلترینگ سیگنال اندازه‌گیری شده به صورت زیر خواهد بود

$$T_{delay} = 0.2 + 0.2 + \frac{N-1}{f_s} + \frac{N_s}{f_s} \quad (20)$$

در (۲۰) f_s ، N_s و N به ترتیب عبارت هستند از فرکانس نمونه‌برداری واحدهای اندازه‌گیری فازورها (PMUs)، تعداد داده لازم برای تشخیص خطا و تعداد داده لازم برای فیلترینگ داده‌های اندازه‌گیری شده. واحدهای اندازه‌گیری فازورها برای طراحی کنترل کننده از کلاس M بوده و با استفاده از تبدیل فوریه درون‌یابی شده کالیبره می‌شوند [۳۱].

۵- نتیجه گیری

این مقاله روشی برای تنظیم PSS بر اساس اندازه‌گیری‌های فازوری حوزه وسیع ارائه می‌کند. روش پیشنهادی می‌تواند به کمک داده‌های اختلاف فاز ولتاژ دو نقطه از سیستم، یک مدل مرتبه پایین که مشخصات مد نوسانی بین ناحیه‌ای را در بر دارد، به سیستم اختصاص دهد. با توجه به پیچیدگی سیستم قدرت امروزی و عدم امکان مدل‌سازی دقیق، این مدل می‌تواند در طراحی و تنظیم کنترل کننده‌های میراکننده مدهای نوسانی مؤثر واقع شود. کارامدی روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی سیستم قدرت بررسی شده و تأثیر کنترل کننده بر بهبود میرایی مد نوسانی بین ناحیه‌ای با پایش داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهند که یک کنترل کننده مناسب می‌تواند با استفاده از این مدل مرتبه پایین حاصل از داده‌های سیستم حوزه وسیع طراحی شود و وضعیت سیستم را بهبود بخشد.

مراجع

- [۱] م. زمانی و غ. شاهقلیان، "طراحی هماهنگ پایدار ساز سیستم قدرت و ادوات امپدانس متغیر برای افزایش میرایی مدهای بین ناحیه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک،" *مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران- الف مهندسی برق*، سال ۱۷، شماره ۴، صص. ۲۷۸-۲۷۱، پاییز ۱۳۹۸.
- [2] H. Golpira, A. R. Messina, and H. Bevrani, *Renewable Integrated Power System Stability and Control*, Wiley-IEEE, USA, 2021.
- [3] T. Hashiguchi, et al., "Identification of characterization factor for power system oscillation based on multiple synchronized phasor measurements," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 163, no. 3, pp. 10-18, May 2008.
- [4] F. Al Hasnain, A. Sahami, and S. Kamalasadani, "An online wide-area direct coordinated control architecture for power grid transient stability enhancement based on subspace identification," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 3, pp. 2896-2907, May/June 2021.
- [5] S. N. Sarmadi and V. Venkatasubramanian, "Electromechanical mode estimation using recursive adaptive stochastic subspace identification," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 349-358, Jan. 2013.
- [6] H. Liu, et al., "ARMAX-based transfer function model identification using wide-area measurement for adaptive and coordinated damping control," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 3, pp. 1105-1115, May 2015.
- [7] R. L. Ribler, J. S. Vetter, H. Simitci, and D. A. Reed, "Autopilot: adaptive control of distributed applications," in *Proc. The Seventh Int. Symp. on High Performance Distributed Computing*, pp. 172-179, Chicago, IL, USA, 31-31 Jul. 1998.
- [8] F. Bai, et al., "Design and implementation of a measurement-based adaptive wide-area damping controller considering time delays," *Electric Power Systems Research*, vol. 130, no. 2, pp. 1-9, Jan. 2016.

هیمن گل پیرا دکترای مهندسی برق - قدرت را از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۹۴ اخذ و بعد از آن به عنوان محقق ارشد در دانشگاه ویسکانسین - مدیسون (آمریکا) مشغول به تحقیق شد. ایشان در سال ۱۳۹۵ به عنوان عضو هیأت علمی به دانشگاه کردستان پیوست و در حال حاضر نیز دانشیار گروه مهندسی برق قدرت - کنترل است. ایشان در این مدت دو بار به عنوان استاد مدعو در دانشگاه لیل (فرانسه) به تحقیق و تدریس پرداخته است. حوزه تحقیقاتی مورد علاقه ایشان کنترل و پایداری سیستم‌های قدرت مدرن است. ایشان در اجرای بیش از ۵ پروژه داخلی و خارجی مشارکت موثر داشته و دستاوردهای علمی و پژوهشی خود را در یک کتاب در انتشارات وایلی و چندین مقاله به رشته تحریر درآورده است.

حسن بیورانی دکترای مهندسی برق - کنترل را از دانشگاه اوزاکا (ژاپن) در سال ۱۳۸۳ اخذ و از آن پس به مدت چند سال در دانشگاه‌های اوزاکا، صنعتی کوئینزلند (استرالیا)، صنعتی کیوشو (ژاپن)، دانشگاه کوماموتو (ژاپن)، صنعتی برلین (آلمان) و لیل (فرانسه) به عنوان محقق مدعو، محقق ارشد، استادیار و استاد به تدریس و تحقیق پرداخته است. در حال حاضر نیز استاد دانشگاه کردستان می‌باشد. حوزه تحقیقاتی مورد علاقه ایشان طراحی و کنترل ریزشبه‌ها و شبکه‌های هوشمند الکتریکی است. ایشان در اجرای بیش از ۱۰ پروژه داخلی و خارجی مشارکت موثر داشته و دستاوردهای علمی و پژوهشی خویش را در چندین کتاب و مقاله به رشته تحریر درآورده است.

reduction," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1834-1844, May 2018.

- [30] V. V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1260-1266, Aug. 2006.
- [31] H. Golpira, H. Bevrani, A. R. Messina, and B. Francois, "A data-driven under frequency load shedding scheme in power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, p. 1, 10.1109/TPWRS.2022.3172279, Early Access, 2022.

آذین عطاردی مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تبریز در سال ۱۳۹۵ دریافت نمود و در سال ۱۳۹۷ در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت از دانشگاه کردستان فارغ التحصیل گردید. از سال ۱۳۹۷ تاکنون نامبرده به عنوان دانشجوی دکترای مهندسی برق در دانشگاه کردستان مشغول به تحصیل است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی شامل موضوعاتی مانند دینامیک و پایداری سیستم‌های قدرت، سیستم‌های پایش حوزه وسیع و سیستم‌های قدرت مدرن می‌باشد.