

روشهای نوین برای کنترل نوسانات شبکه‌های بزرگ قدرت به همراه بررسی و ارائه پیشنهاد برای شبکه سراسری برق ایران

محمدباقر ابوالحسنی جبلی

دانشجوی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شاهد و کارشناس شرکت مدیریت شبکه برق ایران
m.abolhasani@shahed.ac.ir

محمدحسین کاظمی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شاهد
kazemi@shahed.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت پیوستگی کارکرد سیستم قدرت و نیز اینکه هزینه زیادی برای تأمین انرژی مصرف کننده ها صرف شده، مفهوم پایداری سیستم قدرت، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. تمام تلاشها باید به گونه‌ای باشد تا احتمال تبدیل اغتشاشات به رویدادهای عمده (همچون خاموشیهای گسترده) کاهش یابد. در میان این اغتشاشات، وقوع نوسانات توان در سیستمهای قدرت همواره به عنوان یکی از دغدغه‌های بهره برداران مطرح بوده و از روشهای مختلفی برای مواجهه با این موضوع استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به طراحی پایدارسازها و کنترل کننده‌های مختلف اشاره نمود. این مقاله نگاهی دارد به اهداف، روشها و رویکردهای تحقیقاتی جدید درباره کنترل میرایی سیستمهای قدرت ابعاد وسیع که از طرق مختلف و از جمله استفاده از سامانه اندازه‌گیری فراگیر WAMS (با نصب واحدهای اندازه‌گیری فازوری PMU) در سالهای اخیر مورد توجه محققان در سطح بین‌المللی قرار گرفته است. همچنین با وجود سابقه وقوع نوسانات در شبکه ایران و با عنایت به راه اندازی سیستم WAMS در این شبکه، با مقایسه این تحقیقات، ایده هایی برای رفع مشکلات شبکه سراسری برق ایران پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: کنترل میرایی نوسانات، پایدارساز سیستم قدرت، سیستم اندازه‌گیری فراگیر WAMS

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت پیوستگی کارکرد سیستم قدرت در تغذیه بارهای الکتریکی و نیز با توجه به اینکه هزینه زیادی برای تأمین انرژی مصرف کننده ها صرف شده است، مفهوم پایداری و امنیت^۱ سیستم قدرت، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. معمولاً بین مسائل اقتصادی و تأمین امنیت سیستم قدرت یک رابطه معکوس وجود دارد؛ هرچه بخواهیم امنیت سیستم را بالا ببریم باید سرمایه گذاری بیشتری داشته باشیم یعنی هزینه بیشتر اما سود کمتر. تمام تلاشها برای رفع کامل خطاهای تصادفی در سیستم قدرت باید به گونه‌ای باشد تا احتمال تبدیل اغتشاشات به رویدادهای عمده (همچون خاموشیهای گسترده) کاهش یابد. در میان این اغتشاشات، وقوع نوسانات توان در سیستمهای قدرت همواره به عنوان یکی از دغدغه‌های بهره برداران مطرح بوده است. نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پایین (LFO)^۲ با محدوده فرکانسی ۰.۱ تا ۲ هرتز، جزو طبیعت سیستمهای قدرت محسوب می‌شوند. در تاریخ سیستمهای قدرت مسائل مختلفی ناشی از میرایی ناکافی این نوسانات رخ داده است. نوسانات بین ناحیه‌ای که از جمله این موارد است، باعث وقوع جداسازیهای زیادی در سیستمهای قدرت شده، اما تعدادی از آنها منجر به خاموشی گسترده در شبکه های برق گردیده‌اند. برخی از اتفاقات قابل

^۱ security

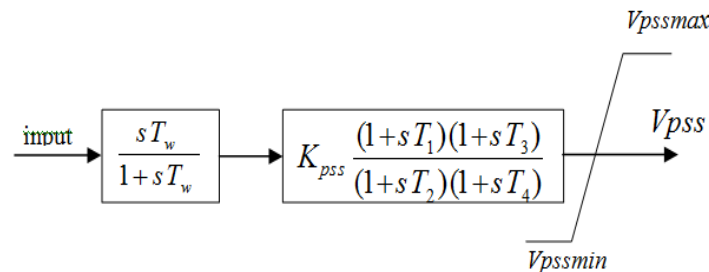
^۲ Low Frequency Oscillations

توجه عبارتند از (۱): حادثه شبکه هماهنگ تامین برق غرب آمریکا و کانادا^۳ (WECC) (سالهای ۱۹۹۶ و ۱۹۶۴)، منطقه غرب استرالیای غربی (۱۹۸۲) و (۱۹۸۳)، تایوان (۱۹۸۵)، غنا- ساحل عاج (۱۹۸۵)، جنوب برزیل (۱۹۷۵-۱۹۸۰ و ۱۹۸۴) و

همچنین علاوه بر موارد فوق، وقوع نوسانات در شبکه سراسری برق ایران نیز سابقه قابل توجهی دارد (۲،۳) که به دلیل محدودیتهای بسیاری که بر شبکه سراسری تحمیل نموده و در مواردی منجر به خاموشی گسترده و یا از دست رفتن واحدهای تولید شده است، همواره یکی از دغدغه‌های بهره‌برداران بوده و لذا توجه به این موضوع بویژه در تحقیقات کاربردی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله با نگاهی به روشهای مختلف برای رفع با این مشکل، ضمن بررسی تحقیقات جدید، با مقایسه روشها و رویکردها، تلاش شده ایده‌هایی برای بهبود نوسانات شبکه ایران ارائه گردد.

۲- روشهای کنترلی برای میرایی نوسانات

روشهای مختلفی برای مقابله با مشکل نوسانات سیستم قدرت استفاده شده‌است که یکی از رایجترین روشها طراحی پایدارسازها و کنترل کننده‌های مختلف بوده است. پایدارساز سیستم قدرت (PSS)^۴ به عنوان یک کنترل کننده رایج برای رفع پسفازی میان گشتاور الکتریکی و ورودی ولتاژ مرجع در تنظیم کننده ولتاژ ژنراتور طراحی می شود و متشکل از یک بهره، بلوک‌های جبران‌ساز فاز، یک فیلتر پاک‌ساز (صافی یا شوینده)^۵، ورودی‌های سرعت، فرکانس و یا توان و نیز محدود کننده‌های خروجی می‌باشد (۴). شکل (۱) مدل رایج PSS را نشان می‌دهد.



شکل (۱) : توابع تبدیل ساده و رایج در مطالعات PSS (۵)

در رویکردی دیگر، در بسیاری از تحقیقات درباره کنترل تکمیلی از طریق کنترل کننده‌های سیستمها و ادوات مختلف بویژه FACT^۶ و یا مبدل‌های HVDC^۷ مطالعه و تحقیق شده است و از آنجا که در این حالت که تمرکز بر کنترل میرایی نوسانات سیستم قدرت است، از کنترل طراحی شده به نام میراکننده نوسانات توان (POD)^۸ یاد شده است (۶-۱۳). با گسترش امکانات اندازه‌گیری و پایش سیستمهای ابعاد وسیع WAMS^۹ بویژه با ابزارهای اندازه‌گیری فازور PMU^{۱۰} روشهای مختلفی از جمله در (۱۴) برای تخمین مشخصات الکترومکانیکی نوسانات فرکانس پایین سیستم پیشنهاد شده‌است که می‌توان از آن برای تشخیص مودهای نوسانی بهره گرفت. همچنین از پایدارسازهای پیشرفته‌ای که بر مبنای سیستمهای WAMS و با هدف میرایی مودهای نوسانی شبکه ایجاد شده‌اند در برخی مراجع مانند (۱۵) به عنوان پایدارسازهای سراسری سیستم قدرت (GPSS)^{۱۱} نام برده شده است. همچنین از آنجا که بکمک سیگنالهای راه دور می‌توان وقوع نوسانات بین ناحیه‌ای را تشخیص داد، علاوه بر پایدارسازهای رایج سیستم قدرت (CPSS)^{۱۲} که بر اساس سیگنالهای محلی (مانند سرعت ژنراتور) عمل می‌نمایند، می‌توان باطراحی کنترل کننده مناسب به میرایی نوسانات نایل آمد و از آنجا که این سیستم بر اساس WAMS و در کنار کنترل کننده های محلی رایج بصورت کنترل کننده تکمیلی^{۱۳} در سیستم قدرت عمل می‌کند (۱۶)، در برخی مراجع مانند (۱۷، ۱۸) به نام اختصاری WAC^{۱۴} به معنای "کنترل فراگیر" و یا در بسیاری مراجع (۱۹-۲۳) با نام اختصاری WADC^{۱۵} با مفهوم "کنترل میرایی فراگیر" نام برده می‌شود که باتوجه به تمرکز این مقاله بر موضوع میرایی نوسانات، کنترل میرایی فراگیر به اختصار در این مقاله "کُمیف" نامیده می‌شود. شکل (۲) جایگاه این نوع کنترل را در مقایسه با سایر اجزای سیستم قدرت نشان می‌دهد. هرچند نحوه طراحی و پیاده سازی این کنترلها متفاوت بوده لیکن در همه آنها موضوع میراسازی نوسانات سیستم قدرت دنبال شده است و تعدد این تحقیقات اخیر حاکی از اهمیت

^۳ Western Electric Coordinating Council

^۴ Power System Stabilizer

^۵ Washout filter

^۶ Flexible AC transmission system

^۷ High-voltage direct current

^۸ Power Oscillation Damper

^۹ Wide Area Monitoring (Measurement) System

^{۱۰} Phasor Measurement Unit

^{۱۱} Global Power System Stabilizer

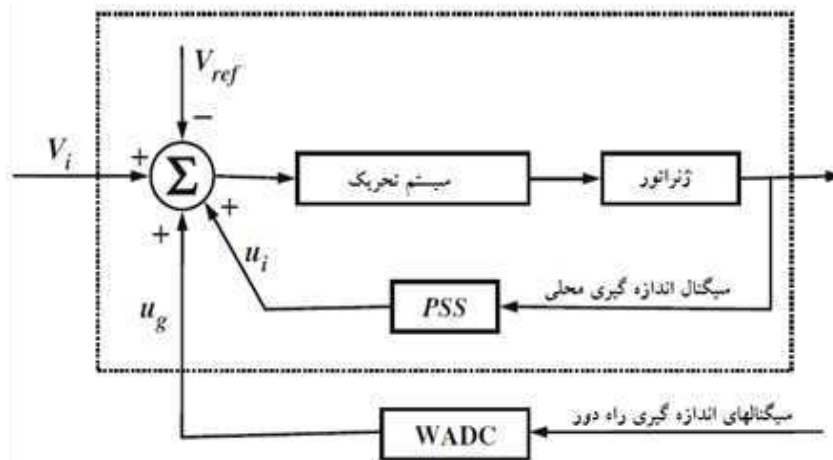
^{۱۲} Conventional Power System Stabilizer

^{۱۳} Supplementary Controller

^{۱۴} Wide-Area Controller

^{۱۵} Wide-Area Damping Control

موضوع و تمرکز محققان برای ابداع روشهای جدید بویژه با فناوریهای نوین می‌باشد. از طرفی با توجه به سابقه وقوع نوسانات در شبکه سراسری برق



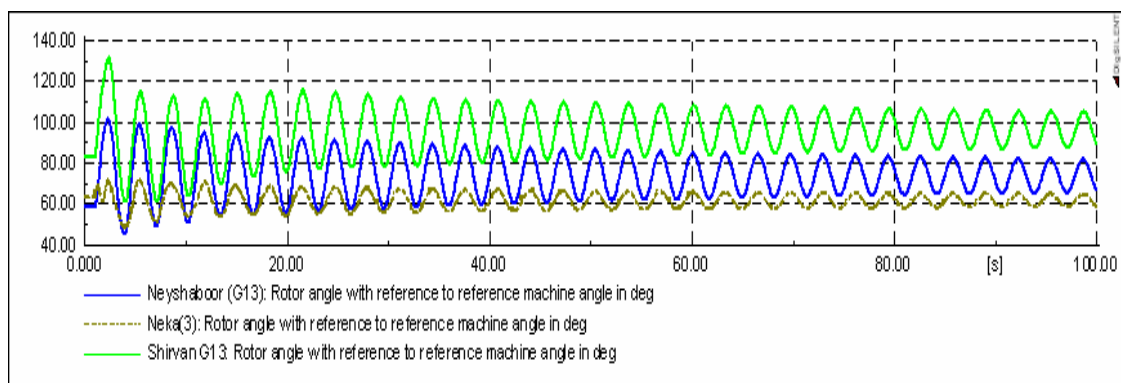
ایران و با عنایت به راه اندازی سیستم WAMS در این شبکه (۲۴)، می‌توان ایده های مناسبی برای رفع مشکلات ارائه نمود.

شکل (۲): کنترل میرایی فراگیر (گمیف) و کنترل تکمیلی آن در کنار PSS

۱-۲- تنظیم پایدارسازهای رایج

تنظیم پایدارسازهای یک سیستم قدرت در عملکرد آن بسیار مهم و ضروری است. این امر به دلیل تأثیر این ادوات کنترلی بر میرایی نوسانات می‌باشد. به عنوان مثال، در (۲۵) ضمن بیان روشی برای شناسایی مودهای الکترومکانیکی برای سیستم ۳۹ شینه IEEE، نسبت میرایی^{۱۶} مودهای نوسانی قبل و پس از بازتنظیم^{۱۷} با روش جبران سازی فاز (۲۶،۲۷) ارائه شده است که در این مطالعه، بازتنظیم توانسته بین ۵۰ تا ۳۷۳ درصد در بهبود میزان میرایی مودهای نوسانی مختلف موثر باشد.

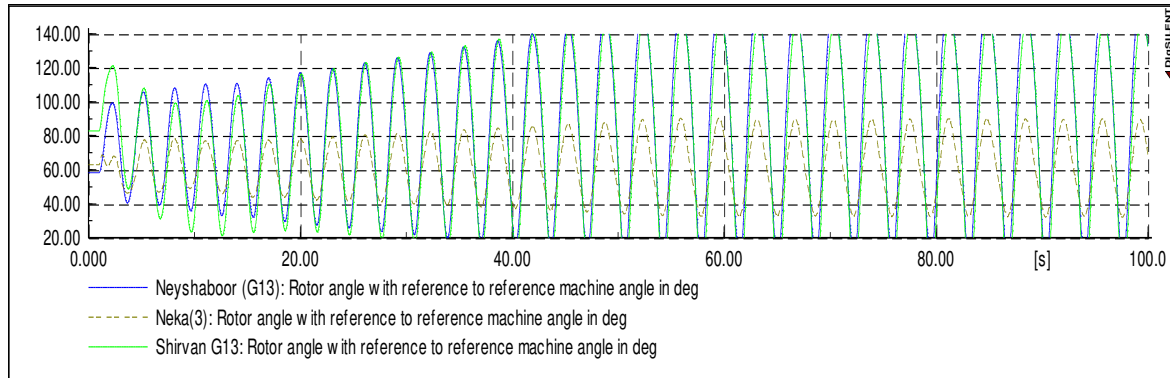
در (۲۸) به تأثیر مقادیر ناصحیح پایدارسازهای سیستم قدرت بر میرایی نوسانات پرداخته شده است. در این مطالعه، رفتار شبکه در صورت وقوع اغتشاش بدون PSS و با حضور آن در شرایط مختلف بررسی شده است و پاسخ شبکه پس از وقوع خطا روی خط بین ناحیه ای علی آباد-اسفراین و خروج آن پس از ۱۰۰ میلی ثانیه مطالعه می‌شود. در حالات مختلف، نمودار زاویه رتور (برحسب درجه) برای نیروگاههای شیروان، نیشابور و نکا، در شکل های (۳)، (۴) و (۵)، با / بدون فعالیت پایدارسازهای شبکه در حالات با / بدون تنظیم مناسب نمایش داده شده است.



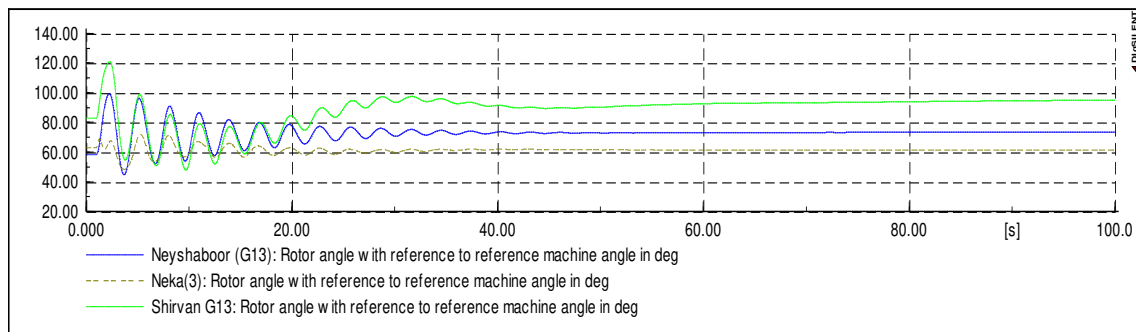
شکل (۳): زاویه رتور در سه نیروگاه ایران پس از حادثه بدون فعالیت PSS

^{۱۶} Damping ratio

^{۱۷} Retuning



شکل (۴): زاویه رتور پس از حادثه با فعال بودن PSS بدون تنظیم مناسب



شکل (۵): تأثیر تنظیم نسبی پارامترها زاویه رتور در سه نیروگاه ایران

ملاحظه می شود که در صورت عدم کنترل مناسب بوسیله پایدارسازها، نوسان زاویه رتور رخ خواهد داد که دارای میرایی بسیار کمی است، بطوری که پس از ۱۰۰ ثانیه همچنان در شبکه وجود دارد. لذا صرف وجود PSS نه تنها باعث بهبود میرایی نمی شود بلکه عدم تنظیم، شبکه را به سمت ناپایداری پیش می برد لذا تنظیم مناسب پایدارسازهای سیستم بویژه در سیستمهای با ابعاد بزرگ مانند شبکه ایران از اهمیت زیادی برخوردار است.

۲-۲- تنظیم پایدارسازهای موجود با روشهای بهینه سازی

در برخی مراجع، پایدارسازهای موجود را با روشهای بهینه سازی تنظیم نموده اند و در واقع با محاسبه توابع هزینه ای که عمدتاً بر مبنای میزان نوسانات تعریف شده اند، تنظیماتی را که موجب کمینه شدن این نوسانات می شوند، یافته و برای اعمال در کنترل کننده ها بیان می گردند. به عنوان نمونه مرجع (۲۹) با استفاده از شبیه سازی زمانی، برای پایدارساز رایج یک نیروگاه ۶۱۲ مگاواتی در کشور کره پارامترهای بهینه را یافته و البته با انجام تست، مدل مربوطه و کارایی تنظیم پارامترهای آن را نیز بررسی نموده است. در مرجع (۳۰) با استفاده از روش الگوریتم فرهنگی (CA)^{۱۸} به تنظیم پایدارسازهای سیستم قدرت چند ماشینه، پرداخته شده و نتایج آن با روش الگوریتم ژنتیک مقایسه گردیده و نشان داده شده است که روش الگوریتم فرهنگی سریعتر به پاسخ نهایی می رسد. این مرجع علاوه بر نمایش شبیه سازی (بر اساس مدل غیر خطی)، شاخصی رایج به نام انتگرال حاصل ضرب خطای مطلق در زمان (ITAE)^{۱۹} را برای بیان میزان نوسانات مورد استفاده قرار داده که بصورت رابطه (۱) تعریف می گردد:

$$ITAE = \int_0^t \sum_{i=1}^n t |\Delta\omega_i| dt$$

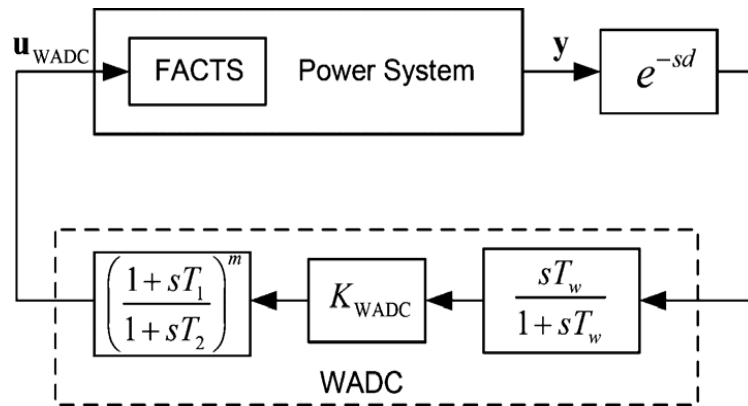
که در این رابطه t زمان و $\Delta\omega_i$ میزان تغییرات سرعت ژنراتور شماره i می باشد و در واقع مجموع مساحت زیر منحنی نوسانات با ضریب وزنی زمان در نظر گرفته شده تا هرچه نوسانات دیرتر میراشود به رغم کاهش دامنه، اهمیت آن کاسته نشود. در این روشها باتوجه به اینکه زمان محاسبات معمولاً چند دقیقه است، کاربرد برخط (آنلاین) بعید به نظر می رسد.

^{۱۸} cultural algorithms

^{۱۹} Integral of the Time multiplied Absolute Error

۲-۳- کنترل کننده های کلاسیک

در (۳۱) رویکردی در زمینه طراحی کلاسیک کنترل WADC برای سیستم قدرت با لحاظ نمودن تأخیر مخابراتی سیگنالهای راه دور، ارائه شده است که در آن پس از استخراج یک مدل خطی براساس سیگنالهای مناسب سیستم قدرت و کاهش مرتبه آن به اندازه کافی، با استفاده از روش کلاسیک، یک کنترل پیشفاز-پسفاز، طراحی و سیگنال کنترل برای عملکرد مطلوب ادوات FACTS اعمال می‌گردد. البته همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، در این مرجع، ساختاری شبیه پایدارساز رایج سیستم قدرت در نظر گرفته شده است و در عین حال با لحاظ نمودن بلوکی خاص برای لحاظ نمودن تأخیر سیگنالها، حاشیه لازم برای پایداری براساس روش نامساویهای ماتریسی (LMI) ^{۲۰} در طراحی منظور شده است.



شکل (۶): ساختار کنترل میرایی فراگیر WADC برای ادوات FACTS [۲۰]

در این مرجع ضمن بررسی برخی پیشامدهای سیستم قدرت، با شبیه سازی غیرخطی چند سیستم، کارایی کنترل طراحی شده، را نمایش داده است. لیکن مدل بار مربوطه در این مرجع، مدل امپدانس ثابت ^{۲۱} منظور شده در حالی که باتوجه به تنوع بار در یک سیستم قدرت، عدم قطعیت ناشی از این امر، ممکن است کارایی دینامیکی کنترل را تحت الشعاع قرار دهد. همچنین در طراحی و مطالعات میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای، تأثیر تأخیرات چندگانه متغیر با زمان ^{۲۲} (مرتبط با سیگنالهای مختلف) در (۳۱) مورد توجه قرار نگرفته است که باتوجه به این ضعف روشهای دیگر مورد توجه خواهند بود.

۲-۴- کنترل کننده های تطبیقی

مرجع (۱۶) ساختار کلی شکل (۷) را برای پایدارسازهای مبتنی بر کنترل تطبیقی ^{۲۳} بیان نموده است. در این ساختار کلی، از خروجی واقعی سیستم برای شناسایی یا تخمین پارامترهای مدل ^{۲۴} سیستم و به تبع آن تعیین کنترل کننده و پارامترهای مربوطه استفاده می‌شود.

در (۳۲) باهدف بهبود میرایی نوسانات، از داده های سیستم اندازه گیری ناحیه وسیع WAMS بعنوان ورودی کنترل کننده استفاده شده است و البته تأخیر ناشی از اندازه گیری و تدوین اطلاعات PMU که از طریق سیستمهای مخابراتی ارسال می‌گردد، مورد توجه قرار گرفته و ساختار کنترل تطبیقی مورد نظر برای کنترل یکی از ادوات FACTS، برای بهبود نوسانات بین ناحیه‌ای، بفرم رابطه (۲) طراحی و اجرا گردیده است.

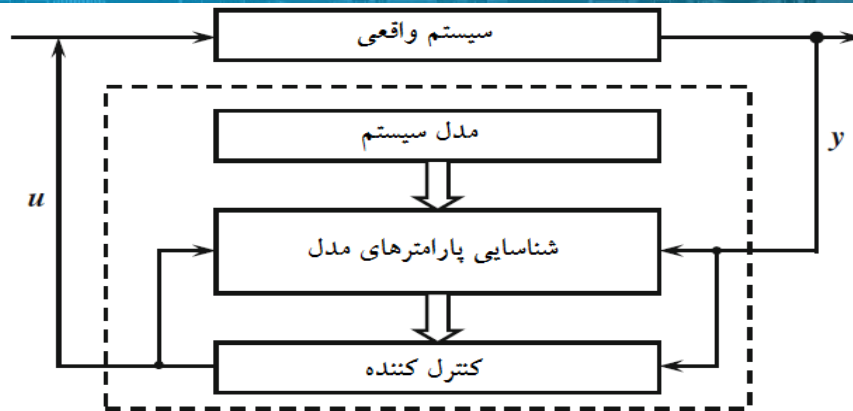
^{۲۰} linear matrix inequalities

^{۲۱} constant impedance

^{۲۲} multiple time-varying delays

^{۲۳} Adaptive control

^{۲۴} parameter identification/estimation



شکل (۷): ساختار کلی کنترل تطبیقی

$$G_c(s, T_d) = K(T_d) \frac{1 + T_1(T_d)s}{1 + T_2(T_d)s} \frac{1 + T_3(T_d)s}{1 + T_4(T_d)s} \frac{T_w s}{1 + T_w s} \quad (2)$$

این تابع تبدیل شباهت زیادی به ساختار پایدارسازهای رایج سیستم قدرت دارد اما تفاوت اساسی این کنترل کننده، وابستگی همه پارامترهای آن (بجز ثابت زمانی صافی) به پارامتر زمان تأخیر (T_d) می باشد که براساس این تأخیر، پارامترهای تابع تبدیل فوق تنظیم می شوند و میزان تأخیر به سرعت اندازه گیری و محاسبات PMU و نیز سرعت تبادل اطلاعات در بسترهای مخابراتی وابسته است که می تواند تا حد ۱۵۰ میلی ثانیه باشد البته یکی از مهمترین بسترهای ارتباطی شبکه جهانی اینترنت است که در آن سرعت تبادل اطلاعات یک پارامتر متغیر می باشد لذا تأخیرات سیگنالی ناشی از این امر نیز متغیر خواهد بود.

در (۳۳) تأخیر سیگنالهای راه دور WAMS برای اندازه گیری و ارسال سیگنالهای ورودی سیستم کنترل لحاظ شده و از تکنیک شناسایی زیرفضا^{۲۵} (SIT) برای یافتن یک مدل درجه پایین برای سیستم قدرت استفاده شده است سپس با استفاده از یک طرح پیشنهادی، تنظیم آنلاین کنترل میرایی فراگیر (کمیف) بصورت تطبیقی دنبال شده است. یکی از ویژگیهای این مطالعه، توجه به عدم قطعیت های پارامتری سیستم و نیز جبران سازی تأخیر ناشی از ارسال سیگنالهای راه دور می باشد. البته این مرجع، مدل خطی سیستم قدرت را برای کنترل مورد نظر لحاظ نموده و کنترل فراگیر با ساختاری شبیه به یک پایدارساز محلی^{۲۶} (LPSS) اما همراه با یک جبران ساز تأخیر، در نظر گرفته شده و بصورت یک کنترل کننده کمکی^{۲۷} با خروجی پایدارساز محلی جمع شده و به سیستم اعمال می شود.

۲-۵- کنترل کننده های مقاوم

از آنجا که سیستم قدرت دارای شرایطی است که دائماً ممکن است تغییر نماید، توجه به مقاوم بودن^{۲۸} پایدارسازهای آن ضروری است. این مقاوم بودن به معنای کارایی کنترل کننده مورد نظر در برابر عدم قطعیت^{۲۹} سیستم قدرت می باشد. در برخی مراجع، نرم های H^2 و H^∞ توابع تبدیل تعریف شده بصورت سره، تحت چارچوب نامعادلات ماتریسی (LMI)^{۳۰} کمینه می شوند تا رفتار مطلوب و پایداری مقاوم حاصل گردد. هر دو ساختار کنترل متمرکز^{۳۱} و غیرمتمرکز^{۳۲} مورد استفاده قرار گرفته اند. به عنوان مثال، ساختارهای کنترلی مختلف پیشنهادی در (۳۴)، با سیستم های کنترل فراگیر (WACS)^{۳۳} از طریق واحدهای اندازه گیر فازوری (PMUs)، جهت عملکرد مطمئن سیستم های قدرت موثر خواهند بود. در (۱۱) تلاش شده تا از یک سیستم فتوولتایی با مقیاس بزرگ در کنترل میرایی نوسانات توان (POD) استفاده شود لذا بادر نظر گرفتن روش کنترلی^{۳۴} LQG برای یک سیستم قدرت که دارای مدل عدم قطعیت بفرم $\phi(t)$ و مدل نویز سفید گوسی با کوواریانس واحد^{۳۵} به نام $w(t)$ می باشد، طرحواره شکل (۸) را مورد نظر

^{۲۵} subspace system identification technique

^{۲۶} Local PSS

^{۲۷} Supplementary Controller

^{۲۸} robustness

^{۲۹} uncertainty

^{۳۰} Linear Matrix Inequalities

^{۳۱} Centralized

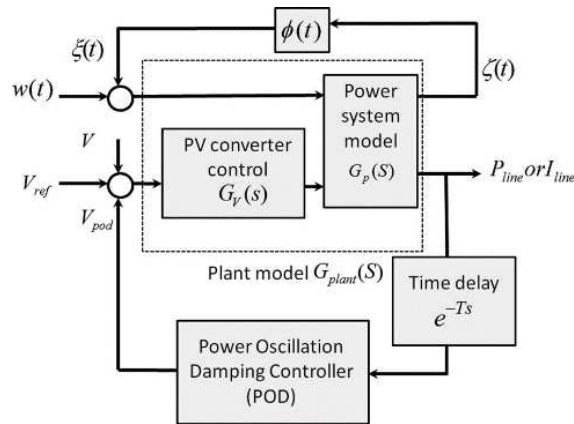
^{۳۲} Decentralized

^{۳۳} Wide Area Control Systems

^{۳۴} linear quadratic Gaussian

^{۳۵} unity-covariance Gaussian white noise process

قرار داده است که در آن تأخیر سیگنالهای اندازه گیری راه دور لحاظ گردیده است. در این طرح، $\zeta(t)$ خروجی دارای عدم قطعیت و $\xi(t)$ ورودی ناشی از مدل عدم قطعیت می باشد.



شکل (۸): ارتباطات کلی کنترل POD برای سیستم فتوولتایی بزرگ (۱۱)

در (۱۱)، پس از طراحی، درجه کنترلر به دست آمده بکمک روشهای کاهش درجه^{۳۶}، باحفظ خواص رفتار فرکانسی آن، پایین آورده شده و سپس با شبیه سازی غیرخطی سیستم قدرت، عملکرد حلقه بسته اعتبارسنجی^{۳۷} شده و همچنین با بررسی حالتیهای مختلف بهره برداری سیستم، مقاوم بودن کنترل کننده مورد نظر، ارزیابی شده است.

در (۳۵) کنترل LQG با استفاده از تخمین حالت فیلتر کالمن^{۳۸} مورد بررسی قرار گرفته است که در آن ماتریسهای فضای حالت سیستم، ماتریس فیدبک خطا و نویز منظور شده است. نکته مهم اینکه ضرایب وزنی در تابع هدف طراحی کنترل براساس اهمیت مودهای سیستم تعیین می شود لذا کنترل مربوطه MLQG^{۳۹} نامیده شده است. در طراحی کنترل فوق، برای مقاوم بودن کنترل، فلوجارتی ارائه شده که در آن پیشامدهای^{۴۰} شبکه قدرت مانند خروج ژنراتورها، خطوط و ترانسفورماتورهای قدرت و حتی قطع شدن سیگنالهای کنترلی بررسی می شود. ساختار کنترل میرایی POD بصورت متمرکز و یا نامتمرکز قابل اجراء است که به عنوان نمونه در شکل (۱۰) ارتباطات سیگنالی در این دو طرح برای یک سیستم قدرت دارای خطوط بین ناحیه ای HVDC نمایش داده شده است (۸). در این سیستم، کنترل میرایی مورد نظر برای مودهای بین ناحیه ای طراحی بگونه ای اجرا شده که سیگنالهای ΔP_{dc}^{ref} به عنوان سیگنال کنترل برای میزان تغییر توان هر یک از سیستمهای HVDC اعمال گردد.

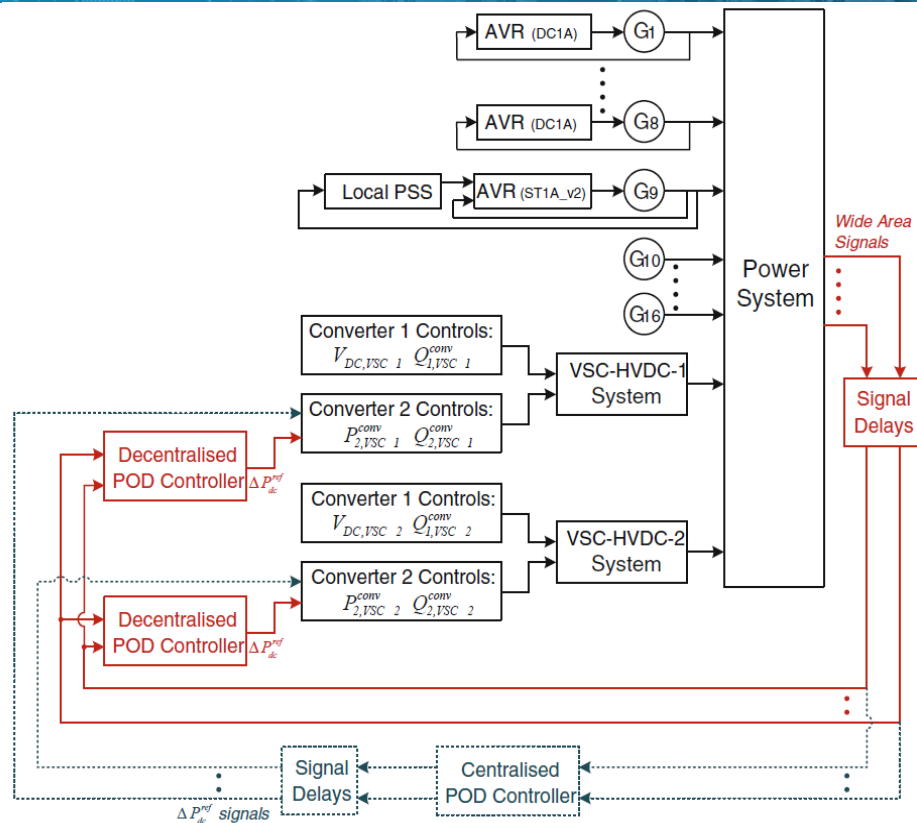
^{۳۶} Reduction(truncation)

^{۳۷} Validation

^{۳۸} Modal Linear Quadratic Gaussian Control

^{۳۹} Kalman Filter

^{۴۰} contingency

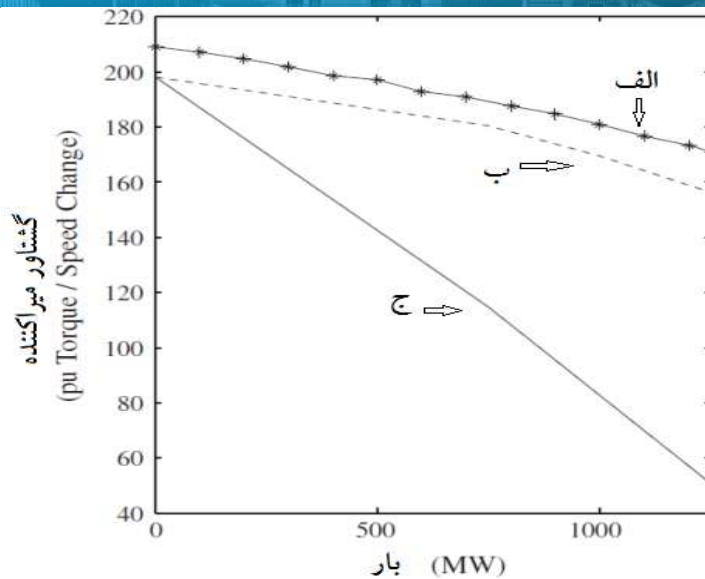


شکل (۹): ارتباطات سیگنالی کنترل میرایی متمرکز و نامتمرکز (۸)

نکته دیگر در این راستا، تأخیر سیگنالهاست که تأثیر آن در کنترل متمرکز بیشتر از کنترل نامتمرکز است. در (۹) تأثیر این امر بر ضریب میرایی مودهای نوسانی یک سیستم قدرت که کنترل کننده‌ای با ساختار MLQG برای میرایی آن طراحی شده، ارزیابی گردیده که این امر نشان دهنده تأثیر قابل ملاحظه تأخیر سیگنالها بر هدف کنترل است زیرا با افزایش این تأخیر، میزان ضریب میرایی حاصله بشدت کاهش می‌یابد بگونه‌ای که حتی ممکن است از حالت بدون کنترل میرایی کمتر شود. لذا توجه به مقاوم بودن کنترل در برابر تأخیرات سیگنالها در طراحی باید لحاظ گردد.

علاوه بر تغییرات مداوم عملکرد شبکه، یکی از مهمترین نامعینها و عدم قطعتهای مهم در سیستم قدرت، مدل بار می‌باشد که اثر مهمی بر پایداری دارد و برای طراحی یک کنترل مقاوم لازم است در نظر گرفته شود. در مرجع (۳۶) اثر این موضوع بر پایداری سیستم بویژه در حضور کنترل کننده های مقاوم (RPODC)^{۴۱} و غیر مقاوم رایج بررسی شده و مطابق شکل (۱۱) با مقایسه مقدار گشتاور میراکننده نتیجه گرفته شده که کنترل کننده های رایج (PSS/PODC) با مدل بار امیدانس ثابت که معمولاً در مطالعات لحاظ می‌شود، رفتار مناسبی نشان می‌دهند اما در مواجهه با بارهای دینامیکی که در سیستمهای قدرت بزرگ ممکن است تعداد قابل توجهی باشند، میرایی مناسبی ایجاد نمی‌کنند، لذا به منظور اطمینان از ایجاد میرایی مطلوب، استفاده از کنترل میرایی یا پایدارسازهای مقاوم توصیه شده‌است.

^{۴۱} Robust Power Oscillation Damping



شکل (۱۰): مقایسه گشتاور میرا کننده سیستم در سه وضعیت الف) کنترل مقاوم RPODC در حضور بار دینامیکی ب) پایدارساز رایج در مواجهه با مدل بار امیدانس ثابت ج) پایدارساز رایج در مواجهه با مدل بار دینامیکی (۳۶)

توجه به مقاوم بودن کنترل کننده، از نظر کاربردی در شبکه های بزرگ بسیار مهم است چرا که همواره تهیه مدل دقیق بار در اینگونه شبکه ها پیچیده و دشوار بوده و البته این مسئله در شبکه های بزرگ و در حال توسعه مانند ایران پیچیده تر خواهد بود. لذا ویژگی مقاوم بودن در طراحی کنترل مناسب در شبکه برق ایران ضروری می باشد.

۳- بحث و نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد

بر اساس مطالب این مقاله می توان گفت که یکی از مهمترین عوامل تهدید بهره برداری مطمئن شبکه های برق، موضوع نوسانات بویژه از نوع بین ناحیه ای است. در پژوهشهای اخیر، استفاده از سیستمهای اندازه گیری فراگیر WAMS مورد توجه قرار گرفته و از این سیگنالها برای تشخیص وقوع و کنترل میرایی نوسانات استفاده می شود که گرچه به دلیل تأخیر در ارسال، دریافت و تحلیل با مشکلاتی مواجه است اما راهکارهای کنترل (بویژه مقاوم و تطبیقی) ارائه شده و در حال توسعه است. از طرفی سیستمهای قدرت با شرایط عملکردی و محدودیتهای مختلفی مواجه هستند که از آن جمله می توان به اختلالات کوچک (مانند تغییر بار و مدل رفتار دینامیکی آن) و نیز اختلالات بزرگ (مانند خطاها و خروج تجهیزات از مدار) اشاره نمود. از طرفی بات توجه به در حال توسعه بودن کشور ایران که به تبع آن شرایط شبکه برق نیز بسیار متغیر است و عدم قطعیتهای بسیاری در آن وجود دارد، توجه به مقاوم بودن کنترلهای شبکه ضروری است بویژه در زمینه نوسانهای توان که سابقه وقوع آن در شبکه ایران همواره به عنوان یک دغدغه برای بهره برداران مطرح بوده است. همچنین با عنایت به راه اندازی WAMS در ایران، این امکان وجود دارد که ابتدا ماهیت نوسانات و عوامل دخیل در آنها شناسایی شده و سپس برای تعیین فیدبک (پسخور)، مسیرهای توان که این نوسانات در آنها بیشتر قابل رویت هستند، تشخیص داده شود و در نهایت با استفاده از کنترل مقاوم بر اساس سیگنالهای راه دور تولید شده توسط PMU، کنترل میرایی نوسانات شبکه طراحی و اجرا گردد.

منابع

- Power System Oscillations. Robust Control in Power Systems [Internet]. Springer US; ۲۰۰۵. p. ۵-۱۲. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/0-387-25950-3_2
- Jabali MBA, Kazemi MH, Joudaki S. A proposed approach for modeling of power system uncertainties to design robust PSS. Electrical Engineering (ICEE), ۲۰۱۳ ۲۱st Iranian Conference on. ۲۰۱۳. p. ۱-۶.
- Iravani A, Karrari M, Malik OP. Study of a major oscillations event in northeastern area of the Iranian power network. Electr Power Syst Res [Internet]. ۲۰۱۱;۸۱(۷):۱۲۹۲-۸. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961100023X>

۴. Machowski J, Bialek J, Bumby J. Power System Dynamics: Stability and Control [Internet]. Wiley; ۲۰۰۸. Available from: <http://books.google.com/books?id=·ZE۲yt·tfFEC>
۵. Power System Stabilizers. Robust Control in Power Systems [Internet]. Springer US; ۲۰۰۵. p. ۵۹-۷۸. Available from: http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۷/۰-۳۸۷-۲۵۹۵۰-۳_۵
۶. Chaudhuri NR, Domahidi A, Majumder R, Chaudhuri B, Korba P, Ray S, et al. Wide-area power oscillation damping control in nordic equivalent system. Gener Transm Distrib IET. ۲۰۱۰;۴(۱۰):۱۱۳۹-۵۰.
۷. Leon AE, Solsona JA. Power Oscillation Damping Improvement by Adding Multiple Wind Farms to Wide-Area Coordinating Controls. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۴;۲۹(۳):۱۳۵۶-۶۴.
۸. Preece R, Milanovic J V, Almutairi AM, Marjanovic O. Probabilistic Evaluation of Damping Controller in Networks With Multiple VSC-HVDC Lines. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۳;۲۸(۱):۳۶۷-۷۶.
۹. Preece R, Milanovic J V, Almutairi AM, Marjanovic O. Damping of inter-area oscillations in mixed AC/DC networks using WAMS based supplementary controller. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۳;۲۸(۲):۱۱۶۰-۹.
۱۰. Preece R, Woolley NC, Milanovic J V. The Probabilistic Collocation Method for Power-System Damping and Voltage Collapse Studies in the Presence of Uncertainties. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۳;۲۸(۳):۲۲۵۳-۶۲.
۱۱. Shah R, Mithulananthan N, Lee KY. Large-Scale PV Plant With a Robust Controller Considering Power Oscillation Damping. Energy Conversion, IEEE Trans. ۲۰۱۳;۲۸(۱):۱۰۶-۱۶.
۱۲. Simfukwe DD, Pal BC. Robust and Low Order Power Oscillation Damper Design Through Polynomial Control. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۳;۲۸(۲):۱۵۹۹-۶۰۸.
۱۳. Surinkaew T, Ngamroo I. Coordinated Robust Control of DFIG Wind Turbine and PSS for Stabilization of Power Oscillations Considering System Uncertainties. Sustain Energy, IEEE Trans. ۲۰۱۴;۵(۳):۸۲۳-۳۳.
۱۴. Ni J, Shen C, Liu F. Estimation of the electromechanical characteristics of power systems based on a revised stochastic subspace method and the stabilization diagram. Sci China Technol Sci [Internet]. SP Science China Press; ۲۰۱۲;۵۵(۶):۱۶۷۷-۸۷. Available from: <http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۴۳۱-۰۱۲-۶۸۳۴-۵>
۱۵. Mei S, Chen L. Recent advances on smart grid technology and renewable energy integration. Sci China Technol Sci [Internet]. Springer Berlin Heidelberg; ۲۰۱۳;۵۶(۱۲):۳۰۴۰-۸. Available from: <http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۴۳۱-۰۱۳-۵۴۱۴-Z>

۱۶. Malik O. Evolution of Power Systems into Smarter Networks. J Control Autom Electr Syst [Internet]. Springer US; ۲۰۱۳;۲۴(۱-۲):۱۳۹-۴۷. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s40313-013-0005-6>
۱۷. Salehi V, Mohamed A, Mazloomzadeh A, Mohammed OA. Laboratory-Based Smart Power System, Part II: Control, Monitoring, and Protection. Smart Grid, IEEE Trans. ۲۰۱۲;۳(۳):۱۴۰۵-۱۷.
۱۸. Yong L, Rehtanz C, Ruberg S, Longfu L, Yijia C. Wide-Area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Interarea Oscillations. Power Deliv IEEE Trans. ۲۰۱۲;۲۷(۳):۱۰۹۶-۱۰۵.
۱۹. He J, Lu C, Wu X, Li P, Wu J. Design and experiment of wide area HVDC supplementary damping controller considering time delay in China southern power grid. Gener Transm Distrib IET. ۲۰۰۹;۳(۱):۱۷-۲۵.
۲۰. Wei Y, Jiang L, Jinyu W, Wu QH, Shijie C. Wide-Area Damping Controller of FACTS Devices for Inter-Area Oscillations Considering Communication Time Delays. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۴;۲۹(۱):۳۱۸-۲۹.
۲۱. Yao W, Jiang L, Wu QH, Wen JY, Cheng SJ. Delay-Dependent Stability Analysis of the Power System With a Wide-Area Damping Controller Embedded. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۱;۲۶(۱):۲۳۳-۴۰.
۲۲. Yong L, Rehtanz C, Ruberg S, Longfu L, Yijia C. Assessment and Choice of Input Signals for Multiple HVDC and FACTS Wide-Area Damping Controllers. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۲;۲۷(۴):۱۹۶۹-۷۷.
۲۳. Zhang P, Yang DY, Chan KW, Cai GW. Adaptive wide-area damping control scheme with stochastic subspace identification and signal time delay compensation. Gener Transm Distrib IET. ۲۰۱۲;۶(۹):۸۴۴-۵۲.
۲۴. Rabiee S, Ayoubzadeh H, Farrokhzad D, Aminifar F. Practical aspects of phasor measurement unit (PMU) installation in power grids. Smart Grid Conference (SGC), ۲۰۱۳. ۲۰۱۳. p. ۲۰-۵.
۲۵. Huang H, Xu Z, Hua W. Estimation of interarea modes in large power systems. Int J Electr Power Energy Syst [Internet]. ۲۰۱۳;۵۳(۰):۱۹۶-۲۰۸. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061513001841>
۲۶. Kundur P, Klein M, Rogers GJ, Zywno MS. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability. Power Syst IEEE Trans. ۱۹۸۹;۴(۲):۶۱۴-۲۶.
۲۷. Xu Z, Shao W, Zhou C. Power system small signal stability analysis based on test signal. Power system

computation conference. ۲۰۰۲. p. ۱-۷.

۲۸. Jabali MBA, Mohseni A, Kazemi MH. Iran Grid PSS Retuning to Damp the interarea Oscillation. The First Electric Industry Automation Congress (EIAC۲۰۱۳). Mashhad, IRAN; ۲۰۱۳.
۲۹. Shin J, Nam S, Lee J, Baek S, Choy Y, Kim T. A Practical Power System Stabilizer Tuning Method and its Verification in Field Test. J Electr Eng Technol. ۲۰۱۰;۵(۳):۴۰۰-۶.
۳۰. Khodabakhshian A, Hemmati R. Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms. Int J Electr Power Energy Syst [Internet]. ۲۰۱۳;۴۴(۱):۵۷۱-۸۰. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S۰۱۴۲۰۶۱۵۱۲۰۰۴۰۹۷>
۳۱. Wei Y, Jiang L, Jinyu W, Wu QH, Shijie C. Wide-Area Damping Controller of FACTS Devices for Inter-Area Oscillations Considering Communication Time Delays. Power Syst IEEE Trans. ۲۰۱۴;۲۹(۱):۳۱۸-۲۹.
۳۲. Chow J, Ghiocel S. An Adaptive Wide-Area Power System Damping Controller using Synchrophasor Data. In: Chakraborty A, Ilić MD, editors. Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids [Internet]. Springer New York; ۲۰۱۲. p. ۳۲۷-۴۲. Available from: http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۱-۴۶۱۴-۱۶۰۵-۰_۱۷
۳۳. Cai G, Yang D, Liu C. Adaptive Wide-Area Damping Control Scheme for Smart Grids with Consideration of Signal Time Delay. Energies. ۲۰۱۳;۶(۹):۴۸۴۱-۵۸.
۳۴. $\xi \infty$ Control For Time-Delayed Systems. Robust Control in Power Systems [Internet]. Springer US; ۲۰۰۵. p. ۱۵۱-۶۹. Available from: http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۷/۰-۳۸۷-۲۵۹۵۰-۳_۱۰
۳۵. Preece R. Power System Modelling and Analysis Techniques. Improving the Stability of Meshed Power Networks [Internet]. Springer International Publishing; ۲۰۱۳. p. ۳۱-۶۱. Available from: http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۰۰۲۳۹۳-۹_۲
۳۶. Mahmud MA, Hossain MJ, Pota HR. Effects of large dynamic loads on power system stability. Int J Electr Power Energy Syst [Internet]. ۲۰۱۳;۴۴(۱):۳۵۷-۶۳. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S۰۱۴۲۰۶۱۵۱۲۰۰۴۱۲۷>