

روشی جدید برای بهبود پایداری سیگنال کوچک و تنظیم ولتاژ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده

هیمن گل‌پیرا^۱ حسن بیورانی^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج- ایران

hemin.golpira@uok.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج- ایران

bevrani@uoj.ac.ir

چکیده: نفوذ روزافزون منابع نوظهور تولید انرژی در سیستم‌های قدرت در پاسخ به افزایش تقاضای بار و مسائل زیست‌محیطی از یک طرف و تغییر ماهیت بار و شبکه‌های توزیع از سویی دیگر منجر به افزایش عدم قطعیت‌های سیستم شده است. این مهم به نوبه‌ی خود ضرورت طراحی روش‌های کنترلی مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است. در این مقاله به ارائه روشی جدید به منظور تنظیم پارامترهای سیستم تحریک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده پرداخته می‌شود. در گام اول روشی جدید و مبتنی بر مفهوم مرکز ثقل سیستم در مکانیک و با تکیه بر انتشار خطا برای کاهش مرتبه سیستم معرفی شده است. در روش معادل‌سازی پیشنهادی هر ناحیه سیستم قدرت از طریق تنها یک خط انتقال مجازی به مرکز ثقل سیستم متصل می‌شود. محاسبه خطوط انتقال مجازی بر صفر بودن برآیند گشتاورها در مرکز ثقل استوار است. در گام دوم الگوریتمی کنترلی ارائه شده است که با استفاده از دینامیک‌های سیستم و نحوه حرکت داده‌های اندازه‌گیری شده در صفحه تغییرات زاویه رتور - تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور، به تنظیم مجدد ضرایب ثابت پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ می‌پردازد. روش ارائه‌شده با تکیه بر معادلات ریاضی اساسی حاکم بر سیستم قدرت به استخراج شاخص‌هایی برای تنظیم پارامترهای سیستم تحریک می‌پردازد. عملکرد مطلوب کنترل‌کننده ارائه شده بر روی سیستم آزمون ۶۸ شینه IEEE و برای چند خطای مختلف، شبیه‌سازی و مورد تأیید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سیستم تحریک، پایداری، تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، پایدارساز سیستم قدرت، کنترل هماهنگ، داده‌های اندازه‌گیری شده

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: هیمن گل‌پیرا

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کردستان - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی برق

محدودیت‌های فیزیکی، همچون اشباع، از کارایی این دسته از مطالعات کاسته است.

به‌منظور غلبه بر مشکلات حاکم بر دسته‌ی اول تحقیقات، مطالعات جدید با بهره‌گیری از روش‌های تئوری کنترل مقاوم، کلید زنی و شناسایی سیستم و به‌صورت اعمال‌شده به مجموعه پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ معرفی شدند. در این دسته از مطالعات، پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در راستای متعادل‌سازی هر دو گشتاور سنکرون کننده و میرا کننده با یکدیگر هماهنگ می‌شوند. مطالعات انجام شده در این زمینه را می‌توان در پنج دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد:

- ۱- استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر روش‌های شناسایی [۶، ۷، ۹]
- ۲- استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر کلید زنی [۱۰، ۱۱]
- ۳- استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر روش‌های هوشمند و کنترل فازی [۱۲-۱۵]
- ۴- استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی [۱۶، ۱۷]
- ۵- استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر تئوری کنترل مقاوم [۴، ۱۸-۲۲]

ذات غیرخطی و تغییرپذیر با زمان، در کنار ابعاد بزرگ موجب محدودیت استفاده از روش‌های مبتنی بر شناسایی در مطالعات سیستم‌های قدرت واقعی شده است. در روش‌های مبتنی بر کلیدزنی، به ازای هر خطای مشخص، با استفاده از روش آزمون‌وخطا بهترین زمان کلید زنی محاسبه می‌شود. غیر مقاوم بودن این روش‌ها در برابر اغتشاشات مختلف از جمله محدودیت‌های این دسته از مطالعات است. در دسته سوم، مسئله غیر مقاوم بودن کنترل‌کننده‌ها با استفاده از وزن‌دهی سیگنال‌های فرمان خروجی حل شده است. پیاده‌سازی این دسته از مطالعات در سیستم‌های واقعی به دلیل افزایش قابل توجه قوانین کنترلی غیرعملی است. مدل‌سازی هماهنگی پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی در دسته‌ی چهارم مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مهم‌ترین مشکلات حاکم بر این دسته از مطالعات می‌توان به نیاز به خطی‌سازی سیستم حول نقطه کار و همچنین غیرمقاوم بودن آن‌ها اشاره کرد. استفاده از تئوری کنترل مقاوم برای هماهنگی و تنظیم پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در سال‌های اخیر بیش‌ازپیش مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های حاکم بر سیستم در مسئله هماهنگی، نتایجی به‌مراتب بهتر و مقاوم‌تر از سایر روش‌های مذکور را نتیجه می‌دهند. مشکلاتی همچون خطی‌سازی سیستم حول نقطه کار [۴] و نسبت مستقیم بین ابعاد سیستم مورد مطالعه و کنترل‌کننده [۱۸، ۱۹] کاربرد این روش‌ها را برای استفاده در سیستم‌های قدرت واقعی تحت تأثیر قرار داده است. به‌طور کلی تحقیقات فوق محدود به سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت و یا مدل خطی شده سیستم قدرت شده‌اند. حال آنکه این دو نوع مدل نمی‌توانند نمایانگر مناسبی از رفتار

تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ به‌عنوان قسمت اصلی یک سیستم تحریک از یک‌سو باعث بهبود پایداری گذرا و تثبیت ولتاژ شده و از سویی دیگر با کاهش میرایی مدهای الکترومکانیکی منجر به تضعیف پایداری سیگنال کوچک می‌شود [۱]. در نتیجه، پایدارساز سیستم قدرت به‌عنوان کنترل‌کننده‌ای کمکی برای بهبود پایداری سیگنال کوچک به سیستم تحریک افزوده شد [۲].

جبران سازی فاز به‌عنوان اساس کار پایدارساز سیستم قدرت یک استراتژی کنترلی مبتنی بر تئوری کنترل خطی است؛ بنابراین عملکرد پایدارساز سیستم قدرت به‌وضوح تابع نقطه کار سیستم است [۳]. حال آنکه محدوده‌ی وسیعی از اغتشاشات ممکن و همچنین عدم قطعیت‌های موجود در سیستم موجب فاصله گرفتن نقطه کار از مقدار اولیه و در نتیجه تضعیف عملکرد پایدارساز سیستم قدرت می‌شوند [۴]. متناسب با هر نوسان الکترومکانیکی به وجود آمده در سیستم دو گشتاور متعادل، یکی هم‌فاز با زاویه رتور، تحت عنوان گشتاور سنکرون کننده و دیگری گشتاور هم‌فاز با سرعت رتور تحت عنوان گشتاور میرا کننده، به وجود می‌آیند [۵]. ناپایداری در سیستم قدرت در اثر کمبود گشتاور سنکرون کننده یا میرا کننده و یا هر دو حاصل می‌شود. پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ از طریق مدولاسیون ولتاژ تحریک به ترتیب گشتاورهای غیر هم‌فاز میرا کننده و سنکرون کننده را به وجود می‌آورند. به‌عبارت‌دیگر یک سیگنال کنترلی واحد به‌منظور بهبود دو رفتار متناقض سیستم یعنی پایداری گذرا و سیگنال کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو بهبود پایداری گذرای سیستم منجر به تضعیف پایداری سیگنال کوچک شده و بالعکس [۶]. با توجه به تناقض ذاتی موجود بین این دو رفتار، مصالحه‌ای تحت عنوان هماهنگی در تنظیم پارامترهای این دو کنترل‌کننده در سیستم‌های قدرت اجتناب‌ناپذیر است [۷].

مطالعات گسترده‌ای در زمینه تنظیم پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در سال‌های متمادی انجام شده است. در اغلب این تحقیقات سعی شده است تا با ارائه‌ی روش‌هایی مناسب، عملکرد مطلوب پایدارساز سیستم قدرت در گستره‌ی وسیعی از نقاط کار تضمین شود. در این دسته از مطالعات، ساختار سلسله مراتبی سنتی برای بهبود عملکرد سیستم در نظر گرفته شده است. در این ساختار که برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ توسط دملو و کونکورديا [۸] معرفی شد دو مرحله کاملاً مجزا برای تنظیم پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. ابتدا پارامترهای تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ به‌منظور دستیابی به پایداری گذرای مطلوب تنظیم و سپس پایدارساز سیستم قدرت با توجه به میرایی مورد نیاز در سیستم طراحی می‌شود. نادیده گرفتن تناقض بین رفتار پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ و همچنین

دینامیکی سیستم‌های قدرت واقعی باشند. فقدان یک تحلیل دینامیکی جامع و معیاری مناسب برای هماهنگی و تنظیم پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در یک سیستم واقعی با مقیاس بزرگ در این مطالعات احساس می‌شود.

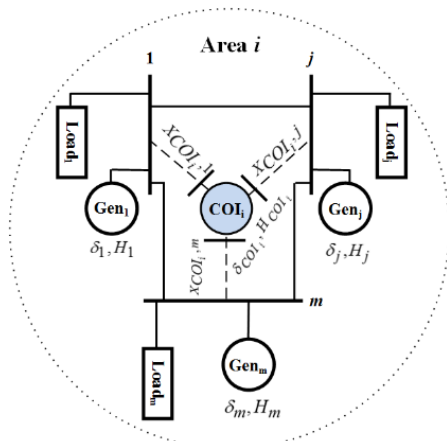
برای غلبه بر مشکلات فوق و در دسته‌ی نوظهوری از مطالعات، روش‌های مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده معرفی شدند. پیاده‌سازی موفق این دسته از مطالعات درگرو شناسایی مدل سیستم مورد مطالعه است. حال آن‌که مدل‌های متداول مورداستفاده در شبیه‌سازهای حوزه زمان، مدل‌هایی پیچیده بوده که به دلیل تغییرات دائمی ساختار سیستم همواره از دقت قابل قبولی به‌ویژه برای کاربردهای کنترلی زمان واقعی برخوردار نیستند. از طرفی در سیستم‌های با ابعاد بزرگ نیز تنها تعداد محدودی از توابع انتقال و یا مدهای نوسانی، تأثیرگذار بر رفتار دینامیکی سیستم بوده و نیازمند به بررسی و شناسایی در فرایند شناسایی مدل سیستم دارند. بنابراین شناسایی مدل مناسب و کاهش مرتبه یافته مشتمل بر توابع موردنظر بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. روش‌های موجود در تحقیقات منتشرشده تا به امروز بیشتر مبتنی بر روش‌های برازش منحنی و یا مبتنی بر روش‌های خطی‌سازی، همچون بسط تیلور و روش اعمال اغتشاش، هستند. دقت این دسته از روش‌ها که با تخمین پارامترهای معادلات دینامیکی برای سیستم مورد مطالعه به خطی‌سازی آن‌ها حول نقطه کار می‌پردازند، متأثر از مشکلاتی همچون خطای خطی‌سازی و صرف‌نظر کردن از جملات مرتبه بالا است. مقاله حاضر به ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی کاهش مرتبه یافته سیستم قدرت بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده می‌پردازد. روش ارائه‌شده با بهره‌گیری از مفهوم مرکز ثقل در مکانیک به مدل‌سازی سیستم با روشی ساده و دقیق می‌پردازد. این روش از راه بیان هر ناحیه سیستم با استفاده از یک ژنراتور معادل درجه ۲ و اتصال آن به سایر نواحی از طریق تنها یک خط انتقال مجازی به تخمین نوسانات الکترومکانیکی کند می‌پردازد. تجمیع کلیه دینامیک‌های تأثیرگذار بر رفتار یک ناحیه نوعی، در یک سیستم قدرت به‌هم‌پیوسته، در یک خط انتقال از مزایای قابل‌توجه این روش برای استفاده در تنظیم پارامترهای سیستم تحریک است. بعد از مدل‌سازی دقیق سیستم، ارائه روش کنترلی زمان واقعی مبتنی بر شاخص گرافیکی برای بهبود پایداری سیگنال کوچک سیستم در دستور کار قرار خواهد گرفت. استفاده از روش‌های تحلیلی و گرافیکی در کنار شاخص‌های محاسباتی برای بهره‌گیری در سیستم‌های کنترل زمان واقعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند توسط کارگروه کنترل و پایداری IEEE معرفی شده است. در این راستا هوزو و همکاران [۲۳]، در سال ۲۰۱۰ در تلاشی به معرفی ابزاری گرافیکی برای تحلیل رفتار دینامیکی سیستم قدرت پرداختند. در این روش رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور در صفحه تغییرات فاز برحسب تغییرات فرکانس مورد مطالعه قرار گرفته است. با این‌وجود، ذات یکسان دو متغیر فرکانس و زاویه رتور از توانایی این روش در تحلیل

دینامیکی سیستم‌های قدرت واقعی باشند. فقدان یک تحلیل دینامیکی جامع و معیاری مناسب برای هماهنگی و تنظیم پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در یک سیستم واقعی با مقیاس بزرگ در این مطالعات احساس می‌شود.

برای غلبه بر مشکلات فوق و در دسته‌ی نوظهوری از مطالعات، روش‌های مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده معرفی شدند. پیاده‌سازی موفق این دسته از مطالعات درگرو شناسایی مدل سیستم مورد مطالعه است. حال آن‌که مدل‌های متداول مورداستفاده در شبیه‌سازهای حوزه زمان، مدل‌هایی پیچیده بوده که به دلیل تغییرات دائمی ساختار سیستم همواره از دقت قابل قبولی به‌ویژه برای کاربردهای کنترلی زمان واقعی برخوردار نیستند. از طرفی در سیستم‌های با ابعاد بزرگ نیز تنها تعداد محدودی از توابع انتقال و یا مدهای نوسانی، تأثیرگذار بر رفتار دینامیکی سیستم بوده و نیازمند به بررسی و شناسایی در فرایند شناسایی مدل سیستم دارند. بنابراین شناسایی مدل مناسب و کاهش مرتبه یافته مشتمل بر توابع موردنظر بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. روش‌های موجود در تحقیقات منتشرشده تا به امروز بیشتر مبتنی بر روش‌های برازش منحنی و یا مبتنی بر روش‌های خطی‌سازی، همچون بسط تیلور و روش اعمال اغتشاش، هستند. دقت این دسته از روش‌ها که با تخمین پارامترهای معادلات دینامیکی برای سیستم مورد مطالعه به خطی‌سازی آن‌ها حول نقطه کار می‌پردازند، متأثر از مشکلاتی همچون خطای خطی‌سازی و صرف‌نظر کردن از جملات مرتبه بالا است. مقاله حاضر به ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی کاهش مرتبه یافته سیستم قدرت بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده می‌پردازد. روش ارائه‌شده با بهره‌گیری از مفهوم مرکز ثقل در مکانیک به مدل‌سازی سیستم با روشی ساده و دقیق می‌پردازد. این روش از راه بیان هر ناحیه سیستم با استفاده از یک ژنراتور معادل درجه ۲ و اتصال آن به سایر نواحی از طریق تنها یک خط انتقال مجازی به تخمین نوسانات الکترومکانیکی کند می‌پردازد. تجمیع کلیه دینامیک‌های تأثیرگذار بر رفتار یک ناحیه نوعی، در یک سیستم قدرت به‌هم‌پیوسته، در یک خط انتقال از مزایای قابل‌توجه این روش برای استفاده در تنظیم پارامترهای سیستم تحریک است. بعد از مدل‌سازی دقیق سیستم، ارائه روش کنترلی زمان واقعی مبتنی بر شاخص گرافیکی برای بهبود پایداری سیگنال کوچک سیستم در دستور کار قرار خواهد گرفت. استفاده از روش‌های تحلیلی و گرافیکی در کنار شاخص‌های محاسباتی برای بهره‌گیری در سیستم‌های کنترل زمان واقعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند توسط کارگروه کنترل و پایداری IEEE معرفی شده است. در این راستا هوزو و همکاران [۲۳]، در سال ۲۰۱۰ در تلاشی به معرفی ابزاری گرافیکی برای تحلیل رفتار دینامیکی سیستم قدرت پرداختند. در این روش رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور در صفحه تغییرات فاز برحسب تغییرات فرکانس مورد مطالعه قرار گرفته است. با این‌وجود، ذات یکسان دو متغیر فرکانس و زاویه رتور از توانایی این روش در تحلیل

۲- تحلیل دینامیکی و معرفی معیار پیشنهادی

این بخش به سه زیر بخش به شرح زیر تقسیم می‌شود: ابتدا فرضیات لازم برای توسعه مدل و استخراج شاخص‌های کنترلی بیان خواهند شد. در بخش دوم جزئیات روشی پیشنهادی به‌منظور شناسایی و استخراج مدل کاهش مرتبه یافته سیستم مورد مطالعه ارائه



شکل (۱): شماتیک مرکز اینرسی برای ناحیه نام و امیدانس های مجازی

حال آن که رفتار دینامیکی هر یک از شین ها در ناحیه مورد مطالعه، بر حسب رفتار دینامیکی مرکز اینرسی و با استفاده از رابطه زیر می تواند محاسبه شود.

$$f_j = \frac{\partial f_j}{\partial \text{COI}_i} \Delta f_{\text{COI}_i}, \quad \forall j \in A_i \quad (2)$$

به عبارت دیگر رابطه (۲) برای محاسبه فرکانس شین نام در ناحیه نام و بر حسب مشخصات مرکز اینرسی ناحیه مورد استفاده قرار می گیرد. برای محاسبه حساسیت تغییرات فرکانس شین نام به تغییرات فرکانس مرکز اینرسی ناحیه نام در این رابطه، از تعریف مفهوم مکانیکی مرکز ثقل استفاده می شود. بر این اساس فرض می شود هر شین در ناحیه مورد مطالعه، مشخص شده به وسیله فرکانس، اینرسی و زاویه، به وسیله تنها یک خط انتقال (خط چین های موجود در شکل ۱) به مرکز اینرسی ناحیه متصل می شود. لازم به ذکر است که این خطوط وجود خارجی ندارد و تنها بر اساس صفر بودن برآیند گشتاورهای وارده از طرف شین های موجود در ناحیه نام بر مرکز اینرسی ناحیه محاسبه می شود. با استدلالی مشابه و تفسیر مرکز ثقل سیستم به عنوان واحدی (مشخص شده با فرکانس، زاویه و اینرسی معادل) که برآیند گشتاورهای وارده از طرف مراکز اینرسی نواحی بر آن صفر است شکل ۲ حاصل می شود. در شکل های ۱ و ۲ $P_{COI_i, j}^{tie}$ و $P_{COI_i, COG}^{tie}$ به ترتیب توان انتقال داده شده از شین نام به مرکز اینرسی ناحیه نام و از مرکز اینرسی ناحیه نام به مرکز ثقل سیستم توسط راکتانس های مجازی است. در ادامه نحوه محاسبه راکتانس مجازی بر اساس صفر بودن برآیند گشتاورها و همچنین ضرایب حساسیت در معادله (۲) توضیح داده خواهد شد.

رفتار دینامیکی مرکز ثقل سیستم در شکل ۲ بر اساس مشخصات مراکز اینرسی نواحی به صورت زیر قابل بیان است:

می شود. در نهایت دسته منحنی های تغییرات ولتاژ- تغییرات زاویه رتور و کاربرد آنها در طراحی الگوریتم کنترلی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱-۲- فرضیات

به منظور استخراج مدل معادل سیستم توجه به فرضیات زیر ضروری است:

- داده های اندازه گیری شده برای کلیه شین های PV در سیستم در دسترس خواهند بود. به عبارت دیگر سیستم مشاهده پذیر است.
- فرض می شود داده های اندازه گیری شده، داده های فیلتر شده و بدون نویز هستند و هیچ گونه از دست رفتن داده وجود ندارد.
- کلیه ژنراتورهای موجود مجهز به سیستم تحریک و پایدارساز سیستم قدرت هستند.

۲-۲- کاهش مرتبه سیستم قدرت

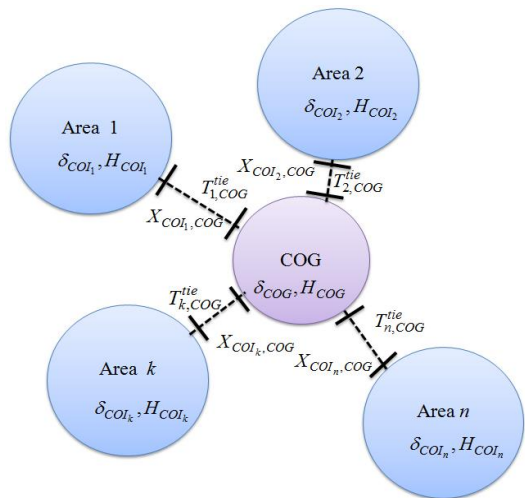
روش پیشنهادی با بهره گیری از تعریف ارائه شده برای مرکز ثقل یک جسم سلب به شناسایی سیستم مورد مطالعه می پردازد. مرکز ثقل یک جسم، نقطه ای منحصر به فرد در آن جسم است که برآیند گشتاورهای وارده به آن نقطه صفر است [۲۶]. در ادامه سعی می شود تا با بهره گیری از این تعریف و تطبیق آن به سیستم های قدرت به ارائه الگوریتمی سیستماتیک برای شناسایی و معادل سازی سیستم پرداخته شود.

فرض کنید سیستم قدرت مورد مطالعه به n ناحیه تقسیم شده باشد. ناحیه بندی نواحی بر اساس معیار همسانی ژنراتورها و یا روش متغیر با زمان تک ماشین معادل [۲۷] انجام می شود. برای هر ناحیه، پارامترهای فرکانس، ولتاژ و زاویه فاز مرکز اینرسی برای تعریف کردن ناحیه در نظر گرفته می شود. رفتار دینامیکی ناحیه نام بر اساس پارامترهای مرکز اینرسی آن ناحیه و با استفاده از معادله نوسان زیر بیان می شود [۲۸]:

$$M_{COI_i} \frac{d^2 \theta_{COI_i}(t)}{dt^2} = T_{m_{COI_i}}(t) - T_{e_{COI_i}}(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

که در آن موقعیت زاویه ای مرکز اینرسی، M_{COI} اینرسی معادل ناحیه و T_m و T_e گشتاورهای الکتریکی خروجی و مکانیکی ورودی متغیر با زمان هستند. شکل ۱ اساس فرآیند تشکیل مرکز اینرسی ناحیه ای دلخواه از سیستم را نشان می دهد. در حالی که رابطه (۱) به بررسی رفتار ناحیه مورد نظر در مواجهه با یک اغتشاش خارجی می پردازد، اطلاعات فرکانس های محلی و نوسانات کند بین ژنراتورهای موجود در ناحیه بر اساس این رابطه قابل بیان نیست.

لازم به ذکر است که مقدار کمینه یک تابع قدر مطلق همواره برابر با صفر خواهد بود و بنابراین معادلات (۸) و (۹) نتایج یکسانی را با معادلات (۶) و (۷) نتیجه خواهند داد. از آنجاکه نسبت مقادیر امیدانس‌های مجازی برای تعیین میزان مشارکت نواحی در تغییرات فرکانس و توان‌ها حائز اهمیت است بنابراین روابط (۸) و (۹) مقید به $0 < X_{COG}^{tie} < 1$ خواهند بود. لازم به ذکر است که مدل معادل کاهش مرتبه یافته سیستم قدرت که از طریق پرداختن به روابط (۸) و (۹) حاصل خواهد شد تنها نیازمند به اطلاعات لحظه‌ای ولتاژ و فرکانس شین‌های کنترلی و مشخصات اینرسی واحدهای تولیدی است. از آنجایی که واحدهای اندازه‌گیری فازورها هر ۲۰ میلی‌ثانیه اقدام به ارسال اطلاعات به‌روز خواهند کرد بنابراین مدت‌زمان لازم برای به‌روزرسانی مدل بستگی به زمان لازم برای پرداختن به معادلات (۸) و (۹) دارد. از طرفی معادلات (۸) و (۹) معادلاتی مناسب و ساده برای حل به‌وسیله روش‌های فرابتکاری در کسری از زمان هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سیستم مورد مطالعه در نهایت دارای ابعادی برابر با تعداد ژنراتورهای موجود (و یا تعداد نواحی) داشته و مناسب برای مطالعات پایداری خواهد بود. از طرف دیگر کلیه دینامیک‌های بین ناحیه‌ای در شکل ۲ در امیدانس‌های مجازی محاسبه‌شده جمع شده و بنابراین ابزاری مناسب برای تنظیم سیستم تحریک را فراهم می‌آورند.



شکل (۲): شماتیک مرکز ثقل سیستم و امیدانس‌های مجازی

بر اساس شکل‌های ۱ و ۲ و مستقل از مدل در نظر گرفته‌شده برای هر یک از ژنراتورها در مطالعات، هر ناحیه به‌وسیله یک ژنراتور معادل با درجه دو معادل‌سازی خواهد شد. حال آن‌که تأثیرات سایر دینامیک‌های ژنراتورهای موجود، بر اساس روابط (۸) و (۹) در مقدار راکتانس مجازی محاسبه‌شده تأثیرگذار خواهند بود. از طرف دیگر روش پیشنهادی صرفاً به مدل‌سازی و کاهش مرتبه سیستم بر اساس داده‌های دریافتی از شین‌های کنترلی می‌پردازد، بنابراین اطلاعات سایر شین‌ها و محل فیزیکی خطوط تأثیری بر دقت و کارایی مدل

$$M_{COG} \frac{d^2 \delta_{COG}}{dt^2} = T_{m_{COG}} - T_{e_{COG}} \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^n M_{COI_i} \frac{d^2 \delta_{COI_i}}{dt^2} = \sum_{i=1}^n T_{m_{COI_i}} - \sum_{i=1}^n T_{COI_i}$$

شرط برابری فوق، بر اساس تعریف مرکز ثقل سیستم، تحت شرایط مرزی زیر بایستی برآورده شود:

$$\sum_{i=1}^n T_{COI_i, COG}^{tie} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{COI_i, COG}^{tie}}{2\pi f_{COG}} = 0 \quad (4)$$

با جایگذاری رابطه توان انتقالی بین دو شین به‌صورت

$$P_{COI_i, COG}^{tie} = \frac{|V_{COI_i}| |V_{COG}|}{X_{COI_i, COG}^{tie}} \sin(\delta_{COI_i} - \delta_{COG}) \quad (5)$$

در رابطه (۴)، خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^n T_{COI_i, COG}^{tie} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{COI_i, COG}^{tie}}{2\pi f_{COG}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi f_{COG}} \frac{|V_{COI_i}| |V_{COG}|}{X_{COI_i, COG}^{tie}} \sin(\delta_{COI_i} - \delta_{COG}) = 0 \quad (6)$$

با دنبال کردن فرآیندی همانند آنچه در بالا برای مرکز ثقل سیستم انجام شد می‌توان معادلاتی مشابه برای مرکز اینرسی هر ناحیه به دست آورد. در این صورت رابطه (۶) برای هر ناحیه در سیستم چند ناحیه‌ای به‌صورت زیر بیان خواهد شد:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \in n}}^n T_{COI_i, j}^{tie} + T_{COI_i, COG}^{tie} = \sum_{j=1}^n \frac{P_{COI_i, j}^{tie}}{2\pi f_{COI_i}} + \frac{P_{COI_i, COG}^{tie}}{2\pi f_{COI_i}} = \sum_j \frac{1}{2\pi f_{COI_i}} \frac{|V_j| |V_{COI_i}|}{X_{COI_i, j}^{tie}} \sin(\delta_j - \delta_{COI_i}) + \frac{P_{COI_i, COG}^{tie}}{2\pi f_{COI_i}} = 0 \quad (7)$$

عبارت اول در رابطه فوق برآیند گشتاورهای وارده به مرکز اینرسی ناحیه از طرف شین‌های موجود در ناحیه و عبارت دوم گشتاور وارده به ناحیه مورد مطالعه از طرف مرکز ثقل سیستم است. مجموعه معادلات (۱) تا (۷) بستری مناسب برای نمایش سیستم معادل و با ابعاد پایین را فراهم می‌آورند. برای محاسبه امیدانس‌های مجازی، روابط (۶) و (۷) را می‌توان به‌صورت معادلات بهینه‌سازی زیر بازنویسی کرد:

$$\min_{X_{COI_i, COG}^{tie}} \left| \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi f_{COG}} \frac{|V_{COI_i}| |V_{COG}|}{X_{COI_i, COG}^{tie}} \sin(\delta_{COI_i} - \delta_{COG}) \right| \quad (8)$$

9

$$\min_{X_{COI_i, j}^{tie}} \left| \sum_j \frac{1}{2\pi f_{COI_i}} \frac{|V_j| |V_{COI_i}|}{X_{COI_i, j}^{tie}} \sin(\delta_j - \delta_{COI_i}) + T_{COI_i, COG}^{tie} \right| \quad (9)$$

حاصل می‌شود که نقطه کار و به‌طور مشخص سطح ولتاژ، فرکانس و توان انتقالی به مقدار قبل از خطا و یا همسایگی نزدیکی از آن بازگردد. معادله زیر توان انتقالی بین دو شین متصل‌به‌هم را برحسب زاویه رتور و ولتاژ ترمینال ژنراتورها نشان می‌دهد:

$$P_{ij} + \Delta P_{ij} = \frac{|V_i + \Delta V_i| |V_j + \Delta V_j|}{X_{ij}} \sin((\delta_i + \Delta \delta_i) - (\delta_j + \Delta \delta_j)) \quad (16)$$

با توجه به معادله فوق مشاهده می‌شود که تغییرات ولتاژی پس از رفع خطا برای کلیه ژنراتورها بایستی به سمت صفر و تغییرات زاویه رتور ژنراتورها برای کلیه ژنراتورها یکسان باشد تا ولتاژ، فرکانس و توان انتقالی به سمت مقدار اولیه میل کنند. در این حالت ایده‌آل، کلیه ژنراتورها دارای تغییرات ولتاژ و فاز یکسان بوده و در نتیجه در صفحه‌ی نرمال شده $\Delta V - \Delta \delta$ در مقدار (۱ و ۱) قرار خواهند گرفت. حال آنکه در سیستم‌های واقعی پس از رفع خطا تغییرات ولتاژ و فاز برای ژنراتورها غیر یکسان بوده و در نتیجه نقطه کار از نقطه (۱ و ۱) فاصله گرفته و سیستم به نقطه‌ای در مجاورت نقطه کار اولیه بازمی‌گردد. در این حالت با توجه به غیر همسان بودن تغییرات برای ژنراتورها، کنترل‌کننده‌ای لازم است تا تغییرات ولتاژ هر ژنراتور را به سمت صفر، صفر در راستای بردار نرمال شده تغییرات ولتاژ و تغییرات فاز را برای کلیه ژنراتورها به سمت مقداری مشخص ۱، در راستای بردار نرمال شده تغییرات فاز، سوق دهد. به‌عبارت‌دیگر عملکرد پایدار، امن و قابل‌اعتماد سیستم زمانی حاصل می‌شود که سیستم و به‌طور مشخص ژنراتورهای موجود در نزدیک‌ترین فاصله از نقطه کار اولیه یعنی نقطه (۱ و ۱) در صفحه نرمال شده تغییرات فاز برحسب تغییرات ولتاژ قرار داشته باشند. به‌عبارت‌دیگر:

$$\min \{ \|\Delta \delta_i + \Delta V_i\| - \|(1,0)\| \} \rightarrow \min(\sqrt{\Delta \delta_i^2 + \Delta V_i^2} - 1) \quad (17)$$

مقدار بهینه در معادله فوق زمانی حاصل می‌شود که مشتق آن برابر صفر گردد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{2\Delta \delta_i + 2\Delta \delta_i \frac{d(\Delta V_i)}{d(\Delta \delta_i)}}{2\sqrt{\Delta \delta_i^2 + \Delta V_i^2}} = 0 \rightarrow \Delta \delta_i = \pm \Delta V_i \quad (18)$$

معادله فوق در نهایت منجر به $|\Delta \delta_i| = |\Delta V_i| = 0.707$ می‌شود. حال آنکه با نزدیک شدن کلیه ژنراتورها به نقطه کار اولیه این مقادیر به سمت (۱ و ۱) میل می‌کنند. بنابراین خواهیم داشت:

$$\|\Delta \delta_i\| \geq 0.707 \quad (19)$$

$$\|\Delta V_i\| \geq 0.707 \quad (20)$$

از طرف دیگر با توجه به نرمال بودن مقادیر تغییرات ولتاژ و فاز، حداکثر مقدار برای این متغیرها برابر با یک است. پس می‌توان نوشت:

$$\|\Delta \delta_i\| < 1 \quad (21)$$

$$\|\Delta V_i\| < 1 \quad (22)$$

با توجه به روابط (۱۹) تا (۲۲) می‌توان ناحیه عملکرد پایدار هر ژنراتور را به‌صورت ناحیه هاشور خورده در شکل ۳ ترسیم نمود.

ندارد. این نکته به‌عنوان یکی از مزایای روش پیشنهادی استفاده از آن را برای محاسبات زمان واقعی جذاب خواهد کرد.

۲-۳- استخراج دسته منحنی‌های ولتاژ - تغییرات زاویه رتور

این دسته از منحنی‌ها را می‌توان به‌عنوان ابزاری مناسب برای مطالعات پایداری ولتاژ و پایداری نوسانی یا به‌عبارت‌دیگر مطالعات سیستم تحریک بکار برد. تناقض ذاتی موجود بین رفتار متغیرهای معرفی شده در این دسته منحنی‌ها، آن را به ابزار مؤثری در هماهنگی پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ تبدیل می‌کند. این دسته از منحنی‌ها با تحلیل حرکت سیستم در پرتوهای از فضای حالت می‌تواند به طراحی کنترل‌کننده و بهبود عملکرد سیستم کمک نمایند.

به‌منظور به دست آوردن این دسته منحنی‌ها پس از هر تغییر در بار یا تولید سیستم، به ازای هر ژنراتور موجود یک منحنی تغییرات ولتاژ ترمینال - تغییرات زاویه رتور $(\Delta V - \Delta \delta)$ بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده رسم می‌شود. بر این اساس می‌توان نوشت:

$$\Delta \delta_i = \delta_i - \delta_{0i} \quad (10)$$

$$\Delta V_i = V_i - V_{0i} \quad (11)$$

که در آن:

δ_{0i} : زاویه رتور ژنراتور i ام در لحظه صفر

V_{0i} : ولتاژ ترمینال ژنراتور i ام در لحظه صفر

با توجه به تنوع شدت اغتشاشات محتمل در سیستم، نرمال کردن این متغیرها در زمان‌های دلخواه منجر به محدود شدن فضای حرکتی سیستم و در نتیجه مستقل بودن معیار به‌دست‌آمده از ساختار سیستم و اغتشاش وارد می‌شود. برای این منظور در هر بار به‌روزرسانی داده‌ها، بیشترین مقدار تغییرات زاویه رتور به‌صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$\Delta \delta_{\max} = \max \{ \Delta \delta_i \} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

با بازنویسی (۱۲) برای کمیت ولتاژ خواهیم داشت:

$$\Delta V_{\max} = \max \{ \Delta V_i \} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

نرمال کردن مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه رتور در هر به‌روزرسانی بر اساس (۱۲) و با استفاده از رابطه زیر خواهد بود:

$$\Delta \delta_i = \frac{\Delta \delta_i}{\Delta \delta_{\max}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

رابطه (۱۴) برای تغییرات ولتاژ به‌صورت (۱۵) قابل بازنویسی است.

$$\Delta V_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_{\max}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

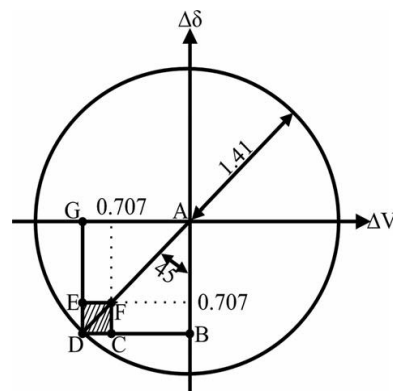
که در آن n تعداد ژنراتورها است.

با توجه به محدودیت‌های زیست‌محیطی و عوامل اقتصادی، سیستم‌های قدرت نزدیک به حد پایداری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. بنابراین عملکرد مطلوب سیستم پس از رفع خطا زمانی

راستای تغییرات مثبت سرعت رتور، سعی در افزایش تغییرات زاویه و در نتیجه هدایت ژنراتور مذکور به ناحیه پایدار می‌شود. حال حالتی را در نظر بگیرید که در آن تغییرات هر دو متغیر ولتاژ و زاویه برای یک ژنراتور معین کمتر از 0.707 باشد. در این حالت متغیر دارای تغییرات کوچک‌تر نسبت به دیگری (ولتاژ یا زاویه)، کنترل‌کننده مناسب برای بهبود رفتار سیستم را انتخاب می‌کند. بدین معنا که قرار گرفتن ژنراتور در ناحیه $ABCFA$ به معنای تغییرات غالب زاویه نسبت به تغییرات ولتاژ برای ژنراتور مذکور است. بنابراین با کاهش ضریب تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، تغییرات ولتاژ در راستای هماهنگی با سایر ژنراتورها افزایش می‌یابد. ناحیه $AFEGA$ به معنای تغییرات غالب ولتاژ نسبت به تغییرات زاویه است. با توجه به کاهش زاویه رتور پس از حذف تولید در سیستم، با کاهش ضریب پایدارساز سیستم قدرت سعی در بهبود رفتار سیستم می‌شود. در حالت خروج بار ضریب پایدارساز سیستم قدرت در فرآیند کنترلی بجای کاهش مقدار با افزایش مواجه می‌شود. حال آنکه ضریب تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ همواره برای حذف اثرات مخرب بر روی پایداری نوسانی با کاهش مقدار مواجه می‌شود. حال می‌توان ناحیه عملکردی کنترل‌کننده‌های موجود در سیستم را به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- در هر بار به روزرسانی اطلاعات اندازه‌گیری شده ژنراتورهای قرارگرفته در ناحیه $AFEGA$ طی فرآیند کنترلی با کاهش ضریب پایدارساز سیستم قدرت مواجه می‌شوند.
- ۲- در هر بار به روزرسانی اطلاعات اندازه‌گیری ژنراتورهای قرارگرفته در ناحیه $ABCFA$ طی فرآیند کنترلی با کاهش ضریب تنظیم‌کننده خودکار ولتاژی قدرت مواجه می‌شوند.

در ادامه به بیان استراتژی کنترلی برای هماهنگی پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ پرداخته می‌شود. الگوریتم کنترلی ارائه‌شده الگوریتمی گسسته و مبتنی بر نمونه‌برداری از تغییرات ولتاژ و زاویه در زمان‌های مختلف است. به عبارت دیگر با نمونه‌برداری از تغییرات زاویه رتور و تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتورها در زمان‌های موردنظر می‌توان به تنظیم مجدد پارامترهای این کنترل‌کننده‌ها با استفاده از معیار پیشنهادی پرداخت. از آنجاکه مدت‌زمان لازم برای ناپایداری ولتاژ در حدود ۲۰ ثانیه و این زمان برای ناپایداری گذرا در محدوده ۵-۲ ثانیه است [۷] زمان اولین نمونه‌برداری کمتر از کمترین مقدار این دو عدد یعنی ۲ ثانیه انتخاب شده و سپس هر ΔT ثانیه یکبار الگوریتم کنترلی برای بهبود عملکرد سیستم وارد عمل می‌شود. بر این اساس، استراتژی کنترلی برای هماهنگی کنترل‌کننده‌ها را به شرح زیر می‌توان ارائه کرد:



شکل (۳): ناحیه عملکرد پایدار سیستم

ناحیه هاشور خورده ناحیه‌ای است که در آن پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ برای کلیه ژنراتورهای موجود در سیستم با یکدیگر هماهنگ هستند. قرار گرفتن کلیه ژنراتورها در این ناحیه متضمن عملکرد پایدار سیستم قدرت است. بنابراین لازم است تا با تنظیم مجدد پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ سیستم را بعد از وقوع خطا به سمت ناحیه مطلوب هدایت کرد. حال آنکه ساده‌ترین پارامترهای قابل تنظیم بعد از نصب این کنترل‌کننده‌ها در سیستم ضرایب آن‌ها هستند. بنابراین در این مقاله تلاش می‌شود با استفاده از معیار به‌دست‌آمده روشی برای تنظیم این ضرایب ارائه شود.

با توجه به روابط (۱۹) و (۲۰) می‌توان نتیجه گرفت که حد آستانه عملکرد پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ برابر با 0.707 بوده و به صورت زیر قابل بیان است.

$$\|\Delta\delta_i + \Delta C_i\| \geq 0.707 \quad (23)$$

به عبارت دیگر در صورت بروز شرایطی که تغییرات نرمال شده ولتاژ کمتر از 0.707 باشد با کاهش ضریب تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، تغییرات ولتاژی در راستای هماهنگی با سایر ژنراتورها افزایش می‌یابد. این کاهش ضریب علاوه بر هماهنگی تغییرات ولتاژ با سایر ژنراتورها سبب حذف اثرات مخرب تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ بر روی پایداری نوسانی سیستم می‌شود.

حال به بررسی نحوه عملکرد پایدارساز سیستم قدرت بر روی پایداری سیستم در استراتژی ارائه‌شده پرداخته می‌شود. با جایگذاری

$$\theta = \omega t - \omega_0 t + \theta_0 \quad (24)$$

در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = P_{mech} - P_{elec} \quad (25)$$

پایدارساز سیستم قدرت گشتاوری در راستای تغییرات سرعت رتور به وجود می‌آورد [۴، ۵، ۲۹]. از آنجاکه حذف تولید از سیستم و با افزایش بار در سیستم با توجه به رابطه فوق تغییرات منفی سرعت را سبب می‌شود، در حالتی که تغییرات زاویه کمتر از 0.707 باشد با کاهش ضریب پایدارساز سیستم قدرت و در نتیجه کاهش گشتاور در

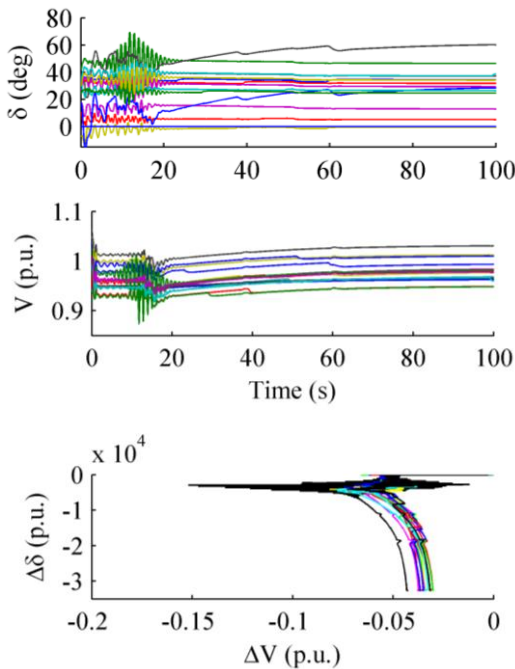
نمونه در ثانیه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نمونه‌ها به همراه روابط (۱) تا (۹) برای استخراج مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شبیه‌سازی حوزه زمان در محیط نرم‌افزار Matlab و PLECS پیاده‌سازی شده است. جدول ۱ به مقایسه مدهای بین ناحیه‌ای سیستم واقعی و سیستم معادل استخراج شده می‌پردازد.

جدول (۱): تحلیل مدال برای سیستم اصلی و سیستم معادل کاهش مرتبه یافته

#	سیستم واقعی		سیستم معادل	
	مقدار ویژه	فرکانس	مقدار ویژه	فرکانس
1	$-0.3591 \pm 2.3868j$	0.3799	$-0.3393 \pm 2.2131j$	0.3705
2	$-0.3801 \pm 3.0739j$	0.4892	$-0.3951 \pm 3.3168j$	0.4738
3	$-0.3617 \pm 3.9378j$	0.6267	$-0.3801 \pm 3.9301j$	0.6371
4	$-0.4302 \pm 4.9073j$	0.7810	$-0.5912 \pm 2.8151j$	0.8616

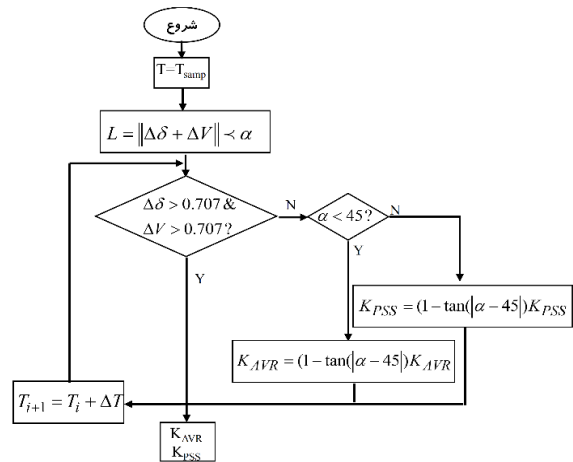
همان‌گونه که مشاهده می‌شود روش معادل‌سازی پیشنهادی با دقت قابل قبولی رفتار سیستم واقعی را نمایش داده و بنابراین طراحی الگوریتم کنترلی بر اساس سیستم معادل می‌تواند نتایج قابل قبولی را در سیستم واقعی نتیجه دهد.

برای به دست آوردن دسته منحنی‌های موردنظر، در لحظه $t=0^+$ اغتشاشی به سیستم وارد شده و رفتار دینامیکی هر ژنراتور در صفحه $\Delta V-\Delta\delta$ رسم می‌شود. در گام اول به بررسی خروج ژنراتور در سیستم پرداخته می‌شود. شکل ۶ مشخصه ولتاژ - زمان، زاویه - زمان و دسته منحنی‌های $\Delta V-\Delta\delta$ را به ازای خروج ژنراتور شماره ۱۶ نشان می‌دهند.



شکل (۶): رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور شماره ۱۶، حوزه زمان و دسته منحنی‌های $\Delta V-\Delta\delta$

شکل ۷ توزیع متغیرهای نرمال شده در صفحه تغییرات فاز برحسب تغییرات ولتاژ را در زمان‌های ۱، ۱۳ و ۵۷ ثانیه نشان می‌دهد. حرکت نقاط کار ژنراتورها در صفحه تغییرات فاز برحسب تغییرات ولتاژ به سمت ناحیه مطلوب در این شکل به‌وضوح قابل مشاهده است.



شکل (۴): فلوجارت استراتژی هماهنگی کنترلی

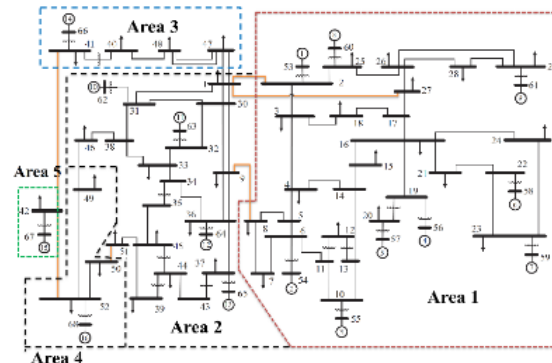
پیشنهاد شده

- ۱- تنظیم زمان نمونه‌برداری (T_{samp}) از تغییرات ولتاژ و زاویه
- ۲- تعیین موقعیت هر ژنراتور در صفحه نرمال شده $\Delta V-\Delta\delta$ با استفاده از اندازه (L) و زاویه بین تغییرات ولتاژ و زاویه (α)
- ۳- تغییر ضرایب پایدارساز سیستم قدرت (K_{PSS}) و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (K_{AVR}) بر اساس موقعیت هر ژنراتور در صفحه و روابط کنترلی ارائه‌شده در بالا
- ۴- بازگشت به پله ۲ و انجام مجدد مراحل فوق هر ΔT ثانیه یک‌بار ($\Delta T < 2$)

فلوجارت مراحل فوق در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی عددی

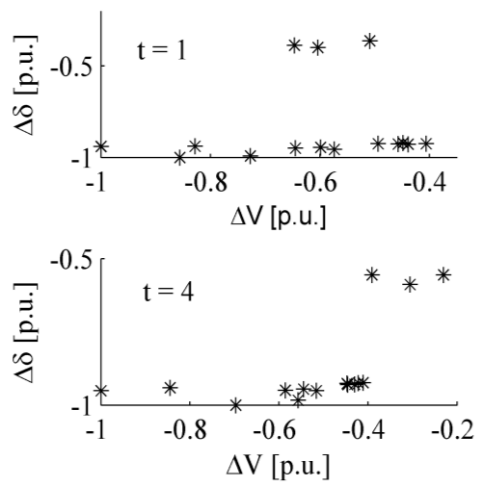
در این بخش کارایی روش گرافیکی و روش کنترلی ارائه‌شده به‌ازای تغییرات متنوع بار و تولید روی سیستم ۱۶ ماشینه IEEE مورد آزمایش قرار می‌گیرد. دیاگرام تک‌خطی این سیستم در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل (۵): سیستم مورد مطالعه

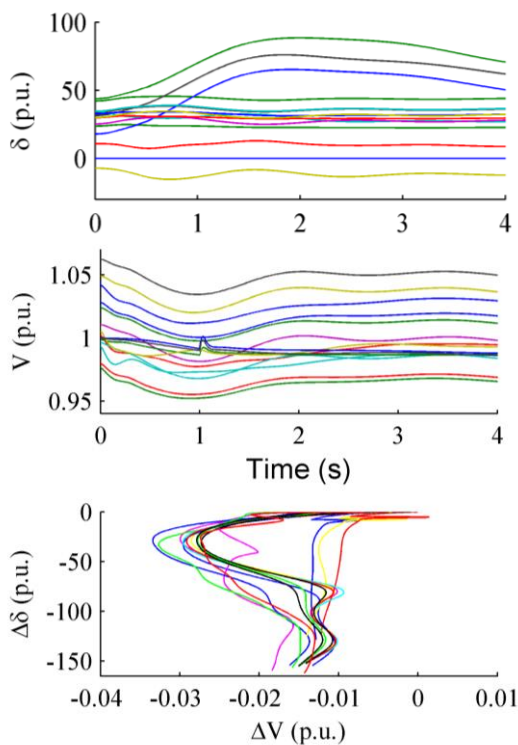
در گام اول، مدار معادل و کاهش مرتبه یافته سیستم قدرت بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده استخراج می‌شود. برای این منظور شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی حوزه زمان با نرخ نمونه‌برداری ۵۰

واگرایی تغییرات ولتاژ و غیرهمسان بودن تغییرات زاویه رتور برای اکثر ژنراتورها در این شکل نشان از ناپایداری سیستم دارد. شکل ۹ توزیع متغیرهای نرمال شده در صفحه تغییرات فاز بر حسب تغییرات ولتاژ را در زمان‌های ۱ و ۴ ثانیه نشان می‌دهد.

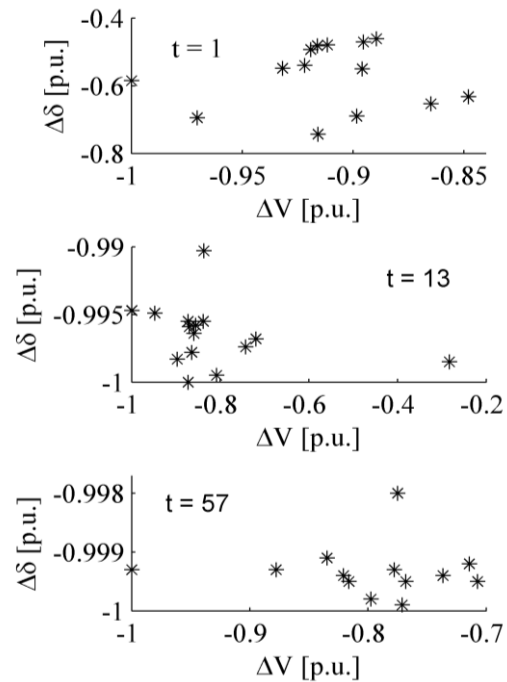


شکل (۹): توزیع پارامترهای نرمال شده در معیار موردنظر در لحظات ۱/۵ و ۴ ثانیه

مشاهده می‌شود که ژنراتورهای ۱۴، ۱۵ و ۱۶ بر اساس نمونه‌های اندازه‌گیری شده در ثانیه اول در ناحیه عملکردی پایداری سیستم قدرت قرار دارند، بنابراین کاهش ضریب این کنترل‌کننده به همراه کاهش ضریب تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ برای دسته‌ی دیگری از ژنراتورها می‌تواند به بهبود رفتار سیستم کمک نماید. شکل ۱۰ رفتار پایدار سیستم، پس از اعمال الگوریتم کنترلی را نشان می‌دهد.

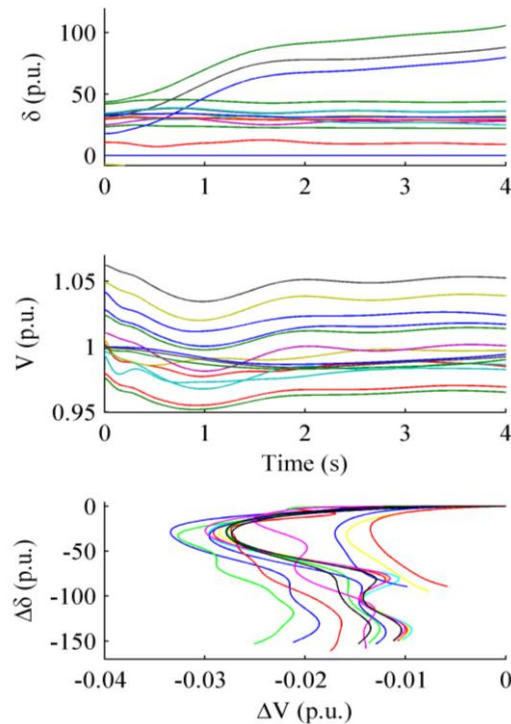


شکل (۱۰): رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور شماره ۱۲ در حضور الگوریتم کنترلی، حوزه زمان و دسته منحنی‌های $\Delta V-\Delta\delta$



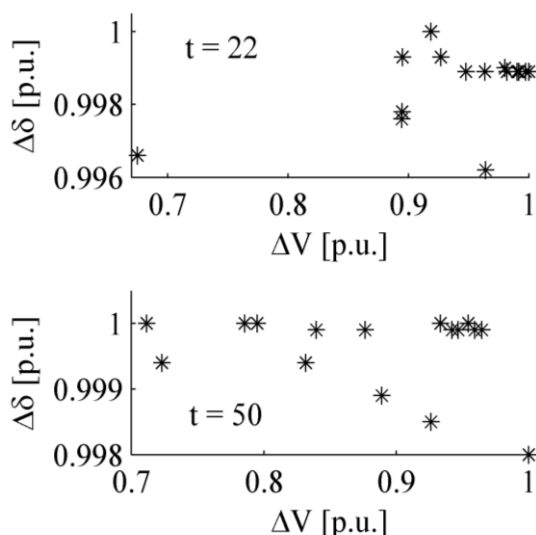
شکل (۷): توزیع پارامترهای نرمال شده در معیار موردنظر در لحظات ۱، ۱۳ و ۵۷ ثانیه

همان‌گونه که از شکل‌های ۶ و ۷ پیداست، گرچه سیستم هم از لحاظ پایداری گذرا و هم از لحاظ پایداری سیگنال کوچک ناپهنجاری‌هایی را تجربه می‌کند، ولی الگوریتم کنترلی ارائه‌شده به حفظ پایداری گذرای سیستم و میرا کردن نوسانات کمک می‌کند. در آزمایشی دیگر شکل ۸ به بررسی رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور شماره ۱۲ می‌پردازد.



شکل (۸): رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور شماره ۱۲، حوزه زمان و دسته منحنی‌های $\Delta V-\Delta\delta$

همان گونه که قبلاً گفته شد به ازای خروج بار ضرایب پایدارساز سیستم قدرت در فرآیند کنترلی بجای کاهش با افزایش مقدار مواجه می شوند. مشاهده می شود الگوریتم ارائه شده توانسته است پایداری گذرا و سیگنال کوچک را پس از حذف یک بار بزرگ از سیستم حفظ نماید. شکل ۱۳ توزیع متغیرهای نرمال شده در صفحه تغییرات فاز برحسب تغییرات ولتاژ را نشان می دهد. مشاهده می شود سیستم پس از تغییر ضرایب کنترلی پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم کننده خودکار ولتاژ، توانسته است به حالت ماندگار قابل قبول و پایداری برسد.



شکل (۱۳): توزیع پارامترهای نرمال شده در معیار موردنظر در

لحظات ۲۲ و ۵۰ ثانیه

در نهایت جدول شماره ۲ به مقایسه کارایی روش پیشنهادی با مقاله [۳۰] می پردازد. برای این منظور ضریب میرایی مد شماره ۱ و ۲ در ثانیه ۲۰ مقایسه می شود.

جدول (۲): مقایسه ضریب میرایی برای روش پیشنهادی و مرجع [۳۰]

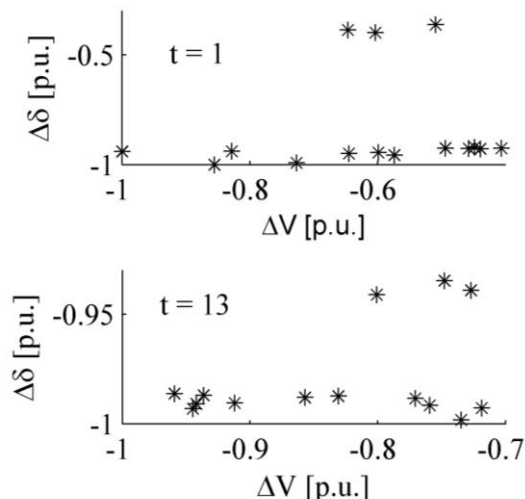
مد بین ناحیه ای ۱			مد بین ناحیه ای ۲		
شماره ژنراتور	روش پیشنهادی	مرجع [۳۰]	شماره ژنراتور	روش پیشنهادی	مرجع [۳۰]
G ₁	15.81	15.51	G ₃	12.37	12.21
G ₂	15.64	15.43	G ₅	12.55	12.07
G ₉	15.31	15.25	G ₇	12.01	11.91
G ₁₄	15.19	14.87	G ₁₅	12.42	12.31

نتیج جدول ۲ نشان از عملکرد مطلوب روش پیشنهادی در مقایسه با مرجع شماره [۳۰] دارد. به علاوه نتایج مقایسه ای در زمان های مختلف کارایی روش پیشنهادی را تایید می کند.

۴- نتیجه گیری

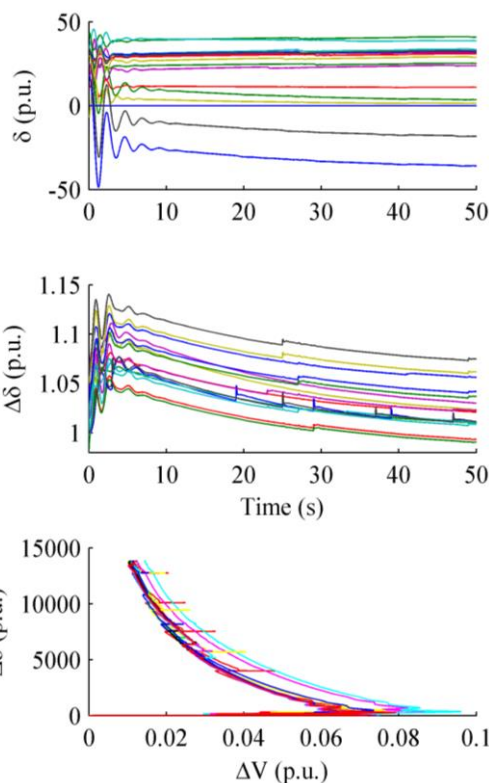
تناقض بین رفتارهای دو حلقه کنترلی مهم، شامل پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم کننده خودکار ولتاژ، در سیستم های قدرت عملکرد دینامیکی سیستم را در نقاط کار مختلف تحت تأثیر قرار می دهد. از این رو هماهنگی بین این کنترل کننده ها به منظور حفظ

با مقایسه شکل های ۸ و ۱۰ مشاهده می شود که کنترل کننده پیشنهادی توانایی حذف واگرایی ولتاژ و همچنین کاهش اختلاف بین زاویه ژنراتورها را دارا است. شکل ۱۱ توزیع متغیرهای نرمال شده در صفحه تغییرات فاز برحسب تغییرات ولتاژ را پس از اعمال الگوریتم کنترلی نشان می دهد.



شکل (۱۱): رفتار سیستم پس از خروج ژنراتور شماره ۲

در ادامه به بررسی عملکرد معیار و روش کنترلی ارائه شده به ازای خروج بار در سیستم پرداخته می شود. شکل ۱۲ رفتار سیستم پس از خروج ۶۰ پروینیت توان اکتیو را نشان می دهد.



شکل (۱۲): رفتار سیستم پس از خروج ۶۰ پروینیت بار، حوزه زمان و دسته منحنی های ΔV-Δδ

[۷] K. Law, D. Hill, and N. Godfrey, "Robust controller structure for coordinated power system voltage regulator and stabilizer design," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 220-232, 1994.

[۸] F. P. Demello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, vol. 88, no. 4, pp. 316-329, 1969.

[۹] M. Saidy, "A unified approach to voltage regulator and power system stabiliser design based on predictive control in analogue form," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 103-109, 1997.

[۱۰] Y. Wang and D. J. Hill, "Robust nonlinear coordinated control of power systems," *Automatica*, vol. 32, no. 4, pp. 611-618, 1996.

[۱۱] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, and L. Gao, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 8, no. 2, pp. 620-627, 1993.

[۱۲] Y. Guo, D. J. Hill, and Y. Wang, "Global transient stability and voltage regulation for power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 678-688, 2001.

[۱۳] R. Khezri and H. Bevrani, "Voltage performance enhancement of DFIG-based wind farms integrated in large-scale power systems: Coordinated AVR and PSS," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 400-410, 2015.

[۱۴] N. Yadaiah, A. G. D. Kumar, and J. Bhattacharya, "Fuzzy based coordinated controller for power system stability and voltage regulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 69, no. 2-3, pp. 169-177, 2004.

[۱۵] H. Zhang, F. Shi, and Y. Liu, "Enhancing optimal excitation control by adaptive fuzzy logic rules," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 226-235, 2014.

[۱۶] A. El-Zonkoly, "Optimal tuning of power systems stabilizers and AVR gains using particle swarm optimization," *Expert Systems with Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 551-557, 2006.

[۱۷] M. L. S. Ríos and R. A. González-Fernández, "Coordinated tuning of power system controllers using metaheuristic techniques," in *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2014, 2014, pp. 1-8: IEEE.

[۱۸] A. Heniche, H. Bourles, and M. Houry, "A desensitized controller for voltage regulation of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1461-1466, 1995.

[۱۹] H. Quinot, H. Bourles, and T. Margotin, "Robust coordinated AVR+ PSS for damping large scale power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1446-1451, 1999.

[۲۰] H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand, and A. Rabiee, "Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. ۹۳, pp. 384-394, 2017.

پایداری سیگنال کوچک و همچنین پایداری گذرا تحت اغتشاشات مختلف امری ضروری است.

در این مقاله روشی جدید برای معادل سازی و شناسایی سیستم مورد مطالعه بر اساس داده های اندازه گیری شده ارائه شد. روش پیشنهادی با تخمین دقیق مدهای نوسانی بستری مناسب برای ارائه الگوریتم کنترلی به منظور هماهنگی پایداری سیستم قدرت و تنظیم کننده خودکار ولتاژ را فراهم می آورد.

در گام بعدی معیاری جدید برای هماهنگی بین پایداری سیستم قدرت و تنظیم کننده خودکار ولتاژ در سیستم های قدرت واقعی معرفی شده است. بر اساس این معیار، یک الگوریتم کنترلی به منظور بهبود پایداری های گذرا و سیگنال کوچک سیستم بعد از تغییرات بار یا تولید معرفی و مورد آزمایش قرار گرفته است. الگوریتم کنترلی معرفی شده بر اساس موقعیت هر ژنراتور در صفحه نرمال شده تغییرات فاز بر حسب تغییرات ولتاژ در زمان های مشخص، به تغییر ضرایب این کنترل کننده ها می پردازد. نتایج نشان دهنده عملکرد مطلوب و مقاوم الگوریتم پیشنهادی به ازای تغییرات متنوع بار و تولید در سیستم است. مستقل بودن معیار به دست آمده و همچنین الگوریتم کنترلی پیشنهادی از ساختار سیستم مورد مطالعه از جمله مزایای روش ارائه شده است که آن را قابل پیاده سازی در سیستم های مختلف می نماید.

مراجع

[۱] G. J. Dudgeon, W. E. Leithead, A. Dysko, J. o'Reilly, and J. R. McDonald, "The effective role of AVR and PSS in power systems: Frequency response analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1986-1994, 2007.

[۲] J. Bayne, D. Lee, and W. Watson, "A power system stabilizer for thermal units based on derivation of accelerating power," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 6, pp. 1777-1783, 1977.

[۳] R. V. de Oliveira, R. A. Ramos, and N. G. Bretas, "An algorithm for computerized automatic tuning of power system stabilizers," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 1, pp. 45-54, 2010.

[۴] H. Bevrani, T. Hiyama, and Y. Mitani, "Power system dynamic stability and voltage regulation enhancement using an optimal gain vector," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 9, pp. 1109-1119, 2008.

[۵] H. Golpira, H. Bevrani, and A. H. Naghshbandy, "An approach for coordinated automatic voltage regulator-power system stabiliser design in large-scale interconnected power systems considering wind power penetration," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 6, no. 1, pp. 39-49, 2012.

[۶] K. Law, D. Hill, and N. Godfrey, "Robust coordinated AVR-PSS design," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. ۱۲۲۵-۱۲۳۸, ۱۹۹۴.

- [۲۱] Y. Batmani and H. Golpîra, "Automatic voltage regulator design using a modified adaptive optimal approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 349-357, 2019.
- [۲۲] A. Younesi, H. Shayeghi, A. Akbari, and Y. Hashemi, "Design of PSS3B stabilizer using KH Algorithm and Q-Learning for damping Low-frequency Oscillations in SMIB," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 14, no. 3, pp. 69-77, ۲۰۱۷.
- [۲۳] M. Hojo, K. Abe, Y. Mitani, H. Ukai, and O. Saeki, "Online power system monitoring by synchronized voltage phasor measurement at demand sides," presented at the Technical Meeting on Power Systems Engineering (PSE), IEE Japan, Japan, January, 2۰۱۰.
- [۲۴] H. Asadi, M. Sanayepasand, and M. Davarpanah, "Introducing a Novel Method for Real Time Estimation of Power System Voltage Instability Based on Wide Area Protection," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 4, no. 2, pp. 3-13, 2007.
- [۲۵] A. Kumar, "Power system stabilizers design for multimachine power systems using local measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2163-2171, 2016.
- [۲۶] H. Golpîra and A. R. Messina, "A Center-of-Gravity-Based Approach to Estimate Slow Power and Frequency Variations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 1026-1035, 2018.
- [۲۷] D. Ruiz-Vega, A. R. Messina, and M. Pavella, "Online assessment and control of transient oscillations damping," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1038-1047, 2004.
- [۲۸] H. Golpîra, H. Seifi, A. R. Messina, and M.-R. Haghifam, "Maximum penetration level of micro-grids in large-scale power systems: frequency stability viewpoint," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 5163-5171, 2016.
- [۲۹] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994.
- [۳۰] T. Jiang, H. Yuan, G. Li, H. Jia, and F. Li, "Spatial-temporal decomposition approach for systematically tracking dominant modes, mode shapes and coherent groups in power systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 8, pp. 1889-1900, 2017.