

میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای: طرح گسترده هماهنگی حذف بار و تولید مبتنی بر منطق Fuzzy

سعید تیمورزاده^۱، دانشجوی دکتری؛ فرخ امین‌فر^۲، استادیار؛ مجید صنایع‌پسند^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران - تهران - ایران - teimourzadeh@ut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران - تهران - ایران - faminifar@ut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران - تهران - ایران - msanaye@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روش جدیدی جهت میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای با استفاده از داده‌های فراهم‌شده توسط سیستم اندازه‌گیری گسترده، ارائه شده است. ابزارهای مورد استفاده در این روش قطع بار، حذف تولید و یا هر دو می‌باشند. روش پیشنهادی یک طرح مقابله اضطراری بوده و برای حالاتی که عملکرد عناصر کنترل‌پذیر موجود در شبکه کفایت نکنند، قابل‌استفاده است. این روش در چهار لایه دریافت اطلاعات، تشخیص نوسان، تصمیم‌گیری و لایه عملگر طراحی شده است. هسته اصلی تصمیم‌گیری بر مبنای منطق Fuzzy می‌باشد. سیگنال‌های سرعت روتور ژنراتورهای نماینده هر ناحیه و نرخ تغییرات آن‌ها به‌عنوان اطلاعات دریافتی و فرمان قطع بار/ حذف تولید به‌عنوان خروجی این طرح دفاعی می‌باشند. مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک سیستم دوناحیه‌ای کارایی روش پیشنهادی را در شرایط مختلف تأیید می‌نمایند.

واژه‌های کلیدی: نوسانات بین‌ناحیه‌ای، منطق Fuzzy، سیستم‌های اندازه‌گیری گسترده، قطع بار، حذف تولید.

Inter-Area Oscillation Damping: A Fuzzy Logic based Wide-Area Load Shedding\Generation Rejection Scheme

S. Teimourzadeh¹, PhD Student; F. Aminifar², Assistant Professor; M. Sanaye-Pasand³, Professor

1- School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: teimourzadeh@ut.ac.ir

2- School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: faminifar@ut.ac.ir

3- School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: msanaye@ut.ac.ir

Abstract: In this paper, a new inter-area oscillation damping approach is proposed based on system-wide measurement data. The load shedding and generation rejection are the main tools which are utilized for inter-area oscillations damping purpose. The proposed scheme is a defense plan deployable whenever the performance of existing controllable devices, say FACTS, are inadequate. The proposed method is founded on the basis of a four-layer framework including data acquisition, oscillation detection, decision making, and application layers. The decision making process is based on the Fuzzy logic engine. The input signals are rotor angular velocity and its associated derivative; besides, the outputs of the new defense plan are the load shedding or generation rejection commands. Comprehensive simulation studies on a two-area system confirm validity of the proposed scheme under various situations.

Keywords: Inter-area oscillations, fuzzy logic, wide-area measurements, load shedding, generation rejection.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳

نام نویسنده مسئول: فرخ امین‌فر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی به‌همراه محدودیت منابع سرمایه‌گذاری در توسعه سیستم‌های قدرت، ملاحظات قابلیت اطمینان و مسائل مربوط به تجارت انرژی موجب ترغیب طراحان سیستم قدرت به اتصال سیستم‌های قدرت مجاور به یکدیگر شده است. سیستم‌های به‌هم‌پیوسته علی‌رغم مزایای انکارناپذیر، با مشکلات جدی روبرو می‌باشند که از میان آن‌ها می‌توان به وقوع نوسانات فرکانس پایین اشاره نمود [۱].

نوسانات فرکانس پایین غالباً در محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۲ هرتز در سیستم‌های قدرت ظاهر می‌شوند که خود شامل نوسانات فرکانس پایین محلی و بین‌ناحیه‌ای است. نوسانات محلی به نوسان یک نیروگاه یا یک واحد تولید در مقابل شبکه اطلاق می‌شود و شامل محدوده فرکانسی ۰/۸ تا ۲ هرتز می‌باشند. حال آن‌که نوسانات بین‌ناحیه‌ای در رنج فرکانسی ۰/۱ تا ۰/۸ هرتز قرار داشته و زمانی رخ می‌دهند که دو دسته از ژنراتورها در نواحی مختلف شروع به نوسان در مقابل هم نمایند [۱]. نوسانات بین‌ناحیه‌ای به‌دلیل میرایی کمتر، ماندگاری طولانی‌تر و درگیر بودن تعداد نیروگاه‌های بیشتر به‌مراتب خطرناک‌تر از نوسانات محلی می‌باشند. این نوسانات می‌بایست با استفاده از روش‌های کنترلی مناسب میرا شوند تا از آسیب رسیدن به شفت ژنراتورها و همچنین، قطع نابجای خطوط انتقال بین‌ناحیه‌ای جلوگیری شود [۲]. بدین منظور در منابع مختلف ابزارهای متنوعی معرفی شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از پایدارساز سیستم قدرت، استفاده از سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر و سیستم انتقال فشارقوی جریان مستقیم اشاره نمود [۳].

استفاده از سیگنال‌های محلی اندازه‌گیری شده به‌عنوان ورودی میراسازها امری معمول می‌باشد [۴-۶]. حال آن‌که قاعده‌تاً کنترل‌کننده‌های تغذیه‌شده با سیگنال‌های محلی تنها توانایی میراسازی نوسانات محلی را دارند و لازمه مقابله با نوسانات بین‌ناحیه‌ای فراهم شدن اطلاعات از گستره سیستم قدرت و خصوصاً نواحی در حال نوسان است. سیستم اندازه‌گیری گسترده^۱ که توسط به‌کارگیری ابزارهایی مانند واحدهای اندازه‌گیر فازور^۲ پیاده‌سازی شده‌اند، توانایی پایش حالت به‌هنگام سیستم قدرت را با سرعت و دقت قابل قبول دارا می‌باشند. دامنه و زاویه شین‌های مختلف شبکه، جریان شاخه‌ها و فرکانس شبکه از جمله مهم‌ترین کمیت‌های تحت پایش در سیستم‌های WAMS می‌باشند. در واقع این سیستم‌ها با گردآوری داده‌های زمان واقعی، سنکرون و با وضوح^۳ بالا از تمام سیستم دید بی‌نظیری از آنچه در حال وقوع است را مهیا می‌نمایند [۷]. در نتیجه، می‌توان با پیاده‌سازی توابع کنترلی یا حفاظتی گسترده عملکرد سیستم‌های کنترلی یا حفاظتی شبکه را بهبود بخشید و سطح پایداری و امنیت شبکه را ارتقا داد [۸، ۹].

روش‌های موجود در زمینه میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- روش‌های مبتنی بر پایدارساز^۴ سیستم قدرت [۱، ۱۰]

- روش‌های مبتنی بر ادوات FACTS^۵ [۱۱-۱۷]

- روش‌های مبتنی بر HVDC^۶ [۱۸-۲۰]

- سایر روش‌ها [۲۱-۲۴]

در روش‌های مبتنی بر پایدارساز سیستم قدرت، خروجی کنترل‌کننده به سیستم تحریک ژنراتور اعمال می‌گردد. روش‌های مبتنی بر ادوات FACTS سعی در میراسازی نوسانات با کنترل پارامترهای عناصری مانند جبران‌ساز استاتیک^۷، جبران‌ساز استاتیک سری سنکرون^۸ و کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان^۹ دارند. در روش‌های مبتنی بر HVDC نیز میراسازی نوسان از طریق کنترل مبدل‌های AC/DC انجام می‌پذیرد. از جمله سایر روش‌ها می‌توان به کنترل ذخیره‌سازهای انرژی اشاره نمود [۲۵]. در غالب روش‌های موجود، پارامترهای کنترلی پیوسته بوده و جهت سهولت در طراحی کنترل‌کننده، از مدل خطی شده سیستم استفاده می‌نمایند. در این حالت، پارامترهای کنترل‌کننده برای برخی از نقاط کار تنظیم می‌شوند. حال آن‌که سیستم قدرت سیستمی کاملاً دینامیک و غیرخطی بوده و چنین روش‌هایی حتی ممکن است در شرایطی خاص خود به بروز ناپایداری کمک نمایند. یک راه‌حل جهت مقابله با چنین مسئله‌ای استفاده از کنترل‌کننده غیرخطی است [۲۶]. عملکرد مناسب این نوع از کنترل‌کننده‌ها شدیداً تابع شرایط اولیه سیستم می‌باشد. راه‌حل دوم جهت حل این مسئله استفاده از کنترل‌کننده مبتنی بر منطق Fuzzy است [۲۷] که چنین کنترل‌کننده‌ای توانایی تحمل عدم قطعیت، عدم دقت و نوسان در ورودی را دارا می‌باشد و فرصت مناسبی جهت پیاده‌سازی قوانین کنترلی مبتنی بر تجربه را فراهم می‌نماید. در تمامی این روش‌ها، وجود عناصر کنترل‌پذیر ضروری است. حال آن‌که ممکن است به‌علت شدت زیاد نوسانات عناصر کنترل‌پذیر قادر به میراسازی نباشند. در این شرایط، مرکز کنترل سیستم^{۱۰} می‌بایستی با اعمال راهکارهای مناسب در صد میراسازی نوسان برآید. در غیراین‌صورت، ممکن است نوسان منجر به از دست رفتن کل بار و خاموشی سراسری گردد.

میراسازی نوسان بین‌ناحیه‌ای با کنترل سیلان توان بر روی خطوط ارتباطی^{۱۱} بین‌ناحیه‌ای مسیر است. یک روش مستقیم جهت تحقق این امر حذف بار و تولید می‌باشد. در این مقاله، یک طرح گسترده مبتنی بر منطق فوق‌الذکر جهت میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای پیشنهاد شده است. در طرح پیشنهادی، قطع بار، حذف تولید و یا هر دو ابزارهای میراسازی نوسان می‌باشند. طرح مقابله پیشنهادی مبتنی بر منطق Fuzzy است که سیگنال‌های سرعت ژنراتور نماینده هر ناحیه و مشتق آن به‌عنوان ورودی آن می‌باشند. این سیگنال‌ها پس از پردازش اولیه در اختیار واحد تصمیم‌گیری قرار می‌گیرند و این واحد بر مبنای قوانین تعریف‌شده میزان استفاده از هر یک ابزارهای نامبرده را مشخص می‌نماید. در واقع این طرح پیشنهادی، یک طرح مقابله اضطراری برای مواقعی است که عناصر کنترل‌پذیر مانند PSS و ادوات FACTS کفایت لازم جهت میراسازی نوسان را نداشته باشند. به‌بیان دیگر، وجود چنین طرحی

ارسال می‌نمایند [۲۸]. فرکانس مهم‌ترین شاخص پایداری شبکه و تعادل تولید مصرف است. این سیگنال و مشتقات آن از جمله سرعت روتور ژنراتورها و نرخ تغییرات آن می‌توانند سیگنال‌های مناسبی جهت استفاده در میراسازهای نوسان باشند [۳]. در این طرح سیگنال سرعت ژنراتور نماینده هر ناحیه به‌عنوان سیگنال ورودی انتخاب شده است. در نوسان بین‌ناحیه‌ای یک گروه از ژنراتورهای همسان^{۱۲} در مقابل گروه دیگر از ژنراتور همسان نوسان می‌نمایند. در نتیجه، سیگنال سرعت مربوط به یکی ژنراتورها در هر گروه می‌تواند نماینده رفتار سایر ژنراتورها نیز باشد. روش دسته‌بندی ژنراتورهای همسان و انتخاب نماینده در [۲۹] آورده شده است. همچنین، نحوه استخراج سیگنال سرعت روتور از داده‌های PMU واقع در ترمینال ژنراتور نیز در [۳۰-۳۲] آورده شده است.

در این روش، فرض شده است که دو ناحیه متصل به هم (توسط یک یا چند خط) در حال نوسان در مقابل هم می‌باشد. علت چنین فرضی این نکته است که نوسانات بین‌ناحیه‌ای عمدتاً بین دو ناحیه از یک سیستم قدرت چندناحیه‌ای ظاهر می‌شوند. به بیان دیگر، پس از وقوع اغتشاش در سیستم قدرت تعدادی از ژنراتورها شروع به نوسان در مقابل ژنراتورهای دیگر می‌نمایند. در این حالت می‌توان هر دسته از ژنراتورهای همسان را به صورت یک دسته (ناحیه) در نظر گرفت و به حل مسئله در حالت دوناحیه‌ای پرداخت. سیستم تحت مطالعه و طرح پیشنهادی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۲-۲- لایه دریافت اطلاعات (DAU)

در این لایه، ابتدا، سیگنال سرعت ژنراتورها و نرخ تغییرات آن‌ها دریافت می‌شوند. سپس، محاسبه تأخیر صورت می‌پذیرد. در نهایت، اطلاعات پیش‌پردازش شده و به فرم مناسب تبدیل می‌شوند. هر ناحیه که با ژنراتور نماینده آن ناحیه نمایش داده شده است، با مرکز کنترل سیستم از طریق PMU در ارتباط است. در نتیجه، سیگنال‌های مورد نیاز جمع‌آوری شده و در اختیار طرح مقابله پیشنهادی قرار می‌گیرد. با توجه به مسافت، نوع کانال مخابراتی و زیرساخت مخابراتی موجود، وجود تأخیر در دریافت سیگنال‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در صورتی که تأخیر به درستی مدل نشود می‌تواند به تشدید نوسان توسط کنترل‌کننده کمک نماید. در جدول ۱ مقادیر نوعی تأخیر کانال‌های مخابراتی مختلف آورده شده است.

جدول ۱: تأخیر زمانی کانال‌های مخابراتی مختلف [۳]

| کانال | تأخیر (میلی ثانیه) |
|-----------|--------------------|
| فیبر نوری | ۱۰۰-۱۵۰ |
| میکروویو | ۱۰۰-۱۵۰ |
| PLC | ۱۵۰-۳۵۰ |
| زوج سیم | ۲۰۰-۳۵۰ |
| ماهواره | ۵۰۰-۷۰۰ |

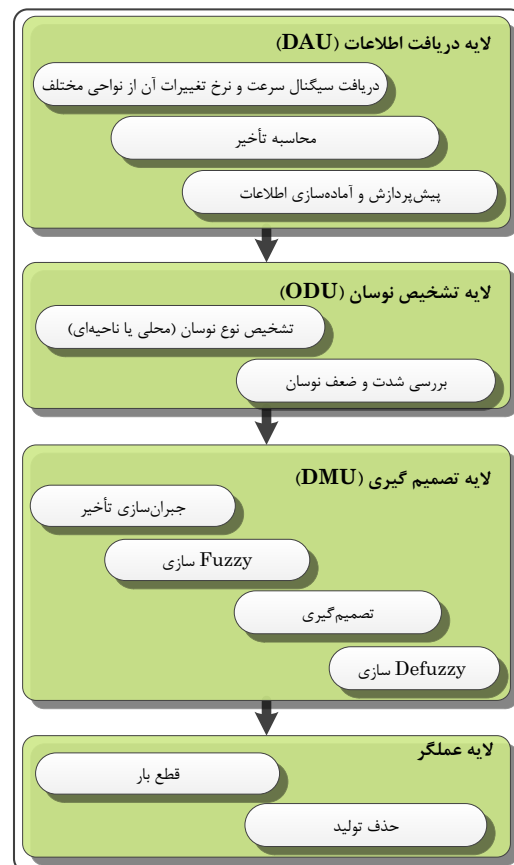
از این جهت ضروری می‌باشد که در حوادث شدید که شبکه در شرایط اضطراری قرار دارد و عناصر کنترل‌پذیر توانایی میراسازی نوسان را ندارند، بتواند با نوسان بین‌ناحیه‌ای مقابله کند و مانع از خاموشی در سطح وسیع گردد. مطالعات شبیه‌سازی در نرم‌افزار PowerFactory DigSILENT کارآمدی روش پیشنهادی را تصدیق می‌نمایند.

در بخش دوم و سوم از این مقاله به ترتیب، روش پیشنهادی و نتایج مطالعات شبیه‌سازی ارائه شده‌اند. در نهایت، نتایج حاصل از این مقاله در بخش چهارم جمع‌بندی شده‌اند.

۲- روش پیشنهادی

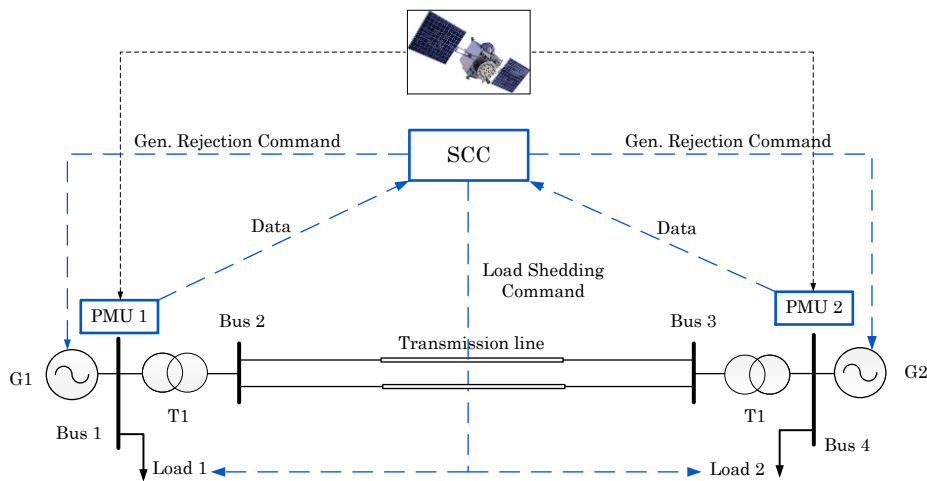
۱-۲- طرح کلی روش پیشنهادی

چارچوب کلی طرح پیشنهادی در شکل ۱ آورده شده است. این طرح در ۴ لایه ارائه شده است.



شکل ۱: چارچوب کلی طرح پیشنهادی

یکی از بنیادی‌ترین مسائل در طراحی کنترل‌کننده‌های گسترده انتخاب مناسب سیگنال‌های ورودی است به نحوی که بهترین عملکرد کنترل‌کننده حاصل شود. این امر مستقیماً با محل قرارگیری PMUها مرتبط می‌باشد. در واقع، دستگاه‌های PMU با اندازه‌گیری مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان در تمامی فازها، فازور ولتاژ و جریان، مؤلفه‌های ترتیبی، فرکانس و نرخ تغییرات آن را محاسبه نموده و به مرکز کنترل



شکل ۲: سیستم تحت مطالعه و طرح پیشنهادی

۲-۳- لایه تشخیص نوسان (ODU)

کاربرد طرح پیشنهادی در میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای است. لذا، فقط تحت شرایطی که نوسان بین ناحیه‌ای رخ می‌دهد می‌بایست وارد عمل شود و در نوسانات محلی عملکرد نداشته باشد. از طرفی، در این طرح از ابزارهایی مانند قطع بار و حذف تولید استفاده می‌شود که به‌عنوان آخرین راه‌حل محسوب می‌شوند. در نتیجه، این طرح مقابله می‌بایست فقط در شرایطی که دامنه نوسان شدیدتر از یک حد می‌باشد وارد عمل شود. در این لایه، ابتدا، نوع نوسان اعم از محلی یا بین ناحیه‌ای بودن تشخیص داده می‌شود. سپس، شدت و ضعف نوسان بررسی شده و در صورت لزوم اطلاعات را از لایه DAU به لایه تصمیم‌گیری انتقال می‌دهد.

جهت ممانعت از به‌کار افتادن بی‌مورد این روش، می‌بایست ترتیبی اتخاذ شود که این روش فقط در مواقع ضرورت شروع به کار کند. در این قسمت، دو شرط اولیه جهت تضمین به‌جا بودن عملکرد این روش تعیین می‌شود. شرط اول حصول اطمینان از این نکته است که نوسان حتماً بین ناحیه‌ای باشد. ثانیاً، انحرافات قابل توجهی در سیگنال‌های ورودی کنترل‌کننده، $\Delta\omega$ و $\Delta\dot{\omega}$ ، مشاهده گردد. منطق پیشنهادی برای این منظور در شکل ۵ آورده شده است.

با توجه به شکل ۵، ابتدا دامنه سیگنال‌های ورودی جهت بررسی شدت و ضعف نوسان با یک مقادیر آستانه، T_{r1} و T_{r2} ، مقایسه شده و فرکانس نوسان نیز سنجیده می‌شود. شرایط شروع به کار الگوریتم پیشنهادی به این صورت است که می‌بایست در هریک از ورودی‌ها انحراف قابل توجهی ایجاد شود و درعین حال فرکانس نوسانات از مقدار آستانه، f_{tr} ، کمتر باشد. مطابق شکل ۵، سیگنال‌های DS و DA به‌ترتیب برابر حاصل ضرب یک متغیر باینری، یعنی x_{os} در سیگنال‌های ورودی $\Delta\omega$ و $\Delta\dot{\omega}$ می‌باشند. متغیر باینری در صورت برقراری شرایط فوق‌الذکر مقدار یک به خود می‌گیرد و در غیراین صورت صفر می‌باشند. در نتیجه، در صورت تشخیص نوسان، سیگنال‌های خروجی DS و DA به‌ترتیب برابر $\Delta\omega$ و $\Delta\dot{\omega}$ قرار می‌گیرند. حال آن‌که اگر شرایط فوق برقرار نباشد، هر دو سیگنال خروجی صفر خواهند بود.

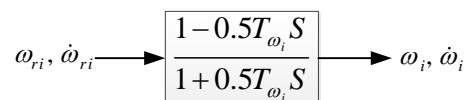
تأخیر در سیستم‌های کنترلی به‌صورت تابع نمایی از زمان در نظر گرفته می‌شود. حال آن‌که به‌منظور سهولت در محاسبات مدل خطی آن به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$e^{-Ts} = \frac{e^{-\frac{T}{2}s}}{e^{\frac{T}{2}s}} \quad (1)$$

که در آن، T مقدار تأخیر و s عملگر لاپلاس است. با بسط صورت و مخرج عبارت (۱) و صرف‌نظر از مراتب بالاتر داریم:

$$e^{-Ts} \cong \frac{1 - \frac{T}{2}s}{1 + \frac{T}{2}s} \quad (2)$$

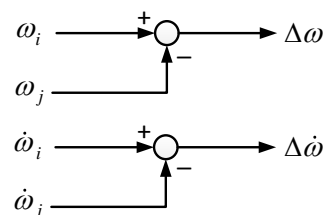
در نتیجه، بلوک دیاگرام مدل‌سازی تأخیر برای هریک از سیگنال‌های ورودی به‌صورت شکل ۳ می‌باشد. در واقع این مدل‌سازی برای در نظر گرفتن اثر کانال مخابراتی است.



شکل ۳: بلوک دیاگرام تأخیر برای هریک از سیگنال‌های ورودی

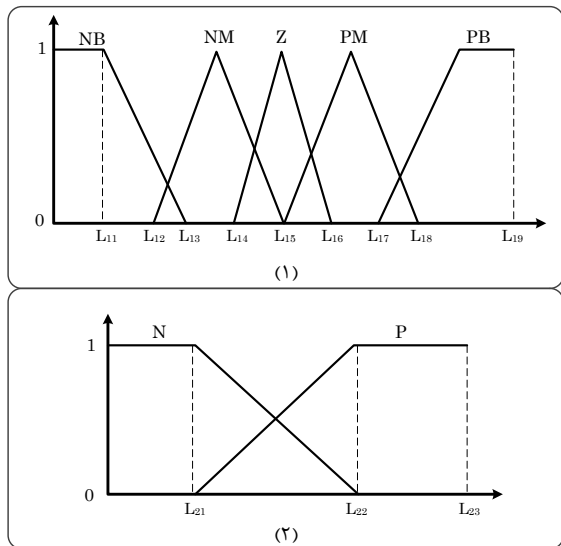
در شکل ۳، ω_{ri} سیگنال واقعی سرعت ژنراتور نماینده ناحیه i و $\dot{\omega}_{ri}$ خروجی کانال مخابراتی می‌باشد. بالانویس نقطه نمایشگر مشتق این سیگنال می‌باشد. T_{ω_i} نیز ضرایب تأخیر مربوط به سیگنال‌های سرعت ناحیه i می‌باشند.

پس از جمع‌آوری داده‌ها، سیگنال‌ها می‌بایست به فرم مناسبی تبدیل شده و در اختیار کنترل‌کننده قرار گیرند. شکل ۴ فرم مناسب سیگنال‌های ورودی کنترل‌کننده را نمایش می‌دهد. فرم سیگنال‌های مورد نیاز به‌صورت اختلاف سرعت نواحی i و j و نیز مشتق آن است.



شکل ۴: فرم مناسب سیگنال‌های ورودی به الگوریتم پیشنهادی

لازم جهت میراسازی برخوردار باشد، دیگر نیازی به پیچیده‌تر نمودن مدل به‌وسیله سطوح بیشتر نمی‌باشد. در شکل ۶، مقادیر L_i ها ($i=1, \dots, 12$) بر اساس دامنه تغییرات سیگنال و نظر اپراتور سیستم می‌بایست تعیین گردد.



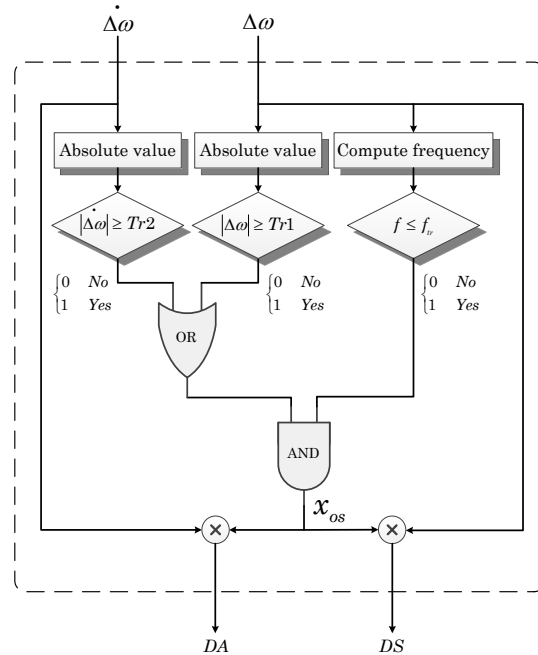
شکل ۶: توابع عضویت پیشنهادی برای سیگنال‌های ورودی؛ (۱) DS، (۲) DA

پس از تعیین توابع عضویت ورودی، توابع عضویت خروجی نیز می‌بایست تعیین گردند تا بتوان قوانین تصمیم‌گیری مناسبی را معرفی نمود. در طرح پیشنهادی، سیگنال‌های خروجی عبارت‌اند از سیگنال قطع بار و سیگنال حذف تولید. برای هر دو سیگنال خروجی تابع عضویت ۵ سطحی مشابه شکل ۶ (۱) در نظر گرفته شده است. سیگنال‌های خروجی قطع بار و حذف تولید به ترتیب LS و GR نام‌گذاری شده‌اند. پس از تعیین توابع عضویت، قوانین استنتاج Fuzzy می‌بایست طراحی شوند. این قوانین بر مبنای استنتاج از وضعیت سیستم و با فرض جهت سیلان توان در خط ارتباطی از شین ۲ به ۳ (شکل ۲)، به شرح جدول ۲ می‌باشند.

جدول ۲: قوانین استنتاج Fuzzy

| سیگنال خروجی | | سیگنال ورودی | | ردیف |
|--------------|------|----------------------|----------------|------|
| GR | LS | $\Delta\dot{\omega}$ | $\Delta\omega$ | |
| PB | None | P | NB | ۱ |
| PM | None | N | NB | ۲ |
| PM | None | P | NM | ۳ |
| Z | None | N | NM | ۴ |
| NM | None | P | Z | ۵ |
| NB | None | N | Z | ۶ |
| None | PB | P | PB | ۷ |
| None | PM | N | PB | ۸ |
| None | PM | P | PM | ۹ |
| None | Z | N | PM | ۱۰ |

هدف اصلی در طراحی این قوانین از بین بردن اختلاف سرعت بین ژنراتورهای نماینده هر ناحیه با قطع بار، حذف تولید و یا هر دو می‌باشد.



شکل ۵: منطق پیشنهادی برای تشخیص نوسان بین‌ناحیه‌ای

مقادیر آستانه می‌بایست بر اساس تجربه اپراتور سیستم از وضعیت شبکه مورد مطالعه و یا با استفاده از نتایج مطالعات شبیه‌سازی انتخاب شود. انتخاب مقادیر کوچک منجر به فعال شدن بی‌مورد کنترل‌کننده خواهد شد که البته اثر منفی بر روی بهره‌برداری سیستم قدرت نداشته و تنها موجب کاهش طول عمر تجهیزات خواهد داشت. لیکن، انتخاب مقدار بزرگ آستانه می‌تواند کنترل‌کننده را با تأخیر فعال نموده و حتی عملکرد مؤثر آن را مخدوش نماید. لذا، توصیه می‌شود با رویکردی محافظه‌کارانه به این مهم پرداخته شود. سیگنال‌های خروجی این لایه تأمین‌کننده لایه تصمیم‌گیری می‌باشند.

۲-۴- لایه تصمیم‌گیری (DMU)

در این لایه، تصمیم‌گیری بر مبنای منطق Fuzzy پیاده‌سازی می‌شود. پس از مهیا شدن سیگنال‌های مورد نیاز و حصول اطمینان از لزوم به‌کارگیری این راهکار، تصمیمات لازم توسط واحد تصمیم‌گیری مبتنی بر منطق Fuzzy اتخاذ می‌شوند. جزئیات مربوط به منطق Fuzzy و قسمت‌های مختلف آن در [۳] آورده شده است.

مرحله نخست جبران‌سازی تأخیر می‌باشد. روش‌های متعددی در مقالات جهت جبران‌سازی تأخیر بیان شده است [۳]. سپس، Fuzzy سازی سیگنال‌های ورودی می‌بایست انجام پذیرد. بدین منظور می‌بایست توابع عضویت مناسب تعیین گردند. شکل ۶ توابع عضویت پیشنهادی برای سیگنال‌های ورودی را نمایش می‌دهد. برای سیگنال DS، مقدار و علامت سیگنال هر دو حائز اهمیت می‌باشند. حال آن‌که برای سیگنال DA علامت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه، تابع عضویت سیگنال DS از ۵ سطح و تابع عضویت سیگنال DA از ۲ سطح تشکیل یافته است. افزایش تعداد افراز توابع عضویت موجب بهبود عملکرد کنترل‌کننده Fuzzy می‌گردد. حال آن‌که اگر طراحی از کارایی

است. همچنین، به منظور پیاده‌سازی منطق Fuzzy این نرم‌افزار با نرم‌افزار محاسباتی MATLAB لینک شده و از جعبه‌ابزار Fuzzy آن استفاده شده است. نقطه کار سیستم به نحوی انتخاب شده است که توان ۱۳۰۰ مگاوات و ۲۶۰- مگاوار از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ در حال انتقال می‌باشد. مقادیر آستانه تعریف شده در شکل ۵ مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است. همچنین، مقادیر مربوط به پارامترهای توابع عضویت در جدول ۵ آورده شده است. شایان ذکر است که فرکانس نوسانات بین ناحیه‌ای با استفاده از روش مقادیر ویژه محاسبه گردیده است [۳۳].

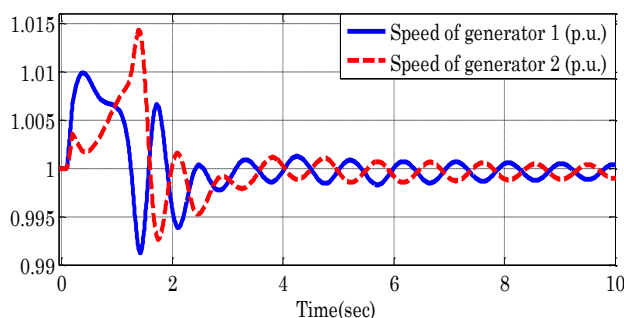
جدول ۴: مقادیر آستانه

| مقدار | نام پارامتر |
|---------------|-------------|
| ۱/۲ هرتز | f_{tr} |
| ۰/۰۰۵ پریونیت | Tr1 |
| ۰/۰۰۵ پریونیت | Tr2 |

جدول ۵: پارامترهای توابع عضویت

| نوع سیگنال | پارامتر | | |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| ورودی | $L_{11} = -0/01$ | $L_{12} = -0/0072$ | $L_{13} = -0/0036$ |
| | $L_{14} = -0/0024$ | $L_{15} = 0$ | $L_{16} = 0/0024$ |
| | $L_{17} = 0/0036$ | $L_{18} = 0/0072$ | $L_{19} = 0/01$ |
| | $L_{21} = -0/005$ | $L_{22} = 0/005$ | $L_{23} = 0/01$ |
| خروجی | $L_{11} = 62/5$ | $L_{11} = 125$ | $L_{11} = 250$ |
| | $L_{11} = 375$ | $L_{11} = 500$ | $L_{11} = 750$ |
| | $L_{11} = 875$ | $L_{11} = 0/0072$ | $L_{11} = 0/01$ |

به منظور تحریک مد نوسانی، یک اتصال کوتاه سه فاز در محل وسط یکی از خطوط (فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ابتدا و انتهای خط) شبیه‌سازی شده است. مدت زمان برقراری خطا ۱۰۰ میلی ثانیه می‌باشد. سرعت ژنراتورهای ۱ و ۲ پس از رفع خطا در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نوسانات به مدت نسبتاً طولانی، بیش از ۱۰ ثانیه پس رفع خطا، ادامه دارند. این نوع از نوسان ممکن است منجر به خاموشی و نیز موجب آسیب دیدن ژنراتورها گردد.



شکل ۷: سرعت ژنراتورهای ۱ و ۲ پس از رفع خطا

توان خروجی ژنراتورها در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۸، توان خروجی ژنراتورها نیز نوسانی است که موجب صدمه

به عنوان مثال، هنگامی که $\Delta\omega$ منفی و $\Delta\dot{\omega}$ مثبت باشند، به این معنی است که سرعت ناحیه ۱ از ناحیه ۲ کمتر است و روند افزایشی دارد. لذا، می‌بایست تولید در ناحیه ۲ حذف شود تا اختلاف سرعت کاهش یابد. به طور مشابه، زمانی که $\Delta\omega$ و $\Delta\dot{\omega}$ مثبت باشند، می‌بایست بار در ناحیه ۲ قطع گردد. سایر قوانین نیز به طریق مشابه قابل استنتاج می‌باشند.

خروجی موتور تصمیم‌گیری Fuzzy کیفی است در حالی که می‌بایست در خروجی یک مقدار عددی مشخص به عنوان سیگنال خروجی تحویل گردد. بدین منظور، عملیات Defuzzy سازی با استفاده از (۳) انجام می‌پذیرد.

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^n F_i S_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3)$$

که در رابطه فوق، F درجه عضویت و S موقعیت هر عضو از تابع عضویت است.

۲-۵- لایه عملگر

تصمیمات اتخاذ شده در لایه DMU در این لایه عملیاتی می‌شوند. از جمله این تصمیمات می‌توان به حذف بار و کاهش تولید اشاره نمود. با توجه به نوع تصمیم، فرمان در زمان‌های مقتضی به محل بار یا تولید ارسال می‌شود.

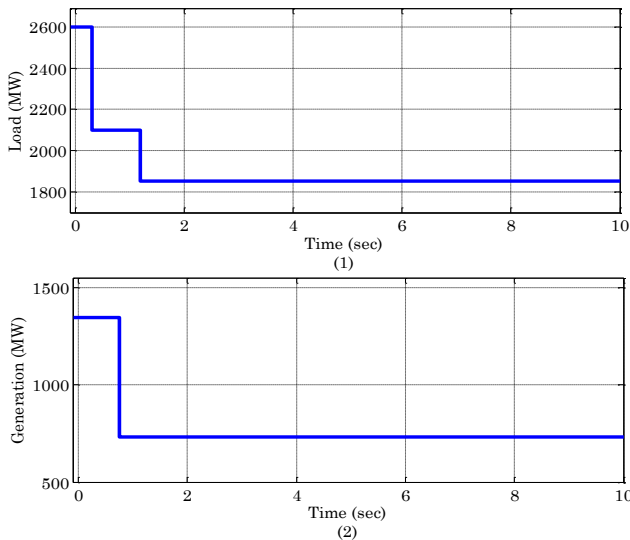
۳- مطالعات شبیه‌سازی

در این قسمت عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از مطالعات شبیه‌سازی بر روی سیستم دو ناحیه‌ای معرفی شده در [۱] بررسی می‌گردد. سیستم مورد نظر مشابه شکل ۲ بوده و پارامترهای آن به شرح جدول ۳ می‌باشند.

جدول ۳: پارامترهای سیستم تحت بررسی

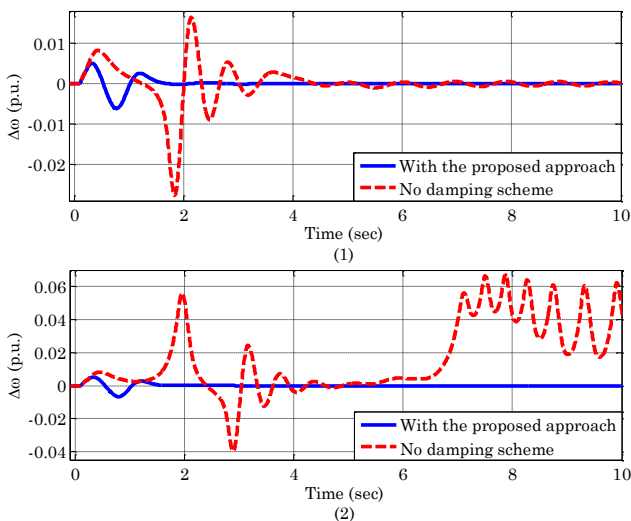
| نام تجهیز | مشخصات |
|--------------------|---|
| G2 و G1 | $S_{max} = 1700 \text{ MVA}$, $V_i = 20 \text{ kV}$, $\text{PF} = 0.9$ $X_d = X_q = 2 \text{ p.u.}$, $X'_d = 0.2 \text{ p.u.}$, $H = 10 \text{ s}$, $D = 0$ |
| T2 و T1 | $S_{max} = 1000 \text{ MVA}$, $20 / 500 \text{ kV}$ $x = 8\% \text{ p.u.}$ |
| Transmission lines | Length: 200 km , Rated Voltage: 500 kV $R = 0.03 \Omega/\text{km}$, $X = 0.3 \Omega/\text{km}$ $B = 5 \mu\text{S}/\text{km}$ |
| Load1 | $P = 0 \text{ MW}$ and $Q = 0 \text{ MVA}$ r |
| Load2 | $P = 2600 \text{ MW}$ and $Q = 400 \text{ MVA}$ r |

این سیستم در نرم‌افزار PowerFactory DiGSILENT و با استفاده از زبان DiGSILENT Simulation Language (DSL) پیاده‌سازی شده



شکل ۱۱: (۱) بار در شینه ۳، (۲) تولید در ناحیه ۲

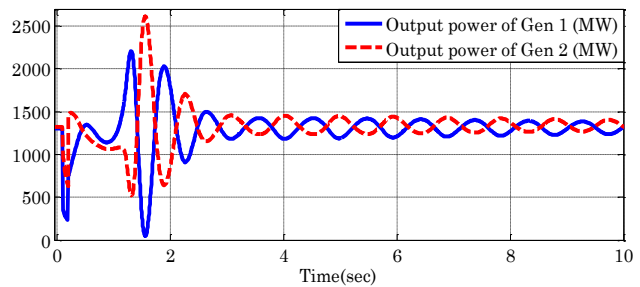
زمان رفع خطا و نقطه کار سیستم از جمله مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر دامنه نوسانات بین ناحیه‌ای می‌باشند. شکل ۱۲ اختلاف سرعت روتور ژنراتورهای دو ناحیه را در شرایط زمان رفع خطای ۱۲۰ میلی ثانیه و ۱۵۰ میلی ثانیه نمایش می‌دهد. با مقایسه شکل ۱۲ با شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان رفع خطا دامنه نوسانات افزایش می‌یابد. علت این امر وجود فرصت بیشتر برای جذب انرژی در حین خطا می‌باشد. هرچه انرژی جذب شده توسط ژنراتورها بیشتر باشد، نوسانات با دامنه بیشتر و زمان طولانی‌تر در شبکه حضور خواهند داشت. همان طوری که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی موفق به میرا نمودن نوسانات در چند سیکل اول نوسان شده است.



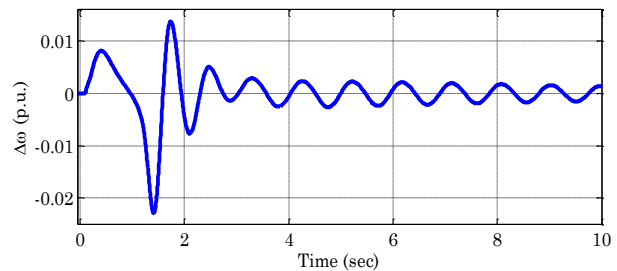
شکل ۱۲: اختلاف سرعت روتور ماشین‌های واقع در دو ناحیه برای زمان‌های رفع خطای: (۱) ۱۲۰ میلی ثانیه، (۲) ۱۵۰ میلی ثانیه

جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی در نقاط کار مختلف، نقطه کار سیستم با تغییر بار اکتیو از ۲۶۰۰ مگاوات به ۳۰۰۰ مگاوات جابه‌جا شده است. شکل ۱۳ سرعت ژنراتورها را پس از وقوع خطای سه‌فاز به مدت ۱۰۰ میلی ثانیه در شین ۲ نمایش می‌دهد.

زدن به قسمت‌های مکانیکی ماشین می‌گردد. سیگنال ورودی به کنترل کننده می‌بایست شرایط ذکر شده در بخش ۳-۲ را احراز نماید تا کنترل کننده شروع به کار نماید. بدین منظور، سیگنال $\Delta\omega$ مربوط به این نوسان در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود، دامنه و فرکانس این سیگنال شرایط آستانه تعیین شده در جدول ۳ را برآورده می‌نمایند. لذا، جهت میراسازی این نوسان روش پیشنهادی می‌بایست وارد عمل شود.

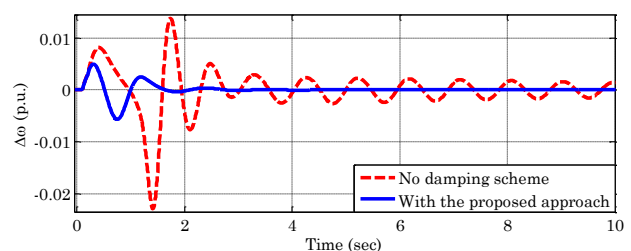


شکل ۸: توان خروجی ژنراتورهای ۱ و ۲ پس از رفع خطا



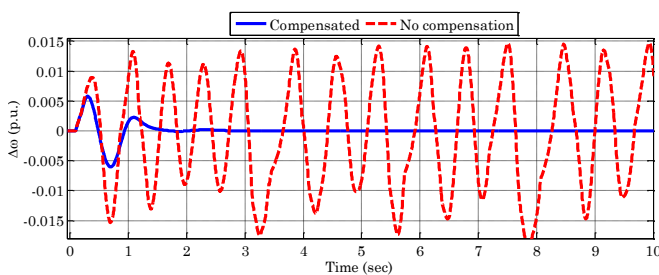
شکل ۹: سیگنال $\Delta\omega$

شکل ۱۰ اختلاف سرعت روتور ماشین‌های واقع در دو ناحیه را پس از اعمال روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود، کنترل کننده پیشنهادی موفق شده است نوسان را در همان سیکل اول میرا سازد. میراسازی نوسان در این حالت از طریق دو مرحله حذف بار و یک مرحله کاهش تولید میسر شده است. مراحل حذف بار و کاهش تولید به ترتیب در شکل ۱۱ آورده شده‌اند. با توجه به شکل ۱۱، در مرحله اول و در لحظه $t = 0.3$ ثانیه مقدار ۵۰۰ مگاوات بار در باس ۳ حذف شده است. سپس، در لحظه $t = 0.75$ ثانیه مقدار ۵۶۹ مگاوات تولید در ناحیه ۲ کاهش یافته است. در نهایت، با حذف ۲۴۸ مگاوات بار در لحظه $t = 1.185$ ثانیه نوسان میرا شده است. در واقع با حذف $28/7\%$ از بار شین شماره ۳ و کاهش $43/7\%$ از تولید در ناحیه ۲ نوسان میرا شده است.



شکل ۱۰: اختلاف سرعت روتور ماشین‌های واقع در دو ناحیه

است. در این شرایط اگر تأخیر کانال ۲۰۰ میلی‌ثانیه باشد، اقدامات مقابله‌ای ربع سیکل دیرتر صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال زمانی که نوسان در پیک مثبت خود می‌باشد، اطلاعات مربوط به ربع سیکل قبل‌تر، یعنی گذر از صفر نوسان، در اختیار الگوریتم قرار می‌گیرد. در نتیجه اقدام صورت گرفته مناسب آن لحظه از نوسان نمی‌باشد و ممکن است موجب تشدید نوسان نیز گردد. راهکار مقابله با این مشکل جبران‌سازی تأخیر مخابراتی است. یک روش کارآمد جهت جبران‌سازی تأخیر مخابراتی در [۳] پیشنهاد شده است. شکل ۱۶ نتایج مطالعات شبیه‌سازی در صورت جبران‌سازی تأخیر را نمایش می‌دهد. در این شکل تأخیر ۲۰۰ میلی‌ثانیه بوده و از روش جبران‌سازی پیشنهادی در [۳] استفاده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در این حالت نیز موفق به میراسازی نوسانات شده است.

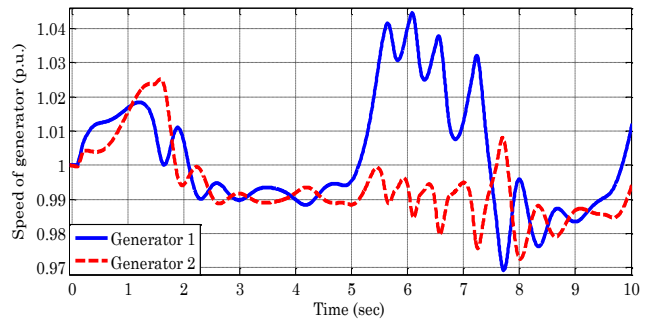


شکل ۱۶: جبران‌سازی تأخیر

۴- نتیجه‌گیری

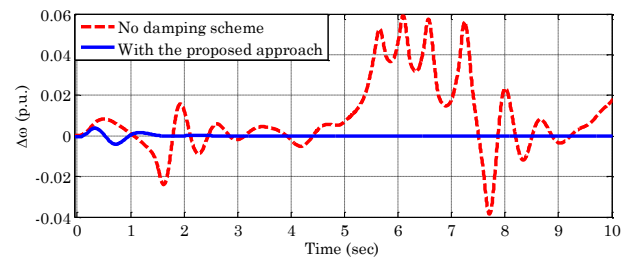
در این مقاله یک روش میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای با استفاده از طرح گسترده قطع بار، حذف تولید و یا هر دو ارائه گردید. روش پیشنهادی یک طرح مقابله اضطراری برای حالاتی است که عملکرد عناصر کنترل‌پذیر موجود جهت میراسازی نوسانات کفایت نکنند. این طرح یک طرح چهار لایه است که از منطق Fuzzy به‌عنوان هسته اصلی تصمیم‌گیری استفاده شده است. قوانین استنتاجی طراحی شده برای هسته تصمیم‌گیری با هدف از بین بردن اختلاف سرعت بین ژنراتورهای نماینده هر ناحیه می‌باشند.

همان‌طوری که توسط مطالعات شبیه‌سازی نشان داده شد، می‌توان با استفاده به‌موقع از ابزارهای قطع بار، حذف تولید و یا هر دو، نوسان بین‌ناحیه‌ای را میرا نمود. تصمیم‌گیری در مورد این که در هر لحظه از نوسان بار حذف شود یا تولید، می‌بایست توسط واحد تصمیم‌گیری و بر مبنای قوانین استنتاجی طراحی شده صورت گیرد. با توجه به نتایج مطالعات شبیه‌سازی مشاهده گردید، قوانین طراحی شده کارآمد می‌باشند و با انتخاب مناسب ابزارهای پیشنهادی در لحظات به‌خصوص از نوسان قادر به میراسازی نوسان می‌باشند. همچنین، عملکرد روش پیشنهادی در شرایط بارگذاری مختلف و به‌ازای مدت‌زمان برقراری اتصال کوتاه متفاوت بررسی گردید. مشاهده شد که نوسانات بین‌ناحیه‌ای با افزایش بارگذاری خط ارتباطی و طولانی‌تر شدن زمان رفع اتصال کوتاه تشدید می‌شوند. نشان داده شد که روش پیشنهادی از قابلیت میراسازی نوسانات در شرایط بارگذاری و زمان‌های رفع خطای مختلف برخوردار



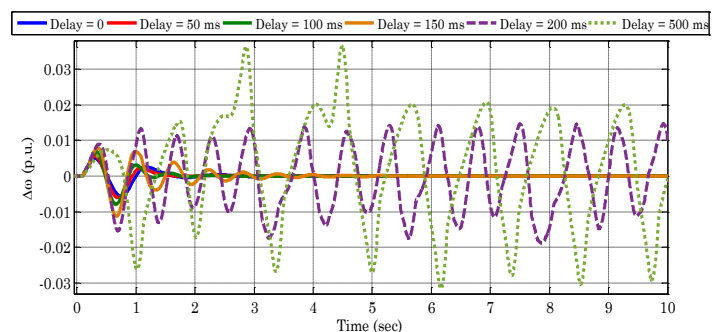
شکل ۱۳: سرعت روتور ماشین‌های واقع در دو ناحیه

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، این ژنراتورها پس از حدوداً ۴ ثانیه تحت نوسان قرار گرفتن ناپایدار شده‌اند. حال آنکه، با استفاده از روش پیشنهادی در این حالت نیز نوسان میرا شده و از ناپایداری ژنراتورها ممانعت به‌عمل آمده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: اختلاف سرعت روتور ماشین‌های واقع در دو ناحیه

درنهایت، عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با تأخیر مخابراتی و لزوم جبران‌سازی آن بررسی می‌شود. فرض می‌شود که تمامی ضرایب تأخیر نمایش داده شده در شکل ۳ با هم برابر می‌باشند. نتایج مطالعات شبیه‌سازی برای شرایط مشابه شرایط شکل ۱۰ و تأخیرهای مختلف، در شکل ۱۵ آورده شده است.



شکل ۱۵: اثر تأخیر بر عملکرد روش پیشنهادی

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، با افزایش تأخیر دامنه نوسانات افزایش یافته و عملکرد روش پیشنهادی به مخاطره می‌افتد. میراسازی برای تأخیرهای مخابراتی زیر ۱۵۰ میلی‌ثانیه به‌خوبی انجام می‌پذیرد. حال آنکه برای تأخیرهای بیشتر، به‌عنوان مثال ۲۰۰ میلی‌ثانیه، نوسان تشدید شده و به ناپایداری می‌انجامد. علت این امر قابل‌مقایسه بودن مقدار تأخیر ۲۰۰ میلی‌ثانیه با دوره تناوب نوسان می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که دوره تناوب این نوسان حدود ۰/۸ ثانیه

- است. در نهایت اثر تأخیر کانال مخابراتی بررسی گردیده و مشاهده شد که وجود تا حدی از تأخیر در ویژگی میراسازی روش پیشنهادی خلل ایجاد نمی‌کند. حال آن‌که تأخیر بیش از حد موجب تشدید دامنه نوسانات و در نتیجه ناپایداری می‌گردد.
- مراجع**
- [1] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power System Stability and Control*, McGraw-hill New York, 1994.
 - [2] D. Dotta, A. S. Silva, and I. C. Decker, "Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 208-216, 2009.
 - [3] M. Mokhtari, F. Aminifar, D. Nazarpour, and S. Golshannavaz, "Wide-area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous communication delays," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28 no. 2, pp. 1997-2005, 2013.
 - [4] X. Yang, and A. Feliachi, "Stabilization of inter-area oscillation modes through excitation systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 494-502, 1994.
 - [5] E. V. Larsen, J. J. Sanchez-Gasca, and J. H. Chow, "Concepts for design of FACTS controllers to damp power swings," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 948-956, 1995.
 - [6] M. Xiao-Ming, Z. Yao, G. Lin, and W. Xiao-Chen, "Coordinated control of interarea oscillation in the China Southern power grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 845-852, 2006.
 - [7] M. Patel, S. Aivaliotis, and E. Ellen, "Real-time application of synchrophasors for improving reliability," *NERC Report*, Oct, 2010.
 - [8] X. Xie, J. Xiao, C. Lu, and Y. Han, "Wide-area stability control for damping interarea oscillations of interconnected power systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 5, pp. 507-514, 2006.
 - [9] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Safdarian, A. Davoudi, and M. Shahidehpour, "Synchrophasor measurement technology in power systems: panorama and state-of-the-art," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1607-1628, 2014.
 - [10] A. R. Messina, J. M. Ramirez, and J. M. Canedo, "An investigation on the use of power system stabilizers for damping inter-area oscillations in longitudinal power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 552-559, 1998.
 - [11] W. Yao, L. Jiang, J. Wen, Q. Wu, and S. Cheng, "Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 318-32, 2014.
 - [12] D. Rai, S. O. Faried, G. Ramakrishna, and A. A. Edris, "Damping inter-area oscillations using phase imbalanced series compensation schemes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1753-1761, 2011.
 - [13] R. Majumder, B. C. Pal, C. Dufour, and P. Korba, "Design and real-time implementation of robust FACTS controller for damping inter-area oscillation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 809-816, 2006.
 - [14] J. Ma, T. Wang, X. Gao, S. Wang, and Z. Wang, "Classification and regression tree-based adaptive damping control of inter-area oscillations using wide-area signals," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 6, pp. 1177-1186, 2014.
 - [15] سعید اباذری و صادق قائدی، «بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم‌های قدرت چندماشینه با کاربرد TCSC»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۲، صفحات ۱۰-۱، ۱۳۹۴.
 - [16] داود فاتح، علی‌اکبر مطیع بیرجندی و رضا ابراهیم‌پور، «افزایش میرای نوسانات سیستم قدرت با جایابی UPFC بر اساس ضریب مانده و مدهای بحرانی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۳، صفحات ۲۳-۳۱، ۱۳۹۳.
 - [17] سعید اباذری و امید مرادی، «بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با به‌کارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۱-۱۱، ۱۳۹۵.
 - [18] S. P. Azad, R. Iravani, and J. E. Tate, "Damping inter-area oscillations based on a model predictive control (MPC) HVDC supplementary controller," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3174-3183, 2013.
 - [19] W. Du, H. Wang, J. Cao, H. Li, and L. Xiao, "Application of the phase compensation method for the design of a DC/AC converter-based stabilizer to damp inter-area power oscillations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1302-1310, 2012.
 - [20] A. C. Zolotas, B. Chaudhuri, I. M. Jaimoukha, and P. Korba, "A study on LQG/LTR control for damping inter-area oscillations in power systems," *IEEE Trans. Control Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 151-160, 2007.
 - [21] S. Chandra, D. F. Gayme, and A. Chakraborty, "Coordinating wind farms and battery management systems for inter-area oscillation damping: A frequency-domain approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1454-1462, 2014.
 - [22] J. Ma, T. Wang, Z. Wang, and J. S. Thorp, "Adaptive damping control of inter-area oscillations based on federated Kalman filter using wide area signals," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1627-1635, 2013.
 - [23] D. Ke, C. Chung, and Y. Xue, "An eigenstructure-based performance index and its application to control design for damping inter-area oscillations in power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2371-2380, 2011.
 - [24] M. Mokhtari, and F. Aminifar, "Toward wide-area oscillation control through doubly-fed induction generator wind farms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2985-2992, 2014.
 - [25] T. Smed, and G. Andersson, "Utilizing HVDC to damp power oscillations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 2, pp. 620-627, 1993.
 - [26] M. Zarghami, M. L. Crow, and S. Jagannathan, "Nonlinear control of FACTS controllers for damping interarea oscillations in power systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 3113-3121, 2010.
 - [27] M. E. El-Hawary, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, Wiley-IEEE Press, 1998.
 - [28] A. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *Computer Applications in Power*, IEEE, vol. 6, no. 2, pp. 10-15, 1993.
 - [29] K. Sun, K. Hur, and P. Zhang, "A new unified scheme for controlled power system separation using synchronized phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1544-1554, 2011.
 - [30] K. Mei, S. M. Rovnyak, and C. M. Ong, "Clustering-based dynamic event location using wide-area phasor

- [32] E. Ghahremani, and I. Kamwa, "Dynamic state estimation in power system by applying the extended Kalman filter with unknown inputs to phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2556-2566, 2011.
- [33] L. Yuan-Chyuan, and W. Chi-Jui, "Damping of power system oscillations with output feedback and strip eigenvalue assignment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1620-1626, 1995.
- [31] P. Tripathy, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "A divide-by-difference-filter based algorithm for estimation of generator rotor angle utilizing synchrophasor measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 6, pp. 1562-1570, 2010.

زیرنویس‌ها

⁷ Static Compensator (STATCOM)

⁸ Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

⁹ Unified Power Flow Controller (UPFC)

¹⁰ System Control Center (SCC)

¹¹ Tie-line

¹² Coherent

¹ Wide-Area Measurement System (WAMS)

² Phasor Measurement Unit (PMU)

³ Resolution

⁴ Power System Stabilizer (PSS)

⁵ Flexible AC Transmission System (FACTS)

⁶ High Voltage Direct Current (HVDC)