کنترل فرکانس-بار ریزشبکه ها با استفاده از کنترل کننده فازی نوع-۲ مرتبه کسری

مهدی سخندانی[۱] ، محمدحسن خوبان[۲*]

*۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه باهنر شیراز، شیراز، ایران، m.sokhandani@yahoo.com
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، khooban@sutech.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲

چکیده: تجدید ساختار در صنعت برق، گرمایش زمین و نگرانی محیط زیستی نسبت به آلودگی نیروگاه ها، نوسانات قیمت انرژی زمینه ساز ظهور انرژی های تجدیدپذیر در صنعت برق شده است. در سه دهه گذشته از منابع تولید انرژی پراکنده که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ میزان تولید گازهای آلاینده بسیار مناسب تر هستند، برای تامین انرژی مورد نیاز صنعت و مصارف خانگی استفاده شده است. با کنارهم قرار گیری منابع تولید انرژی پراکنده، مفهوم جدیدی در شبکه های قدرت به نام ریزشبکه معرفی شده است. یکی از مهمترین چالش های موجود در ریزشبکه های جزیره ای، ایجاد تعادل بین توان تولیدی و توان مصرفی و در نتیجه پایداری فرکانس در هنگام ایجاد اغتشاشات است. از این رو، در این مقاله به ارائه یک روش کنترلی نوین برای کنترل ثانویه فرکانس-بار ریزشبکه ها پرداخته خواهد شد. روش کنترلی پیشنهادی در این پژوهش، مبتنی بر کنترل کننده فازی نوع-دوم و کنترل کننده های مرتبه کسری می باشد. از مزایای روش پیشنهادی می توان به ۱) مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت ها، ۲) دقت و عملکرد بالا در تثبیت فرکانس ریزشبکه جزیره ای اشاره کرد. در پایان، برای بررسی هرچه بهتر عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی و مقایسه های متعددی انجام گرفته است. همچنین، با بکارگیری سیستم سخت افزاری OPAL-RT تمامی نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج عملی مقایسه و تطابق مطلوب میان آن ها نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل فرکانس-بار (LFC) ، ریزشبکه های چند ناحیه ای، کنترل فازی، کنترل مرتبه کسری، فازی نوع – دوم.

۱- مقدمه

نگرانی های جهانی به دلیل افزایش مشکلات زیست محیطی از یک سو و از طرف دیگر افزایش نیاز به تولید توان الکتریکی، افزایش بی ثباتی ها در پیش بینی و برنامه ریزی تولید و افزایش فشارها جهت احداث خطوط انتقال جدید به ویژه در فواصل طولانی باعث شده تا توجهات به سمت تولیدات پراکنده افزایش یابد. در سالهای اخیر، تولیدات پراکنده با منابع انرژی تجدید پذیر همچون باد و انرژی خورشیدی مورد توجه زیادی قرار گرفتند. تولیدات پراکنده قسمتی از سیستم را تشکیل می دهند و دارای هزینه ساخت پایین هستند و برای سطح توزیع و در نزدیکی مراکز بار و در ابعاد کوچک مناسب می باشند (ابعاد آنها وابسته به ظرفیت توان سیستمی است که درآنجا قرار داده می‌شود.). در آینده این امکان وجود دارد که از تولیدات پراکنده بتوان در مکان های استراتژیک سیستم های توزیع استفاده کرد. از دیگر کاربردهای آن کاهش تلفات توان، کاهش هزینه ی اجرایی و بهبود پروفایل ولتاژ و ضریب توان را می توان نام برد [۱، ۳].

سیستم‌های قدرتی که از منابع تولید توان الکتریکی مختلف استفاده می‌کنند، با عنوان سیستم‌های قدرت هیبرید شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها از ترکیب اجزای مختلفی مانند سیستم تولید، سیستم ذخیره، سیستم کنترل و مدیریت توان و غیره تشکیل می‌گردند. طراحی اجزای سیستم‌های قدرت کوچک با قابلیت اتصال و انفصال از

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

شبکه سراسری برق که اصطلاحاً ریزشبکه نامیده می‌شود باید به نحوی باشد که عملکرد مطمئن آن را در هر دو مود بهره‌برداری شامل مود اتصال به شبکه و مود جزیره یا مستقل از شبکه تضمین نماید [۲]. ریز شبکه ها، شبکه هایی با ولتاژ پایین می باشند که منابع کوچک تولید پراکنده و دستگاه های ذخیره ساز انرژی از طریق فیدر به بارها متصل شده اند. آنها می توانند هم با سیستم توزیع ولتاژ متوسط به شبکه اصلی متصل شوند و هم در حالت مستقل یا جزیره ای کار کنند. با این حال، ریز شبکه تنها می تواند ظرفیت بار حداکثر ۱۰ MVA عرضه کند [۴].

کنترل توان اکتیو و فرکانس در یک سیستم قدرت به عنوان کنترل فرکانس-بار (LFC) نامیده می شود [۵]. از آنجایی که سیستم‌های ذخیره ساز انرژی بخش جدایی ناپذیر از ریز شبکه ها تلقی می شوند، این سیستم ها قادر هستند که به سرعت جبران توان اکتیو در شبکه را فراهم کنند. همچنین می توانند به منظور بهبود عملکرد کنترل فرکانس- بار در ریزشبکه های جزیره ای مورد استفاده قرار گیرند [۴، ۵].

تاکنون روش های کنترلی متنوعی برای کنترل فرکانس-بار سیستم و شبکه های قدرت مطرح شده است. بطورکلی، مهمترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت و ریزشبکه‌ها را می توان به چهار دسته کلی روش‌های کنترل کلاسیک و بهینه، کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم و کنترل هوشمند تقسیم کرد [۶]. هر کدام از این روش‌ها را می‌توان بصورت متمرکز یا غیرمتمرکز پیاده‌سازی نمود. در ادامه و با توجه به حجم عظیم فعالیت‌های مربوط به کنترل بار-فرکانس و گستردگی زمینه‌های پژوهش، تنها به ذکر مهم‌ترین و جدیدترین مراجع بسنده خواهد شد [۷]. روش‌های کنترل کلاسیک مرسوم برای LFC از انتگرال سیگنال خطا به عنوان معیار استفاده می‌کنند. در روش‌های کلاسیک برای بدست آوردن حاشیه فاز و حاشیه بهره مناسب از دیاگرام نایکوئیست و مکان هندسی ریشه‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، روند و طراحی این دسته از کنترل‌کننده‌ها سر راست، ساده و قابل پیاده‌سازی عملی می‌باشند. عیب روش‌های کلاسیک را می‌توان عملکرد ضعیف دینامیکی این سیستم‌ها در مواجهه با اثرات ناپایدار کننده نظیر، تغییر پارامترهای سیستم و وجود عوامل غیرخطی دانست [۷]. استفاده و پیاده‌سازی روش‌های کنترل مدرن را می توان در [۸] جست و جو کرد. طراحی این چنین کنترل‌کننده‌هایی نیازمند داشتن تمامی متغیرهای سیستم می‌باشد. در صورتی که تمام متغیرهای حالت سیستم از طریق اندازه‌گیری‌های سیستم رویت‌پذیر باشند، طراحی این چنین کنترل‌کننده‌هایی امکان‌پذیر می‌باشد. مضاف براین، پیاده‌سازی و اجرای چنین کنترل‌کننده‌ای حتی در صورتی که شرایط رویت‌پذیری برآورده شود بسیار پیچیده خواهد بود. در نتیجه، این روش‌ها برای سیستم‌های قدرت بزرگ که دارای متغیرهای حالت فراوانی هستند فاقد کارایی و پیاده‌سازی می‌باشند. با توجه به مطالب بیان شده، به علت محدودیت و مشکلات استفاده از LFC مبتنی بر تمام متغیرهای حالت سیستم، استفاده از روش‌های کنترلی مبتنی بر متغیرهای محدود در [۷، ۸] پیشنهاد شده است. روش‌های ارائه شده کارایی روش‌های با متغیرهای حالت کامل را ندارند اما سادگی بیشتری در اجرا را دارند [۸].

روش‌های کنترل تطبیقی موضوع تحقیقات در بیش از یک ربع قرن اخیر بوده است. روش‌های کنترل تطبیقی را می توان به دو دسته کلی، روش‌های خودتنظیم و روش‌های مبتنی بر مدل مرجع تقسیم نمود. تاکنون روش‌های مختلفی برای غلبه بر تغییرات پارامترها ارائه و پیشنهاد شده است. بطور نمونه، در [۹] یک روش کنترل تطبیقی مبتنی بر کنترل‌کننده PI را برای مقابله با عدم قطعیت‌های پارامتری سیستم ارائه شده است. در روش پیشنهاد شده، کنترل‌کننده PI به عنوان قلب تپنده سیستم LFC فرض شده و یک کنترل‌کننده فازی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PI بصورت لحظه ای لحاظ شده است. مرجع [۱۰] یک الگوریتم تطبیقی خودتنظیم برای حل مسئله LFC در یک سیستم قدرت با هدف داشتن بهترین عملکرد کنترل‌کننده در شرایط تغییرات وسیعی از پارامترها پیشنهاد شده است. همچنین [۹] اقدام به طراحی کنترل تطبیقی LFC چند متغیره نموده است. تابع هدف پیشنهاد شده شامل دو رابطه خطای سیگنال کنترلی و اندازه فعالیت‌های کنترلی می‌باشد. در نهایت، ورودی کنترلی در یک فرآیند بهینه‌سازی با هدف حداقل کردن تابع هزینه محاسبه شده است [۷].

علی‌رغم نتایج خوبی که از کنترل‌کننده‌های تطبیقی حاصل می شود، روش‌های تطبیقی روش های بسیار پیچیده‌ای بوده که نیاز به شناسایی دائم مدل سیستم دارند. همچنین، روش‌های تطبیقی نیازمند داشتن مدل دقیق و کامل سیستم هستند. به همین دلیل، بکارگیری این روش‌ها برای سیستم‌های واقعی چندان واقع بینانه بنظر نمی‌رسد [۷].

از یک سو واضح است که یک سیستم قدرت واقعی به دلیل تغییرات زیاد در پارامترهای سیستم، تغییرات مدام بار، خطای مدل‌سازی، خطای ناشی از خطی‌سازی و همچنین عدم دسترسی کامل به اطلاعات سیستم، همواره دارای عدم قطعیت‌های زیادی می‌باشد. از سوی دیگر، نمونه اولیه یک عدم قطعیت معمول در سیستم، تغییرات بار و تغییرات مدام نقطه‌کار سیستم می‌باشد. به دلایل فوق، یک کنترل‌کننده LFC مبتنی بر پارامترهای نامی سیستم ممکن است برای حل این مساله کافی نباشد و استفاده از آن در شرایط مختلف کاری سیستم ممکن است منجر به نتایج دلخواه طراح و بهره‌بردار نشود. در نتیجه، در شرایط متفاوت کاری عملکرد سیستم افت می‌کند و حتی ممکن است سیستم ناپایدار شود. تاکنون تحقیق و پژوهش‌های فروانی صورت گرفته شده است تا مشکل نامعینی و عدم قطعیت در کنترل‌کننده فرکانس - بار حل شود. این نکته را باید در نظر داشت که در روش‌های کنترل مقاوم هدف کنترل نه تنها طراحی کنترل فرکانس-بار به منظور فراهم آوردن پایداری و عملکرد در نقطه

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019

نامی، بلکه هدف اصلی فراهم کردن پایداری و عملکرد مقاوم سیستم می‌باشد [۱۱].

در [۱۲] یک کنترل‌کننده مقاوم برپایه روش معادله ریکارتی برای حل مسئله کنترل مقاوم LFC پیشنهاد شده است. در ادامه، براساس کنترل مقاوم و تطبیقی یک روش ترکیبی جدید مقاوم-تطبیقی ارائه شده است [۱۳]. در واقع ایده اصلی استفاده هم زمان از دو روش مقاوم و تطبیقی بدین گونه می‌باشد که با استفاده از تکنیک کنترل مقاوم بر تغییرات و نامعینی‌های کوچک غلبه شود و با استفاده از روش کنترل تطبیقی بتوان بر عدم قطعیت‌های بزرگ فائق آمد. در [۱۴] یک کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر H_∞ و در نظر گرفتن نامعینی‌های پارامتری پیشنهاد شده است. تحلیل‌های انجام گرفته شده مبتنی بر μ نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فوق عملکرد مناسبی در مواجهه با عدم قطعیت‌های ساختاری سیستم ارائه می‌دهد [۱۱].

مرجع [۱۵] از روش تحلیل و طراحی μ برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استفاده کرده است. جهت ارزیابی کنترل‌کننده پیشنهاد شده، نتایج بدست آمده با یک کنترل‌کننده کلاسیک PI که مقادیر آن از طریق معیار ISE در یک محدوده تغییرات پارامترها تنظیم شده، مقایسه شده است [۷].

طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر روش پارامتره کردن Q برای کنترل فرکانس در [۱۶] مطرح شده است. این روش مزیت‌های متعددی می‌تواند داشته باشد. از جمله این مزیت‌ها می توان به یک کنترل‌کننده همیشه پایدار اشاره کرد. قطب‌های حلقه بسته می‌تواند در نواحی مشخصی قرار گیرد تا پاسخ گذرا بهبود یابد. ضمن اینکه مرتبه کنترل‌کننده مزبور از مرتبه کنترل‌کننده‌های مشابه که با روش های H_2 و H_∞ طراحی شده‌اند، کمتر می‌باشد [۱۱].

روش‌های کنترل مقاومی که مورد بحث و بررسی قرار گرفتند، همگی پاسخ‌های دینامیکی خوبی را از خود نشان می‌دهند. اما مشکل عمده اکثر این روش‌ها نیاز به دسترسی به تمام متغیرهای حالت موجود در سیستم می‌باشد. در نتیجه، این روش و تکنیک‌ها بدلیل مشکلات ناشی از دسترسی به تمام متغیر حالت‌های سیستم برای کاربرد عملی چندان واقع بینانه بنظر نمی‌رسد. از سوی دیگر، از آنجایی که برخی از این روش‌ها از یک ساختار متمرکز استفاده می‌کنند، مرتبه کنترل‌کننده منتجه بسیار بالاست که برای سیستم‌ها قدرت نامناسب می‌باشد. در طراحی کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز برای سیستم‌های قدرت بایستی توجه داشت که اهداف هر کنترل‌کننده غیرمتمرکز بایستی هم راستا با اهداف کل سیستم بوده و با آن‌ها تطابق داشته باشد. مهم‌ترین ویژگی کنترل غیرمتمرکز، کاهش مرتبه و پیچیدگی کنترل‌کننده آن به همراه تضمین پایداری برای کاربردهای عملی می‌باشد. برای نمونه، مرجع [۲] یک روش کنترل مقاوم غیرمتمرکز برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PI در سیستم قدرت را پیشنهاد داده است. روش کنترلی مزبور یک روش LMI مبتنی بر H_2/H_∞ می‌باشد که برای غلبه بر مشکلات ناشی از تاخیر در حلقه کنترل فرکانس-بار طراحی شده است. طبق بررسی‌های صورت پذیرفته شده، تاخیر در حلقه کنترلی LFC می‌تواند موجب ناپایداری سیستم قدرت شود [۷].

با توجه به آنچه گفته شد، آشکار است که در عمل بسیاری از ساختارهای غیرخطی، مانند سیستم قدرت، بوسیله مدل‌های کاهش مرتبه‌یافته مدل‌سازی می‌شوند. مدل‌های بدست آمده، بعضا خطی بوده و به شدت وابسته به مشخصات و نقطه کار می‌باشند. مدل‌های خطی با تغییر نقطه‌کار سیستم کارایی خود را تا حدودی از دست می‌دهند. در واقع شاید لازم باشد که یک مدل خطی شده جدید تعریف شود یا اینکه کنترل‌کننده مربوطه خود را با شرایط تطبیق دهد. به علت پیچیدگی و ماهیت چند متغیره بودن سیستم‌های قدرت، ساختارهای LFC انعطاف ناپذیر و روش‌های کلاسیک لزوما راه حل‌های مناسبی را پیشنهاد نمی‌دهند. بنابراین برای بهبود عملکرد چنین سیستم‌هایی بایستی روش‌های انعطاف پذیری ارائه شود. در سال ها اخیر، با پیشرفت روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی، منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی دریچه جدیدی برای غلبه بر مشکلات فوق ایجاد شده است. بر این اساس تکنیک‌های هوشمند با قابلیت‌های بشری هم چون درک، منطق و یادگیری ممکن است بتوانند بر مشکلات فوق غلبه کنند. اساس بیشتر این تکنیک‌ها بدین گونه است که نیازی به مدل ریاضی یا سیگنال کوچک سیستم برای کنترل آن ندارند، در نتیجه در بسیاری از موارد می‌توانند به مشکلاتی که پیش‌تر ذکر شد بهتر از تئوری‌های کنترل کلاسیک، مقاوم و تطبیقی فائق آیند [۷].

مراجع بسیاری به کاربرد شبکه‌های عصبی در کنترل فرکانس-بار ریزشبکه ها پرداخته‌اند. مرجع [۱۶] یک شبکه خطی چندلایه که با استفاده از روش انتشار معکوس خطا آموزش می‌بینند را برای کنترل فرکانس-بار پیشنهاد داده است. کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر ANN در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PI طراحی شده به روش کلاسیک در سیستم‌های LFC عملکرد خوبی از خود نشان داده است. در بعضی از مراجع دیگر، ترکیبی از روش‌های هوش مصنوعی و کنترل مقاوم به منظور استفاده در LFC مطرح شده است. به عنوان مثال می‌توان به [۹] اشاره نمود.

در این مقاله، با توجه به مطالب بیان شده، به طراحی یک کنترل کننده مقاوم هوشمند بهینه مبتنی بر سیستم فازی و محاسبات مرتبه کسری برای کنترل فرکانس-بار ریزشبکه های جزیره ای پرداخته خواهد شد. روش پیشنهادی، در مقایسه با روش های پیشنهاد شده تا کنون دارای مزیت و ویژگی هایی همچون ۱) عدم وابستگی به نقطه کار ۲) مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت های پارامتری ۳) تنظیم آنلاین پارامترها بر اساس اغتشاشات بار در ریزشبکه می باشد. همچنین سعی شده است که در قسمت بررسی و آنالیز نتایج، از دیتاهای واقعی برای تست کنترل کننده پیشنهادی در ریزشبکه استفاده شود. در پایان با انجام شبیه سازی های متنوع و همچنین

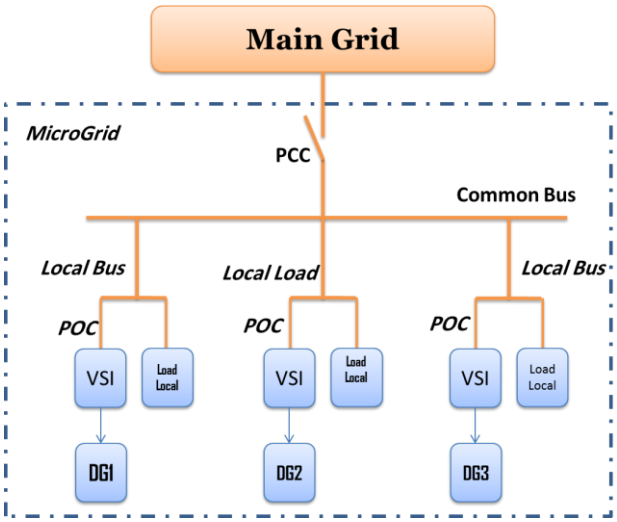
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019

پیشنهاد سناریوهای متفاوت، روش پیشنهادی در این مقاله مورد چالش و بررسی دوچندان قرار داده شده است.

۲- مفهوم و ساختار ریز شبکه ها

یک ریز شبکه شامل گروهی از بارها و منابع کوچک یا تولید کننده های پراکنده است که قادرند به عنوان یک شبکه قدرت کنترل پذیر ، بارهای خود را به صورت مستقل تغذیه نمایند. ساختار کلی یک ریز شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. ریز شبکه در نقطه اتصال مشترک (PCC) به شبکه اصلی متصل می‌شود. منابع موجود می توانند AC یا DC باشند. این منابع به واسطه المانهای الکترونیک قدرت(اینورترها و کانورترها)،در نقطه اتصال (POC) به ریز شبکه متصل می‌شوند [۲].

تعادل میان تولید و مصرف یکی از مهم ترین پارامترهایی است که باید در یک ریز شبکه در هر دو حالت وصل و قطع وجود داشته باشد. در حالت وصل، این تعادل به وسیله تبادل توان میان ریز شبکه و شبکه اصلی تامین می شود. اما در حالت قطع، باید با به کارگیری یک استراتژی مناسب و کم و زیاد کردن تولید یا بار، تعادل میان تولید و مصرف را برقرار نمود [۲، ۹]. برای این منظور در یک ریز شبکه وجود یک سری بارهای کنترل پذیر و منابع انرژی کنترل پذیر الزامی است.



شکل (۱): شمای کلی از یک ریزشبکه

این مقاله بر روی تنظیم هوشمندانه فرکانس توسط کنترل کننده های هوشمند تمرکز دارد. از ان رو در ادامه، به حلقه های مرسوم کنترلی که در تنظیم فرکانس استفاده می شوند، اشاره ای خواهد شد.

۲-۱- کنترل اولیه

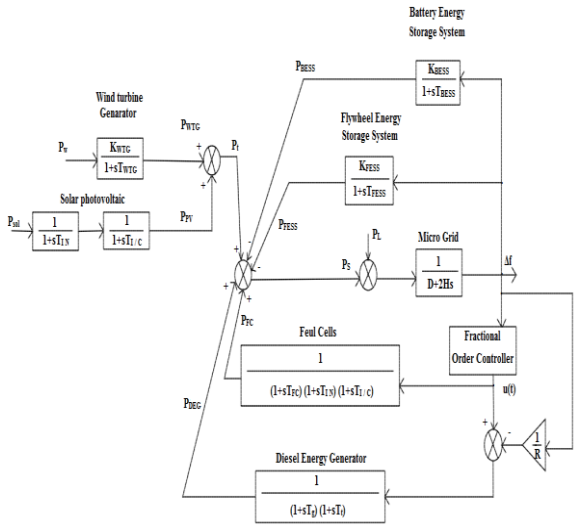
اگر یک اغتشاش در سیستم قدرت اتفاق بیافتد که سبب بر هم خوردن تعادل میان تولید و مصرف شود، فرکانس از مقدار نامی دور شده و اگر این نوسانات کنترل نشوند، حتی می توانند منجر به خروج واحدهای تولیدی شوند. اولین حلقه کنترلی که این نوسانات فرکانسی را احساس می کند، کنترل اولیه است که روی ژنراتورهای سنکرون تعبیه شده است. این حلقه کنترلی بر اساس مشخصه توان حقیقی-فرکانس (P/f) ژنراتور که در معادله (۱) نشان داده شده است عمل می کند [۷].

$$f - f_0 = -k_p (P - P_0) \quad (1)$$

که در آن f_0 و P_0 به ترتیب فرکانس نامی و توان اکتیو شبکه هستند. اگر بر میزان تقاضای بار افزوده شود، فرکانس از مقدار نامی افت می‌کند. این افت توسط حلقه کنترلی اولیه محدود می‌شود. اگر این حلقه وجود نداشته باشد، این افت، به افتی ماندگار تبدیل شده و در نهایت حتی می‌تواند به خروج واحدهای تولیدی منجر شود.

۲-۲- کنترل ثانویه

در این مقاله، هدف از طراحی کنترل کننده برای کنترل فرکانس-بار ریزشبکه ها، طراحی یک کنترل کننده مقاوم برای حلقه کنترل ثانویه در این سیستم ها می باشد. در این حلقه کنترلی، معمولا از کنترل کننده های کلاسیک PI برای حذف خطای ماندگار در فرکانس استفاده می‌شود. بعد از ایجاد نوسان در فرکانس به علت عدم وجود تعادل میان تولید و مصرف، این خطا و نوسان توسط کنترل اولیه محدود و توسط کنترل ثانویه صفر می‌شود. همانطور که پیشتر گفته شد، هدف اصلی این مقاله، طراحی یک کنترل کننده هوشمند نوین برای کنترل فرکانس-بار ثانویه در ریزشبکه ها می باشد. برای اطلاعات بیشتر در مورد کنترل فرکانس-بار ثانویه در ریزشبکه ها می توان به [۲، ۷، ۹] رجوع کرد.



شکل (۲): مدل فرکانس-بار ریزشبکه جزیره ای مورد مطالعه

۳- سیستم آزمون

برای آزمودن روش کنترلی پیشنهادی، یک ریز شبکه جزیره ای که مدل فرکانسی آن که در شکل ۲ نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است. جزئیات این ریز شبکه در مرجع [۱۷] به صورت کامل ارائه شده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

در این ریز شبکه مستقل، چندین منبع تولید پراکنده (DG)، یک توربین بادی، وسایل ذخیره کننده انرژی (BEES, FESS) ، و یک پانل خورشیدی وجود دارند. یک کنترل کننده PI در کنترل ثانویه فرکانس استفاده شده که در حالت عادی به صورت سعی و خطا و بر حسب تجربه در مقادیر مشخصی تنظیم می‌شود. در این مقاله از یک کنترل کننده هوشمند فازی-مرتبه کسری برای کنترل فرکانس-بار ثانویه شبکه مورد مطالعه استفاده شده است.

در مدل فرکانسی سیستم آزمون (شکل ۲)، ΔP_L ، P_s ، P_w، Φ_{PV} و ΔF به ترتیب توان مکانیکی توربین بادی، کل توان تولیدی در ریز شبکه، تغییرات الگوی بار، نوسانات شار خورشید و نوسانات فرکانس ریز شبکه هستند. مقادیر پارامترهای بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۲ در جدول (۱) داده شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ریزشبکه

Symbol and Abbreviation	Values	Symbol and Abbreviation	Values
T_g	0.08s	T_{FC}	0.26 s
D	0.015	2H	0.1667
R	3.000	T_{WTG}	1.5 s
K_{FESS}	1	T_t	0.4 s
K_{BESS}	1	$T_{I/C}$	0.004 s
T_{FESS}	0.1 s	T_{IN}	0.04 s
T_{BESS}	0.1 s	K_{WTG}	1

۴- طراحی کنترل کننده پیشنهادی

۴-۱- مبانی محاسبات دیفرانسیل و انتگرال غیر صحیح

این غیر قابل انکار است که سیستم کنترل و اصول نظری آن، بوسیله ترکیب روش های مهندسی و تئوری های ریاضی تغییر و توسعه پیدا کرده است، به خصوص، محاسبات دیفرانسیل و انتگرال کسری به عنوان شاخه ای از محاسبات دیفرانسیل و انتگرال در طراحی کنترل کننده های مقاوم مورد توجه قرار گرفته است [۱۸]. در چند سال گذشته، کنترل کننده های غیر صحیح در یک طیف گسترده از سیستم های قدرت و کاربردهای مهندسی کنترل (به عنوان مثال کنترل سرعت خودرو برقی، کنترل جریان و ولتاژ ریز شبکه ها، روبات های پرنده و غیره) برای غلبه بر عدم قطعیت و حذف اغتشاشات نامطلوب مورد استفاده قرار گرفته اند. به طور کلی، $\alpha D_t^r f_x(t)$ برای نظریه های کنترلِ مبتنی بر محاسبات دیفرانسیل و انتگرال غیر صحیح بکار گرفته می شود که در آن $r \in \mathcal{R}$ است و همچنین t و r به ترتیب محدوده بالا و پایین معرفی شده اند. باید توجه داشت که r می تواند مقدار منفی یا مثبت داشته باشد. به طور خاص، فرمول کاپوتو در سیستم های کنترل خودکار برای تعریف عوامل انتگرالی/ دیفرانسیلی کسری کنترل کننده های غیر صحیح مورد استفاده قرار می گیرد. در زیر، فرمول کاپوتو ارائه شده است :

$$\alpha D_t^r f_x(t) = \frac{1}{\Gamma(m-r)} \int_\alpha^t \frac{D^m f_x(t)}{(t-\tau)^{r+1-m}} d\tau \quad ، \quad r \in \mathcal{R}^+, \ m \in Z^+ \ and \ \ m-1 \le r < m \qquad (۱)$$

خوانندگان این پژوهش که مشتاق به کسب اطلاعات بیشتر درباره چگونگی فرمول بندی کنترل غیر صحیح در سیستم های کنترل و قدرت هستند می توانند به [۲۲] رجوع کنند.

۴-۲- کنترل کننده منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FLC)

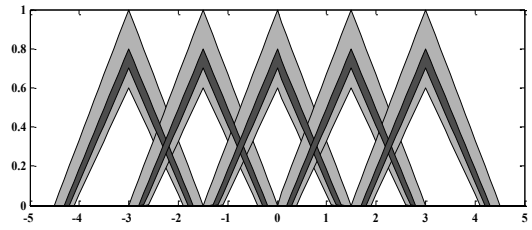
کاملا واضح است که پیدا کردن و استخراج مدل ریاضی سیستم های قدرت و الکترونیک در بسیاری از موارد و شرایط بسیار دشوار و یا شاید غیر ممکن است. در نتیجه، کنترل کننده های مدل مستقل (به عنوان مثال منطق فازی، شبکه عصبی و غیره) می تواند برای کنترل چنین سیستم هایی بسیار مفید باشند. اکنون، در این بخش و برای اولین بار، کنترل کننده منطق فازی نوع-دوم عمومی برای کنترل فرکانس-بار (LFC) در ریزشبکه (MG) های مستقل مورد بحث قرار داده شده است. مزایای اصلی کنترل کننده منطق فازی نوع دوم عمومی پیشنهادی را می توان به شرح زیر بیان کرد : ۱) کاملا در برابر انواع عدم قطعیت ها و اختلالات مقاوم است. ۲) کنترل کننده مذکور یک نوع از کنترل کننده های مدل مستقل (آزاد) است و می توان آن را در یک طیف گسترده از سیستم های قدرت و برنامه های کاربردی بدون هیچ گونه پیچیدگی به کار گرفت. ۳) پیاده سازی آن در کاربردهای سخت افزاری آسان است [۱۹].

معمولا کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) را می توان با ترکیب مجموعه ای از کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم بازه ای(IT2FL) به کار برد [۹]. بنابراین، با استفاده از این ایده، فرمول ریاضی کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) می توانند شبیه به کنترل کنند های منطق فازی نوع-دوم بازه ای (IT2FL) باشند. از این رو و باتوجه به مطالب بالا می توان نوشت:

$$\tilde{\tilde{A}} = \{((x,u), \mu_{\tilde{A}}(x)) | \forall \ x \in X, \ \forall \ u \in J_x \subseteq [0,1]\} \qquad (۲)$$

که در آن X یک مجموعه فازی عمومی است، J_x تابع عضویت ابتدایی و تابع عضویت ثانویه بوسیله $\mu_{\tilde{A}}(x)$ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که J_x می تواند هر مقداری بین [۰، ۱] باشد و به عنوان یک تابع عضویت ثانویه عدم قطعیت تعریف می شود. یک نمونه تابع عضویت ثانویه کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) در شکل ۳ نشان داده شده است که در آن از توابع عضویت ثانویه مثلثی برای نشان دادن مرتبه بالا و همچنین توابع عضویت مرتبه پایین استفاده شده است[۹].

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

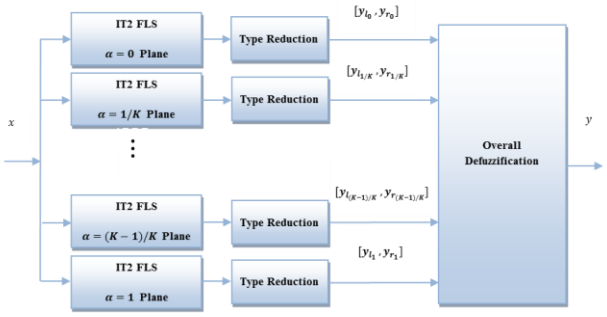


شکل (۳): توابع عضویت یک کنترل کننده فازی نوع-دوم عمومی

در [۵]، روشی به نام α-plane به منظور کاهش محاسبات در کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) ارائه داده شده است. به عبارت دیگر، مجموعه کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) قابل تفکیک به چند مجموعه منطق فازی نوع-دوم بازه ای (IT2F) هستند که در آن هر مجموعه دارای یک سطح متناظر α می باشد ($\alpha =\{0,1/k,\ldots,(k-1)/k,1\}$) .

$$\tilde{A} = \cup_{\alpha\in[1,0]} \alpha/\tilde{A}_\alpha \qquad (۳)$$

اکنون، کنترل کننده منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) بر اساس نمایش صفحه-آلفا در شکل ۴ بیان شده است.



شکل (۴): کنترل کننده فازی نوع-دوم عمومی مبتنی بر صفحه آلفا

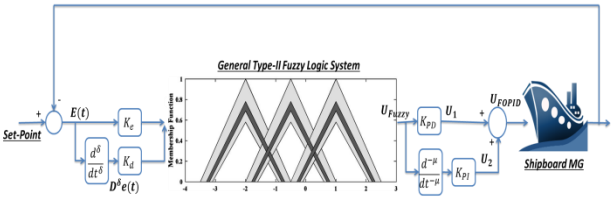
از این رو، خروجی سیستم کنترل کننده منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) بر اساس تئوری نمایش صفحه-آلفا می تواند به صورت زیر بیان شود [۵].

$$U_{Fuzzy} = y = \frac{\sum_\alpha \alpha(y_{l_\alpha}+y_{r_\alpha})}{2\sum_\alpha \alpha} = \sum_\alpha \alpha(y_{l_\alpha} + y_{r_\alpha})\Big/_{K+1}, \quad \alpha = \{0.\frac{1}{K},\ldots,\frac{K-1}{K},1\} \qquad (۴)$$

خوانندگان مقاله که مشتاق به کسب اطلاعات بیشتر درباره چگونگی فرمول بندی کنترل منطق فازی نوع-دوم عمومی هستند می توانند به [۵، ۸] رجوع کنند.

۳-۴- طراحی کنترل کننده تناسبی- انتگرالگیر – مشتق گیر (PID)منطق فازی نوع-دوم عمومی مرتبه کسری

در این مرحله، با استفاده از مزایای هر یک از کنترل کننده های فازی، مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر-تناسبی و مرتبه کسری و ترکیب این کنترل کننده ها با یکدیگر، یک روش کنترلی جدید طراحی خواهد شد.



شکل (۵): کنترل کننده پیشنهادی

در این مقاله، ورودی های کنترل کننده منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FLC) توسط K_d و مرتبه متغیرهای غیر صحیح توسط K_e نشان داده شده است. علاوه بر این خروجی های کنترل کننده مدل-آزاد جدید پیشنهاد شده توسط K_{PI} و K_{PD} که دارای توان های غیر صحیح هستند نشان داده شده اند. در [۱۸]، برتری کنترل کننده های غیر صحیح در مقایسه با دیگر کنترل کننده های صحیح مانند کنترل مدل پیش بین (MPC) و کنترل کننده های تناسبی – انتگرالگیر-مشتق گیر (PID) متعارف به طور خلاصه بیان شده است. در مقایسه با کنترل‌کننده های معمولی تناسبی-انتگرالگیر-مشتق گیر فازی ، کنترل کننده پیشنهادی دارای توان های انتگرالگیر (μ) و مشتق گیر (δ) غیر صحیح است. معماری جدید کنترل کننده تناسبی- انتگرالگیر – مشتق گیر منطق فازی نوع-دوم عمومی مرتبه کسری (FOGT2FPID) در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، سیگنال کنترل می تواند به صورت زیر بیان شود :

$$U_{FOFPID} = U_1 + U_2 \qquad (۵)$$

در این پژوهش، مجموعه قواعد فازی در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این جدول، متغیرهای فازی که شبیه به متغیرهای ورودی و خروجی هستند با عنوان منفی کوچک (NS) ، منفی متوسط (NM)، منفی بزرگ (NL) ، صفر (ZR) ، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM) و مثبت بزرگ (PL) طبقه بندی شده اند.

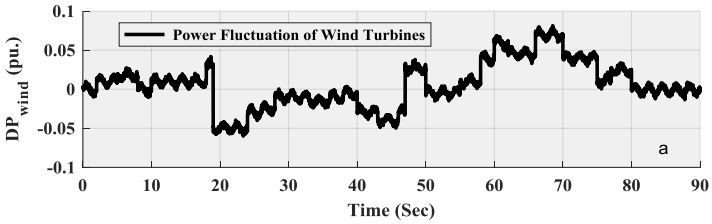
جدول ۲: قوانین فازی روش پیشنهادی

$\dot{e}$ \ e	NL	NM	NS	PS	PM	PL
S	NL	NM	NS	PS	PS	PM
M	NL	NL	NM	PS	PM	PM
L	NL	NL	NL	PM	PM	PM

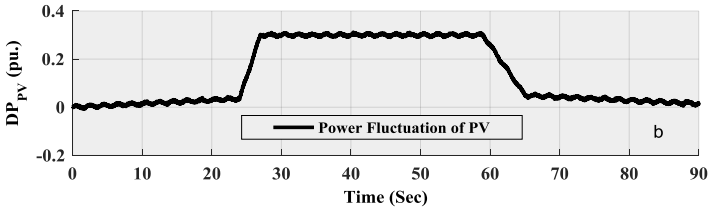
۵- بررسی نتایج و شبیه سازی ها

در این بخش از مقاله، عملکرد روش پیشنهادی را با استفاده از چندین شبیه سازی مورد ارزیابی قرار خواهیم داد. شایان به ذکر است که برای هر چه بیشتر به چالش کشیدن روش پیشنهادی و همچنین عملی بودن کنترل کننده فازی مرتبه کسری، از دیتاهای واقعی برای ورودی توربین بادی و سلول خورشیدی در ریزشبکه استفاده شده است. در گام اول از شبیه سازی ها، مدل ریزشبکه جزیره ای که در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است در فضای نرم افزار متلب/سیمولینک پیاده سازی شده است. مقادیر سیستم مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۶ و ۷ به ترتیب خروجی تغییرات توان توربین بادی و سلول خورشیدی را در ریزشبکه نشان می دهند.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

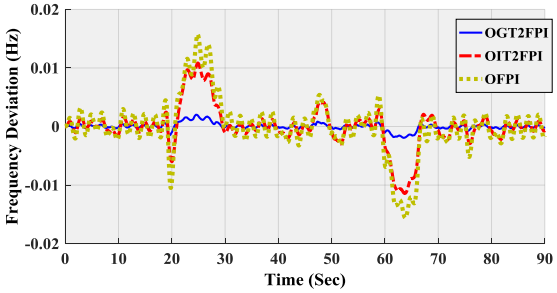


شکل (۶): خروجی توان توربین بادی



شکل (۷): خروجی توان سلول خورشیدی

در شکل ۸، تغییرات فرکانس ریزشبکه به تصویر کشیده شده است.



شکل (۸): تغییرات خروجی فرکانس ریزشبکه

همانطور که مشاهده می شود، روش پیشنهادی در این مقاله قادر است که نوسانات فرکانسی را در ریزشبکه مورد مطالعه در حضور انرژی های تجدیدپذیر، به خوبی و با کمترین بالازدگی کنترل نماید.

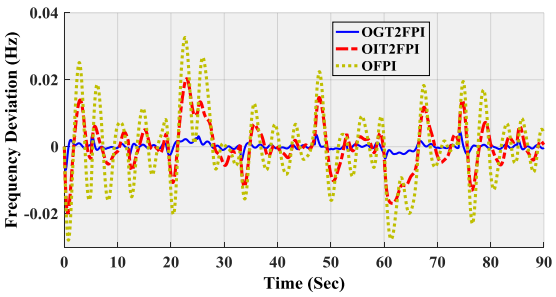
- **حالت دوم**

در این مرحله، برای بررسی عملکرد روش کنترلی پیشنهاد شده، عدم قطعیت هایی مطابق با جدول ۳ به سیستم تحت مطالعه اعمال شده است.

جدول ۳: عدم قطعیت های پیشنهادی برای تست شبکه

Parameters	Variation Range
	Scenario 1
R	+15%
D	-25%
H	+30%
T_e	-25%
T_g	+30%
T_{FESS}	-20%
T_{BESS}	+30%

شکل ۹ عملکرد روش پیشنهادی در مقابل عدم قطعیت های پارامتری را نشان می دهد.



شکل (۹): تغییرات خروجی فرکانس ریزشبکه در حالت دوم

همانطور که به وضوح از شکل ۹ قابل رویت است، کنترل کننده هوشمند مرتبه کسری توانسته است که در مقایسه با روش های کنترل مد پیش بین و همچنین کنترل کننده تناسبی-انتگرالگیر کسری مرتبه ای عملکرد فوق العاده چشمگیری در مقابله با عدم قطعیت های پارامتری از خود نشان دهد. باید به این نکته اشاره کرد که روش پیشنهادی در این مقاله توانسته است که تغییرات و نوسانات فرکانسی را به بهترین نحو ممکن کنترل کرده تا از آسیب و خسارات جبران ناپذیر در ریزشبکه جلوگیری نماید.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش، تلاش شد که یک کنترل کننده هوشمند مقاوم مبتنی بر سیستم های فازی، کنترل کننده های کلاسیک و محاسبات مرتبه کسری ارائه شود. سپس روش پیشنهادی در این مقاله بر روی یک ریزشبکه جزیره ای با انواع منابع انرژی تجدید پذیر و منابع ذخیره کننده انرژی مورد تست و ارزیابی قرار داده شد. در بخش شبیه سازی و بررسی نتایج، با معرفی سناریوهای مختلف، سعی شد که عملکرد روش پیشنهادی مورد چالش و بررسی موشکافانه قرار داده شود. در پایان نشان داده شد که روش پیشنهادی قادر است برای کلاسی از سیستم هایی که در آن‌ها معادلات ریاضی برای طراحی کنترل کننده در دسترس نیست طراحی شود .

مراجع

[1] Pahasa J, Ngamroo I. Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid. IEEE Systems Journal. 2016 Mar;10(1):97-105.

[2] Khalghani MR, Khooban MH, Mahboubi-Moghaddam E, Vafamand N, Goodarzi M. A self-tuning load frequency control strategy for microgrids: Human brain emotional learning. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016 Feb 29;75:311-9.

[3] Wang C, Mi Y, Fu Y, Wang P. Frequency control of an isolated micro-grid using double sliding mode controllers and disturbance observer. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016 May 24.

[4] Khooban MH, Niknam T, Blaabjerg F, Dragičević T. A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles. Electric Power Systems Research. 2017 Feb 28;143:585-98.

[5] Modirkhazeni A, Almasi ON, Khooban MH. Improved frequency dynamic in isolated hybrid power system using

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[13] Vrabie D, Pastravanu O, Abu-Khalaf M, Lewis FL. Adaptive optimal control for continuous-time linear systems based on policy iteration. Automatica. 2009 Feb 28;45(2):477-84.

[14] Singh VP, Mohanty SR, Kishor N, Ray PK. Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system. International journal of electrical power & energy systems. 2013 Mar 31;46:294-305.

[15] Shayeghi H, Shayanfar HA. Application of ANN technique based on μ-synthesis to load frequency control of interconnected power system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2006 Sep 30;28(7):503-11.

[16] Daneshfar F, Bevrani H. Load–frequency control: a GA-based multi-agent reinforcement learning. IET generation, transmission & distribution. 2010 Jan 1;4(1):13-26.

[17] Pan I, Das S. Kriging based surrogate modeling for fractional order control of microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid. 2015 Jan;6(1):36-44.

[18] Khooban MH, Sha-Sadeghi M, Niknam T, Blaabjerg F. Analysis, Control and Design of Speed Control of Electric Vehicles Delayed Model: Multi-Objective Fuzzy Fractional-Order PIλDμ Controller. IET Science, Measurement & Technology. 2016 Nov 18.

[19] Khooban MH, Niknam T, Blaabjerg F, Dehghani M. Free chattering hybrid sliding mode control for a class of non-linear systems: electric vehicles as a case study. IET Science, Measurement & Technology. 2016 Oct 1;10(7):776-85.

an intelligent method. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016 Jun 30;78:225-38.

[6] Jiayi H, Chuanwen J, Rong X. A review on distributed energy resources and MicroGrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008 Dec 31;12(9):2472-83.

[7] Bevrani H. Robust power system frequency control. New York: Springer; 2009 Jan 1.

[8] Olivares DE, Mehrizi-Sani A, Etemadi AH, Canizares CA, Iravani R, Kazerani M, Hajimiragha AH, Gomis-Bellmunt O, Saeedifard M, Palma-Behnke R, Jimenez-Estevez GA. Trends in microgrid control. IEEE Transactions on smart grid. 2014 Jul;5(4):1905-19.

[9] Khooban MH, Niknam T. A new intelligent online fuzzy tuning approach for multi-area load frequency control: Self Adaptive Modified Bat Algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015 Oct 31;71:254-61.

[10] Zribi M, Al-Rashed M, Alrifai M. Adaptive decentralized load frequency control of multi-area power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2005 Oct 31;27(8):575-83.

[11] Vasant P, editor. Innovation in Power, Control, and Optimization: Emerging Energy Technologies: Emerging Energy Technologies. IGI Global; 2011 Sep 30.

[12] Bevrani H, Feizi MR, Ataee S. Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: ${H} _ {\ infty} $ and $\ mu $-Synthesis Approaches. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016 Mar;7(2):706-17.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Load Frequency Control of Microgrids Using Fuzzy Type-2 Order Fractional Controller

Mehdi Sokhandani[1*], Mohammad Hassan Khoban[2]

1- Department of Electrical Engineering, Bahonar University of Shiraz, Shiraz, Iran, m.sokhandani@yahoo.com
2- Department of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, khooban@sutech.ac.ir

Abstract: Restructuring in the electricity industry, global warming and environmental concerns about power plant pollution, energy price fluctuations have fueled the emergence of renewable energy in the electricity industry. In the last three decades, scattered energy sources, which are both economically and economically more suitable for the production of pollutants, have been used to supply energy needed by industry and domestic consumption. Along with scattered power generation resources, a new concept has emerged in power grids called microgrids. One of the most important challenges in island micro-networks is to balance power generation and power consumption and thereby to maintain frequency stability when disturbances occur. Therefore, this paper presents a novel control method for secondary frequency-charge control of micro-grids. The control method proposed in this study is based on type-II fuzzy controllers and fractional-order controllers. The advantages of the proposed method can be 1) resilience to uncertainties, 2) high accuracy and performance in stabilizing the island microcontroller. Finally, several simulations and comparisons have been performed to better evaluate the performance of the proposed controller. Also, using the OPAL-RT hardware system, all the results of the simulation are compared with the practical results and their optimal match is shown.

Keywords: Frequency-Load Control (LFC), Multi-zone Microgrids, Fuzzy Control, Fractional Order Control, Type-II Fuzzy.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.2.2.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 2- Summer 2019 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]