

## کنترل فرکانس-بار ریزش شبکه ها با استفاده از کنترل کننده فازی نوع-۲ مرتبه کسری

مهدی سخندانی<sup>۱</sup>، محمدحسن خوبان<sup>۲\*</sup>

\*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 ریزش شبکه معرفی شده است. یکی از مهمترین چالش های موجود در ریزش شبکه 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 ریزش شبکه 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 ریزش شبکه 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.

**واژه های کلیدی:** کنترل فرکانس-بار (LFC)، ریزش شبکه های چند ناحیه ای، کنترل فازی، کنترل مرتبه کسری، فازی نوع - دوم.

### ۱- مقدمه

آنها وابسته به ظرفیت توان سیستمی است که در آنجا قرار داده می شود. 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]. سیستم های قدرتی که از منابع تولید توان الکتریکی مختلف استفاده می کنند، با عنوان سیستم های قدرت هیبرید شناخته می شوند. این سیستم ها از ترکیب اجزای مختلفی مانند سیستم تولید، سیستم ذخیره، سیستم کنترل و مدیریت توان و غیره تشکیل می گردند. طراحی اجزای سیستم های قدرت کوچک با قابلیت اتصال و انفعال از

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

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 می‌توان 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 کنترل کننده PI را برای مقابله با عدم قطعیت‌های پارامتری سیستم ارائه شده است. در روش پیشنهاد شده، کنترل کننده PI به عنوان قلب تپنده سیستم LFC فرض شده و یک کنترل کننده فازی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده 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 کنترل کننده 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 کنترل کننده‌های تطبیقی حاصل می‌شود، روش‌های تطبیقی روش‌های 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 نقطه کار سیستم می‌باشد. به دلایل فوق، یک کنترل کننده 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 فراوانی صورت گرفته شده است تا مشکل نامعینی و عدم قطعیت در کنترل کننده 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

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 شبکه‌ها، شبکه‌هایی با ولتاژ پایین می‌باشند که منابع کوچک تولید پراکنده و دستگاه‌های ذخیره ساز انرژی از طریق فیدر به بارها متصل شده‌اند. آنها می‌توانند 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 می‌تواند ظرفیت بار حداکثر ۱۰ MVA عرضه کند [۴].

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

تاکنون روش‌های کنترلی متنوعی برای کنترل فرکانس-بار سیستم و شبکه‌های قدرت مطرح شده است. بطور کلی، مهمترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت و ریزشبکه‌ها را می‌توان 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 کنترل کننده‌ها 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 می‌توان در [۸] جست و جو کرد. طراحی این چنین کنترل کننده‌هایی نیازمند داشتن تمامی متغیرهای سیستم می‌باشد. در صورتی که تمام متغیرهای حالت سیستم از طریق اندازه‌گیری‌های سیستم رویت پذیر باشند، طراحی این چنین کنترل کننده‌هایی امکان پذیر می‌باشد. مضاف براین، پیاده‌سازی و اجرای چنین کنترل کننده‌ای حتی در صورتی که شرایط رویت پذیری 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

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

در [۱۲] یک کنترل کننده مقاوم بر پایه 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 می باشد که با استفاده از تکنیک کنترل مقاوم بر تغییرات و نامعینی های کوچک غلبه شود و با استفاده از روش کنترل تطبیقی بتوان بر عدم قطعیت های بزرگ فائق آمد. در [۱۴] یک کنترل کننده مقاوم مبتنی بر  $H_{\infty}$  و در نظر گرفتن نامعینی های پارامتری پیشنهاد شده است. تحلیل های انجام گرفته شده مبتنی بر  $\mu$  نشان می دهد که کنترل کننده فوق عملکرد مناسبی در مواجهه با عدم قطعیت های ساختاری سیستم ارائه می دهد [۱۱].

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

طراحی یک کنترل کننده مقاوم مبتنی بر روش پارامتره کردن Q برای کنترل فرکانس در [۱۶] مطرح شده است. این روش مزیت های متعددی می تواند داشته باشد. از جمله این مزیت ها می توان به یک کنترل کننده همیشه پایدار اشاره کرد. قطب های حلقه بسته می تواند در نواحی مشخصی قرار گیرد تا پاسخ گذرا بهبود یابد. ضمن اینکه مرتبه کنترل کننده مزبور از مرتبه کنترل کننده های مشابه که با روش های  $H_2$  و  $H_{\infty}$  طراحی شده اند، کمتر می باشد [۱۱].

روش های کنترل مقاومی که مورد بحث و بررسی قرار گرفتند، همگی پاسخ های دینامیکی خوبی را از خود نشان می دهند. اما مشکل عمده اکثر این روش ها نیاز به دسترسی به تمام متغیرهای حالت موجود در سیستم می باشد. در نتیجه، این روش و تکنیک ها بدلیل مشکلات ناشی از دسترسی به تمام متغیر حالت های سیستم برای کاربرد عملی چندان واقع بینانه بنظر نمی رسد. از سوی دیگر، از آنجایی که برخی از این روش ها از یک ساختار متمرکز استفاده می کنند، مرتبه کنترل کننده منتهی بسیار بالاست که برای سیستم ها قدرت نامناسب می باشد. در طراحی کنترل کننده های غیرمتمرکز برای سیستم های قدرت بایستی توجه داشت که اهداف هر کنترل کننده غیرمتمرکز بایستی هم راستا با اهداف کل سیستم بوده و با آن ها تطابق داشته باشد. مهم ترین ویژگی کنترل غیرمتمرکز، کاهش مرتبه و پیچیدگی کنترل کننده آن به همراه تضمین پایداری برای کاربردهای عملی می باشد. برای نمونه، مرجع [۲] یک روش کنترل مقاوم غیرمتمرکز برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PI در سیستم قدرت را پیشنهاد داده است. روش کنترلی مزبور یک روش LMI مبتنی بر  $H_2/H_{\infty}$  می باشد که برای غلبه بر مشکلات ناشی از تاخیر در حلقه

کنترل فرکانس-بار طراحی شده است. طبق بررسی های صورت پذیرفته شده، تاخیر در حلقه کنترلی LFC می تواند 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 مدل های کاهش مرتبه یافته مدل سازی می شوند. مدل های بدست آمده، بعضاً خطی بوده و به شدت وابسته به مشخصات و نقطه کار می باشند. مدل های خطی با تغییر نقطه کار سیستم کارایی خود را تا حدودی از دست می دهند. در واقع شاید لازم باشد که یک مدل خطی شده جدید تعریف شود یا اینکه کنترل کننده مربوطه خود را با شرایط تطبیق دهد. به علت پیچیدگی و ماهیت چند متغیره بودن سیستم های قدرت، ساختارهای LFC انعطاف ناپذیر و روش های کلاسیک لزوماً راه حل های مناسبی را پیشنهاد نمی دهند. بنابراین برای بهبود عملکرد چنین سیستم هایی بایستی روش های انعطاف پذیری ارائه شود. در سال ها اخیر، با پیشرفت روش های هوش مصنوعی مانند شبکه های عصبی، منطق فازی و الگوریتم های تکاملی درجه جدیدی برای غلبه بر مشکلات فوق ایجاد شده است. بر این اساس تکنیک های هوشمند با قابلیت های بشری هم چون درک، منطق و یادگیری ممکن است بتوانند بر مشکلات فوق غلبه کنند. اساس بیشتر این تکنیک ها بدین گونه است که نیازی به مدل ریاضی یا سیگنال کوچک سیستم برای کنترل آن ندارند، در نتیجه در بسیاری از موارد می توانند به مشکلاتی که پیش تر ذکر شد بهتر از تئوری های کنترل کلاسیک، مقاوم و تطبیقی فائق آیند [۷].

مراجع بسیاری به کاربرد شبکه های عصبی در کنترل فرکانس-بار ریزشبه ها پرداخته اند. مرجع [۱۶] یک شبکه خطی چندلایه که با استفاده از روش انتشار معکوس خطا آموزش می بیند را برای کنترل فرکانس-بار پیشنهاد داده است. کنترل کننده پیشنهادی مبتنی بر ANN در مقایسه با کنترل کننده های PI طراحی شده به روش کلاسیک در سیستم های LFC عملکرد خوبی از خود نشان داده است. در بعضی از مراجع دیگر، ترکیبی از روش های هوش مصنوعی و کنترل مقاوم به منظور استفاده در LFC مطرح شده است. به عنوان مثال می توان 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 ریزشبه 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 ریزشبه می باشد. همچنین سعی شده است که در قسمت بررسی و آنالیز نتایج، از دیتاهای واقعی برای تست کنترل کننده پیشنهادی در ریزشبه استفاده شود. در پایان با انجام شبیه سازی های متنوع و همچنین

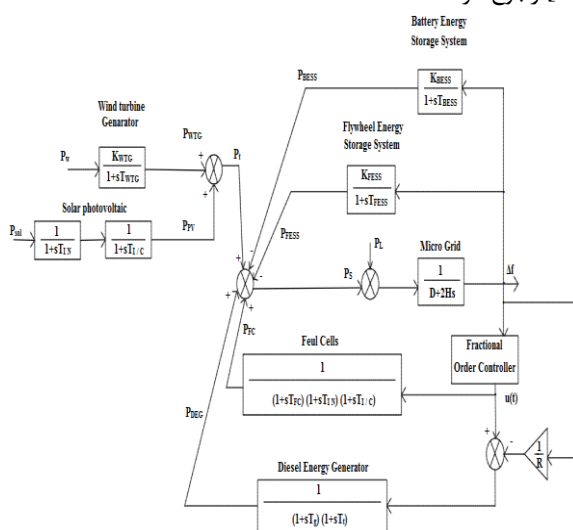
را احساس می کند، کنترل اولیه است که روی ژنراتورهای سنکرون تعبیه شده است. این حلقه کنترلی بر اساس مشخصه توان حقیقی-فرکانس ( $P/f$ ) ژنراتور که در معادله (۱) نشان داده شده است عمل می کند [۷].

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

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 می کند. این افت توسط حلقه کنترلی اولیه محدود می شود. اگر این حلقه وجود نداشته باشد، این افت، به آفتی ماندگار تبدیل شده و در نهایت حتی می تواند به خروج واحدهای تولیدی منجر شود.

## ۲-۲- کنترل ثانویه

در این مقاله، هدف از طراحی کنترل کننده برای کنترل فرکانس-بار ریزش شبکه 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 می شود. 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 می شود. همانطور که پیشتر گفته شد، هدف اصلی این مقاله، طراحی یک کنترل کننده هوشمند نوین برای کنترل فرکانس-بار ثانویه در ریزش شبکه ها می باشد. برای اطلاعات بیشتر در مورد کنترل فرکانس-بار ثانویه در ریزش شبکه ها می توان به [۲، ۷، ۹] رجوع کرد.



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

## ۳- سیستم آزمون

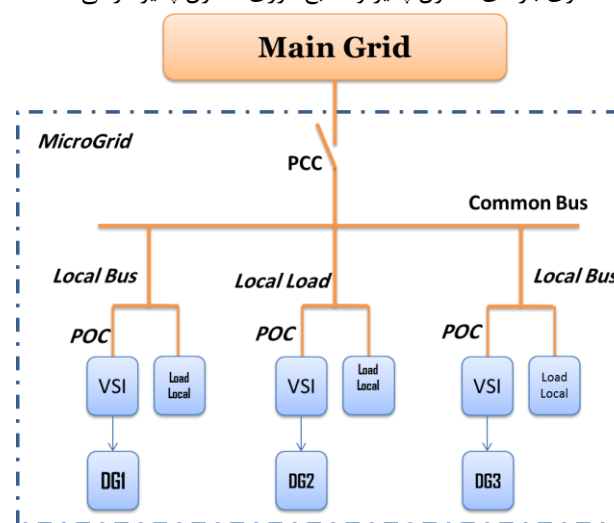
برای آزمون روش کنترلی پیشنهادی، یک ریز شبکه جزیره ای که مدل فرکانسی آن که در شکل ۲ نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است. جزئیات این ریز شبکه در مرجع [۱۷] به صورت کامل ارائه شده است.

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 می شود. 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 می شوند [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 ریز شبکه

این مقاله بر روی تنظیم هوشمندانه فرکانس توسط کنترل کننده های هوشمند تمرکز دارد. از آن 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 برهم 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

$$\alpha D_t^r f_x(t) = \frac{1}{\Gamma(m-r)} \int_a^t \frac{D^m f_x(t)}{(t-\tau)^{r+1-m}} d\tau, \quad r \in \mathbb{R}^+, \quad m \in \mathbb{Z}^+ \text{ and } m-1 \leq r < m \quad (1)$$

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.

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

کاملاً 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 ریزشبهه (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) کاملاً 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].

معمولاً 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 تواند شبیه به کنترل کننده های منطق فازی نوع-دوم بازه ای (IT2FL) باشند. از این رو و با توجه به مطالب بالا می توان نوشت:

$$\tilde{A} = \{((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x)) | \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad (2)$$

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  $[0, 1]$  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].

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 می شود. 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)،  $\Delta P_L, P_s, P_w$ ،  $\Phi_{PV}$  و  $\Delta F$  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.

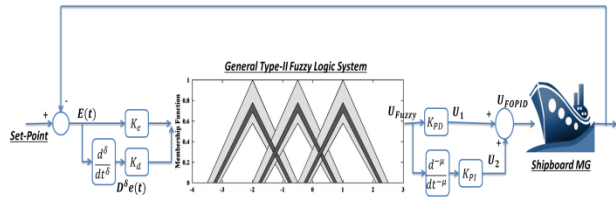
جدول ۱: مقادیر پارامترهای ریزشبهه

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 کنترل مبتنی بر محاسبات دیفرانسیل و انتگرال غیر صحیح بکار گرفته می شود که در آن  $r \in \mathbb{R}$  است و همچنین  $t$  و  $r$  به ترتیب محدوده بالا و پایین معرفی شده اند. باید توجه داشت که  $\Gamma$  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:



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 کنترل کننده های معمولی تناسبی-انتگرالگیر-مشتق گیر فازی، کنترل کننده پیشنهادی دارای توان های انتگرالگیر ( $\mu$ ) و مشتق گیر ( $\delta$ ) 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:

$$U_{FOPID} = U_1 + U_2 \quad (5)$$

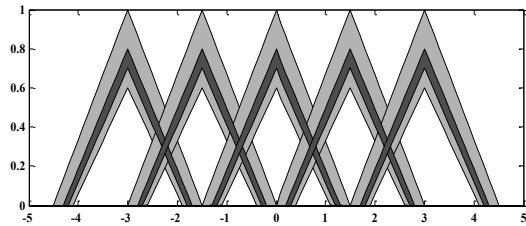
در این پژوهش، مجموعه قواعد فازی در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این جدول، متغیرهای فازی که شبیه به متغیرهای ورودی و خروجی هستند با عنوان منفی کوچک (NS)، مثبت کوچک (PS)، منفی بزرگ (NL)، منفی بزرگ (NL)، صفر (ZR)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM) و مثبت بزرگ (PL) طبقه بندی شده اند.

جدول ۲: قوانین فازی روش پیشنهادی

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

### ۵- بررسی نتایج و شبیه سازی ها

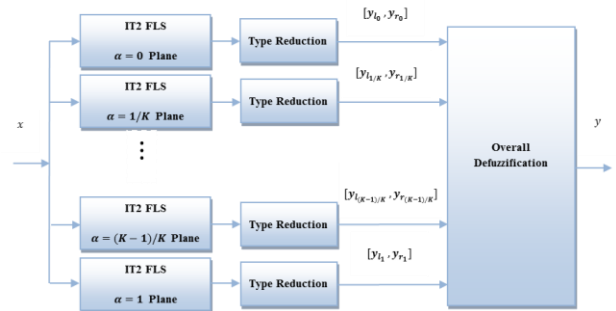
در این بخش از مقاله، عملکرد روش پیشنهادی را با استفاده از چندین شبیه سازی مورد ارزیابی قرار خواهیم داد. شایان به ذکر است که برای هر چه بیشتر به چالش کشیدن روش پیشنهادی و همچنین عملی بودن کنترل کننده فازی مرتبه کسری، از دیتاهای واقعی برای ورودی توربین بادی و سلول خورشیدی در ریزشبه استفاده شده است. در گام اول از شبیه سازی ها، مدل ریزشبهک 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 ریزشبهک نشان می دهند.



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

در [۵]، روشی به نام  $\alpha$ -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  $\alpha$  می باشد ( $\alpha = \{0, 1/k, \dots, (k-1)/k, 1\}$ ).

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

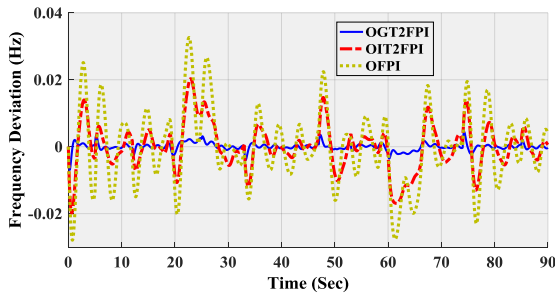
از این رو، خروجی سیستم کنترل کننده منطق فازی نوع-دوم عمومی (GT2FL) بر اساس تئوری نمایش صفحه-آلفا می تواند به صورت زیر بیان شود [۵].

$$U_{Fuzzy} = y = \frac{\sum_{\alpha} \alpha (y_{l\alpha} + y_{r\alpha})}{2 \sum_{\alpha} \alpha} = \frac{\sum_{\alpha} \alpha (y_{l\alpha} + y_{r\alpha})}{K + 1}, \quad \alpha = \{0, \frac{1}{K}, \dots, \frac{K-1}{K}, 1\} \quad (4)$$

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

### ۴-۳- 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، مشتق گیر-انتگرالگیر-تناسبی و مرتبه کسری و ترکیب این کنترل کننده ها با یکدیگر، یک روش کنترلی جدید طراحی خواهد شد.



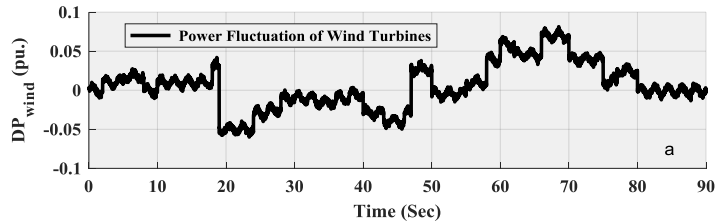
شکل (۹): تغییرات خروجی فرکانس ریزشکه در حالت دوم همانطور که به وضوح از شکل ۹ قابل رویت است، کنترل کننده هوشمند مرتبه کسری توانسته است که در مقایسه با روش های کنترل مد پیش بین و همچنین کنترل کننده تناسبی-انتگرالگیر کسری مرتبه ای عملکرد فوق العاده چشمگیری در مقابله با عدم قطعیت های پارامتری از خود نشان 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 ریزشکه جلوگیری نماید.

## ۶- نتیجه گیری و جمع بندی

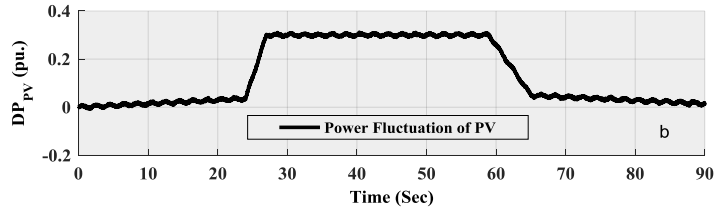
در این پژوهش، تلاش شد که یک کنترل کننده هوشمند مقاوم مبتنی بر سیستم های فازی، کنترل کننده های کلاسیک و محاسبات مرتبه کسری ارائه شود. سپس روش پیشنهادی در این مقاله بر روی یک ریزشکه جزیره ای با انواع منابع انرژی تجدید پذیر و منابع ذخیره کننده انرژی مورد تست و ارزیابی قرار داده شد. در بخش شبیه سازی و بررسی 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 آن ها 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

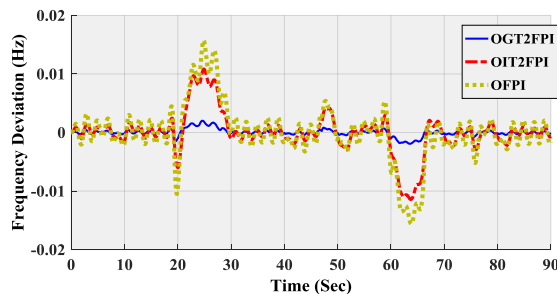


شکل (۶): خروجی توان توربین بادی



شکل (۷): خروجی توان سلول خورشیدی

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



شکل (۸): تغییرات خروجی فرکانس ریزشکه

همانطور که مشاهده می شود، روش پیشنهادی در این مقاله قادر است که نوسانات فرکانسی را در ریزشکه 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
<b>R</b>	+15%
<b>D</b>	-25%
<b>H</b>	+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.

- [13] Vrable 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  $\mu$ -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  $PI\lambda D\mu$  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-Estevéz 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, Atae 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.

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

Mehdi Sokhandani<sup>1\*</sup>, Mohammad Hassan Khoban<sup>2</sup>

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.