

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۶

تنظیم تطبیقی رله حذف بار زیرفرکانسی با استفاده از برنامه‌ریزی ساعتی با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه هوشمند

علی رفیع‌نیا^۱، نوید رضایی^{۲*}، جمال مشتاق^۳

^۱ دانش‌آموخته دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

a.rafania@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

n.rezaei@uok.ac.ir

^۳ استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

j.moshtagh@uok.ac.ir

چکیده: در پرتو پیدایش شبکه هوشمند، عملکردهای مرتبط با این شبکه در بلوک‌های سیستم مدیریت انرژی، نیازمند اتخاذ استراتژی‌های مقاوم‌اند تا سطح بالاتری از کنترل و خدمات محافظتی را ارائه دهند. طرح‌های حذف بار زیرفرکانسی (UFLS)، بلوک‌های بار را هنگامی که افت فرکانس زیر محدوده آستانه قرار می‌گیرد، جدا می‌کند. در طرح‌های UFLS تطبیقی در یک بستر مخابراتی پیشرفته، کمیت‌های اصلی سیستم در هر لحظه و در زمان واقعی اندازه‌گیری می‌شوند و متناسب با میزان انحراف فرکانس، مقدار بهینه‌ای از بار حذف می‌گردد. در این مقاله، یک چهارچوب ساعتی توسط برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح (MILP) برای طراحی بهینه یک سیستم UFLS تطبیقی پیشنهاد شده است. هدف از این کار، ارائه یک UFLS تطبیقی منظم‌تر است که به مقدار کمتری به سعی و خطا وابسته باشد. در اینجا، رله زیرفرکانسی برای هر ساعت از یک شبانه‌روز و با توجه به شرایط بهره‌برداری و عدم قطعیت‌های ناشی از پیشامد، منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) و نوسانات بار در آن ساعت تنظیم می‌شود. شبیه‌سازی‌ها بر روی سیستم تست ۳۹ شینه IEEE، در یک افق زمانی ۲۴ ساعته اجرا شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: شبکه هوشمند، حذف بار زیرفرکانسی تطبیقی، منابع انرژی تجدیدپذیر، نوسانات بار.

۱. مقدمه

امروزه شبکه‌های هوشمند به‌عنوان یک جایگزین قابل اعتماد برای سیستم‌های قدرت سنتی به‌منظور تأمین نیازهای رو به رشد آینده از قبیل انعطاف پذیری، در دسترس بودن، پایدارپذیری، امنیت و کیفیت توان در یک چهارچوب اقتصادی‌تر و زیست‌محیطی‌تر قرار می‌گیرند. شبکه‌های هوشمند از فناوری‌های پیشرفته اندازه‌گیری، ارتباطی، حفاظتی و کنترلی برای بخش‌های تولید، انتقال، توزیع و مصرف استفاده می‌کنند [۱ و ۲].

حذف بار زیرفرکانسی (UFLS^۱) در بلوک مدیریت انرژی در قالب طرح‌های حفاظت ویژه (SPS^۲) طبقه‌بندی می‌شود. UFLS به‌گونه‌ای طراحی شده است که به‌طور بهینه بار بیش از حد سیستم را مطابق با نامتعادلی توان اکتیو حذف کند و سیستم قدرت را از خطر فروپاشی احتمالی فرکانس محافظت نماید. استراتژی‌های متداول برای تنظیم تنظیمات UFLS از یک ضعف بزرگ رنج می‌برند، بدین صورت که دارای تطبیق‌پذیری کمی در برابر وقوع تغییرات در مشخصات بهره‌برداری سیستم قدرت اند [۳ و ۴]. مفهوم پایدارپذیری در طرح‌های UFLS این است که در هر افق زمانی بهره‌برداری، میزان حذف بار به نسبت نامتعادلی توان محاسبه می‌شود [۵]. در شبکه‌های هوشمند امروزی، زیرساخت‌های پیشرفته اندازه‌گیری AMI^۳ به پیشرفت اهداف پروژه‌های UFLS تطبیقی کمک کرده است. طرح‌های UFLS تطبیقی به‌طور مداوم کمیت‌های اصلی سیستم قدرت از قبیل فرکانس، نرخ تغییر فرکانس (ROCOF^۴)، ولتاژ، توان اکتیو و... را اندازه‌گیری کرده و مطابق با شرایط سیستم قدرت پس از وقوع اختلال در فرکانس، عمل می‌کنند [۶ و ۷]. در این روش‌ها، حداقل بار بسته به شرایط واقعی سیستم قدرت حذف می‌شود. این طرح‌ها برای ارسال سیگنال‌های حذف بار به رله‌های زیرفرکانسی به‌منظور حذف بیش از حد بار با حداکثر سرعت، به تجهیزات ارتباطی سریع متکی هستند. بنابراین، طرح‌های UFLS تطبیقی از عملکرد مناسبی برای هر دو شرایط پیشامد^۵ ضعیف و شدید برخوردارند [۸].

امروزه با افزایش تقاضای برق در شبکه هوشمند و همچنین اثرات مخرب زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، تمایل صنعت برق برای استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی (RES^۶) در سراسر جهان

افزایش یافته است. با توجه به عدم قطعیت‌های ناشی از توان خروجی متناوب این منابع، قابلیت اطمینان و امنیت سیستم و همچنین کیفیت منبع برق به خطر می‌افتد [۹ و ۱۰]. با توجه به نیاز شبکه هوشمند، این منابع جایگزین برخی از واحدهای تولیدی متداول شده‌اند؛ بنابراین ثابت اینرسی معادل و ذخیره‌توان اکتیو کاهش می‌یابد و کنترل فرکانس به چالش کشیده می‌شود. با اجرای حذف بار، تعادل بین تولید و مصرف افزایش می‌یابد و فرکانس به‌سرعت بازیابی می‌شود. استفاده از تجهیزات پیشرفته برای کنترل و مانیتورینگ توان خروجی RES و همچنین نوسانات بار^۷ به‌منظور بهبود پاسخ فرکانس سیستم بسیار حیاتی است. بنابراین در تنظیم پارامترهای رله زیرفرکانسی، باید اثر RES و نوسانات بار در نظر گرفته شود [۱۱]. در ادامه، مروری بر کارهای قبلی ارائه شده است.

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی استراتژی‌های UFLS تطبیقی و متداول در شبکه هوشمند انجام شده است. هدف اصلی این مطالعات بهینه‌سازی تابع هدف به‌منظور به حداقل رساندن مقدار کل بار حذف شده با توجه به محدودیت‌های مختلف سیستم است. هی و همکاران [۱۲] یک روش UFLS غیرمتمرکز تطبیقی را بر اساس اطلاعات بار توسعه داده‌اند. در این کار، یک استراتژی محاسبه با استفاده از اطلاعات بار پس از اغتشاش برای شناسایی اینرسی مجازی معادل بار در زمان واقعی ارائه شده است. سپس با تخمین مقدار حذف بار، طرح UFLS بهینه تطبیقی به دست آمده است. در [۱۳] روش UFLS نیمه‌تطبیقی چندمرحله‌ای با استفاده از ROCOF پیاده‌سازی شده است. این طرح، آخرین مرحله از پیش تعیین شده را به‌عنوان مرحله اولیه با در نظر گرفتن شدیدترین پیشامد فعال می‌کند. بر این اساس، سناریوهای جزیره‌ای و تولیدی به‌عنوان محتمل‌ترین سناریوهای نامتعادلی توان در برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP^۸) برای تنظیم رله زیرفرکانسی در نظر گرفته شده‌اند. شکاری و همکاران [۱۴] از یک طرح UFLS تطبیقی متمرکز برای به دست آوردن بار مطلوب در سه مرحله استفاده کرده‌اند: در مرحله اول، الزامات اجرای این طرح ارائه شده است؛ در مرحله دوم، با در نظر گرفتن معیارهای پایداری و ولتاژ، محدودیت‌های بهره‌برداری و هزینه، استراتژی، اندازه و محل مورد نظر بار برای حذف بار مشخص شده است؛ در مرحله سوم، برنامه حذف بار حداقل در خصوص نوع رویداد در زمان واقعی انجام شده است. عتیقه‌چی و همکاران [۱۵] یک روش UFLS سریع را

1. Under-Frequency Load Shedding
2. Special Protection Schemes
3. Advanced Metering Infrastructure
4. Rate of Change of Frequency
5. Contingency
6. Renewable Energy Sources

7. Load Fluctuations

8. Mixed-Integer Linear Programming

که با توجه به کارهای قبلی و دانش ما، هیچ روش جامعی برای تنظیم تطبیقی پارامترهای رله زیرفرکانسی وجود ندارد که بتواند تمامی عدم قطعیت ها و شرایط سیستم را در نظر بگیرد. بنابراین، هدف این مقاله تنظیم پارامترهای رله زیرفرکانسی با در نظر گرفتن تمام شرایط سیستم در طول یک افق زمانی ۲۴ ساعته در یک شبکه هوشمند پیشرفته است.

از آنجا که شبکه‌های هوشمند تغییرات چشمگیری به سبب ازدیاد منابع انرژی تجدیدپذیر و احداث بازارهای برق یافته‌اند، هرکدام از این‌ها، منابع جدیدی از عدم قطعیت را معرفی می‌کنند که سبب انحراف نقاط کار عملی سیستم قدرت از مقادیر متداول می‌شوند. این امر نیازمند این است که کمیت‌های سیستم با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری پیشرفته و همچنین مخابرات سریع و قدرتمند در مکانی مشخص به صورت ساعتی در یک افق زمانی ۲۴ ساعته در یک شبانه‌روز برای اطمینان از امنیت سیستم قدرت اخذ گردند تا در تنظیم تطبیقی رله‌های زیرفرکانسی که محرک و انگیزه‌ای برای کار ارائه شده در این مقاله است در نظر گرفته شوند.

در اینجا یک روش تطبیقی منظم و استاندارد در خصوص تنظیم رله‌های زیرفرکانسی پیشنهاد شده است. لذا این مقاله توسعه یک حذف بار زیرفرکانسی تطبیقی ساعتی را که مبتنی بر MILP است، ارائه می‌نماید و بدون استفاده از روش‌های ذهنی، تجربی و سعی و خطایی حداقل مقدار حذف بار را در هر ساعت از ۲۴ ساعت یک شبانه‌روز حذف می‌کند.

مسئله بهینه‌سازی تنظیمات تطبیقی رله زیرفرکانسی به‌عنوان یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح (MILP)، به‌وسیله نرم‌افزار بسیار کارآمد GAMS و حل‌کننده CPLEX حل شده است. در نتیجه به‌طور خلاصه نوآوری‌های مقاله به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

الف. حذف بار اجباری بهینه با توجه به شرایط ساعتی در

شبکه هوشمند

- ارائه مدل‌سازی دقیق رفتار وابسته به فرکانس اجزای سیستم قدرت شامل بارها و نیروگاه‌های تولیدی؛
- مدل‌سازی نرخ تغییر فرکانس واحدهای تولیدی با استفاده از مفهوم اینرسی معادل و کنترل‌کننده کاهشی؛
- تبیین یک استراتژی تطبیقی برای بهبود عملکرد سیستم حفاظتی در محیط شبکه هوشمند؛
- فرمول‌بندی دقیق ریاضی بخش‌های مختلف رله با در نظر گرفتن قیود مختلف بهره‌برداری؛

بر اساس یک طرح اقدام درمانی (RAS^۱) گسترش دادند. سپس با معرفی یک شاخص بهره‌وری متناسب با سهم هر ژنراتور و با در نظر گرفتن دینامیک‌های تولید بادی، حداقل مقدار حذف بار را به دست آوردند. در مرجع [۱۶]، یک مدل UFLS-MILP برای حذف حداقل بار با مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای سیستم با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS^۲) برنامه‌ریزی شده است. سپس با تنظیم بهینه پارامترهای رله ROCOF، سیستم قدرت در برابر جزیره‌ای شدن ناشی از افت فرکانس به دلیل افت تولید محافظت می‌شود. امرایی و درباغی [۱۷] یک استراتژی UFLS احتمالی ابتکاری را برای بهینه‌سازی مقدار بار حذف‌شده با استفاده از MILP پیشنهاد کرده‌اند. در این کار، عدم قطعیت‌ها با استفاده از روش 3-PEM^۳ مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده با شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه گردیده است. ژنگلونگ و همکاران [۱۸] طرحی را برای تنظیم بهینه رله زیرفرکانسی در سیستم برق منطقه‌ای ارائه داده‌اند. در این مقاله، مدل پاسخ فرکانسی چندژنراتور بهبودیافته (IMFR^۴) شامل گاورنرهای مختلف، ذخیره چرخان و بار برای اندازه‌گیری دقیق فرکانس پس از نامتعادلی توان به دست آمده است. در مرجع [۱۹] یک طرح UFLS جدید مبتنی بر حداقل فرکانس پیش‌بینی سیستم ارائه شده است. در این کار، با نمونه‌گیری از فرکانس پس از پیشامد، هر نمونه حداقل فرکانس سیستم را بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۵) پیش‌بینی کرده است. معظمی و همکاران [۲۰] یک طرح حذف سریع بار را بر اساس شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۶) پیشنهاد داده و مقدار بار اکتیو و راکتیو را با استفاده از یک لیست اولویت‌بندی‌شده توسط الگوریتم PSO حذف کرده‌اند. در مرجع [۲۱]، یک استراتژی UFLS مبتنی بر MILP با توجه به ثابت‌های میرایی و اینرسی معرفی شده است. در این روش با در نظر گرفتن پیشامد واحدهای تولیدی مقدار حذف بار به حداقل می‌رسد و در نتیجه از افت فرکانس سیستم جلوگیری می‌شود.

با بررسی سایر مقالات می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه روش‌های UFLS متداول از نظر اجرا ساده‌تر از روش‌های تطبیقی هستند، روش‌های UFLS تطبیقی در یک بستر مخابراتی پیشرفته، بار کمتری را حذف می‌کنند. در این مقاله چشم‌انداز کار این است

1. Remedial Action Scheme
2. Monte-Carlo Simulation
3. Point Estimate Method
4. Improved Multigenerator Frequency Response
5. Particle Swarm Optimization
6. Artificial Neural Networks

کار یا آستانه و تأخیر زمانی برای رله زیرفرکانس به‌طور جداگانه طی یک افق زمانی ۲۴ ساعته با توجه به اطلاعات ساعتی عدم قطعیت‌ها در زمان واقعی؛

• گنجاندن عدم قطعیت‌های مدل‌سازی شده در تابع هدف به‌منظور تنظیم بهینه رله.

در این مقاله، در بخش ۲ شرح مدل پیشنهادی مربوط به استراتژی UFLS تطبیقی ساعتی در محیط شبکه هوشمند ارائه شده است. سپس در بخش ۳ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج آورده شده و در نهایت، در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی بیان شده است.

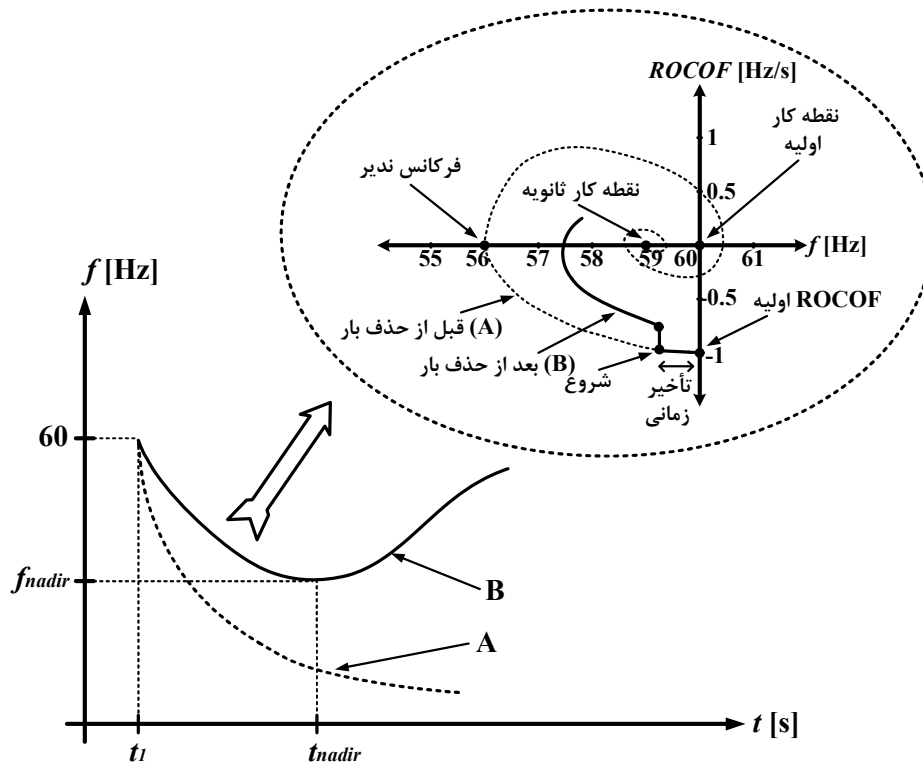
• تنظیم رله زیرفرکانسی در هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز توسط فرمول‌بندی MILP برای تقویت خاصیت تطبیقی؛

• حذف حداقل بار در هر ساعت به‌طور جداگانه با توجه به شرایط آن ساعت بر روی یک بستر پیشرفته مخابراتی در شبکه هوشمند.

ب. مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ناشی از کمبود تولید، توان خروجی RES و نوسانات بار

• ردیابی تغییرات ساعتی در افت تولید، تغییرات توان RES و نوسانات بار به‌عنوان عدم قطعیت؛

• تنظیم سه پارامتر بلوک حذف بار، فرکانس تنظیم نقطه



شکل (۱): منحنی فرکانس برحسب زمان و متناسب با آن منحنی فرکانس برحسب ROCOF در شرایط زیرفرکانسی قبل و بعد از حذف بار

می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار فرکانس و ROCOF در حالت پایدار سیستم و در زمان t_1 به ترتیب ۶۰ هرتز و صفرند. پس از نامتعادلی توان، فرکانس در لحظه اول دارای مقدار نامی است، درحالی‌که ROCOF به یک مقدار غیرصفر (منحنی A) می‌رسد. برای برقراری تعادل بین تولید و مصرف، تنظیم فرکانس اولیه توسط گاورنر باعث افزایش توان اکتیو می‌شود. در نهایت، فرکانس به پایین‌ترین مقدار (فرکانس ندیر) کاهش می‌یابد زیرا توان اکتیو متعادل می‌گردد. در حالت ماندگار جدید، با عملکرد سیستم تنظیم

۲. شرح مدل پیشنهادی

روند کار یک سیستم UFLS به این صورت است که هرگاه شرایط زیرفرکانسی رخ دهد، رله‌های زیرفرکانسی که در ایستگاه‌های توزیع یا انتقال قرار دارند، بر اساس اطلاعات به‌دست آمده، دستور حذف بار را به مدارشکن ارسال می‌کنند. در طرح‌های مختلف UFLS، ROCOF اغلب علاوه بر فرکانس به‌عنوان یک کمیت اضافی برای طرح‌های UFLS تطبیقی استفاده می‌شود. شکل (۱) منحنی فرکانس برحسب زمان و متناسب با آن منحنی فرکانس را برحسب ROCOF در شرایط زیرفرکانسی قبل و بعد از حذف بار نشان

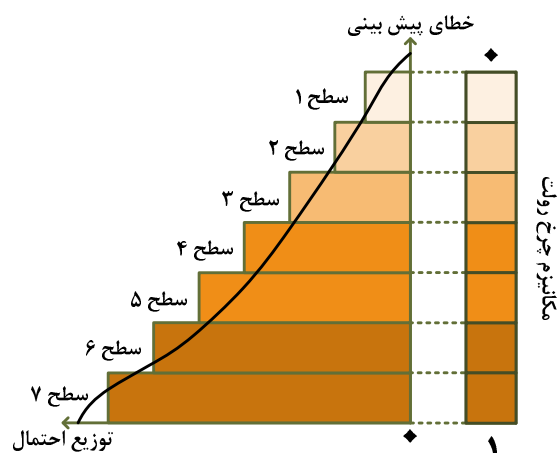
می شود. اگرچه این تابع نمایانگر ماهیت تصادفی تولید بادی است، با تقریب مناسب، تابع توزیع گاوسی برای مدل سازی رفتار توأم با عدم قطعیت تولید بادی و خورشیدی و نوسانات بار در نظر گرفته می شود [۲۴].

در این مقاله، خطای پیش بینی مربوط به کمبود تولید ژنراتورهای اصلی، تولید بادی و خورشیدی و نوسانات بار، با تابع توزیع احتمال نرمال توصیف می شوند. در شکل (۲)، PDF استاندارد و سازوکار چرخ رولت^۴ مربوط به خطای پیش بینی نشان داده شده است. در این شکل، منحنی پیوسته خطای پیش بینی با انحراف معیار (σ) نسبت به میانگین خطای صفر (μ) در مرکز منحنی، به چندین بازه گسسته تقسیم شده است. هر بازه گسسته یک احتمال خاص دارد. در واقع عرض هر بازه برابر با انحراف معیار خطای پیش بینی مربوط به عدم قطعیت های ناشی از کمبود تولید، توان بادی و خورشیدی و نوسانات بار است. این عدم قطعیت ها بر قیمت برق، رفاه اجتماعی و امنیت و قابلیت اطمینان سیستم تأثیر می گذارند. لذا از MCS برای مدل سازی عدم قطعیت ها بر اساس سطوح مختلف پیش بینی و احتمالات به دست آمده از PDF پیشنهادی برای تولید سناریو هر ساعت استفاده شده است. در ادامه، بر اساس سطوح پیش بینی متفاوت و احتمالات به دست آمده از تابع توزیع احتمال پیشنهادی، RWM برای تولید سناریوهای هر ساعت اعمال می شود. بنابراین، ابتدا احتمالات مربوط به هر سطح پیش بینی با استفاده از RWM به گونه ای بهنجار می شوند که مجموع آن ها مساوی ۱ باشد. سپس محدوده بین صفر و یک اعداد به وسیله احتمال های بهنجار شده پر می شود. در ادامه، اعداد تصادفی بین صفر و یک تقسیم می شوند. هر عدد تصادفی در محدوده احتمال بهنجار شده به وسیله RWM به عنوان یک سناریوی متناظر انتخاب می شود. روند تولید سناریو تا زمان ایجاد سناریوهای مربوط در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته تکرار می شود [۲۵ و ۲۶].

به طور طبیعی، هرچه تعداد سناریوهای تولید شده بیشتر شود، محدوده گسترده تری از طیف عدم قطعیت ها پوشش داده می شود. اما در مقابل، پیچیدگی مسئله و حجم محاسبات بیشتر خواهد شد. از سوی دیگر، سناریوهای تولید شده با احتمال پایین، زمان حل مسئله را افزایش می دهند. برای مواجهه با این مشکل، حذف سناریوهای با احتمال خیلی کم و سناریوهایی که بسیار مشابه یکدیگرند، به وسیله روش های کاهش سناریو انجام می شود [۲۷]. این کاهش سناریو نه تنها یکپارچگی روش را تغییر نمی دهد، بلکه

فرکانس اولیه، فرکانس سیستم به کمتر از مقدار نامی بازنشانی می شود. برای تنظیم مجدد فرکانس در فرکانس نزدیک به فرکانس نامی، باید از استراتژی UFLS استفاده شود. در این حالت، افت فرکانس کم شده و منحنی فرکانس برحسب ROCOF جدید (منحنی B) کوچک تر از منحنی A است [۲۲].

در اینجا، فرمول بندی طرح UFLS تطبیقی پیشنهادی در دو مرحله ارائه شده است: در مرحله اول، فرایند تولید سناریو با توجه به عدم قطعیت ها و شرایط مختلف سیستم در هر ساعت انجام می شود؛ در مرحله دوم، پارامترهای رله تطبیقی در فضای تصادفی با استفاده از فرمول بندی MILP بهینه می شوند.



شکل (۲): PDF و RWM مربوط به خطای پیش بینی

۲.۱. مرحله اول: فرایند تولید و کاهش سناریو

در این مقاله، عدم قطعیت های مربوط به کمبود تولید ژنراتورهای اصلی ناشی از پیشامد، تغییرات توان خروجی تولیدات بادی و خورشیدی و نوسانات بار برای تنظیم تطبیقی رله زیرفرکانسی در فضای تصادفی مورد توجه قرار گرفته است. برای تولید سناریوهای مربوطه، تابع توزیع احتمال (PDF^1) به خطای پیش بینی برای هر عدم قطعیت با دقت مناسب به دست می آید. این PDF ها می توانند بر اساس داده های قبلی از شرایط آب و هوایی، سرعت باد و تابش نور خورشید در محیط شبکه هوشمند و داده های ثبت شده از مصرف انرژی در گذشته استخراج شوند. رفتار غالب بارهای سیستم قدرت هم از تابع توزیع احتمال نرمال (گوسی^۲) تبعیت می کند [۲۳]. به طور معمول تابع ویبول^۳ که تابعی از سرعت باد در سیستم است، برای توصیف توزیع احتمال تولید بادی در نظر گرفته

1. Probability Distribution Function
2. Gaussian
3. Weibull

۲.۲.۲. مدل‌سازی طرح UFLS تطبیقی پیشنهادی

در این مقاله، تنظیمات پارامترهای رله حذف بار زیرفرکانسی تطبیقی در فضای تصادفی توسط فرمول‌بندی MILP برای کمینه‌سازی تابع هدف مناسب اجرا می‌شود. یک طرح‌واره UFLS تطبیقی با یک تعداد مشخص n_s از مراحل حذف بار در سناریو SC و ساعت h برای هر مرحله حذف بار s رله یک بلوک بار LSH_s^h را در پله زمانی n حذف می‌کند. در این پله زمانی، منحنی فرکانسی $\Delta f_n^{sc,h}$ ، برای مدت‌زمانی بزرگ‌تر از Δt_s^h از نقطه کار فرکانسی f_s^h عبور می‌کند. در اینجا مقادیر تنظیمات رله $\{f_s^h, LSH_s^h, \Delta t_s^h\}$ و متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به انحراف فرکانس، برای سناریوهای مختلف SC و ساعت h در پله زمانی n توسط روش MILP تنظیم می‌شوند. لذا در پله حذف بار s برای هر نقطه کار فرکانسی f_s^h به وسیله متغیر دودویی $\alpha_{s,n}^{sc,h}$ یک زمان‌سنج توسط نامعادله (۸) تعریف می‌شود،

$$\frac{f_s^h - (f_0 + \Delta f_n^{sc,h})}{M_1} \leq \alpha_{s,n}^{sc,h} \leq 1 + \frac{f_s^h - (f_0 + \Delta f_n^{sc,h})}{M_1} \quad (۸)$$

که باید شرایط (۹) برای متغیر دودویی $\alpha_{s,n}^{sc,h}$ مدنظر قرار گیرد:

$$\alpha_{s,n}^{sc,h} = \begin{cases} 0 & f_0 + \Delta f_n^{sc,h} > f_s^h \\ 1 & f_0 + \Delta f_n^{sc,h} < f_s^h \end{cases} \quad (۹)$$

M_1 در (۸)، یک مقدار مثبت بزرگ است. مجموع زمان صرف‌شده در سناریو SC و ساعت h زیرفرکانس نقطه کار f_s^h در پله زمانی n توسط متغیر دودویی $\alpha_{s,n}^{sc,h}$ ، به وسیله معادله (۱۰) نوشته می‌شود.

$$\Delta t_{s,n}^{sc,h} = \Delta t_{s,n-1}^{sc,h} + \alpha_{s,n}^{sc,h} \Delta t \quad (۱۰)$$

منطق رله به این صورت بیان می‌شود که اگر فرکانس هنگامی که $\Delta t_{s,n}^{sc,h} > \Delta t_s^h$ است، کوچک‌تر از f_s^h شود، بلوک بار LSH_s^h حذف می‌گردد. در اینجا منطق عملکرد رله به وسیله یک متغیر دودویی حذف بار $\beta_{s,n}^{sc,h}$ به صورت نامعادله (۱۱) مدل می‌شود.

$$\frac{\Delta t_{s,n}^{sc,h} - \Delta t_s^h}{M_2} \leq \beta_{s,n}^{sc,h} \leq 1 + \frac{\Delta t_{s,n}^{sc,h} - \Delta t_s^h}{M_2} \quad (۱۱)$$

پارامتر M_2 یک عدد مثبت بزرگ است. همچنین برای متغیر دودویی $\beta_{s,n}^{sc,h}$ شروط (۱۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$\beta_{s,n}^{sc,h} = \begin{cases} 0 & \Delta t_n^{sc,h} < \Delta t_s^h \\ 1 & \Delta t_n^{sc,h} > \Delta t_s^h \end{cases} \quad (۱۲)$$

همچنین Δt_s^h یک متغیر است و طبق شرط (۱۳) باید از حداقل زمان مورد نیاز برای باز شدن مدارشکن، Δt_{\min} ، بزرگ‌تر باشد.

$$\Delta t_s^h \geq \Delta t_{\min} \quad (۱۳)$$

تقریب مناسبی از رفتار توأم با عدم قطعیت سیستم را حفظ می‌کند.

۲.۲. مرحله دوم: فرمول‌بندی ریاضی استراتژی UFLS تطبیقی پیشنهادی

در اینجا یک پاسخ فرکانسی زمان‌گسسته برای مدل‌سازی رفتار فرکانس سیستم در مقابل زمان ارائه شده است. سپس پارامترهای سیستم UFLS تطبیقی پیشنهادی بر اساس فرمول‌بندی UFLS با در نظر گرفتن جزئیات کامل تنظیم شده‌اند.

۲.۲.۱. مدل پاسخ فرکانسی زمان گسسته با در نظر گرفتن دینامیک‌های سیستم قدرت

پاسخ فرکانسی سیستم با در نظر گرفتن حساسیت بار به تغییرات فرکانس و تنظیم فرکانس اولیه گاورنر سرعت، از طریق یک معادله نوسان تک‌ماشین به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود [۲۸].

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt} = \frac{f_0}{2H} (\Delta R(t) - \Delta GL(t) + LSH(t) - D\Delta f(t)) \quad (۱)$$

که D و Δf به ترتیب ثابت میرایی و انحراف فرکانس سیستم از مقدار نامی در مدت‌زمان t ناشی از افت تولید به اندازه $\Delta GL(t)$ در $t=0$ و $LSH(t)$ مقدار حذف بار در زمان t به وسیله عملکرد رله زیرفرکانسی هستند. $\Delta R(t)$ تنظیم فرکانس اولیه در زمان t با عملکرد گاورنر و ثابت زمانی T است که توسط معادله (۲) نوشته می‌شود:

$$\frac{d\Delta R(t)}{dt} = \frac{1}{T} (-\Delta R(t) - \frac{\Delta f(t)}{R}) \quad (۲)$$

در (۲) افت گاورنر معادل به صورت معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{S_i}{R_i S} \quad (۳)$$

معادلات (۱) و (۲) در پله‌های زمانی $n\Delta t$ به صورت معادلات (۴) گسسته شده است:

$$\begin{cases} \Delta R(n\Delta t) = \Delta R_n \\ LSH(n\Delta t) = LSH_n \\ \Delta f(n\Delta t) = \Delta f_n \end{cases} \quad (۴)$$

سپس با استفاده از روش اویلر، معادله (۱) به فرم گسسته معادلات (۵) و (۷) گسسته شده است:

$$\Delta f_n = \Delta f_{n-1} + ROCOF_{n-1} \Delta t \quad (۵)$$

در اینجا

$$ROCOF_n = \frac{f_0}{2H} (\Delta R_n - \Delta GL + LSH_n - D\Delta f_n) \quad (۶)$$

که معادله (۲) در فرم معادله (۷) گسسته شده است:

$$\Delta R_n = \Delta R_{n-1} \times (1 - \frac{\Delta t}{T}) - \frac{\Delta t}{T} \times \frac{\Delta f_n}{R} \quad (۷)$$

همچنین مطابق با نامعادله (۱۴) نباید مراحل مختلف حذف بار در پله زمانی n در ساعت h برای تمامی مراحل s همزمان باشند.

$$\sum_s \beta_{s,n}^{sc,h} - \sum_s \beta_{s,n-1}^{sc,h} \leq 1 \quad (14)$$

مسئله بعدی این است که بارهای با اولویت بالاتر (از قبیل بارهای مهم و حیاتی شامل بیمارستان‌ها، نهادهای نظامی و امنیتی و...) باید حتی‌الامکان حذف نشوند یا در مراحل s پایین‌تری حذف شوند. این شرط در (۱۵) بیان شده است:

$$\beta_{s,n}^{sc,h} \geq \beta_{s+1,n}^{sc,h} \quad (15)$$

با توجه به معادله (۵) رابطه زمان فرکانسی گسسته برای هر سناریو sc در ساعت h ، به‌صورت معادله (۱۶) نوشته می‌شود:

$$\Delta f_n^{sc,h} = \Delta f_{n-1}^{sc,h} + ROCOF_n^{sc,h} \Delta t \quad (16)$$

در اینجا ترم حذف بار $\sum_s \beta_{s,n}^{sc,h} \times LSH_s^h$ به (۶) اضافه می‌شود تا تأثیر حضور ترم حذف بار در پاسخ فرکانسی سیستم در نظر گرفته شود. لذا معادله جدید به‌صورت معادله (۱۷) نوشته می‌شود:

$$ROCOF_n^{sc,h} = \frac{f_0}{2H^{sc,h}} (\Delta R_n^{sc,h} - \Delta GL^{sc,h} - \dots - D\Delta f_n^{sc,h} + \sum_s \beta_{s,n}^{sc,h} \times LSH_s^h) \quad (17)$$

در این معادله، تنظیم فرکانس اولیه به‌صورت معادله (۱۸) است:

$$\Delta R_n^{sc,h} = \Delta R_{n-1}^{sc,h} \times (1 - \frac{\Delta t}{T}) - \frac{\Delta t}{T} \times \frac{\Delta f_n^{sc,h}}{R^{sc,h}} \quad (18)$$

یک طرح حذف بار موفق باید در چهارچوب محدودیت‌های زیرفرکانسی/زمان ژنراتورها که توسط کارخانه سازنده تعیین می‌شوند، قرار گیرند تا اگر فرکانس برای یک مدت طولانی زیر یک آستانه معین قرار گرفت، ژنراتور آسیب نبیند. با فرض تعداد n_c آستانه فرکانس بحرانی f_c ، مربوط به حداکثر زمان مجاز مشخص شده توسط کارخانه، Δt_c^{\max} ، یک متغیر دودویی $\gamma_{c,n}^{sc,h}$ مطابق با نامعادله (۱۹) و شروط (۲۰) معرفی می‌شود:

$$\frac{f_c - (f_0 + \Delta f_n^{sc,h})}{M_3} \leq \gamma_{c,n}^{sc,h} \leq 1 + \frac{f_c - (f_0 + \Delta f_n^{sc,h})}{M_3} \quad (19)$$

$$\gamma_{c,n}^{sc,h} = \begin{cases} 0 & f_0 + \Delta f_n^{sc,h} > f_c^h \\ 1 & f_0 + \Delta f_n^{sc,h} < f_c^h \end{cases} \quad (20)$$

در اینجا نیز پارامتر M_3 یک عدد مثبت بزرگ است. کل زمان سپری‌شده فرکانس زیر یک آستانه فرکانسی معین در سناریوی sc در ساعت h و در پله زمانی n به‌صورت معادله (۲۱) نوشته می‌شود:

$$\Delta t_{c,n}^{sc,h} = \Delta t_{c,n-1}^{sc,h} + \gamma_{c,n}^{sc,h} \Delta t \quad (21)$$

قید (۲۲) محدوده زیرفرکانسی/زمان ژنراتور برای تنظیم رله

UFLS تطبیقی را باید برآورده کنند:

$$\Delta t_{c,n}^{sc,h} \leq \Delta t_c^{\max} \quad (22)$$

برای جلوگیری از حذف بار پیش از موعد باید نقطه کار فرکانسی f_s^h در محدوده مجاز زیرفرکانسی ژنراتور قرار گیرد که این شرط در (۲۳) بیان شده است:

$$\min_c(f_c) \leq f_s^h \leq \max(f) \quad (23)$$

علاوه بر این، باید شرط (۲۴) در نظر گرفته شود تا از داشتن نقاط کار فرکانسی یکسان در مراحل پی‌درپی حذف بار اجتناب شود.

$$0.2Hz \leq f_s^h - f_{s+1}^h \quad (24)$$

تغییر در توان خروجی نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و همچنین نوسانات بار بر روی فرکانس سیستم تأثیر گذاشته و لذا این فاکتورها باید در تنظیم پارامترهای رله زیرفرکانسی در نظر گرفته شود. از این‌رو ترم‌های تغییر تولید بادی، $\Delta P_w^{sc,h}$ ، تولید خورشیدی، $\Delta P_{pv}^{sc,h}$ و نوسانات بار، $\Delta P_{lf}^{sc,h}$ مطابق با معادله (۲۵) به معادله (۶) اضافه می‌شود:

$$ROCOF_n^{sc,h} = \frac{f_0}{2H^{sc,h}} (\Delta R_n^{sc,h} - \Delta GL^{sc,h} - \dots - D\Delta f_n^{sc,h} - \Delta P_w^{sc,h} - \Delta P_{pv}^{sc,h} - \dots - \Delta P_{lf}^{sc,h} + \sum_s \beta_{s,n}^{sc,h} \times LSH_s^h) \quad (25)$$

توجه شود که ترم حذف بار $\sum_s \beta_{s,n}^{sc,h} \cdot LSH_s^h$ ، شامل ضرب

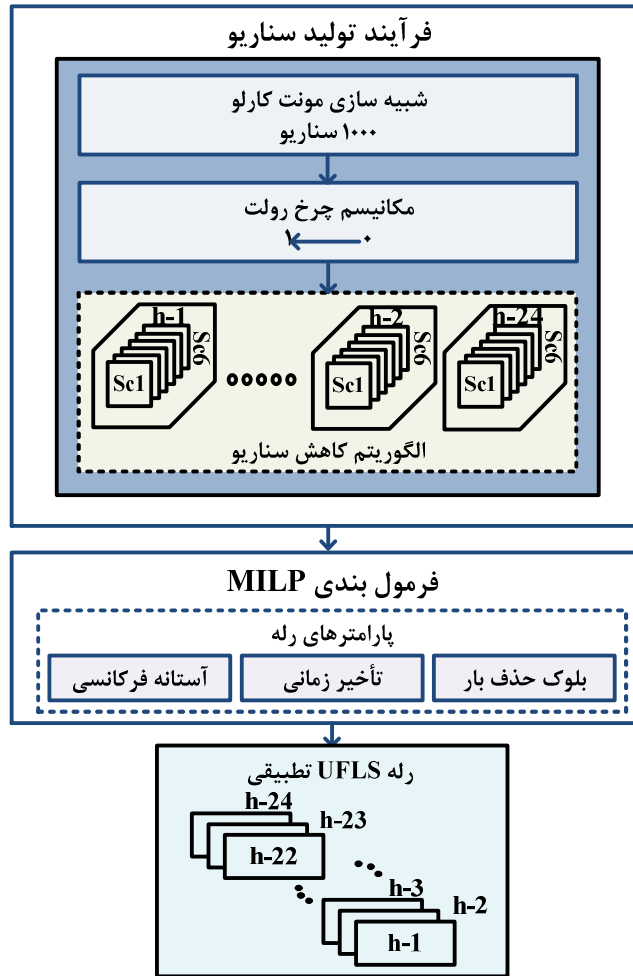
یک متغیر دودویی $\beta_{s,n}^{sc,h}$ و مقدار پیوسته حذف بار LSH_s^h است که هر دو متغیرهای تصمیم‌گیری ناشناخته هستند و بنابراین لازم است برای پیاده‌سازی این ترم، خطی‌سازی مربوط صورت گیرد. لذا مسئله تنظیم رله به‌عنوان یک مسئله MILP به‌وسیله جایگزین کردن ضرب $\beta_{s,n}^{sc,h} \cdot LSH_s^h$ با متغیر $\chi_{s,n}^{sc,h}$ و همچنین به‌وسیله تحمیل نامساوی‌های (۲۶) و (۲۷) و شروط (۲۸) فرمول‌بندی می‌شود.

$$0 \leq \chi_{s,n}^{sc,h} \leq \beta_{s,n}^{sc,h} \quad (26)$$

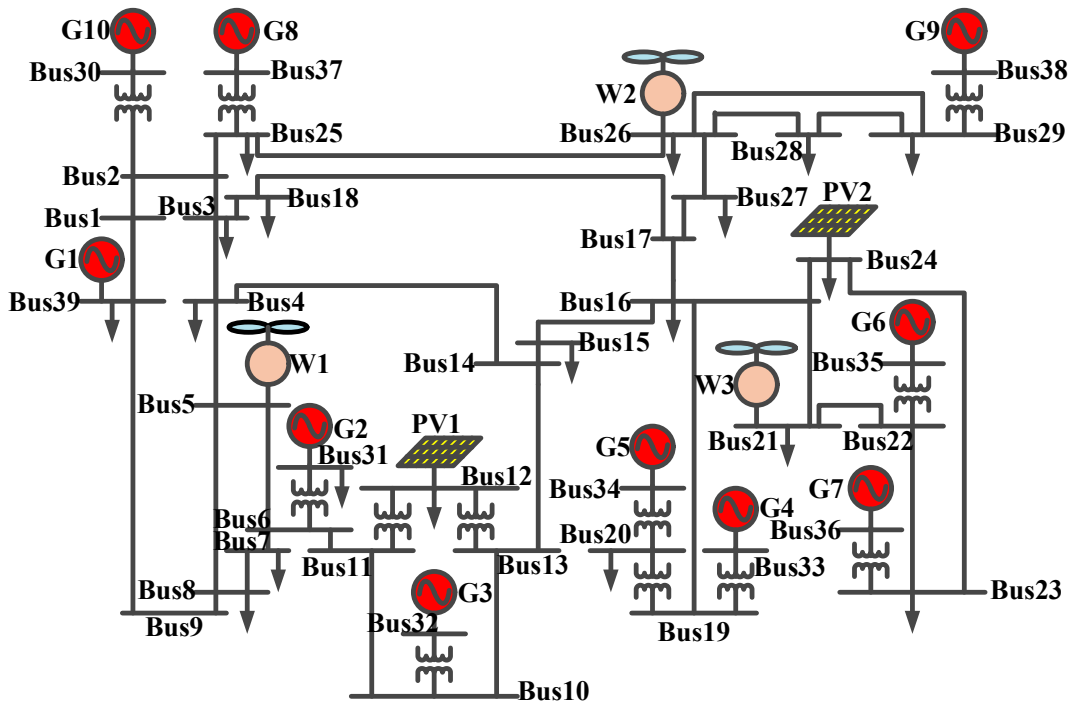
$$0 \leq LSH_s^h - \chi_{s,n}^{sc,h} \leq (1 - \beta_{s,n}^{sc,h}) \quad (27)$$

$$\chi_{s,n}^{sc,h} = \begin{cases} LSH_s^h & \beta_{s,n}^{sc,h} = 1 \\ 0 & \beta_{s,n}^{sc,h} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

به‌طور مشابه برای سایر قسمت‌ها هم به این صورت می‌توان خطی‌سازی را انجام داد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام طرح UFLS تطبیقی پیشنهادی



شکل (۴): روندنمای سیستم ۳۹ شینه IEEE

۳. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم نمونه ارائه می‌شود. در شکل (۴) روندنمای سیستم ۳۹ شینه IEEE با ۱۰ ژنراتور و ۱۹ بار بر روی شینه‌های مختلف آن به همراه سه نیروگاه بادی (مزرعه بادی) و دو نیروگاه خورشیدی (مزرعه خورشیدی) به‌عنوان سیستم پیشنهادی مورد مطالعه برای طرح UFLS تطبیقی نشان داده شده و پارامترهای مختلف آن به‌منظور شبیه‌سازی طرح پیشنهادی در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است [۳۰ و ۱۶]. تمامی مقادیر این جداول در توان مبنای ۱۰۰۰ MVA بیان شده‌اند. به‌علاوه مقادیر ساعتی پیش‌بینی شده توان اکتیو واحدهای بادی و خورشیدی و بار مصرفی مطابق شکل (۵) نشان داده شده است [۳۱]. لذا باید تأثیر حضور منابع تجدیدپذیر و همچنین نوسانات بار و عدم قطعیت‌های ناشی از آن‌ها بر روی طرح پیشنهادی بررسی شود.

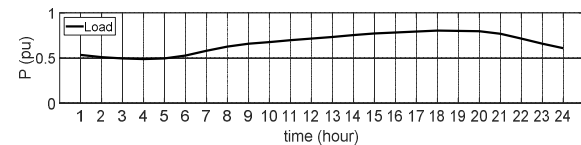
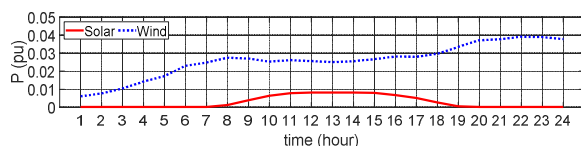
برای پیاده‌سازی روش تنظیم ساعتی رله UFLS تطبیقی پیشنهادی، تمامی شبیه‌سازی‌ها در ۲۰۰ پله زمانی صورت گرفته است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

جدول (۱): پارامترهای ورودی برای سیستم نمونه ۳۹ شینه IEEE

۶۰	فرکانس نامی سیستم f_n (هرتز)
۴	ثابت زمانی اینرسی معادل H، (ثانیه)
۲	میرایی بار D، (پرونیوت)
۵	افتی معادل گاورنر R، (درصد)
۰/۱	حداقل اختلاف فرکانس بین پله‌های متوالی حذف بار Δf_{min} (هرتز)

جدول (۲): خروجی نامی ژنراتورهای سیستم برحسب پرونیوت

ژنراتور ۱	ژنراتور ۲	ژنراتور ۳	ژنراتور ۴	ژنراتور ۵
۰/۱۵۸۸	۰/۱۰۷۶	۰/۱۰۳۲	۰/۱۰۰۳	۰/۰۸۰۶
ژنراتور ۶	ژنراتور ۷	ژنراتور ۸	ژنراتور ۹	ژنراتور ۱۰
۰/۱۰۳۲	۰/۰۸۹۰	۰/۰۸۵۷	۰/۱۳۱۸	۰/۰۳۹۸



شکل (۵): مقادیر ساعتی پیش‌بینی شده توان اکتیو واحدهای بادی و خورشیدی و بار مصرفی

سه مجموعه پارامتر برای تنظیم رله UFLS تطبیقی به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری MILP برای هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز تعریف می‌شود: ۱. نقاط کار فرکانسی، f_s^h ؛ ۲. تأخیرهای زمانی قبل از حذف بار، Δt_s^h ؛ ۳. مقدار بار حذف‌شده در هر مرحله، LSH_s^h . با توجه به اینکه مسئله UFLS دارای تعداد زیادی از متغیرهای مختلف و همچنین پیچیدگی است، دستیابی به یک حل ممکن و مقدار بهینه، با استفاده از روش‌های ابتکاری و سعی و خطایی مشکل است. تنظیمات رله UFLS تطبیقی سیستم قدرت را در برابر تمامی سناریوها با احتمال وقوع متفاوت محافظت می‌کند. بنابراین، یک تابع هدف مناسب برای کمینه‌سازی مقدار حذف بار، به‌صورت معادله (۲۹) در نظر گرفته می‌شود:

$$OF = \min_{f_s^h, \Delta t_s^h, LSH_s^h} \left\{ \sum_{sc} (\pi^{sc} \sum_s LSH_s^h) \right\} \quad (29)$$

در این معادله، احتمال وقوع هر سناریو به‌وسیله π^{sc} نشان داده می‌شود و اگر احتمال هر سناریو مشخص نباشد، این احتمال توسط عدد ثابت $\frac{1}{n_\pi}$ تخمین زده می‌شود، که n_π تعداد سناریوهایی است که تأثیر بالایی بر مقدار بار حذف‌شده دارند.

در مسئله بهینه‌سازی تنظیمات رله حذف بار زیرفرکانسی تطبیقی، از شاخص ENLS به‌عنوان مقدار مورد انتظار بار تأمین‌نشده در نتیجه خاموشی بار ناخواسته برای ارزیابی امنیت و قابلیت اطمینان سیستم استفاده می‌شود، که طبق معادله (۲۷) بیان می‌شود [۲۹]:

$$ELNS = \sum_{sc} \pi^{sc} \sum_h \sum_s LSH_s^h \quad (30)$$

شکل (۳) استراتژی UFLS تطبیقی پیشنهادی را بر اساس فرمول بندی MILP نشان می‌دهد. در این شکل، اطلاعات سیستم در هر ساعت استخراج و سپس سناریوهای ساعتی با استفاده از این اطلاعات در زمان واقعی تولید می‌شوند. این سناریوها به‌عنوان ورودی به فرایند بهینه‌سازی MILP داده می‌شوند و پارامترهای رله بر اساس شرایط سیستم به دست می‌آیند. با توجه به روابط ذکر شده در این بخش، منطق عملکرد، زمان سنج و پاسخ فرکانسی زمان گسسته رله با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری در مدل‌سازی لحاظ می‌شوند. سرانجام، رله زیرفرکانسی با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده، حداقل بار را در هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز حذف می‌کند. فرایند مشابهی را می‌توان برای روزهای بعد پیاده‌سازی کرد.

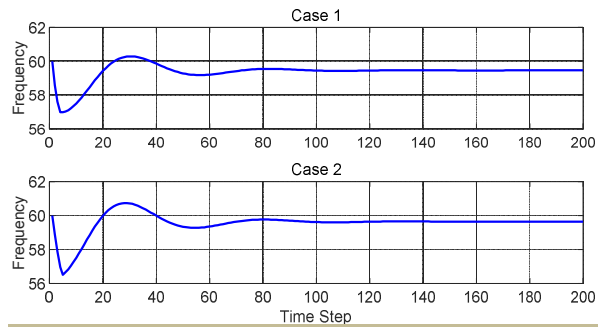
نوسانات توان تولیدی می‌شوند و با توجه به اینکه در سناریوهای مختلف مقدار متفاوتی از اضافه‌بار بر سیستم تحمیل می‌شود، رله زیرفرکانسی باید در این حالت هم فرکانس را به نقطه ایمن برگرداند. در شکل (۶)، شکل موج فرکانس در سناریوی ۱ برای دو حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این شکل، نوسانات ابتدایی فرکانس بر اثر حضور منابع RES افزایش یافته ولی مقدار حالت ماندگار فرکانس در نقطه جدید افزایش یافته است.

جدول (۴) نتایج شبیه‌سازی را برای تنظیم ۲۴ ساعته پارامترهای رله در حالت ۱ نشان می‌دهد. در این جدول، ۲۴ مجموعه پارامتر که برای تنظیم رله‌های زیر فرکانسی جمع‌آوری شده‌اند، ارائه گردیده است. هر یک از این مجموعه پارامترها مربوط به یک ساعت خاص است که مطابق با شرایط سیستم در آن ساعت به دست می‌آید. در ساعاتی که شدت اغتشاش و پیشامد کم است، افت فرکانس نیز کم است و بنابراین بار کمتری حذف می‌گردد. برعکس، در ساعات اوج بار، مقدار بار حذف‌شده در نتیجه نامتعادلی بین بار و تولید به‌میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار میانگین حذف بار به ۰/۳۹۸ پریونیت رسیده است. در این حالت، فرکانس‌های نقطه کار مختلفی برای هر ساعت به دست می‌آیند و با کاهش مقدار حذف بار، فرکانس نقطه کار در هر مرحله افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که انحراف فرکانس، کاهش یافته و در نتیجه بار اضافی در فرکانس بالاتری حذف می‌شود. تأخیر زمانی در هر چهار مرحله ۰/۲ ثانیه است.

در حالت ۲، تأثیر حضور RES و نوسانات بار بر فرکانس سیستم و میزان بار حذف‌شده علاوه بر شرایط ارائه‌شده در حالت ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۵) نتایج استراتژی UFLS تطبیقی را در حالت ۲ در هر ساعت از یک شبانه‌روز نشان می‌دهد. در حالت ۲، حذف بار در هر ساعت به دلیل اثر مخرب حضور RES و نوسانات بار آنی بر فرکانس سیستم افزایش یافته است. این امر ناشی از ماهیت توأم با عدم قطعیت این منابع است. وجود RES و نوسانات بار در سیستم قدرت نوسانات فرکانس را افزایش داده و پایداری سیستم را به خطر می‌اندازد. این امر به این دلیل است که RES در شبکه هوشمند جایگزین مقداری از ظرفیت تولیدی نیروگاه‌های متداول می‌شود و به دلیل اینرسی پایین‌تر این منابع نسبت به نیروگاه‌های متداول، فرکانس سیستم دچار مقداری نوسان می‌گردد. بنابراین رله زیرفرکانسی باید مقدار زیادتری از بار را حذف کند تا از فروپاشی فرکانس سیستم جلوگیری نماید. شایان ذکر است با وجود سیستم ارتباطی سریع و AMI قدرتمند در شبکه

جدول (۳): وضعیت سناریوی منتخب ۱

سناریوی ۱				
شماره حالت	کاهش تولید (پیشامد)	نوسانات توان سیستم		
		باد	خورشید	بار
حالت ۱	✓	×	×	×
حالت ۲	✓	✓	✓	✓



شکل (۶): شکل موج فرکانس سیستم ناشی از سناریوی شماره ۱ در حالت‌های ۱ و ۲

۳.۱. روش UFLS تطبیقی ساعتی پیشنهادی

برای اجرای استراتژی UFLS تطبیقی پیشنهادی و دستیابی به حداقل حذف بار، ۱۰۰۰ سناریو مختلف بر اساس فرایندهای MCS و RWM تولید می‌شوند. این سناریوها عدم قطعیت‌های مربوط به افت تولید ناشی از پیشامد، تغییرات تولید بادی و خورشیدی و نوسانات بار را در نظر می‌گیرند. سپس ۱۴۴ سناریو از محتمل‌ترین سناریوهای باقی‌مانده برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز، ۶ سناریو برای هر ساعت، بر اساس الگوریتم کاهش سناریو به دست می‌آید. در زیر، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی بررسی شده است. در این قسمت، دو حالت برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول (۳) این دو حالت برای سناریوی ۱ نشان داده شده است. در حالت ۱، فقط از دست رفتن تولید بعضی از ژنراتورهای اصلی سیستم ناشی از پیشامد لحاظ شده و در سیستم نمونه هیچ‌گونه نیروگاه بادی و خورشیدی و همچنین نوسانات باری وجود ندارد. در حالت ۲، علاوه بر وقوع پیشامد منجر به از دست دادن توان تولیدی برخی از نیروگاه‌های سنکرون، نیروگاه‌های بادی و خورشیدی نیز در شبکه حضور دارند و با این فرض که نوسانات بار هم به حالت ۲ اضافه شده است، این نیروگاه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر سعی می‌کنند تا تعادل توان را بین تولید و مصرف را در هر ساعت برقرار نمایند. در این حالت، منابع تولید انرژی هم دچار

به شرایط سیستم در آن ساعت با ساعت‌های قبل و بعد متفاوت است. واضح است که فرکانس نقطه کار در هر یک از چهار مرحله حذف بار در حالت ۱ بیشتر از حالت ۲ است، زیرا حضور RES و نوسانات بار پایداری فرکانس را کاهش می‌دهد. بنابراین، این عدم قطعیت‌ها می‌تواند بر روند UFLS تأثیر منفی داشته باشد. در نتیجه به دلیل افزایش مقدار بار حذف‌شده، قابلیت اطمینان و امنیت سیستم کاهش می‌یابد.

هوشمند، سرعت پاسخ‌گویی به نوسانات فرکانس زیاد است و عملکرد سیستم UFLS تطبیقی مناسب‌تر ارزیابی می‌شود [۳۲] و [۳۳]. همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است، روش UFLS تطبیقی پیشنهادی بار میانگین بیشتری (۰/۴۱۹ پرونیوت) را نسبت به حالت ۱ حذف می‌کند. در این حالت، زمان تأخیر همانند مورد قبلی مقدار ثابت ۰/۲ ثانیه است. همان‌طور که از این جدول‌ها مشخص است، مقدار حذف بار در هر ساعت با توجه

جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی در حالت ۱ برای ارزیابی روش UFLS تطبیقی ساعتی پیشنهادی

ساعت	مقدار حذف بار (pu)				فرکانس نقطه کار (Hz)			
	مرحله ۴	مرحله ۳	مرحله ۲	مرحله ۱	مرحله ۴	مرحله ۳	مرحله ۲	مرحله ۱
۱	۰/۳۵۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۱۱۱	۵۸/۰۲	۵۸/۳۹	۵۸/۷۵	۵۹/۱۵
۲	۰/۳۴۰	۰/۰۵۴	۰/۰۶۸	۰/۱۱۶	۵۸/۱	۵۸/۴۴	۵۸/۸۳	۵۹/۲۵
۳	۰/۳۵۵	۰/۰۵۴	۰/۰۸۰	۰/۱۰۱	۵۸/۰۴	۵۸/۳۹	۵۸/۷۲	۵۹/۱۹
۴	۰/۳۵۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۱۰۲	۵۸/۰۳	۵۸/۴۴	۵۸/۸۸	۵۹/۱۹
۵	۰/۳۵۶	۰/۰۶۷	۰/۰۶۷	۰/۱۳۶	۵۸/۰۵	۵۸/۴	۵۸/۷۷	۵۹/۲
۶	۰/۳۵۶	۰/۰۶۰	۰/۰۷۶	۰/۱۱۰	۵۸/۰۶	۵۸/۳۸	۵۸/۷۴	۵۹/۱۸
۷	۰/۳۵۶	۰/۰۳۹	۰/۰۶۳	۰/۱۱۲	۵۸/۱	۵۸/۳۲	۵۸/۶۹	۵۹/۱۸
۸	۰/۳۵۶	۰/۰۸۷	۰/۰۵۷	۰/۱۰۶	۵۸/۱	۵۸/۴۷	۵۸/۸۵	۵۹/۱۷
۹	۰/۳۵۷	۰/۰۳۰	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۵۸/۰۹	۵۸/۴۴	۵۸/۸۳	۵۹/۱۶
۱۰	۰/۳۵۷	۰/۰۲۹	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۵۸/۱۵	۵۸/۳۴	۵۸/۶۱	۵۹/۱۵
۱۱	۰/۳۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۱۱۳	۵۸/۰۱	۵۸/۴۷	۵۸/۸۷	۵۹/۱۳
۱۲	۰/۳۹۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۱۰۲	۵۷/۹۴	۵۸/۲۲	۵۸/۵۸	۵۹/۰۸
۱۳	۰/۳۸۰	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۵۸/۰۹	۵۸/۴۵	۵۸/۸۲	۵۹/۱۲
۱۴	۰/۴۱۲	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۱۱۶	۵۷/۸۹	۵۸/۲۱	۵۸/۴۳	۵۹/۰۳
۱۵	۰/۴۵۵	۰/۰۴۹	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۵۷/۶۸	۵۸/۰۷	۵۸/۳۱	۵۸/۸۹
۱۶	۰/۳۸۸	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۱۴۷	۵۷/۹۹	۵۸/۳۸	۵۸/۷۹	۵۹/۱۱
۱۷	۰/۳۹۵	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۵۸/۰۱	۵۸/۲۸	۵۸/۵۱	۵۹/۰۵
۱۸	۰/۴۷۳	۰/۱۰۸	۰/۱۲۴	۰/۱۴۱	۵۷/۶	۵۸/۰۳	۵۸/۴۹	۵۸/۸۵
۱۹	۰/۵۰۶	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۱۹۹	۵۷/۴۸	۵۷/۹۶	۵۸/۲۸	۵۸/۷۵
۲۰	۰/۴۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۱۵۰	۵۷/۶۶	۵۸/۰	۵۸/۳۷	۵۸/۸۱
۲۱	۰/۴۴۲	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	۵۷/۸۸	۵۸/۲۰	۵۸/۵۹	۵۸/۹۲
۲۲	۰/۴۱۲	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶	۰/۱۲۰	۵۷/۹۲	۵۸/۳۹	۵۸/۷۱	۵۹/۰۲
۲۳	۰/۳۹۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۵۸/۰۱	۵۸/۴۳	۵۸/۷۳	۵۹/۰۹
۲۴	۰/۳۶۴	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۵۸/۰۳	۵۸/۳۴	۵۸/۶۲	۵۸/۱۴

میانگین حذف بار = ۰/۳۹۲ پرونیوت

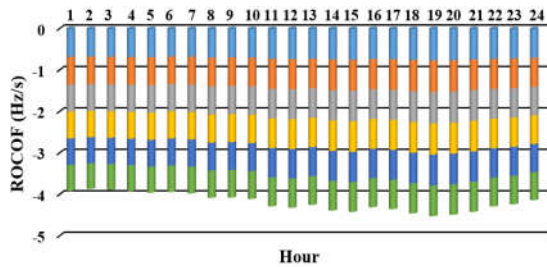
جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی در حالت ۲ برای ارزیابی روش UFLS تطبیقی ساعتی پیشنهادی

ساعت	مقدار حذف بار (pu)				فرکانس نقطه کار (Hz)				
	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	
۱	۵۹/۱۶	۵۸/۷۹	۵۸/۳۵	۵۸/۰۴	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸	۰/۰۹۸	۰/۰۴۲	۰/۳۵۶
۲	۵۹/۱۲	۵۸/۸۵	۵۸/۴۷	۵۸/۱۱	۰/۱۷۶	۰/۰۹۵	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۳۵۶
۳	۵۹/۱۸	۵۸/۷۹	۵۸/۴۲	۵۸/۰۵	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۳۵۶
۴	۵۹/۱۵	۵۸/۸۹	۵۸/۴۲	۵۸/۰۴	۰/۱۱۹	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷	۰/۰۴۴	۰/۳۵۷
۵	۵۹/۱۷	۵۸/۷۵	۵۸/۳۸	۵۸/۰۲	۰/۱۲۳	۰/۱۲۳	۰/۰۹۳	۰/۰۱۸	۰/۳۵۷
۶	۵۹/۱۶	۵۸/۷۳	۵۸/۳۵	۵۸/۰۵	۰/۱۰۷	۰/۱۰۷	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۳۵۷
۷	۵۹/۱۵	۵۸/۷۶	۵۸/۳۷	۵۸/۱۱	۰/۱۲۱	۰/۱۲۱	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۳۶۲
۸	۵۹/۰۹	۵۸/۷۸	۵۸/۳۸	۵۸/۰۹	۰/۱۹۲	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۰/۰۵۵	۰/۳۷۹
۹	۵۹/۱۸	۵۸/۸۶	۵۸/۵۴	۵۸/۱۱	۰/۰۹۲	۰/۰۹۲	۰/۰۹۲	۰/۰۹۲	۰/۳۶۸
۱۰	۵۹/۱۲	۵۸/۷۲	۵۸/۳۸	۵۸/۱۲	۰/۱۱۶	۰/۱۱۶	۰/۱۱۶	۰/۰۳۸	۰/۳۸۶
۱۱	۵۹/۰۶	۵۸/۷۵	۵۸/۴۳	۵۷/۹۵	۰/۱۶۰	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۴۰۹
۱۲	۵۹/۰۰	۵۸/۴۷	۵۸/۱۹	۵۷/۹۱	۰/۱۶۵	۰/۱۰۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۴۲۰
۱۳	۵۹/۱	۵۸/۷۷	۵۸/۳۹	۵۸/۰۳	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۴۰۰
۱۴	۵۸/۹۳	۵۸/۵۴	۵۸/۱۹	۵۷/۸۱	۰/۱۸۰	۰/۱۱۰	۰/۱۱۰	۰/۰۵۰	۰/۴۵۰
۱۵	۵۸/۷۷	۵۸/۳۸	۵۷/۹۲	۵۷/۷۹	۰/۱۹۰	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸	۰/۴۸۴
۱۶	۵۹/۰۴	۵۸/۷۳	۵۸/۳۷	۵۷/۹۹	۰/۱۹۰	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۴۰۹
۱۷	۵۸/۸۱	۵۸/۴۳	۵۸/۱۷	۵۷/۸۷	۰/۲۶۴	۰/۰۸۸	۰/۰۶۴	۰/۰۴۶	۰/۴۴۲
۱۸	۵۸/۶۸	۵۸/۲۶	۵۷/۸۵	۵۷/۳۹	۰/۲۲۹	۰/۰۹۹	۰/۰۹۹	۰/۰۹۹	۰/۵۲۶
۱۹	۵۸/۴۵	۵۸/۱۱	۵۷/۶۵	۵۷/۲۲	۰/۳۳۳	۰/۱۲۴	۰/۱۱۱	۰/۰۲۹	۰/۵۹۷
۲۰	۵۸/۸۶	۵۸/۳۳	۵۷/۹۶	۵۷/۶	۰/۱۹۶	۰/۱۰۰	۰/۱۲۱	۰/۱۱۴	۰/۵۳۱
۲۱	۵۸/۷۵	۵۸/۴۵	۵۸/۰۲	۵۷/۸۲	۰/۱۱۹	۰/۱۱۹	۰/۱۱۹	۰/۱۱۹	۰/۴۷۶
۲۲	۵۹/۱۷	۵۸/۴۲	۵۸/۰۲	۵۷/۸۶	۰/۱۸۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۰۶۲	۰/۴۶۵
۲۳	۵۸/۹۵	۵۸/۴۴	۵۸/۱۱	۵۷/۹۰	۰/۱۰۷	۰/۱۰۷	۰/۱۰۷	۰/۱۰۷	۰/۴۲۸
۲۴	۵۹/۱۲	۵۸/۷۲	۵۸/۳۸	۵۸/۱۲	۰/۱۱۶	۰/۱۱۶	۰/۱۱۶	۰/۰۳۸	۰/۳۸۶

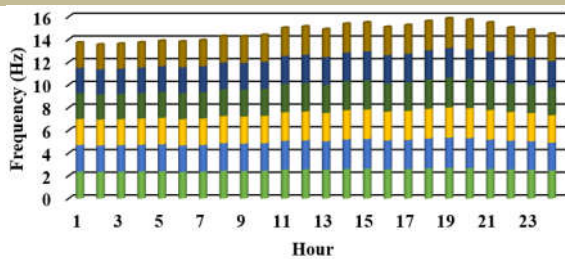
میانگین حذف بار = ۰/۴۱۹ پرونیست

شکل‌ها نمودارهای میله‌ای مقدار ROCOF را در هر ساعت برای سناریوهای ۱ تا ۶ ارائه می‌دهند و هر بخش از این نمودارها بیانگر یک سناریوی مشخص است. در اینجا مقدار ROCOF با توجه به شرایط ساعتی و همچنین شدت پیشامد متفاوت است. در حالت ۲، مقدار ROCOF به دلیل وجود منابع عدم قطعیت RES و نوسانات بار و به تبع آن افزایش انحراف فرکانس، به طور چشمگیری بیشتر از مقدار حالت ۱ است. بنابراین، RES با افزایش ثابت اینرسی معادل سیستم، مقدار ROCOF را در هر سناریو افزایش می‌دهد و در نتیجه، مقدار بار حذف شده نیز افزایش می‌یابد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، مقدار $|f_0 - f_{nadir}|$ را در هر ساعت به ترتیب برای شش سناریو در حالت‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند. در حالت ۲، با حضور RES و نوسانات بار، مقدار $|f_0 - f_{nadir}|$ نسبت به حالت ۱ افزایش یافته است. در اینجا افزایش نوسانات توان سرعت افت

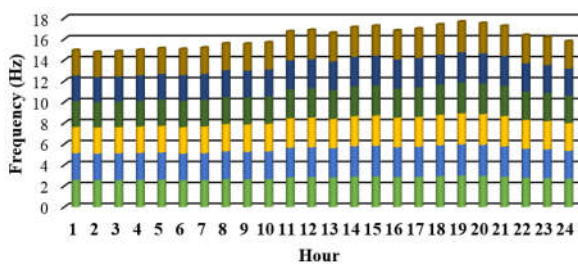
شکل‌های (۷) و (۸)، شکل موج‌های فرکانس ناشی از اعمال سیستم UFLS تطبیقی پیشنهادی را در یک افق زمانی ۲۴ ساعته به ترتیب در حالت‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، انحراف فرکانس در حالت ۱ کم‌تر از حالت ۲ است و حداقل فرکانس حالت پایدار در دوره ۲۴ ساعته در حالت ۱ به میزان ۵۹/۶۲ هرتز است که در حالت ۲ به ۵۹/۵۰۳ هرتز کاهش یافته. این امر ناشی از تأثیر منفی RES و نوسانات بار بر فرکانس سیستم است. با این حال، سیستم UFLS تطبیقی پیشنهادی توانسته است که فرکانس سیستم را در تمام ساعات به محدوده امن بازگرداند و از سقوط فرکانس سیستم جلوگیری نماید. در حالت ۲، انحراف اولیه فرکانس نسبت به حالت ۱ به طور چشمگیری افزایش یافته است. شکل‌های (۹) و (۱۰) مقادیر ROCOF را برای افق زمانی ۲۴ ساعته در حالت‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشان می‌دهند. در این



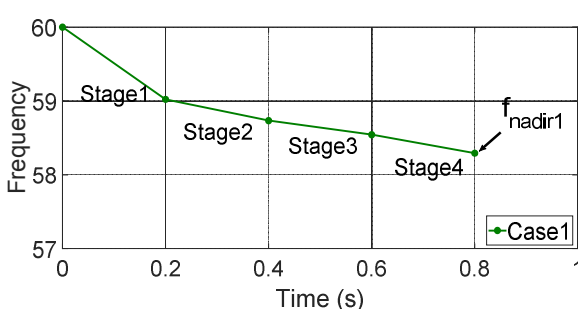
شکل (۱۰): تغییرات ROCOF از ساعت ۱ تا ساعت ۲۴ در حالت ۲



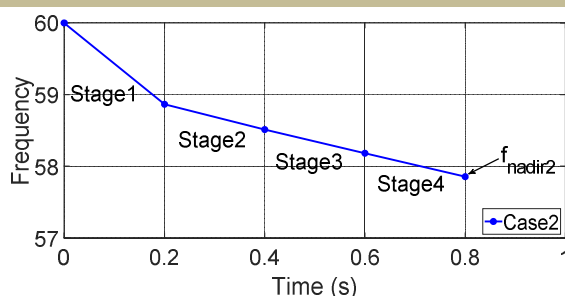
شکل (۱۱): تغییرات $|f_0 - f_{nadir}|$ از ساعت ۱ تا ساعت ۲۴ در حالت ۱



شکل (۱۲): تغییرات $|f_0 - f_{nadir}|$ از ساعت ۱ تا ساعت ۲۴ در حالت ۲

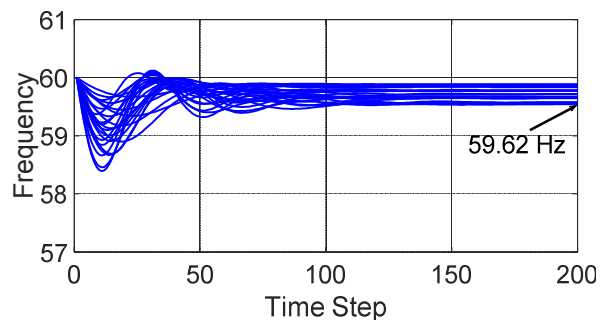


شکل (۱۳): مراحل مختلف حذف بار در حالت ۱

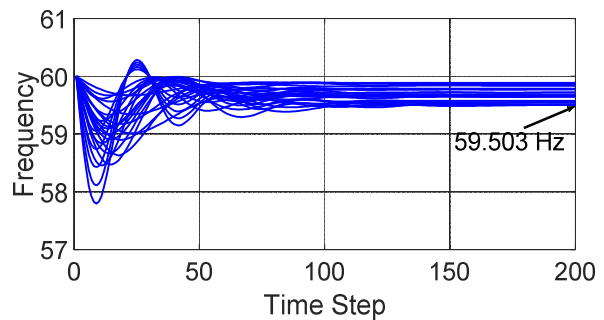


شکل (۱۴): مراحل مختلف حذف بار در حالت ۲

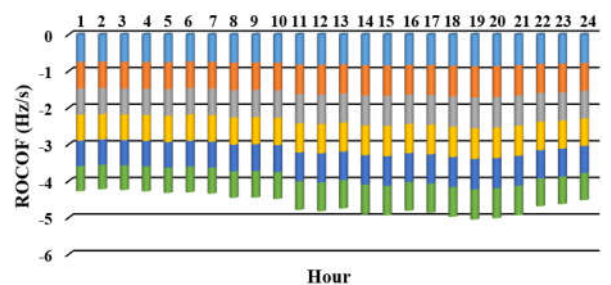
فرکانس در اثر افزایش مقدار ROCOF را در حالت ۲ بیشتر نموده و سبب کاهش بیشتر مقدار f_{nadir} می‌شود. لذا مشهود است که اگر رله زیرفرکانسی به سرعت کاهش فرکانس شدید را تشخیص ندهد، فروپاشی احتمالی فرکانس و در نتیجه خاموشی سراسری در سیستم رخ می‌دهد. در شکل (۱۳) و (۱۴)، استراتژی UFLS تطبیقی پیشنهادی برای حالت‌های ۱ و ۲ در چهار مرحله نشان داده شده است. در اینجا همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، مقدار f_{nadir} در حالت ۱ بیشتر از حالت ۲ است. علاوه بر این، نقطه کار فرکانس در هر مرحله حذف بار، در حالت ۲ نسبت به حالت ۱ کاهش یافته است. شیب هر مرحله بیانگر مقدار ROCOF است. با مقایسه این دو شکل مشخص است که شیب حذف بار در حالت ۱ نسبت به حالت ۲ کمتر است، در نتیجه مقدار حذف بار نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۷): شکل موج فرکانس در یک افق زمانی ۲۴ ساعته در حالت ۱



شکل (۸): شکل موج فرکانس در یک افق زمانی ۲۴ ساعته در حالت ۲



شکل (۹): تغییرات ROCOF از ساعت ۱ تا ساعت ۲۴ در حالت ۱

یافته است. بنابراین امنیت و قابلیت اطمینان سیستم در حالت ۲ کاهش یافته است. با این حال در حالت ۲ نیز با وجود افزایش مقدار بار حذف‌شده، سیستم UFLS تطبیقی ساعتی با موفقیت توانسته است که فرکانس سیستم را به ناحیه ایمن بهره‌برداری برساند.

با توجه به تعریف ELNS، هرچه قدر مقدار آن کمتر باشد، امنیت و قابلیت اطمینان سیستم بیشتر می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، مقادیر شاخص ELNS در حالت‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۱۴/۶۸۸ و ۱۹/۰۳۲ است. از این رو مقدار ELNS در حالت ۲ نسبت به حالت ۱ به دلیل حضور منابع عدم قطعیت افزایش

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی روش UFLS تطبیقی غیرساعتی در حالت‌های ۱ و ۲

حالت	فرکانس نقطه کار (Hz)				مقدار حذف بار (pu)			
	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴
۱	۵۹/۰۲	۵۸/۷۳	۵۸/۵۴	۵۸/۲۹	۰/۱۰۳	۰/۱۹۵	۰/۰۷۴	۰/۰۶۱
۲	۵۸/۸۶	۵۸/۵۱	۵۸/۱۸	۵۷/۸۵	۰/۱۱۴	۰/۱۷۰	۰/۱۴۹	۰/۱۰۰

جدول (۷): نتایج شبیه‌سازی UFLS غیرتطبیقی با فرض ثابت بودن مقدار فرکانس آستانه حذف بار و مقدار بار حذف‌شده در هر مرحله

حالت	فرکانس نقطه کار (Hz)				مقدار حذف بار (pu)			
	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴
۱	۵۸/۹۳	۵۸/۶۱	۵۸/۳۳	۵۸/۰۱	۰/۱۰۹	۰/۱۱۸	۰/۱۱۰	۰/۱۲۰
۲	۵۸/۵۵	۵۸/۳۹	۵۸/۸۸	۵۷/۷۴	۰/۱۲۱	۰/۱۸۹	۰/۱۵۵	۰/۱۱۰

ساعتی افزایش یافته که در این حالت، مقدار ۰/۵۳۳ پریونیت از بار حذف شده است. همچنین مشاهده شده است که مقدار تعیین‌شده نقطه کار فرکانس در مقایسه با روش UFLS تطبیقی ساعتی کاهش یافته و بنابراین خطر فروپاشی فرکانس سیستم در روش تطبیقی ساعتی کمتر است. بنابراین، همان‌طور که مشاهده شد، در استراتژی UFLS تطبیقی ساعتی با توجه به شرایط خاص هر ساعت، حذف بار زیرفرکانس با دقت بیشتری انجام می‌شود. هرچه فاصله زمانی در تنظیم پارامترهای رله کوچک‌تر باشد (برای مثال، فاصله زمانی پانزده دقیقه به جای یک ساعت) مقدار حذف بار کمتر است، اما زمان اجرای برنامه بسیار افزایش می‌یابد و این باعث کاهش کارایی روش پیشنهادی می‌شود. بنابراین باید مصالحه‌ای بین پیچیدگی و دقت حل مسئله صورت گیرد. در جدول (۷)، یک وضعیت غیرتطبیقی نشان داده شده که در آن مقدار فرکانس آستانه مراحل حذف بار و مقدار بار حذف‌شده در هر مرحله ثابت است. با توجه به این جدول، در حالت‌های ۱ و ۲ به ترتیب مقدار ۰/۴۵۷ و ۰/۵۷۵ پریونیت از بار حذف گردیده که بیشتر از مقدار متوسط بار حذف‌شده در همین حالت‌ها (به ترتیب ۰/۳۹۲ و ۰/۴۱۹ پریونیت) در جداول (۱) و (۲) است. این امر نشان‌دهنده برتری روش تطبیقی نسبت به روش غیرتطبیقی بوده و بنابراین مقدار بار حذف‌شده در حالت تطبیقی کمتر از حالت غیرتطبیقی است. در حالت غیرتطبیقی مقدار فرکانس آستانه هر مرحله پایین‌تر از حالت تطبیقی است.

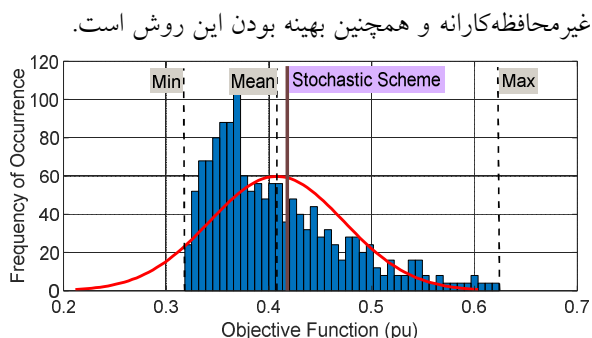
در جدول (۸)، هریک از سناریوها، به‌طور جداگانه برای

جدول (۸): متوسط مقدار بار حذف‌شده برای هر سناریو برای ۲۴

شماره سناریو	متوسط مقدار بار حذف‌شده برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز
۱	۰/۲۷۲
۲	۰/۳۳۱
۳	۰/۳۸۶
۴	۰/۴۲۹
۵	۰/۴۶۱
۶	۰/۴۹۵

۲.۳. بحث و مقایسه

در این بخش پارامترهای رله به‌صورت ساعتی تنظیم نشده‌اند و تنظیم مشابهی در تمام ساعات ارائه می‌شود. از این رو محتمل‌ترین سناریوها از جمله ملایم‌ترین، میانی و شدیدترین سناریوها، با فرایند مشابه قسمت قبل تولید می‌شوند. سپس پارامترهای رله زیرفرکانسی با استفاده از فرمول‌بندی MILP تنظیم می‌شوند. در جدول (۶)، نتایج شبیه‌سازی برای سیستم UFLS غیرساعتی در دو حالت ۱ و ۲، مشابه بخش قبلی نشان داده شده است. در روش UFLS تطبیقی پیشنهادی ساعتی، میانگین مقدار حذف بار در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز معیار مقایسه است. مطابق این جدول، میزان بار حذف‌شده در حالت ۱ در مقایسه با حالت مشابه در استراتژی UFLS تطبیقی ساعتی، بیشتر بوده و به مقدار ۰/۴۳۳ پریونیت رسیده است. در حالت ۲ نیز میزان بار اضافی حذف‌شده در مقایسه با حالت ۲ روش



شکل (۱۵): هیستوگرام روش آماری MCS و مقایسه آن با روش تصادفی

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، یک طرح UFLS تطبیقی در شبکه‌های هوشمند پیشنهاد شده است. در طرح مربوط، فرایند حذف بار بر اساس فرمول بندی MILP در زمان واقعی صورت می‌گیرد. پارامترهای رله زیرفرکانسی شامل فرکانس نقطه کار، تأخیر زمانی و بلوک حذف بار در هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه روز تنظیم می‌شود. بنابراین، شش سناریوی مختلف در هر ساعت توسط فرایند RWM، MCS و الگوریتم کاهش سناریو تولید شده است.

سپس با توجه به همه شرایط سیستم، تابع هدف طی یک افق زمانی ۲۴ ساعته بهینه شده است. طبق نتایج به دست آمده، RES با کاهش ظرفیت اینرسی سیستم، اثرات منفی بر پاسخ فرکانسی سیستم خواهد داشت و لذا این منابع به همراه نوسانات بار، مقدار بار حذف شده را افزایش داده‌اند. سرانجام، نتایج استراتژی پیشنهادی با نتایج UFLS غیرساعتی مقایسه شده است. روش پیشنهادی در شرایط مختلف بهره‌برداری سیستم قدرت بسیار تطبیق پذیر است. با توجه به دقت بالای استراتژی پیشنهادی، این روش می‌تواند مشکلات مرتبط با روش‌های حذف بار متداول را کاهش و پایداری سیستم نیرو را ارتقا دهد. دستاوردهای این مقاله در زیر خلاصه شده است:

- ✓ از فناوری‌های شبکه هوشمند می‌توان برای افزایش بهره‌وری طرح‌واره‌های محافظتی UFLS استفاده کرد. هرچه سرعت این وسایل و ادوات اندازه‌گیری بیشتر باشد، فرایند حذف بار سریع‌تر است و بازگشت فرکانس هم به محدوده ایمن با شتاب بیشتری انجام می‌شود.
- ✓ از آنجا که مدل دقیق ریاضی رله زیرفرکانسی به دست آمده، نتایج شبیه‌سازی‌ها نزدیک به واقعیت است. لذا در این روش، طرح‌واره‌های UFLS مبتنی بر حدس اولیه یا سعی و خطا کاربرد ندارند.

تنظیم پارامترهای رله زیرفرکانسی به کار برده شده است. متوسط مقدار حذف بار برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز در این جدول نشان داده شده است. فرض شود که مقدار بار حذف‌شده در سناریوی ۱، به‌طور ثابت برای تنظیم پارامترهای رله زیرفرکانسی در نظر گرفته شود؛ در این حالت سیستم در برابر اغتشاشات شدیدتر محافظت نمی‌شود. همچنین اگر پارامترهای رله زیرفرکانسی با به‌کارگیری سناریوی ۶ که شامل شدیدترین اغتشاش در بین ۶ سناریوی انتخابی است تنظیم گردد، در اغتشاشات ضعیف‌تر مقدار زیاد و غیرلازمی از بار حذف می‌شود که در این حالت بهینگی طرح حذف بار زیرفرکانسی زیر سؤال می‌رود. لذا در اجرای طرح پیشنهادی شرط ثابت بودن مقدار بار حذف‌شده و فرکانس آستانه، سبب می‌شود مقدار بار حذف‌شده به‌طور بهینه حذف نشود. این امر هم هزینه اضافی بر سیستم و مصرف‌کننده تحمیل می‌کند و هم موجب می‌شود حفاظت سیستم در برابر بعضی اغتشاشات شدیدتر صورت نگیرد.

برای تأیید روش پیشنهادی، یک استراتژی MCS برای مقایسه آن با طرح‌واره حذف بار زیرفرکانسی تطبیقی استفاده شده است. در MCS اجراشده، ۱۰۰۰ سناریوی تصادفی با توجه به عدم قطعیت‌های ناشی از RES، نوسانات بار و پیشامد اتفاقی تولید می‌شود. هیستوگرام آماری و تابع توزیع احتمال نرمال متناسب با آن در شکل (۱۵) نشان داده شده است. حداکثر، حداقل، میانگین و انحراف معیار مقدار حذف بار که با اجرای MCS به دست آمده، به ترتیب ۰/۶۲۱۹، ۰/۳۲۳۶، ۰/۴۰۷۶ و ۰/۰۶۵۳ پریونیت است. مقدار میانگین بهینه حذف بار ساعتی تصادفی در حالت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از RES، نوسانات بار و پیشامد اتفاقی برابر مقدار ۰/۴۱۹ پریونیت است که می‌تواند با توجه به مقادیر آماری هیستوگرام مبتنی بر MCS به‌عنوان یک راه‌حل بهینه در نظر گرفته شود. همان‌طور که از این شکل مشخص است، فاصله معقولی بین حداقل و حداکثر مقادیر حاصل از روش آماری MCS با مقدار متوسط حذف بار پیشنهادی تصادفی ساعتی وجود دارد و با توجه به اینکه روش تصادفی پیشنهادی بار محاسباتی کمتری نسبت به MCS دارد، بیانگر

پارامتر توان خروجی نامی (P_{rated})، سرعت باد قطع افزایشی ابتدایی (v_{cut-in})، سرعت باد نامی (v_{rated}) و سرعت باد قطع کاهشی انتهایی ($v_{cut-out}$) است. توان خروجی (P) یک واحد نیروگاهی بادی توسط رابطه (۱-پ) تقریب زده می‌شود [۳۴].

$$P = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{cut-in} \\ P_{rated} \frac{(v - v_{cut-in})}{(v_{rated} - v_{cut-in})} & v_{cut-in} \leq v \leq v_{rated} \\ P_{rated} & v_{rated} \leq v \leq v_{cut-out} \\ 0 & v_{cut-out} \leq v \end{cases} \quad (1-p)$$

نیروگاه خورشیدی

در پنل‌های خورشیدی مستقر در نیروگاه‌های خورشیدی، شدت تابش خورشید و دمای سطح پنل تأثیر چشمگیری بر روی توان خروجی آن دارد. با تغییر تابش نور خورشید در ساعات مختلف شبانه‌روز و همچنین شرایط آب‌وهوایی متفاوت، خروجی نیروگاه خورشیدی بین صفر تا مقدار نامی آن تغییر می‌کند. این نوسانات ایجادشده در توان خروجی نیروگاه خورشیدی بر کیفیت توان آن تأثیر فراوانی می‌گذارد. یک مدل ریاضی ساده برای تعریف سیستم قدرت خورشیدی استفاده می‌شود که در روابط (۲-پ) و (۲-ب) آورده شده است.

$$T_c = T_a + ((NOCT - 20) / 800) \cdot G_{ir} \quad (2-p)$$

$$P_{pv} = N_{pv} (G_{ir} + G_{ref}) (P_{max} + B_c \cdot (T_c - T_{c,ref})) \quad (2-b)$$

در این روابط، T_c دمای سلول خورشیدی ($^{\circ}C$)، $T_{c,ref}$ دمای مرجع سلول خورشیدی ($^{\circ}C$)، T_a دمای محیطی که در این رساله $25^{\circ}C$ فرض شده، $NOCT$ دمای بهره‌برداری نرمال سلول ($^{\circ}C$)، G_{ir} مجموع شدت اشعه خورشیدی ساعتی (W/m^2)، G_{ref} شدت اشعه خورشیدی مرجع (W/m^2)، N_{pv} تعداد پنل خورشیدی، P_{max} توان حداکثر در شرایط آزمایشی استاندارد و B_c ضریب بهره‌وری دما ($per^{\circ}C$) است [۳۵].

✓ فرکانس سیستم در برابر انواع عدم قطعیت‌های موجود در شبکه هوشمند محافظت شد.

✓ تأثیر منفی عدم قطعیت‌های RES و نوسانات بار بر فرکانس و مقدار بار حذف‌شده مشخص گردید.

✓ ادغام RES و نوسانات بار به همراه UFLS تطبیقی در شبکه هوشمند، قابلیت اطمینان، امنیت و پایدارپذیری سیستم را افزایش داد.

✓ تنظیم ساعتی پارامترهای رله UFLS تطبیقی برای هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز و با توجه به شرایط سیستم سبب افزایش کارآمدی طرح‌واره پیشنهادی و کاهش مقدار بار حذف‌شده سیستم گردید.

✓ تنظیم جداگانه پارامترهای رله UFLS تطبیقی برای هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز نتایج بهتری را نسبت به حالتی که پارامترهای رله به‌طور یکسان برای کل ۲۴ ساعت تنظیم می‌شوند، خواهد داشت.

برای انجام کارهای آینده پیشنهاد می‌شود که این روش بر روی شبکه توزیع یا ریزشبکه با در نظر گرفتن خصوصیات مربوط به هر کدام از این شبکه اجرا گردد.

پیوست

در این بخش، مدل ریاضی نیروگاه بادی و خورشیدی به‌طور اختصار آورده شده است. در اینجا با تقریب مناسبی، از تابع توزیع نرمال برای مدل‌سازی رفتار توأم با عدم قطعیت توان تولیدی بادی و خورشیدی استفاده شده است.

نیروگاه بادی

پارامترهای مقیاس و شکل توزیع مدل نیروگاه بادی از مقدار میانگین و انحراف استاندارد سرعت باد حاصل می‌شود. مدل غیرخطی مشخصه توان خروجی به سرعت باد ورودی شامل چهار

مراجع

- [1] Laghari, JA., Mokhlis, H., Karimi, M., Bakar, AHA. and Mohamad, H., "A new under-frequency load shedding technique based on combination of fixed and random priority of loads for smart grid applications", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 5, pp. 2507-2515, 2015.
- [2] Tabandeh, A., Abdollahi, A. and Rashidinejad, M. "Reliability constrained congestion management with uncertain negawatt demand response firms considering repairable advanced metering infrastructures", Energy, Vol. 104, pp. 213-228, 2016.
- [3] Rudez, U. and Mihalic, R., "WAMS-based underfrequency load shedding with short-term frequency prediction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 4, pp. 1912-1920, 2016.
- [4] Rudez, U. and Mihalic, R., "Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive underfrequency load-shedding schemes", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 2, pp.

- 839-846, 2011.
- [5] Abdelwahid, S., Babiker, A., Eltom, A. and Kobet, G., "Hardware implementation of an automatic adaptive centralized underfrequency load shedding scheme", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 6, pp. 2664-2673, 2014.
- [6] Xia, N., Gooi, HB., Abur, A., Chen, SX., Eddy, YSF. and Hu W., "Enhanced state estimator incorporating adaptive underfrequency load shedding under contingencies via the alternating optimization method", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 81, pp. 239-247, 2016.
- [7] Santos, AQ., Monaro, RM., Coury, DW. and Oleskovicz, M., "A new real-time multi-agent system for under frequency load shedding in a smart grid context", Electric Power Systems Research, Vol. 174, 105851, 2019.
- [8] Talaat, M., Yatata, AY., Alsayyari, AS. and Alblawi, A., "A smart load management system based on the grasshopper optimization algorithm using the under-frequency load shedding approach", Energy, Vol. 190, 116423, 2020.
- [9] Aparicio, N., Villalba, SA., Belenguer, E., Gimenez, RB., "Automatic under-frequency load shedding mal-operation in power systems with high wind power penetration", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 146, pp. 200-209, 2018.
- [10] Gu, W., Liu, W., Zhu, J., Zhao, B., Wu, Z., Luo, Z. and Yu, J., "Adaptive decentralized under-frequency load shedding for islanded smart distribution networks", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, pp. 886-895, 2014.
- [11] Li, H., Wang, J., Du, Z., Zhao, F., Liang, H. and Zhou, B., "Frequency control framework of power system with high wind penetration considering demand response and energy storage", The Journal of Engineering, Vol. 13, pp. 1153-1158, 2017.
- [12] He, P., Wen, B. and Wang, H., "Decentralized adaptive under frequency load shedding scheme based on load information", IEEE Access, Vol. 7, pp. 52007-52014, 2019.
- [13] Banijamali, SS. and Amraee, T., "Semi-adaptive setting of under frequency load shedding relays considering credible generation outage scenarios", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, pp. 1098-1108, 2019.
- [14] Shekari, T., Gholami, A. and Aminifar, F. Sanaye-Pasand, "An adaptive wide-area load shedding scheme incorporating power system real-time limitations", IEEE Systems Journal, Vol. 12, pp. 759-767, 2018.
- [15] Atighechi, H., Hu, P., Ebrahimi, S., Lu, J., Wang, G. and Wang, L., "An effective load shedding remedial action scheme considering wind farms generation", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 95, pp. 353-363, 2018.
- [16] Amraee, T., Darenaghi, MG., Soroudi, A. and Keane, A., "Probabilistic under frequency load shedding considering RoCoF relays of distributed generators", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, pp. 3587-3598, 2018.
- [17] Darebaghi, MG. and Amraee, A., "Dynamic multistage under frequency load shedding considering uncertainty of generation loss", IET Generation, Transmission, Distribution, Vol. 11, pp. 3202-3209, 2017.
- [18] Zhenglong, S., Guowei, C., Yuwei, W. and Jiarong, S., "A method for the design of UFLS schemes of regional power system using improved frequency response model", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 2365, pp. 1-11, 2017.
- [19] Ketabi, A. and Fini, MH., "Adaptive under frequency load shedding using particle swarm optimization algorithm", Journal of Applied Research and Technology, Vol. 15, pp. 54-60, 2017.
- [20] Moazzami, M., Khodabakhshian, A. and Hooshmand, RA., "A new optimal under-frequency load-shedding method using hybrid culture-particle swarm optimization-co-evolutionary algorithm and artificial neural networks", Electric Power Components and Systems, Vol. 43, pp. 69-82, 2015.
- [21] Gomez, C., Qadri, SS. and Galiana, F., "Under-frequency load shedding via integer programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, PP. 1387-1394, 2012.
- [22] Rudez, U. and Mihalic, R., "Predictive underfrequency load shedding scheme for islanded power systems with renewable generation", Electric Power Systems Research, Vol. 126, pp. 21-28, 2015.
- [23] Wu, L., Shahidepour, M. and Li, T., "Cost of reliability analysis based on stochastic unit commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1364-1374, 2008.
- [24] Amjadi, N., Aghaei, J. and Shayanfar, H. A., "Stochastic multiobjective market clearing of joint energy and reserves auctions ensuring power system security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 1841-1854, 2009.
- [25] Rezaei, N. and Kalantar, M., "Stochastic frequency-security constrained energy and reserve management of an inverter interfaced islanded microgrid considering demand response programs", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 69, pp. 273-286, 2015.
- [26] Rezaei, N. and Kalantar, M., "Hierarchical energy and frequency security pricing in a smart microgrid: An equilibrium inspired epsilon constraint based multi-objective decision making approach", Energy Conversion and Management, Vol. 98, pp. 533-543, 2015.
- [27] Rezaei, N. and Kalantar, M., "Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework", Energy

- Conversion and Management, Vol. 92, pp. 287-301, 2015. □
- [28] Kundur, P., Balu, N. and Lauby, M. *Power System Stability and Control*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [29] Rezaei, N. and Kalantar, M., "*Economic–environmental hierarchical frequency management of a droop-controlled islanded microgrid*", Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 498–515, 2014.
- [30] Pai, A., *Energy function analysis for power system stability*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [31] U.S. Energy Information Administration, 1000 Independence Ave., SW, Washington, DC 20585, U.S. Energy Information Administration, 1000 Independence Ave., SW, Washington, DC 20585. <https://www.eia.gov/dashboard/newengland/overview>
- [32] Vatani, M., Amraee, T., Ranjbar, and Mozaffari, B., "*Multi-Stage under frequency load shedding relay in islanded distribution systems*", JEM. Vol. 7, No. 4, pp. 2-11, 2018.
- [33] Abrisham Foroushan Asl, S., Gandomkar, M. and Nikoukar, J., "*System stability-constrained optimal protection coordination in the microgrid including renewable energy sources and energy storage*" JEM. Vol.11, No. 2, pp. 16-31, 2021.
- [34] Nguyen, T. A., Crow, M. L. and Elmore, A. C., "*Optimal sizing of a vanadium redox battery system for microgrid systems*", IEEE transactions on sustainable energy, Vol. 6, No. 3, pp.729-737, 2015.
- [35] Lan, H., Wen, S., Hong, Y. Y., David, C. Y. and Zhang, L., "*Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system*", Applied energy, Vol. 158, pp. 26-34, 2015.