

برداشت هوشمند بار و برنامه‌ریزی مجدد منابع تولید پراکنده برای توسعه عملکرد بازیابی سیستم توزیع

سلمان ثنائی^۱ محمودرضا حقی فام^۲ امیر صفدریان^۳
۱- دانشجوی دکتری- گروه برق- واحد کرج- دانشگاه آزاد اسلامی- کرج- ایران
Saha20660@yahoo.com
۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران
Haghifam@modares.ac.ir
۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف - تهران- ایران
Safdarian@sharif.edu

چکیده: پس از وقوع یک خطای دائمی در صورتی که امکان تامین بار در شبکه وجود نداشته باشد، طرح بازیابی بهینه بار این امکان را به سیستم می‌دهد که بازیابی بار با کمترین هزینه خروج، کمترین قطعی بار و در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام شود. در این مقاله طرح جدیدی به نام برداشت هوشمند بار (SLS) ارائه شده است. در طرح SLS پیشنهادی، انواع وسایل موجود در خانه‌های هوشمند به چهار دسته‌ی بارهای قابل تنظیم، قابل وقفه، قابل جابجایی و غیر قابل کنترل دسته‌بندی شده‌اند. در این طرح، یک الگوریتم دو لایه جدید برای حل مسأله بازیابی بهینه بار پیشنهاد شده است. در لایه اول، یک روش اکتشافی مبتنی بر نظریه گراف برای تجدید پیکربندی بهینه سیستم ارائه شده است. در لایه دوم برای بازیابی بهینه بار، ابزارهایی نظیر برنامه‌ریزی مجدد منابع تولید پراکنده (DGR^2)، برداشت بار، قطع بار و قطع بار حساس استفاده شده است. در این لایه، برداشت هوشمند بار بر حسب اولویت‌بندی وسایل موجود در خانه‌های هوشمند، باعث کاهش قطعی بار در خانه‌های مسکونی، کاهش قطع بارهای حساس مانند بیمارستان‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های مربوط به قطعی بار برای اپراتور سیستم توزیع می‌شود. سیستم تست روی بیلینتون ($RBTS^2$) به عنوان یک سیستم آزمون، برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی استفاده شده است. برای اعتبار سنجی، روش پیشنهادی با دو روش مهم موجود در ادبیات مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد قابل توجه طرح پیشنهادی در کاهش تلفات توان، قطع بار مسکونی، قطع بار حساس و هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بازیابی بهینه بار، برداشت هوشمند بار، برنامه‌ریزی مجدد منابع تولید پراکنده، خانه هوشمند

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.241

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمودرضا حقی فام

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

یکی از مهمترین مزایای شبکه‌های هوشمند، توانایی بازیابی آن‌ها پس از وقوع یک رخداد خطا است. با استفاده از تجهیزات ارتباطی و کنترلی شبکه‌های هوشمند، می‌توان در هنگام وقوع یک خطا در شبکه بهترین تصمیم برای بازیابی بهینه بار را اتخاذ نمود. کاهش مدت زمان خاموشی، به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم و اطمینان از تامین بار، از مهم‌ترین اهداف در بازیابی بهینه بار هستند. در شبکه‌های هوشمند آینده انتظار می‌رود به منظور کنترل و مدیریت بارها، با استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا و استفاده از کنتورهای هوشمند، امکان دسترسی به تمام تجهیزات موجود در هر خانه امکان‌پذیر باشد. [۴۰]

۱-۱- بازیابی

بازیابی یکی از مهمترین ویژگی‌های شبکه هوشمند است. در طرح بازیابی، ابتدا خطا جدا می‌شود. سپس بوسیله عملیات کلیدزنی، منطقه خطا بازیابی می‌شود. بازیابی بار با استفاده از برداشت بار و DGR انجام می‌شود. مسئله بازیابی بهینه سرویس به عنوان یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط ($MILP^6$) فرموله شده است [۱]. مدل برنامه نویسی مخروطی مرتبه دوم بر اساس تئوری تصمیم گیری شکاف اطلاعاتی ($IGDT^5$) انجام می‌شود. از آنجا که بدست آوردن توابع توزیع افزایش بار دشوار است، بهینه‌سازی برداشت بار برای به حداکثر رساندن دامنه نوسان افزایش بار توسط $IGDT$ تغییر شکل می‌یابد. مدل بهینه سازی دامنه نوسان یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط است [۲]. در [۳]، متغیرهای باینری برای نشان دادن شبکه پیکربندی شده و مدل تشکیل ریز شبکه (MG^6) به عنوان یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ($MINLP^7$) ارائه شده است. در این مقاله تقریب خطی تکرار مبتنی بر تکرار از $MINLP$ ارائه شده است که می‌توان با همگرایی روند تکرار، صحت آن را تضمین کرد. در [۴-۵]، یک روش ریاضی برای حل یک طرح بازیابی متمرکز برای سیستم‌های توزیع الکتریکی ارائه شده است. در [۶-۱۰]، با استفاده از مدل‌های $MILP$ مسئله بازیابی حل شده است. در [۱-۱۰]، مدل $MINLP$ به مدل $MILP$ تبدیل می‌شود در حالیکه در اکثر این مقالات، کاربرد طرح‌های پاسخگویی بار و استفاده از وسایل خانه‌های مسکونی هوشمند برای بازیابی بهینه سیستم توزیع هوشمند استفاده نشده است. دلیل خطی سازی مدل غیر خطی در این مقالات، دستیابی به یک راه حل بهینه سراسری است. مسئله $MILP$ توسط حل‌کننده‌های تجاری خطی حل شده است. در نتیجه، پاسخ بهینه سراسری در این مقالات تضمین می‌شود. استفاده از MG امکان بازیابی سریع و بهینه را به سیستم‌های توزیع می‌دهد [۱۱]. در [۱۲]، یک طرح جامع برای ایجاد کنترل بازیابی بهینه در سیستم توزیع ارائه شده است. در [۱۳]، هزینه کلیدزنی به

دلیل هزینه کلیدزنی زیاد و تعداد دفعات بالا در تابع هدف در نظر گرفته شده است. استراتژی جدید بازیابی با استفاده از MG ‌های مجازی در سیستم‌های توزیع ارائه شده است [۱۴-۱۷].

در [۱۱-۱۷]، از نظریه‌های مبتنی بر گراف برای بازیابی سیستم توزیع پس از خطا استفاده شده است در حالیکه این نظریه‌ها می‌توانند با کمک الگوریتم‌های هوشمند، زمان اجرا را کاهش دهند که این مورد در [۱۴] بررسی شده است. اما ضعف مرجع [۱۴]، غیرخطی بودن لایه دوم الگوریتم حل است که از حل‌کننده‌های تجاری برای حل لایه دوم استفاده شده است. این امر موجب افزایش قابل توجه در زمان اجرا می‌شود.

در [۱۸]، معماری قابل ارتقا برای وضعیت نرمال و بازیابی MG ‌های شبکه ارائه شده است. در [۱۹]، یک روش بازیابی سریع و کارآمد سیستم توزیع برای به حداکثر رساندن بازیابی بار خارج از سرویس ارائه شده است. در [۲۰]، بهینه سازی بازیابی شبکه اصلی و جزیره‌ای به طور همزمان در نظر گرفته شده است. بنابراین، الگوریتم‌های مورد استفاده یک راه حل بهینه سراسری پیدا می‌کنند. در [۲۱]، یک روش دو مرحله‌ای ایجاد شده است. در اولین گام، طرح تقسیم بهینه از طریق الگوریتم مربوط به تئوری گراف مورد بررسی قرار می‌گیرد. مرحله دوم به موارد تنظیم می‌پردازد [۲۱]. در [۲۲]، جنبه‌های کاربردی رایانه در بازیابی و جزیره سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در شرایط خاموشی، روند جزیره سازی می‌تواند برق مورد نیاز را تأمین کند [۲۲]. در [۲۳]، هنگام ایجاد خطای دائمی، جزایر برای بازیابی خدمات مشخص شده‌اند. بازیابی سیستم‌های توزیع جزیره‌ای را می‌توان به دو روش انجام داد. در روش اول، جزایر قبل از خطا ایجاد شده‌اند [۱۱-۱۲]، [۱۷-۱۸]. در حالی که در روش دوم جزایر پس از خطا تشکیل شده‌اند [۱۳-۱۶]، [۱۹]، [۲۰-۲۲]. روش دوم موثرتر است زیرا می‌تواند بارهای بیشتری را تغذیه کند.

در [۲۴]، یک روش مبتنی بر سیستم چند عامله (MAS^8) برای بازیابی با کاهش بار و اولویت‌بندی و تولید حالت جزیره‌ای با تولید پراکنده (DG^1) در شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه شده است. در [۲۵-۲۹]، یک سیستم چند عاملی برای بازیابی بارهای خارج از سرویس ارائه شده است. یک استراتژی بازیابی چند مرحله‌ای برای حل مسئله بازیابی خدمات در سیستم‌های توزیع به دلیل عدم اطمینان از زمان قطع شدن ارائه شده است [۳۰]. مفهوم MAS در شبکه‌های هوشمند برای ایجاد یک چارچوب بازیابی برای استفاده از بازیابی سرویس استفاده می‌شود [۳۱-۳۵]. ترکیبات اصلی [۳۶] شامل استفاده از تئوری گراف و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات باینری برای کلیدزنی بهینه، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و پخش بار رفت و برگشتی و برنامه‌ریزی مجدد تولید پراکنده، بررسی تأثیر بازیابی در بهبود قابلیت اطمینان، کاهش تلفات توان و کاهش برداشت بار و ارائه یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی بازیابی و یک مدل ریاضی جدید است. در [۳۹]، یک روش خودترمیمی و بازیابی

برداری سیستم به دلیل قطع کامل بار کاهش یابد و قابلیت اطمینان سیستم توزیع نیز افزایش یابد. همچنین، انواع لوازم خانگی قابل کنترل در خانه‌های هوشمند به سه دسته تقسیم می‌شوند: وسایل قابل تنظیم، قابل وقفه و قابل جابجایی. این لوازم بر اساس اهمیت و اولویت‌های تعیین شده توسط صاحبان خانه انتخاب می‌شوند.

✓ ارائه یک الگوریتم دو لایه جدید برای بازیابی بهینه

بار در سیستم توزیع:

در این طرح یک الگوریتم دو لایه جدید ارائه شده است. در لایه اول پیکربندی بهینه سیستم برای بازیابی بار تعیین می‌شود. سپس در لایه دوم بوسیله‌ی طرح SLS پیشنهادی، برداشت هوشمند بار انجام می‌شود. با توجه به اولویت‌های تعیین شده توسط صاحبان خانه، این برداشت هوشمند بار انجام می‌شود. جدید بودن این الگوریتم دو لایه، در لایه دوم و نحوه برداشت بار بوسیله‌ی طرح SLS و در نظر گرفتن DGR و بار حساس است.

✓ ارائه یک مدل ریاضی جدید:

در مدل ریاضی پیشنهادی در این مقاله چند نکته برجسته وجود دارد. اول اینکه در این مدل ریاضی، انواع وسایل موجود در خانه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین از این طریق می‌توان از این وسایل در طرح SLS استفاده کرد. نکته دوم در مدلسازی این است که طرح پیشنهادی به دلیل وجود قیود پخش بار، یک مدل غیرخطی نامحذب است و رسیدن به جواب بهینه سراسری غیر ممکن است و زمان حل بشدت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین این مدل به یک مدل خطی تبدیل شده است تا بتوان توسط حل کننده‌های تجاری خطی، رسیدن به جواب بهینه سراسری را در این مدل تضمین نمود و زمان حل برنامه را بطور قابل توجهی کاهش داد. نکته سوم در مدل پیشنهادی در نظر گرفتن اهمیت انواع قطع یا برداشت بارها در تابع هدف پیشنهادی است. با این ایده و روش، مدل پیشنهادی با توجه به هزینه‌های قطع یا برداشت بار برای هر وسیله اقدام به قطع یا برداشت بهینه بار می‌کند. ادامه این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی بازیابی بار شامل توابع هدف و محدودیت‌های فنی در حضور DGها ارائه شده است. رویکرد پیشنهادی مسأله بازیابی شبکه توزیع فعال نیز در این بخش توضیح داده شده است. در بخش سوم، برای تأیید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات شبیه سازی بر روی شبکه تست توزیع فعال ۳۰ باس برای سناریوهای مختلف خطا در مناطق مختلف با وجود ابزارهای SLS و DGR بکار می‌رود و در نهایت نتیجه‌گیری مقاله و تحقیقات آینده در بخش چهارم مورد بحث قرار گرفته است.

شبکه توزیع هوشمند مبتنی بر نظریه گراف و برش‌های اساسی ارائه شده است. در [۴۰]، رویکرد جدیدی با عنوان برداشت هوشمند بار در شبکه‌های توزیع ارائه شده است که هدف آن طراحی یک ماژول برداشت هوشمند بار در مواقعی است که امکان تامین بار بعد از وقوع خطا در شبکه وجود نداشته باشد. بازیابی بهینه بار در شبکه با کمترین هزینه خروج و در کوتاه ترین زمان ممکن در راستای جلب حداکثر رضایتمندی مشترکین فراهم شده است. در [۴۱]، بازیابی مشترکین شبکه‌ی توزیع با در نظر گرفتن زبان‌های مالی سالانه مرتبط با قطع فرآیند، مورد مطالعه قرار گرفته است. مهمترین هدف برای بازیابی مشترکین، بازیابی بیشترین بار ممکن می‌باشد. در این مقاله برای ارزیابی زبان‌های مالی مرتبط با قطع فرآیند، از مفهومی جدید در حوزه‌ی کیفیت توان به نام زمان مصونیت استفاده شده است.

در بسیاری از مقالات فوق، دسته بندی انواع وسایل موجود در خانه های هوشمند و استفاده از طرح‌های پاسخگویی بار برای کنترل وسایل خانه‌های هوشمند در نظر گرفته نشده است. اما در مقاله حاضر سطح اتوماسیون شبکه توزیع در داخل خانه‌ها لحاظ شده است که این ایده باعث می‌شود تا در مواقع اضطراری به عنوان مثال با کم کردن نور لامپ‌ها یا کاهش درجه حرارت کولرها در یک فیدر فشار ضعیف، از قطع شدن کل فیدر جلوگیری شود. به عبارت دیگر این مهم باعث کاهش خاموشی و جلب رضایت حداکثری مشترکین خواهد شد. به این دلیل که بوسیله‌ی طرح پیشنهادی، قطعی برق مشترکین در مواقع اضطراری کاهش می‌یابد. همچنین طرح پیشنهادی برای سیستم توزیع نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد چون از هزینه‌های مربوط به قطع بار برای اپراتور سیستم توزیع جلوگیری می‌شود و قطع بارهای حساس همچون بیمارستان‌ها نیز کاهش می‌یابد.

۱-۲- نوآوری و ترکیبات اصلی

در این مقاله، از طرح SLS برای ایجاد شرایط مناسب پس از انجام عملیات بازیابی بار توسط لوازم خانگی هوشمند استفاده شده است. مزیت طرح پیشنهادی برای اپراتور سیستم توزیع شامل هزینه‌های پایین بازیابی سیستم به دلیل جلوگیری از قطع بار گسترده و کاهش هزینه‌های ناشی از قطع بار سیستم است. همچنین مزیت این طرح برای صاحبان خانه، کاهش مدت زمان خاموشی، عدم قطع شدن لوازم برقی با اولویت بالا و دریافت جریمه از شرکت توزیع برق در صورت قطع وسایل با اولویت بالا است.

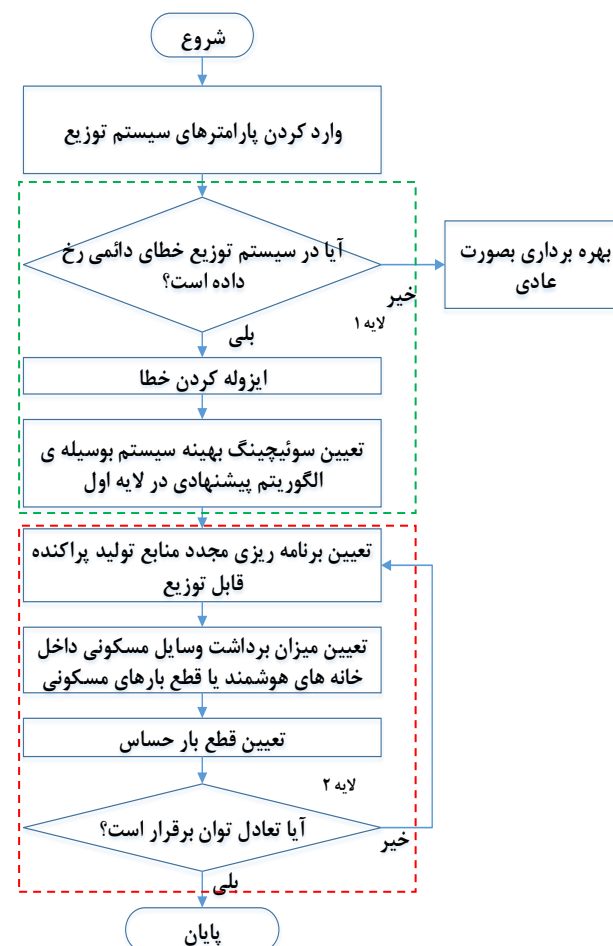
نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد.

✓ ارائه یک طرح SLS برای بهبود عملکرد بازیابی:

این طرح بوسیله‌ی ابزار اینترنت اشیا (IoT) و کنترل‌های هوشمند امکان دسترسی به لوازم داخل خانه‌های هوشمند را فراهم می‌نماید. اپراتور سیستم توزیع می‌تواند بر اساس اولویت از پیش تنظیم شده، لوازم خانگی با اولویت کم را برداشت کند تا هزینه‌های بهره-

۲- روش پیشنهادی

در این تحقیق، پس از ایجاد خطا در سیستم، ابتدا نقطه خطا از سیستم جدا و آرایش شبکه تغییر می‌کند. سپس آرایش بهینه سیستم در لایه اول تعیین می‌شود.



شکل (۱): الگوریتم روش پیشنهادی

در لایه اول الگوریتم، از نظریه گراف برای تجدید پیکربندی بهینه سیستم استفاده شده است. برای حل مسأله تجدید پیکربندی بهینه سیستم، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO^{11}) برای بررسی اینکه هیچ حلقه‌ای در سیستم وجود نداشته باشد، استفاده شده است. با توجه به این نظریه، هر شبکه با یک گراف معادل نشان داده می‌شود. هر لبه این گراف شامل کلیدهای قابل کنترل شبکه است. سپس حلقه‌های اساسی گراف مشخص می‌شوند. حلقه اساسی شامل کوچکترین حلقه ممکن و حلقه‌های مستقل است. هر یک از حلقه‌های اساسی با یک بردار توصیف شده اند که اعضای آن لبه‌های حلقه تشکیل دهنده هستند که به نام بردارهای حلقه اساسی نامیده می‌شوند. هر یک از این حلقه‌ها شامل مجموعه‌ای از کلیدهای

قابل کنترل است. حلقه‌های اساسی می‌توانند به حلقه‌های اساسی واقعی و مجازی تقسیم شوند. بنابراین اضافه کردن هر واحد میکروتوربین (MT^{12}) در شبکه، باعث ایجاد یک حلقه اساسی مجازی جدید می‌شود. پس از تعیین حلقه‌های اساسی گراف، الگوریتم تولید درخت/جنگل پوشا برای تولید یک ساختار ممکن با در نظر گرفتن محدودیت شعاعی شبکه و ضرورت تامین تمام بارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک درخت پوشا یک زیر گراف است که شامل تمام گره‌های گراف با حداقل تعداد ممکن لبه‌ها می‌باشد. در این مقاله، جنگل پوشا معادل پیکربندی ممکن شبکه است. این قانون تضمین می‌کند که ساختارهای ایجاد شده هیچ حلقه‌ای ندارند و تمام بارها به نقطه تولید متصل می‌شوند [13].

در لایه دوم پس از تعیین آرایش بهینه سیستم، هماهنگی بهینه منابع تولید پراکنده تعیین می‌شود. بوسیله هماهنگی و برنامه ریزی مجدد منابع تولید پراکنده و استفاده از ابزار برداشت یا قطع بار که در لایه دوم وجود دارد، تعادل توان در سیستم برقرار می‌شود. برداشت بار، برنامه ریزی مجدد منابع تولید پراکنده تا زمانی ادامه می‌یابد که علاوه بر برقراری تعادل توان، محدودیت‌های سیستم از جمله برقراری حد مجاز ولتاژ برقرار شود.

۳- فرمولاسیون

مدل ریاضی مسئله بازیابی برای شبکه‌های توزیع در حضور منابع DG شامل تابع هدف و محدودیت‌های فنی در این بخش ارائه شده است. شبکه توزیع به عنوان یک سیستم متعادل فرض می‌شود. یک مدل ریاضی برای نشان دادن یک طرح بازیابی بر روی یک شبکه الکتریکی شعاعی جهت مانور در حضور منابع DG متمرکز شده است که می‌تواند به عنوان یک مسئله MINLP نامحدب ارائه شود.

۳-۱- تابع هدف

در این مقاله تابع هدف دارای ۶ بخش است که نشان دهنده هزینه کل بهره‌برداری در حالت بازیابی پس از خطا است و با توجه به رابطه (۱) تعیین می‌شود. هزینه DGR برای تمام DGها طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در این بخش از تابع هدف، ترم اول شامل هزینه برنامه‌ریزی مجدد DG، ترم دوم شامل هزینه آلودگی، ترم سوم شامل هزینه تولید توان DG و ترم آخر شامل هزینه تلفات توان است. در نظر گرفتن ترم دوم و چهارم شاید در طرح بازیابی منطقی نباشد اما تلفات توان نه تنها به دلیل کاهش هزینه بلکه به کاهش برداشت یا قطع بار نیز کمک می‌کند. چون با کاهش تلفات، توان بیشتری برای تغذیه بارها در دسترس است. هزینه آلودگی نیز ممکن است در بازیابی بار موثر نباشد اما این هزینه آنقدر زیاد نیست که بخواهد باعث قطع یا برداشت بار شود و همچنین تاثیر آن زمانی مشخص می‌شود که با این هزینه اجازه ندهد که DG با آلودگی بیشتر بجای DG با آلودگی کمتر تولید توان داشته باشد. هزینه‌های مربوط به برداشت بار برای بارهای

✓ اختلاف زاویه در امتداد یک خط به قدری کم است که می‌توان $\sin \theta_k = \theta_k$ و $\cos \theta_k = 1$ را در نظر گرفت. براساس اولین فرض بالا، اندازه ولتاژ باس را می‌توان به شرح زیر در نظر گرفت:

$$V_{i,t} = 1 + \Delta V_{i,t} \quad (12)$$

جایی که $\Delta V_{i,t}^{\min} \leq \Delta V_{i,t} \leq \Delta V_{i,t}^{\max}$ بسیار کوچک است. با استفاده از فرضیات فوق داریم:

$$P_{i,t} = \sum_j (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t})(G_{i,j} + B_{i,j} \theta_{i,j,t}) \quad \forall i,t \quad (13)$$

$$Q_{i,t} = \sum_j (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t})(G_{i,j} \theta_{i,j,t} - B_{i,j}) \quad \forall i,t \quad (14)$$

روابط (۱۳) و (۱۴) (به دلیل ضرب دو متغیر در هم) همچنان غیرخطی هستند. مطابق انتظار $\Delta V_{i,t}$ ، $\Delta V_{j,t}$ و $\theta_{i,j,t}$ کوچک هستند. ضرب $\Delta V_{i,t} \cdot \theta_{i,j,t}$ و $\Delta V_{j,t} \cdot \theta_{i,j,t}$ می‌تواند بعنوان یک حالت مرتبه دوم در نظر گرفته شود. بنابراین، به دلیل کوچک بودن، این عبارات در نظر گرفته نمی‌شوند. معادلات خطی نهایی برای پخش بار به شرح زیر بدست می‌آیند:

$$P_{i,t} = \sum_j ((1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t})G_{i,j} + B_{i,j} \theta_{i,j,t}) \quad \forall i,t \quad (15)$$

$$Q_{i,t} = \sum_j (G_{i,j} \theta_{i,j,t} - (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t})B_{i,j}) \quad \forall i,t \quad (16)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶) هیچ ترمی وجود ندارد که شامل ضرب دو متغیر در هم باشد. بنابراین این معادلات خطی سازی شده‌اند. در مدل پیشنهادی برای مدلسازی روابط پخش بار، بجای روابط (۸) و (۹) از (۱۵) و (۱۶) استفاده می‌شود.

برنامه ریزی مجدد توان اکتیو و راکتیو برای هر DG با توان ظاهری همانند زیر محدود می‌شود [36]:

$$(P_{DG_{i,t}} + \Delta P_{DG_{i,t}})^2 + (Q_{DG_{i,t}} + \Delta Q_{DG_{i,t}})^2 \leq S_{DG_{i,t}}^2 \quad \forall i,t \quad (17)$$

حد بالا و پایین ولتاژ برای هر باس در حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه می‌تواند مطابق با رابطه (۱۸) تعیین شود [36]:

$$V_i^{\text{Down}} \leq V_i \leq V_i^{\text{Up}} \quad \forall \text{all nodes} \quad (18)$$

حد مجاز ولتاژ در (۱۸) پنج درصد در نظر گرفته شده است. رابطه (۱۷) نیز به دلیل غیرخطی بودن نیاز به خطی سازی دارد. برای خطی سازی آن از روابط (۱۹) تا (۲۲) استفاده می‌شود. رابطه (۱۹) معادله‌ای با متغیرهای مربع است. این محدودیت باید به صورت خطی باشد. از روش خطی سازی چند ضلعی برای تقریب ترم‌های مربعی استفاده می‌شود. شعاع دایره از چند ضلعی S انتخاب می‌شود.

$$S_i = S_{DG_{i,t}}^{\max} \sqrt{\frac{2\pi}{n} \frac{S_i}{\sin(\frac{2\pi}{n})}} \quad (19)$$

با اولویت ۱، ۲ و ۳، قطع بار و قطع بار حساس با توجه به روابط (۳-۷) به دست می‌آیند. اولویت‌های قطع یا برداشت بار برای هر وسیله و بار، توسط هزینه در نظر گرفته شده در این معادلات تعیین می‌شود.

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (1)$$

$$F_1 = \sum_i \sum_t (C_{DG_i}^{\text{Resch}} \Delta P_{DG_{i,t}} + C_{DG_i}^{\text{emi}} P_{DG_{i,t}} + C_{DG_i}^G P_{DG_{i,t}} + C_{DG_i}^{\text{loss}} P_{\text{loss}}) \quad (2)$$

$$F_2 = \sum_i \sum_h \sum_k \sum_t C^a P_{i,h,k,t}^a \quad (3)$$

$$F_3 = \sum_i \sum_h \sum_k \sum_t C^s P_{i,h,k,t}^s \quad (4)$$

$$F_4 = \sum_i \sum_h \sum_k \sum_t C^i P_{i,h,k,t}^i \quad (5)$$

$$F_5 = \sum_i \sum_h \sum_t C^{lc} P_{i,h,t}^{lc} \quad (6)$$

$$F_6 = \sum_i \sum_h \sum_t C^c P_{i,h,t}^c \quad (7)$$

۳-۲- محدودیت‌های فنی

محدودیت پخش بار اکتیو و راکتیو در هر گره با توجه به روابط (۸-۱۱) تعیین می‌شوند. از آنجایی که یکی از اصلی ترین شرایط تحدب این است که محدودیت‌های مساوی، افاین باشند محدودیت‌های (۸) و (۹) مسأله بهینه‌سازی بازیابی را نامحدب می‌کنند [13]. تعادل توان اکتیو و راکتیو بوسیله‌ی رابطه (۱۰) و (۱۱) تعیین می‌شوند. بوسیله‌ی روابط (۸-۱۱) تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس سیستم برقرار می‌شود.

$$P_{i,t} = V_{i,t} \sum_j V_{j,t} \cdot x_{i,j,t} (G_{i,j} \cos \delta_{i,j,t} + B_{i,j} \sin \delta_{i,j,t}) \quad \forall i,t \quad (8)$$

$$Q_{i,t} = V_{i,t} \sum_j V_{j,t} \cdot x_{i,j,t} (G_{i,j} \sin \delta_{i,j,t} - B_{i,j} \cos \delta_{i,j,t}) \quad \forall i,t \quad (9)$$

$$P_{i,t} = P_{i,t}^G + P_{DG_{i,t}}^{\text{DER}} + P_{DG_{i,t}}^G - P_{i,t}^D \quad \forall i,t \quad (10)$$

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^G + Q_{DG_{i,t}}^{\text{DER}} + Q_{DG_{i,t}}^G - Q_{i,t}^D \quad \forall i,t \quad (11)$$

مدل پیشنهادی در این مقاله در شرایط اضطراری سیستم بکار می‌رود. با توجه به حالت غیرخطی روابط (۸) و (۹) و در نظر گرفتن این موضوع که حل مدل غیرخطی بسیار زمان‌بر می‌باشد، در شرایط اضطراری سیستم، استفاده از مدل غیرخطی منطقی نیست، لذا مدل پیشنهادی از حالت غیرخطی به خطی تبدیل می‌شود. محدودیت‌های (۸) و (۹) معادلات غیرخطی هستند.

خطی سازی معادلات پخش بار بر اساس سری تیلور و فرضیات زیر انجام می‌شود:

✓ مقادیر ولتاژ هر باس همیشه یک عدد نزدیک به یک است.

باینری صفر باشد، توان دستگاه معادل توان پایه دستگاه است ($P_{i,h,k,t}^{a,base}$). در غیر این صورت توان دستگاه برابر ($P_{i,h,k,t}^{a,min}$) است.

$$P_{i,h,k,t}^a = P_{i,h,k,t}^{a,base} (1 - I_{i,h,k,t}^a) + P_{i,h,k,t}^{a,min} \cdot I_{i,h,k,t}^a \quad (23)$$

مطابق رابطه (23) چنانچه نیاز به استفاده از وسیله در طرح پاسخگویی بار باشد، توان وسیله به مینیمم توان آن وسیله تغییر خواهد کرد. در غیر این صورت این وسایل با توان مجاز خود عمل می‌کنند.

حد بالا و پایین برداشت بار، قطع بار و قطع بار حساس برای توان‌های اکتیو و راکتیو مطابق با روابط (24-27) تعیین می‌شوند. متغیر باینری (I) نشان دهنده مشارکت یا عدم مشارکت دستگاه در هر طرح است. با استفاده از روابط (24-27) توان هر وسیله در محدوده مجاز برداشت یا قطع بار تعریف شده برای آن وسیله قرار خواهد گرفت.

$$0 \leq P_{i,h,k,t}^s \leq \sum_k P_{i,h,k,t}^{s-off} \cdot I_{i,h,k,t}^s \quad \forall i,t \quad (24)$$

$$0 \leq P_{i,h,k,t}^i \leq \sum_k P_{i,h,k,t}^{i-max} \cdot I_{i,h,k,t}^i \quad \forall i,t \quad (25)$$

$$0 \leq P_{i,h,t}^{lc} \leq \sum_k P_{i,h,t}^{lc-max} \cdot I_{i,h,t}^{lc} \quad \forall i,t \quad (26)$$

$$0 \leq P_{i,l,t}^c \leq \sum_k P_{i,l,t}^{c-max} \cdot I_{i,l,t}^c \quad \forall i,t \quad (27)$$

۴-۳- فاکتور پایداری ولتاژ

فاکتور پایداری ولتاژ (VSF^{12}) برای بررسی پایداری ولتاژ کل سیستم استفاده می‌شود. این عامل ابزاری بسیار سریع و مؤثر برای محاسبه پایداری ولتاژ باس‌ها بصورت آفلاین است [37]. توسط فاکتور VSF می‌توان بصورت آفلاین پایداری ولتاژ کل باس‌ها را بصورت همزمان بررسی کرد که با این کار می‌توان براحتی تاثیر طرح پیشنهادی را در بهبود ولتاژ سیستم بررسی کرد.

$$VSF_{i+1}^t = (2V_{i+1}^t - V_i^t) \quad (28)$$

$$VSF = \frac{\sum_{i=2}^{N_b} VSF_{i+1}^t}{(N_b - 1)} \quad (29)$$

۵-۳- روش حل

در روش پیشنهادی از یک الگوریتم دو لایه برای حل مسئله بازیابی استفاده شده است. در لایه اول همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شده است، بازآرایی سیستم با استفاده از الگوریتم نظریه گراف و الگوریتم ازدحام ذرات بدست می‌آید. همچنین برای لایه دوم، مسئله MINLP نامحذب به یک مدل MILP تبدیل شده است. این مدل محذب توسط حل کننده CPLEX در تولباکس YALMIP نرم افزار MATLAB حل شده است.

جایی که n تعداد لیه‌های چند ضلعی مورد استفاده برای خطی‌سازی است. در اینجا محدودیت‌های خطی با $n=6$ فرموله شده‌اند. در رابطه (20) محدوده توان اکتیو هر DG و در روابط (21-22) محدوده توان راکتیو هر DG تعیین می‌شود. بنابراین، معادلات خطی شده (22-24) جایگزین معادله غیرخطی (17) می‌شوند.

$$-\sqrt{3}(P_{DG_{i,t}} + S_i) \leq P_{DG_{i,t}} \leq -\sqrt{3}(P_{DG_{i,t}} - S_i) \quad (20)$$

$$-\frac{\sqrt{3}}{2} S_i \leq Q_{DG_{i,t}} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (21)$$

$$\sqrt{3}(P_{DG_{i,t}} - S_i) \leq Q_{DG_{i,t}} \leq \sqrt{3}(P_{DG_{i,t}} + S_i) \quad (22)$$

۳-۳- مدل‌سازی وسایل خانه‌های هوشمند

در این مقاله انواع بارهای قابل کنترل در خانه‌های هوشمند بر حسب درجه اهمیت بار به سه دسته: بارهای قابل جابجایی با اولویت ۱، بارهای قابل وقفه با اولویت ۲ و بارهای قابل تنظیم با اولویت ۳، تقسیم بندی شده‌اند.

بارهای قابل جابجایی مانند پلوپز و ماشین لباسشویی هستند. هنگامی که این وسایل روشن می‌شوند، برای مدت زمانی روشن می‌مانند تا اینکه یک چرخه کامل شود. در این مقاله، لوازم خانگی برقی در هر دوره زمانی t اگر روشن باشند، مقدار ثابتی از انرژی را مصرف می‌کنند. بنابراین، بارهای قابل جابجایی عملکردی بدون توقف دارند. با این وجود، وقتی این نوع وسایل روشن نشوند مصرف آنها به چند ساعت آینده منتقل می‌شود.

بارهای قابل وقفه می‌توانند با امضای قرارداد به برنامه بپیوندند. صاحبان خانه با توجه به عادات مصرف برق می‌توانند لوازم خانگی را داوطلبانه انتخاب کنند. در ساعات بازیابی، هنگامی که منبع تغذیه شبکه برای تقاضای بار کافی نیست، شرکت برق بخشی از بار را طبق قرارداد کاهش می‌دهد. زمان وقفه برای بارهای متناوب، یک ساعت تنظیم شده است (کل دوره بازیابی در این مقاله).

بارهای قابل تنظیم مانند بارهای روشنایی و بارهای تهویه مطبوع هستند که می‌توانند تقاضای برق‌شان را برای شرکت در برنامه برداشت بار تنظیم کنند. وقتی عدم تعادل توان در تولید و مصرف در طول دوره بازیابی بار وجود داشته باشد، این بارها تا حدی توان خود را کاهش داده و به سطح مصرف پایین تری می‌رسانند. مشتریان می‌توانند بر اساس راحتی قابل قبول در مصرف برق، میزان توان را بر اساس بارهای قابل تنظیم خود، تنظیم کنند. در مواقع اضطراری، این بارها به طور خودکار به مقدار از پیش تعیین شده ($P_{i,t}^{min}$) کاهش می‌یابند. به عنوان مثال، بار روشنایی، نور کم را بر روی سطح از پیش تعیین شده تنظیم می‌کند و بار تهویه مطبوع، نقطه دما را تنظیم می‌کند تا توان را مطابق رابطه (23) کاهش دهد. در رابطه (23)، متغیر باینری ($I_{i,h,k,t}^a$) نشان دهنده سهم دستگاه در طرح SLS است. اگر متغیر

۴- نتایج عددی و شبیه سازی

راکتانس برای هر شاخه از شبکه توزیع به ترتیب ۰,۷ و ۰,۱ پریونیت در نظر گرفته شده است [۳۶]. در اینجا، از روش PSO برای تجدید پیکربندی بهینه استفاده شده است. تعداد ذرات و تکرارها به ترتیب ۱۵ و ۲۰ است. در ابتدای هر فیدر اصلی یک مدارشن وجود دارد. همچنین ۶ عدد تائ سوئیچ بین باس‌های ۹-۶، ۱۴-۹، ۲۲-۱۹ و ۲۵-۳۰ قرار گرفته است که از آنها در فرآیند بازیابی شبکه توزیع استفاده می‌شود [۳۶].

جدول (۱): دسته‌بندی بارهای نصب شده در یک خانه هوشمند [۴۰]

ردیف	دسته‌بندی بارها		
	بارهای قابل کنترل (W)		
	اولویت ۱	اولویت ۲	اولویت ۳
	بارهای قابل جابجایی (W)	بارهای قابل وقفه (W)	بارهای قابل تنظیم (W)
۱	ماشین ظرف‌شویی (۱۱۰۰)	ششوار (۱۵۰۰)	فریزر (۵۰)
۲	ماشین لباسشویی (۱۰۰۰)	جارو برقی (۱۰۰۰)	یخچال (۵۰)
۳	مخلوط‌کن (۵۰۰)	چرخ خیاطی (۱۰۰)	روشنایی (۵۰۰)
۴	مایکروویو (۱۲۰۰)	کولر آبی (۵۰۰)	اسپیل (۲۰۰۰)
جمع کل	۳۸۰۰	۳۱۰۰	۲۶۰۰

در وضعیت بازیابی بار، مشتریان به صورت اختیاری با ابزار مجازی که در اختیارشان است در برنامه‌های SLS شرکت می‌کنند. این امر باعث می‌شود که شرکت برق برخی از تجهیزات مصرف کننده را در طرح SLS درج کند. هر خانه با توان ۱۰ کیلو وات در نظر گرفته می‌شود. طبقه بندی بارها در هر خانه در جدول (۱) ارائه شده است [۴۰]. همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، بارها به چهار دسته طبقه بندی شده‌اند. مجموع بارهای قابل تنظیم، قابل وقفه، قابل جابجایی و غیرقابل کنترل به ترتیب ۲۶۰۰، ۳۱۰۰، ۳۸۰۰ و ۸۰۰ وات در نظر گرفته شده‌اند. در حالت بازیابی، بارهای قابل تنظیم به ۱۶۰۰ وات کاهش می‌یابند. در این مقاله میزان کاهش بارهای قابل وقفه در ساعات مختلف ثابت فرض می‌شوند. همچنین فرض شده است که ۸۰۰ وات از بارهای قابل جابجایی کار می‌کند. بنابراین، این مقدار را نمی‌توان کاهش داد و میزان بار قابل جابجایی که می‌تواند به ساعات بعدی منتقل شود، ۳۰۰۰ وات در نظر گرفته شده است. در هر نقطه بار ۱۰۰ خانه وجود دارد. مقدار بارهای حساس در هر نقطه بار ۲۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. در [۴]، هزینه برداشت بار و قطع بار عادی (C^L) به ترتیب ۱ و ۵ دلار بر کیلووات در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به این هزینه‌ها و مقدار بارهای طبقه بندی شده، هزینه بارهای قابل کنترل به شرح زیر طبقه بندی می‌شوند:

- ✓ هزینه برداشت بارهای با اولویت ۳: ۰,۵ \$/kw
- ✓ هزینه برداشت بارهای با اولویت ۲: ۰,۷۵ \$/kw
- ✓ هزینه برداشت بارهای با اولویت ۱: ۱ \$/kw
- ✓ هزینه قطع بارهای حساس: ۸ \$/kw

جدول (۲): مشخصات PV [۳۷]

پارامتر	مقدار
N_s	۳۰
N_{PVmod}	۲۰۰۰
T_A	$25^{\circ}C$
V_{MPP}	۲۸ (V)
I_{MPP}	۷۶,۷ (A)
V_{oc}	۳۶,۹۶ (V)
I_{SC}	۳۸,۸ (A)
N_{OT}	$43^{\circ}C$
K_i	$0.0545, 0 (A/^{\circ}C)$
K_v	$127, 0 (A/^{\circ}C)$

هزینه تلفات توان اکتیو در انشعاب‌ها $0.01 \$/kw$ تخمین زده می‌شود [۴]. علاوه بر این، هزینه‌های تولید توان DG، DGR و هزینه‌های آلودگی به ترتیب $0.15 \$/kw$ ، $0.1 \$/kw$ و $0.02 \$/kg$ در نظر گرفته شده است [۱۴]. حد بالا و پایین ولتاژها به ترتیب ۱.۰۵ و ۰.۹۵ پریونیت فرض شده است. مشخصات فتوولتائیک (PV^{14}) و توربین بادی (WT^{15}) و به ترتیب مطابق جداول (۲) و (۳) است [۳۷].

در این بخش، برای ارزیابی مدل بازیابی پیشنهادی، مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه توزیع ۳۰ گره با سناریوهای مختلف خطا در فیدرها در صورت عدم حضور و حضور DG اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود [۳۸]، سیستم تست، یک شبکه توزیع فعال RBTS با ولتاژ کم است که شامل ۳۸ نقطه بار، ۳۰ گره، ۴۶ کلید جدا کننده و ۷ قطع کننده است. تقاضای بار در هر باس از نوع توان ثابت فرض می‌شود. در اینجا گره‌های موجود در فیدرهای اصلی از شماره ۰ تا ۳۰ شماره‌گذاری شده‌اند و مقادیر عددی ۳۱ تا ۶۸ برای نقاط متصل به تقاضای بار است، با فرض اینکه مصرف توان اکتیو هر نقطه بار ۱۰۰۰ کیلو وات است. مقاومت و

جدول (۳): مشخصات WT [۳۷]

پارمتر	مقدار
P_{rated}	۲۵۰ (kw)
V_{cin}	۳ (m/s)
V_N	۱۲ (m/s)
V_{cout}	۲۵ (m/s)
N_v	۴۰

۴-۱-۱- سناریو ۱

در این سناریو خطا در انشعاب ۲۳ در فیدر ۳ رخ می‌دهد. سه مطالعه موردی برای این سناریو در نظر گرفته شده است. مورد ۳، خروجی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این مورد ۱ و ۲ برای مقایسه و اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی بررسی شده‌اند. مدارشکن نصب شده در ابتدای فیدر ۱، ابتدا خطا را رفع می‌کند و منطقه خطا از هر دو سمت توسط کلید جداکننده از شبکه جدا می‌شود و تای سوئیچ ۱۹-۲۲ بسته می‌شود تا منطقه پائین دست خطا به سرویس باز گردد.

۴-۱- نتایج عددی

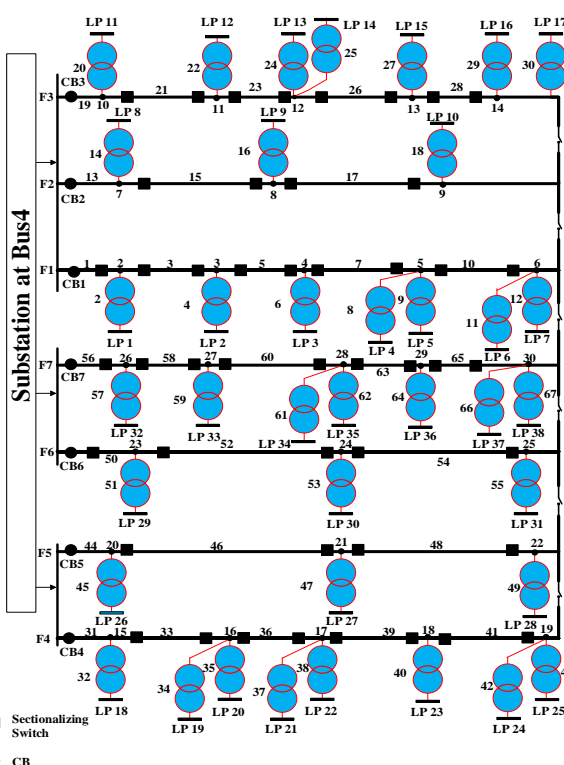
برای اعتبارسنجی طرح پیشنهادی، چهار مطالعه موردی در شبکه توزیع نمونه به شرح ذیل ارائه شده است:

- ✓ سناریو ۱: خطا در انشعاب ۲۳ در فیدر ۳.
 - ✓ سناریو ۲: خطا در انشعاب ۳۳ در فیدر ۴.
 - ✓ سناریو ۳: خطا در انشعاب ۳۳ در فیدر ۴ و با در نظر گرفتن اولویت بارها در مصرف‌کنندگان در هر نقطه بار.
 - ✓ سناریو ۴: خطا در انشعاب ۳۳ در فیدر ۴ و با در نظر گرفتن تولید و بار احتمالاتی.
- ظرفیت هر DG یک مگاوات فرض شده است. موقعیت هر DG در باس‌های ۱۴، ۱۸، ۱۹ و ۳۰ در نظر گرفته شده است.

در مورد ۱، بازیابی بار بدون حضور DG در نظر گرفته شده است. اجرای الگوریتم بدون در نظر گرفتن DG و SLS انجام می‌شود. در مورد ۱، فیدر پشتیبان (فیدر ۵) بخش پایین دست خطا را تأمین می‌کند. میزان تلفات توان و VSF در جدول (۷) نشان داده شده است. تلفات توان ۱،۱۰۷۸ مگاوات و فاکتور پایداری ولتاژ ۰،۹۷۳۰۱ پریونیت است. شکل (۳-الف) نتایج ولتاژ را برای مورد ۱ از سناریو اول نشان می‌دهد.

در مورد ۲، طرح بازیابی بار با اضافه شدن DG اجرا می‌شود. شکل (۳-ب) ولتاژ باس‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزودن DG، ولتاژ بهبود می‌یابد. اهمیت حضور DG و برداشت بار در این شکل نشان داده شده است. هزینه کل، در این حالت ۵۳۱،۷۶ دلار است که به میزان قابل توجهی نسبت به مورد ۱ کاهش یافته است. همچنین بارهای با اولویت سوم تعداد ۲۰۰ خانه در باس ۱۲ و ۱۵ خانه در باس ۱۳ حذف شده‌اند. جدول (۷) تلفات توان و VSF را نشان می‌دهد. در مقایسه با مورد ۱، تلفات توان از ۱،۱۰۷۸ مگاوات به ۰،۸۶۱۸۶ مگاوات کاهش می‌یابد. همچنین VSF از ۰،۹۷۳۰۱ پریونیت به ۰،۹۷۵۸۶ پریونیت افزایش یافته است. بنابراین، با اضافه کردن DG در مورد ۲، تلفات توان، هزینه کل و VSF در مقایسه با مورد ۱ بهبود می‌یابند.

در مورد سوم، DGR و برداشت بار طبق جدول (۴) انجام می‌شود. هزینه کل در مقایسه با مورد ۲ تقریباً ثابت مانده است. در این حالت، هیچ خانه‌ای قطع نمی‌شود. تلفات توان به ۰،۸۵۶۶۴ کاهش می‌یابد. VSF به ۰،۹۷۵۹۴ افزایش یافته است. بنابراین در روش پیشنهادی، مورد ۳ بهینه‌ترین روش برای بازیابی خطا در انشعاب ۲۳ است و نشان دهنده موثر بودن طرح SLS و DGR در بازیابی بهینه بار است. شکل (۳-ج) ولتاژ باس‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۲): سیستم مورد مطالعه [۳۶]

۴-۱-۲- سناریو ۲

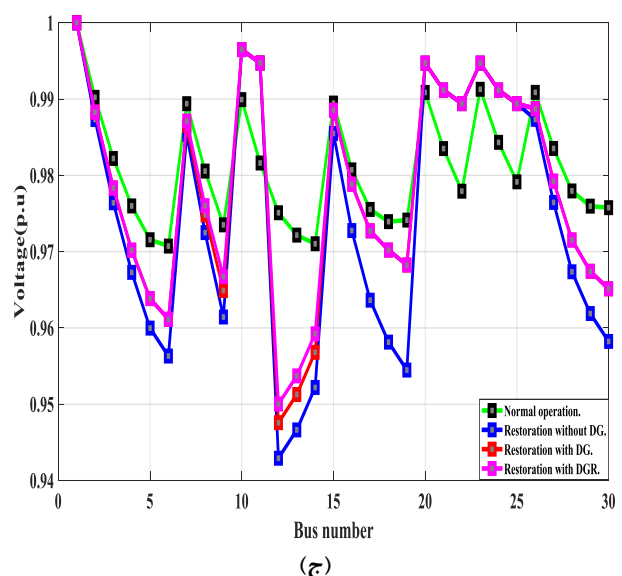
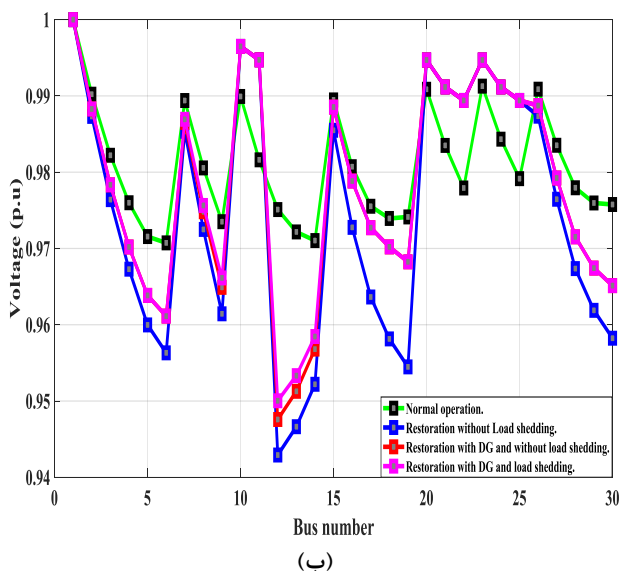
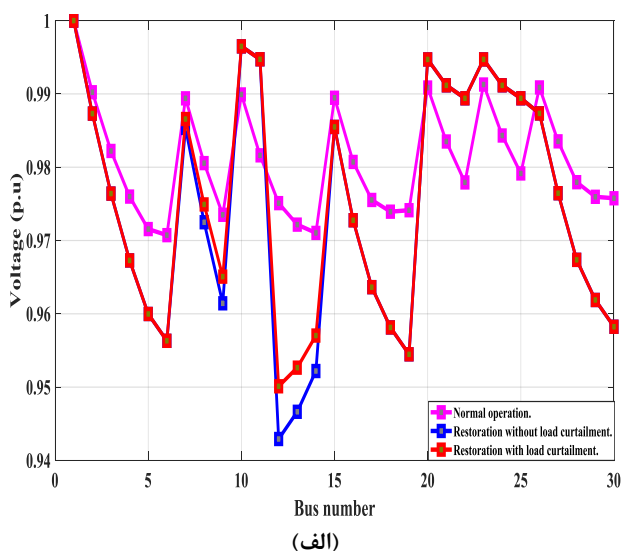
در این سناریو خطا در انشعاب ۳۳ در فیدر ۴ رخ می‌دهد. در این سناریو DGR و برداشت بار طبق جدول (۴) انجام می‌شود. ابتدا خطا توسط مدار شکن رفع شده است. سپس کلیدهای جدا کننده در انشعاب ۳۳ باز می‌شوند تا منطقه خطا دار را از شبکه جدا کنند و تای سوئیچ ۱۹-۲۲ بسته می‌شود تا منطقه پایین دست خطا به سرویس باز گردند. تلفات توان اکتیو، VSF، برداشت بار و هزینه بهره‌برداری در جدول (۷) نشان داده شده است.

۴-۱-۳- سناریو ۳

در این سناریو، بار حساس در کلیه نقاط بار ۲۰۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است. خطا در انشعاب ۳۳ در فیدر ۴ رخ می‌دهد. ابتدا مدار شکن خطا را رفع می‌کند. کلیدهای جدا کننده در انشعاب ۳۳ باز می‌شوند. سپس تای سوئیچ ۱۹-۲۲ بسته شده است. در ابتدا، شرایط سیستم بررسی می‌شود. در این لایه، مقدار برداشت بار در جدول (۷) نشان داده شده است. در مقایسه با سناریوی قبلی، میزان برداشت بار کاهش می‌یابد. همچنین، کل هزینه نیز افزایش یافته است. دلیل افزایش هزینه این است که در سناریوی سوم، برداشت بارهای با اولویت بالا بیشتر است. تلفات توان اکتیو، DGR و VSF ثابت مانده است. مطابق جدول (۷)، در سناریوی سوم، در هر نقطه بار ۱۸۰ خانه در نظر گرفته شده است. بنابراین، هر نقطه بار برای بارهای حساس ۲۰۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است که نباید آنها را قطع کرد.

۴-۱-۴- سناریو ۴

در این سناریو، عملکرد مناسب طرح پیشنهادی با توجه به بار و تولید احتمالاتی نشان داده شده است. دوره بازیابی، یک ساعت در نظر گرفته شده است. تولید قدرت باد و خورشید از شرایط آب و هوا همچون تابش خورشید، سرعت باد و دمای محیط تاثیر می‌گیرد. توابع توزیع احتمال^(۶) می‌تواند برای شناسایی رفتار تصادفی منبع تجدیدپذیر (سرعت باد و تابش خورشید) در یک شیوه آماری مورد استفاده قرار گیرد. توزیع بتا و ویبول به ترتیب برای مدل سازی تابش خورشید و سرعت باد در نظر گرفته شده اند [37]. در شکل (۴)، تغییرات بار ساعتی نشان داده شده است. توان اکتیو ساعتی PV و WT به ترتیب در شکل های (۵) و (۶) ارائه شده است. مطالعه موردی برای ساعت سه تا چهار برنامه‌ریزی شده است. یک PV و یک WT در هر یک از باس های ۶، ۱۴، ۱۸، ۱۹ و ۳۰ قرار دارد. خطا در انشعاب ۳۳ رخ می‌دهد. مشابه سناریو ۳، ابتدا خطا جدا شده و آرایش بهینه سیستم انجام می‌شود. سپس شرایط سیستم بررسی و در صورت لزوم لایه DGR اجرا می‌شود. DGR طبق جدول (۴) برنامه‌ریزی شده است. مقدار DGR برای باس ۱۸ تغییر یافته است. دلیل این امر این است که میزان DG های غیر قابل توزیع کاهش می‌یابد و همچنین بارها در دوره های مختلف تغییر می‌کنند. شرایط سیستم پس از DGR



شکل (۳): پروفیل ولتاژ برای سناریو ۱

سناریو ۳ در [۱۳] است. این نشان می‌دهد که مرجع [۱۳] بهینه نشده است که دلیل آن استفاده از حل کننده MINLP است. حل کننده‌های MINLP به ویژه در مسائل نامحدب هرگز نمی‌توانند نتایج مطلوب را تضمین کنند. همچنین زمان حل در روش پیشنهادی که یکی از مهمترین ویژگی‌های بازیابی بهینه بار است، بصورت چشمگیری نسبت به [۱۳] بهبود یافته است چون حل کننده‌های غیرخطی، زمان حل بسیار زیادی نسبت به حل کننده‌های خطی دارند.

برای مقایسه بیشتر روش ارائه شده در این مقاله، نتایج روش پیشنهادی با مرجع [۳۶] نیز مقایسه شده است. همانطور که در جدول (۶) نشان داده شده است با توجه به اینکه مکان کلیدزنی در هر دو روش یکسان است اما در روش پیشنهادی این مقاله هیچ قطع یا برداشت باری در این سناریو اتفاق نیفتاده است، در حالیکه در مرجع [۳۶]، مقدار ۱٫۵ کیلووات از بار قطع شده است. بنابراین روش پیشنهادی عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش ارائه شده در [۳۶] دارد. دلیل آن هم این است که در روش ارائه شده در [۳۶] از الگوریتم‌های هوشمند به همراه پخش بار جاروب رفت و برگشتی استفاده شده است. الگوریتم‌های هوشمند هیچگاه نمی‌توانند رسیدن به جواب بهینه سراسری را تضمین کنند.

جدول (۵): مقایسه روش پیشنهادی و مرجع [۱۳]

مطالعات موردی	مرجع [۱۳]		روش پیشنهادی	
	زمان اجرا (ثانیه)	هزینه بهره برداری (دلار)	زمان اجرا (ثانیه)	هزینه بهره برداری (دلار)
سناریو ۱ (مورد ۳)	۱۶٫۱	۵۶۸	۶۰	۵۳۰٫۹۸
سناریو ۲	۱۸	۱۷۵۸٫۴۵	۶۸٫۰	۱۳۱۴٫۷
سناریو ۳	۱۷٫۹۶	۱۴۲۵٫۹۸۲	۷۷۵٫۰	۱۳۲۸٫۴۵
سناریو ۴	۱۹٫۲۳	۱۳۵۰	۳۵۰٫۱	۱۲۹۸

جدول (۶): مقایسه روش پیشنهادی و مرجع [۳۶]

مطالعات موردی	مرجع [36]		روش پیشنهادی	
	مکان کلیدزنی (کیلووات)	میزان قطع بار (کیلووات)	مکان کلیدزنی (کیلووات)	میزان قطع بار (کیلووات)
سناریو ۱	۱۴-۹	۱٫۵	۱۴-۹	۰
مورد ۳	۱۲-۱۱		۱۲-۱۱	

بررسی می‌شود. بسته به شرایط سیستم، لایه SLS اجرا می‌شود. برداشت بار در باس‌های ۱۶ و ۱۷ طبق جدول (۷) اتفاق می‌افتد. میزان برداشت بار در دوره‌های مختلف افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که مقدار DG‌های غیرقابل توزیع با گذشت زمان کاهش می‌یابند. همچنین بار حساس قطع نشده است. علاوه بر این، VSF و تلفات توان اکتیو در جدول (۷) نشان داده شده است. VSF و تلفات توان اکتیو تقریباً ثابت هستند. با توجه به نتایج شبیه سازی، طرح پیشنهادی باعث کاهش میزان برداشت/قطع بار در خانه‌ها و هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. بارهای با اولویت بالا نیز در وضعیت انرژی دار باقی می‌مانند. بر اساس نتایج شبیه سازی در سناریوهای مختلف، مشاهده می‌گردد که طرح پیشنهادی باعث می‌شود که هیچ قطع بار حساس اتفاق نیفتد. همچنین برای کاهش هزینه مصرف کنندگان، به ترتیب بارهای با اولویت سوم، دوم و اول کاهش می‌یابند. بنابراین با این روش بارهای با اولویت بالا قطع نمی‌شوند. با توجه به حالات احتمالاتی، در بعضی مواقع هزینه‌ها از مورد بدون احتمالاتی بودن کمتر هستند. دلیل این امر نیز وجود منابع DG تجدیدپذیر است. همچنین، هیچگونه برداشت بار دارای اولویت ۱ و قطع بار برای بارهای حساس در سناریوهای ارائه شده رخ نداده است. نتایج، عملکرد خوب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۴): نتایج DGR برای DG‌های قابل توزیع

مورد مطالعه	MT 6 (Mw)	MT 14 (Mw)	MT 18 (Mw)	MT 19 (Mw)	MT 30 (Mw)
سناریو ۱	۰٫۵	۰٫۹۲	۰٫۶۸	۰٫۹۱	۰٫۷۳
سناریو ۲	۰٫۵	۰٫۸۲	۰٫۹۶	۰٫۹۱	۰٫۷۳
سناریو ۳	۰٫۵	۰٫۸۲	۰٫۹۶	۰٫۹۱	۰٫۷۳
سناریو ۴ ساعت ۱۵:۰۰	۰٫۷۱۵	۰٫۸۵۲	۰٫۹۱۴	۰٫۹۱	۰٫۹۴۵
سناریو ۴ ساعت ۱۵:۱۵	۰٫۷۱۴	۰٫۸۵۱	۰٫۹۲	۰٫۹۱	۰٫۹۴۴
سناریو ۴ ساعت ۱۵:۳۰	۰٫۶۹۳	۰٫۸۳	۰٫۹۰۶	۰٫۹۱	۰٫۹۲۳
سناریو ۴ ساعت ۱۵:۴۵	۰٫۷۰۸	۰٫۸۳۵	۰٫۹۴	۰٫۹۱	۰٫۷۷۵
سناریو ۴ ساعت ۱۶:۰۰	۰٫۶۵۴	۰٫۷۸۱	۰٫۸۶۸	۰٫۹۱	۰٫۷۰۶

۴-۲- اعتبارسنجی روش پیشنهادی

در جدول (۵)، روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله با یکی از روش‌های موجود در ادبیات مقایسه شده است. روش پیشنهادی هزینه عملیاتی بسیار کمتری نسبت به مرجع [۱۳] دارد. همچنین در سناریو ۳، به دلیل استفاده از بار حساس، هزینه عملیاتی باید بالاتر از سناریو ۲ باشد در حالی که هزینه عملیاتی در سناریو ۲ بالاتر از

روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این مقاله، براساس نتایج شبیه سازی، الگوریتم پیشنهادی توانسته است به راه حل بهینه دست یابد و از قطع وسایل با اولویت بالا و بارهای حساس جلوگیری نموده است. مدل پیشنهادی در لایه دوم به یک مدل خطی تبدیل شده است تا دستیابی به راه حل بهینه سراسری توسط حل کننده خطی تضمین شود و زمان حل که یکی از مهمترین معیارهای بازیابی موفق است، بهبود یابد. بنابراین طرح پیشنهادی موجب کاهش میزان برداشت / قطع بارهای مسکونی، قطع بارهای حساس، کاهش تلفات توان و کاهش هزینه‌های بهره برداری می‌شود. کارهای آینده، احتمال مشارکت صاحبان خانه را در نظر خواهد گرفت. صاحبان خانه به طور تصادفی در برنامه های SLS شرکت می‌کنند، در حالی که در این مقاله مشارکت آنها برای همه باس ها بصورت ثابت در نظر گرفته شده است.

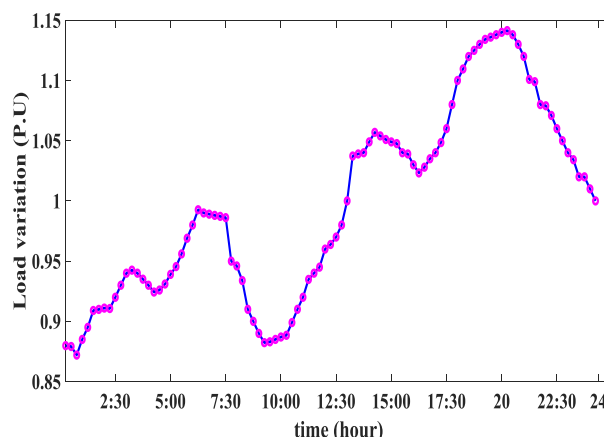
ضمایم

اندیس‌ها

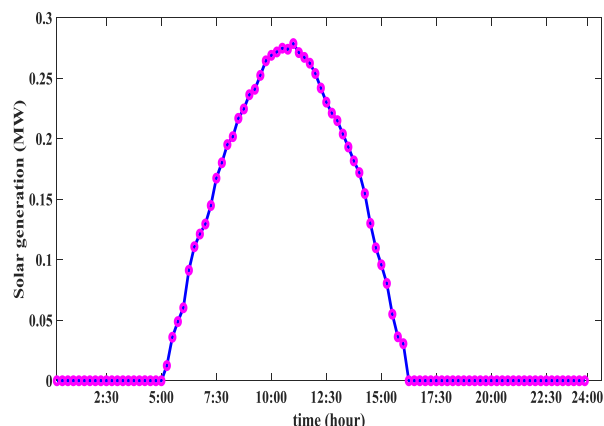
i	مجموعه ای از باس
t	شمارنده زمان
k	شمارنده وسایل برقی
h	شمارنده خانه
b	مجموعه‌ای از انشعاب‌ها
l	مجموعه‌ای از بارهای حساس در هر باس

پارامترها و متغیرها

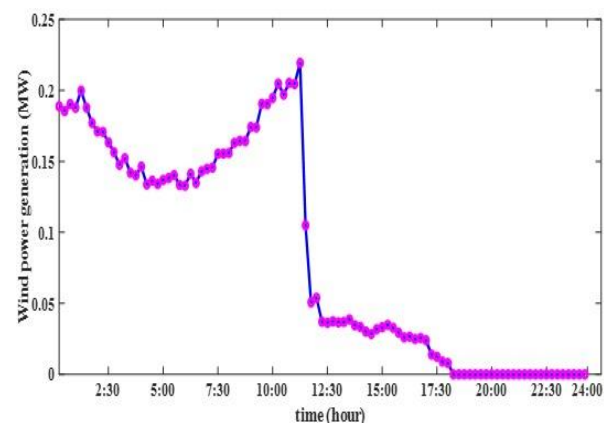
$P_{i,t}$	توان اکتیو خالص شارش یافته به شبکه در باس i در زمان t (کیلووات)
$Q_{i,t}$	توان راکتیو خالص شارش یافته به شبکه در باس i در زمان t (کیلووار)
$P_{i,t}^D Q_{i,t}^D$	تقاضای بار اکتیو/راکتیو در باس i در زمان t (کیلووات / کیلووار)
$C_{DG_i}^{Resch}$	هزینه برنامه‌ریزی مجدد DGها در باس i (دلار)
$\Delta Q_{DG_{i,t}}$	تغییر توان راکتیو در DG موجود در باس i در زمان t (کیلووار)
$\Delta P_{DG_{i,t}}$	تغییر توان اکتیو در DG موجود در باس i در زمان t (کیلووات)
$C_{DG_i}^{emi}$	هزینه آلودگی یک میکروتوربین در باس i (دلار)
$Q_{DG_{i,t}}$	توان راکتیو در DG موجود در باس i در زمان t (کیلووار)
$P_{DG_{i,t}}$	توان اکتیو در DG موجود در باس i در زمان t (کیلووات)
$C_{DG_i}^G$	هزینه تولید یک میکروتوربین در باس i (دلار)
C^{loss}	هزینه تلفات (دلار)
C^a	هزینه برداشت بار با اولویت ۳ (دلار)
$P_{i,h,k,t}^a$	مقدار برداشت بار برای بار قابل تنظیم (کیلووات)
C^s	هزینه برداشت بار با اولویت ۱ (دلار)
$P_{i,h,k,t}^s$	مقدار برداشت بار برای بار قابل جابجایی (کیلووات)
C^i	هزینه برداشت بار اولویت ۲ (دلار)
$P_{i,h,k,t}^i$	مقدار برداشت بار برای بار قابل وقفه (کیلووات)



شکل (۴): پروفیل بار [۳۷]



شکل (۵): توان فتوولتائیک [۳۷]



شکل (۶): توان توربین بادی [۳۷]

۵- نتیجه گیری

در این مقاله طرح جدیدی به نام SLS پیشنهاد شده است. وسایل قابل کنترل موجود در خانه‌های هوشمند به سه دسته بارهای قابل تنظیم، قابل وقفه و قابل جابجایی تقسیم بندی شده‌اند. در این مطالعه، یک الگوریتم دو لایه جدید برای حل مسئله بازیابی سیستم‌های توزیع فعال پس از یک خطای دائمی با استفاده از ابزار SLS و DGR استفاده شده است. نتایج مطالعات موردی اثربخشی

جدول (۷): نتایج شبیه سازی

هزینه نهایی (\$)	شماره باس	تعداد خانه ها			فاکتور پایداری ولتاژ (VSF) (p.u)	تلفات توان (Mw)	نحوه بهره‌برداری	مطالعات موردی	
		برداشت بار اولویت ۳	برداشت بار اولویت ۲	قطع بار					
۳۲۰۵,۳۹	۱۲	۶۳	-	-	۰,۹۷۳۰۱	۱,۱۰۷۸	بازیابی بار- قطع بار بدون حضور DG	مورد ۱	سناریو ۱
۵۳۱,۷۶	۱۲	-	-	۲۰۰	۰,۹۷۵۸۶	۰,۸۶۱۸۶	بازیابی بار- برداشت بار- قطع بار با حضور DG	مورد ۲	
	۱۳	-	-	۱۵					
۵۳۰,۹۸	-	-	-	-	۰,۹۷۵۹۴	۰,۸۵۶۶۴	بازیابی بار- DGR- برداشت بار- قطع بار	مورد ۳	
۱۳۱۴,۷	۱۶	-	۲۰۰	۲۰۰	۰,۹۷۳۵	۰,۸۴	بازیابی بار- DGR- برداشت بار- قطع بار	سناریو ۲	
	۱۷	-	۱۰۰	۲۰۰					
۱۳۲۸,۴۵	۱۶	-	۱۸۰	۱۸۰	۰,۹۷۳۵	۰,۸۴	بازیابی بار- DGR- برداشت بار- قطع بارهای حساس و عادی	سناریو ۳	
	۱۷	-	۱۳۵	۱۸۰					
۱۲۹۸	۱۶	-	۱۸۰	۱۸۰	۰,۹۷۴۶	۰,۷۷۳	بازیابی بار- DGR- برداشت بار- قطع بارهای حساس و عادی (با در نظر گرفتن احتمالاتی بودن تولید و بار)	۱۵:۰۰	سناریو ۴
	۱۷	-	۹۰	۱۸۰					
۱۲۸۲	۱۶	-	۱۸۰	۱۸۰	۰,۹۷۴۵	۰,۷۷۶		۱۵:۱۵	
	۱۷	-	۹۴	۱۸۰					
۱۳۰۷	۱۶	-	۱۸۰	۱۸۰	۰,۹۷۴۳	۰,۷۸۸		۱۵:۳۰	
	۱۷	-	۱۰۹	۱۸۰					
۱۳۰۲	۱۶	-	۱۸۰	۱۸۰	۰,۹۷۴۱	۰,۸۰۲		۱۵:۴۵	
	۱۷	-	۱۱۱	۱۸۰					
۱۳۲۱	۱۶	-	۱۸۰	۱۸۰	۰,۹۷۳۸	۰,۸۱۹		۱۶:۰۰	
	۱۷	-	۱۳۲	۱۸۰					



- ADMM." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 118 (2020): 105809.
- [2] Xie, Yunyun, et al. "Second-order conic programming model for load restoration considering uncertainty of load increment based on information gap decision theory." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 105 (2019): 151-158.
- [3] Zhu, Junpeng, Yue Yuan, and Weisheng Wang. "An exact microgrid formation model for load restoration in resilient distribution system." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 116 (2020): 105568.
- [4] Cavalcante, Patricia L., et al. "Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems." IEEE Transactions on Smart Grid 7.1 (2015): 145-155.
- [5] Al Owaifer, Maad, and Mohammad Al-Muhaini. "MILP-based technique for smart self-healing grids." IET Generation, Transmission & Distribution 12.10 (2018): 2307-2316.
- [6] Romero, Rubén, et al. "A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems." IEEE Transactions on Power Systems 31.2 (2015): 1259-1268.
- [7] Chen, Bo, et al. "Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids." IEEE Transactions on Power Systems 33.2 (2017): 1507-1520.
- [8] Sun, Wei, et al. "Optimal distribution system restoration using PHEVs." IET Smart Grid (2018).
- [9] López, Juan Camilo, et al. "Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems." IEEE Transactions on Smart Grid 9.6 (2018): 6058-6068.
- [10] Chen, Bo, et al. "Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids." IEEE Transactions on Smart Grid 9.6 (2018): 6793-6805.
- [11] Li, Juan, et al. "Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search." IEEE Transactions on Power Systems 29.6 (2014): 3021-3029.
- [12] Seyed Ali Arefifar, Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, and Tarek H. M. EL-Fouly, "Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids." IEEE Transaction on Smart Grid, 2013, Vol. 28, pp. 4192-4200.
- [13] Zadsar, Masoud, Mahmoud Reza Haghifam, and Sayyed Majid Miri Larimi. "Approach for self-healing resilient operation of active distribution network with microgrid." IET Generation, Transmission & Distribution 11.18 (2017): 4633-4643.
- [14] Wang, Zhaoyu, and Jianhui Wang. "Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids." IEEE Transactions on Power Systems 30.6 (2015): 3139-3149.
- [15] Arefifar, Seyed Ali, Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, and Tarek El-Fouly. "Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements." IEEE Transactions on Industrial Electronics 62.2 (2014): 711-723.
- [16] Hosseinneshad, Vahid, et al. "A comprehensive framework for optimal day-ahead operational planning of self-healing smart distribution systems." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 99 (2018): 28-44.
- [17] Arefifar, Seyed Ali, Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, and Tarek HM El-Fouly. "Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems." IEEE transactions on smart grid 3.3 (2012): 1491-1502.

C^{lc}	هزینه قطع بار (دلار)
$P_{i,h,t}^{lc}$	مقدار قطع بار (کیلووات)
C^c	هزینه قطع بار حساس (کیلووات)
$P_{i,h,t}^c$	مقدار قطع بار حساس (کیلووات)
$V_{i,t}$	ولتاژ باس i در زمان t (پریونیت)
$V_{j,t}$	ولتاژ باس j در زمان t (پریونیت)
$x_{i,j,t}$	متغیر تصمیم دودویی برای فیدر i و j در زمان t (زمان قطع: ۰۰ زمان وصل: ۱)
$G_{i,j}$	کندوکتانس خط بین باس i و j (مهو)
$\delta_{i,j,t}$	زاویه ولتاژ بین باس i و j (رادیان)
$B_{i,j}$	سوسپتانس خط بین باس i و j (مهو)
$P_{i,t}^G / Q_{i,t}^G$	توان تولیدی اکتیو / توان تولیدی راکتیو در باس i در زمان t (کیلووات/کیلووار)
$P_{DG,i}^{DER} / Q_{DG,i}^{DER}$	توان تولیدی اکتیو / راکتیو بوسیله منابع انرژی تجدید پذیر (کیلووات/کیلووار)
$\Delta V_{i,t}$	تغییر ولتاژ در باس i در زمان t (پریونیت)
$\Delta V_{j,t}$	تغییر ولتاژ در باس j در زمان t (پریونیت)
$\theta_{i,j,t}$	زاویه امپدانس بین باس i و j در زمان t (رادیان)
$S_{DG,i,t}^2$	حداکثر ظرفیت تولید توان ظاهری در هر DG (کیلوولت آمپر)
V_i^{Down}	حد پایین ولتاژ در باس i (پریونیت)
V_i^{Up}	حد بالای ولتاژ در باس i (پریونیت)
V_i	ولتاژ در باس i (پریونیت)
S_i	توان ظاهری در باس i (کیلوولت آمپر)
$S_{DG,i,t}^{max}$	توان ظاهری ماکزیمم برای هر DG در باس i در زمان t (کیلوولت آمپر)
$P_{i,h,k,t}^{a,base}$	مقدار ماکزیمم برداشت بار برای بار قابل تنظیم (کیلووات)
$I_{i,h,k,t}^a$	متغیر باینری برای مشارکت در برداشت بار قابل تنظیم
$P_{i,h,k,t}^{a,min}$	مقدار مینیمم برداشت بار برای بار قابل تنظیم (کیلووات)
$I_{i,h,t}^{lc}$	متغیر باینری برای تعیین قطع بار باس‌های مختلف
$P_{i,h,k,t}^{s-off}$	مقدار برداشت بار برای بارهای قابل جابجایی که خاموش هستند (کیلووات)
$I_{i,h,k,t}^s$	متغیر باینری برای مشارکت در برداشت بار قابل جابجایی
$P_{i,h,k,t}^{i-max}$	مقدار برداشت بار ماکزیمم برای بار قابل‌وقفه (کیلووات)
$I_{i,h,k,t}^i$	متغیر باینری برای مشارکت در برداشت بار قابل‌وقفه
$P_{i,h,t}^{max}$	مقدار ماکزیمم قطع بار (کیلووات)
$P_{i,l,t}^{c-max}$	مقدار ماکزیمم قطع بار حساس (کیلووات)
$P_{i,l,t}^c$	مقدار قطع بار حساس (کیلووات)
$I_{i,l,t}^c$	متغیر باینری برای تعیین قطع بار باس‌های مختلف
VSF	فاکتور پایداری ولتاژ (پریونیت)
N_b	تعداد انشعاب‌ها

مراجع

- [1] Shen, Feifan, et al. "Hierarchical service restoration scheme for active distribution networks based on

- agent systems." IET Generation, Transmission & Distribution 11.2 (2017): 475-484.
- [34] Hafez, Ahmed Abel, Walid A. Omran, and Yasser G. Hegazy. "A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks." IEEE Transactions on Smart Grid 9.3 (2016): 1911-1919.
- [35] Sekhavatmanesh, Hossein, and Rachid Cherkaoui. "Distribution network restoration in a multi-agent framework using a convex OPF model." IEEE Transactions on Smart Grid (2018).
- [36] Chooapani, Keyvan, Mahdi Hedayati, and Reza Effatnejad. "Self-healing optimization in active distribution network to improve reliability, and reduction losses, switching cost and load shedding." International Transactions on Electrical Energy Systems (2020): e12348.
- [37] Kayal, Partha, and C. K. Chanda. "Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network." Renewable energy 75 (2015): 173-186.
- [38] Heidari, Alireza, et al. "Reliability optimization of automated distribution networks with probability customer interruption cost model in the presence of DG units." IEEE Transactions on Smart Grid 8.1 (2017): 305-315.
- [39] نصرت پورحسین، زنگنه علی. "خودترمیمی بهینه شبکه‌های توزیع هوشمند مبتنی بر گراف درخت پوشا و بهبود قابلیت اطمینان شبکه" مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۸؛ ۱۶ (۱): ۹۱-۱۰۱
- [40] ثنائی سلمان، حقی فام محمودرضا، صفدریان امیر. "برداشت هوشمند بار در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن اهمیت بارها". نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران. ۱۳۹۹؛ ۹ (۳): ۶۸-۸۰
- [41] سلیمانی مسعود، محمدنژاد شورکائی حسین. "بازیابی شبکه توزیع فعال برق برای کاهش زیان های مالی مشترکین" مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۸؛ ۱۸ (۲): ۱۳۱-۱۳۸
- [18] Wang, Zhaoyu, et al. "Networked microgrids for self-healing power systems." IEEE Transactions on smart grid 7.1 (2015): 310-319.
- [19] Wang, Feng, et al. "A multi-stage restoration method for medium-voltage distribution system with DGs." IEEE Transactions on Smart Grid 8.6 (2016): 2627-2636.
- [20] Huang, Xianchao, Yu Yang, and Gareth A. Taylor. "Service restoration of distribution systems under distributed generation scenarios." CSEE Journal of Power and Energy Systems 2.3 (2016): 43-50.
- [21] Hosseinneshad, Vahid, et al. "Optimal island partitioning of smart distribution systems to improve system restoration under emergency conditions." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 97 (2018): 155-164.
- [22] Joglekar, Jayesh J., and Yogesh P. Nerkar. "A different approach in system restoration with special consideration of islanding schemes." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 30.9 (2008): 519-524.
- [23] Abbaszadeh, Amir, Mehrdad Abedi, and Ali Doustmohammadi. "Optimal islands determination in power system restoration applying multi-objective populated simulated annealing." International Transactions on Electrical Energy Systems 29.3 (2019): e2745.
- [24] de Souza, Fausto Augusto, et al. "A multiagent framework for self-healing mechanisms considering priority-based load shedding and islanding with distributed generation in smart distribution grids." IEEE Latin America Transactions 15.4 (2017): 632-638.
- [25] Eriksson, Markus, et al. "Multiagent-based distribution automation solution for self-healing grids." IEEE Transactions on Industrial Electronics 62.4 (2014): 2620-2628.
- [26] Ghorbani, Mohammad Jawad, Muhammad Akram Choudhry, and Ali Feliachi. "A multiagent design for power distribution systems automation." IEEE Transactions on Smart Grid 7.1 (2015): 329-339.
- [27] Leite, Jónatas Boás, and José Roberto Sanches Mantovani. "Development of a self-healing strategy with multiagent systems for distribution networks." IEEE Transactions on Smart Grid 8.5 (2016): 2198-2206.
- [28] Liu, Haoming, et al. "The control and analysis of self-healing urban power grid." IEEE Transactions on smart grid 3.3 (2012): 1119-1129.
- [29] Zidan, Aboelsood, and Ehab F. El-Saadany. "A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems." IEEE transactions on smart grid 3.3 (2012): 1525-1539.
- [30] Sharma, Anurag, Anupam Trivedi, and Dipti Srinivasan. "Multi-stage restoration strategy for service restoration in distribution systems considering outage duration uncertainty." IET Generation, Transmission & Distribution 12.19 (2018): 4319-4326.
- [31] Yu, Wan-Yu, Von-Wun Soo, and Men-Shen Tsai. "Power distribution system service restoration bases on a committee-based intelligent agent architecture." Engineering Applications of Artificial Intelligence 41 (2015): 92-102.
- [32] Elmitwally, Akram, et al. "A fuzzy-multiagent service restoration scheme for distribution system with distributed generation." IEEE Transactions on Sustainable Energy 6.3 (2015): 810-821.
- [33] Sampaio, Raimundo F., et al. "Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-

زیر نویس ها

¹ Smart load shedding

² Distributed Generation Rescheduling

³ Roy Billinton Test System

⁴ Mixed Integer Linear Programming

⁵ Information Gap Decision Theory

⁶ Micro-Grid

⁷ Mixed Integer NonLinear Programming

⁸ Multi Agent System

⁹ Distributed Generation

¹⁰ Internet Of Things

¹¹ Particle Swarm Optimization

¹² Micro Turbine

¹³ Voltage Stability Factor

¹⁴ Photo-Voltaic

¹⁵ Wind Turbine

¹⁶ Probability Distribution Function