

برداشت هوشمند بار در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن اهمیت بارها

سلمان ثنائی^۱، دانشجوی دکتری، محمودرضا حقی فام^۲، استاد، امیر صفدریان^۳، استادیار

۱- گروه برق- واحد کرج- دانشگاه آزاد اسلامی- کرج- ایران.

Saha20660@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران

Haghifam@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف - تهران- ایران

Safdarian@sharif.edu

چکیده: یکی از مهمترین وظایف بهره‌برداران در شرکت‌های توزیع، بازیابی بار بعد از بروز عیب در شبکه می‌باشد. در طرح‌های بازیابی بار علاوه بر رعایت قیود پخش بار، لازم است ساختار شبکه در حالت شعاعی حفظ شده و از همه مهمتر تعادل مصرف با امکان تامین بار ناشی از محدودیت‌های فیدر پشتیبان (و یا محدودیت منابع توزیع شده) رعایت شود. در این مقاله رویکرد جدید با عنوان برداشت هوشمند بار در شبکه‌های توزیع ارائه شده که هدف آن، طراحی یک مازول برداشت هوشمند بار در مواقعی است که امکان تامین بار بعد از وقوع خطا در شبکه وجود نداشته باشد. در این صورت بازیابی بار در شبکه با کمترین هزینه خروج و در کوتاه‌ترین زمان ممکن در راستای جلب حداکثر رضایتمندی مشترکین فراهم خواهد شد. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، سطح اتوماسیون شبکه توزیع نمونه به منظور کنترل هوشمند بارها در سه سناریو تعریف شده است. انواع بارهای موجود در خانه‌های هوشمند نیز اولویت بندی و به سه دسته بارهای قابل تنظیم، قابل وقفه و قابل جابجایی دسته‌بندی شده‌اند. روش پیشنهادی در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است. برای نشان دادن اثربخشی مدل پیشنهادی، شبیه‌سازی بر روی یک سیستم RBTS پیاده‌سازی شده است. نتایج، کارایی روش پیشنهادی را در کاهش هزینه‌ها و بهبود مدیریت بازیابی سیستم توزیع نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بازیابی بار، برداشت هوشمند بار، قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع، خانه هوشمند

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: محمودرضا حقی فام

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

فهرست علائم و اختصارات

انديسه‌ها

i	شمارنده باس
f	شمارنده فیدر
t	شمارنده زمان
k	شمارنده وسایل برقى
h	شمارنده خانه

پارامترها

$C_{i,t,1}^{LC}$	هزینه قطع بار بدون در نظر گرفتن اولویت‌بندی پست‌های توزیع در باس λ م در زمان λ م.
$C_{i,t,2}^{LC}$	هزینه قطع بار با در نظر گرفتن اولویت بندی پست‌های توزیع در باس λ م در زمان λ م.
$C_{i,f,t,1}^{LC}$	هزینه قطع بار بدون در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف در باس λ م در زمان λ م.
$C_{i,f,t,2}^{LC}$	هزینه قطع بار بدون در نظر گرفتن اولویت‌بندی فیدرهای فشار ضعیف در باس λ م در زمان λ م.
$C_{i,k,t,1}^{LS}$	هزینه برداشت هوشمند بار در باس λ م در زمان λ م و در وسیله k ام.
$C_{i,k,t,2}^{LS}$	هزینه برداشت هوشمند بار با در نظر گرفتن اولویت‌بندی فیدر فشار ضعیف در باس λ م در زمان λ م و در وسیله k ام.
$W_{i,t}$	نشان دهنده اولویت پست‌های توزیع در باس λ م در زمان λ م.
$W_{i,k,t}$	نشان دهنده اولویت وسیله k ام در باس λ م در زمان λ م.
$W_{i,f,t}$	نشان دهنده اولویت فیدرهای فشار ضعیف در باس λ م در زمان λ م.
$W_{i,f,k,t}$	نشان دهنده اولویت فیدرهای فشار ضعیف در باس λ م در زمان λ م و در وسیله k ام.
$P_{i,t}$	توان اکتیو خالص شارش یافته به شبکه از باس λ م در زمان λ م.
$Q_{i,t}$	توان راکتیو خالص شارش یافته به شبکه از باس λ م در زمان λ م.
$V_{i,t}$	دامنه ولتاژ باس λ م در زمان λ م.
$V_{j,t}$	دامنه ولتاژ باس j ام در زمان λ م.
$G_{i,j}$	کندوکتانس خط بین باس λ م و j ام.
$\delta_{i,j,t}$	اختلاف فاز بین ولتاژ باس‌های λ م و j ام در زمان λ م.
$B_{i,j}$	سوسپتانس خط بین باس λ م و j ام.
$p_{i,t}^D$	مقدار کل توان اکتیو بارها در باس λ م در زمان λ م.

متغیرها

$p_{i,t}^G$	مقدار کل توان اکتیو تولیدی در باس λ م در زمان λ م.
$q_{i,t}^G$	مقدار کل توان راکتیو تولیدی در باس λ م در زمان λ م.
$q_{i,t}^D$	مقدار کل توان راکتیو بارها در باس λ م در زمان λ م.
$P_{i,t}$	مقدار کل توان موجود در باس λ م در زمان λ م.
$V_{i,t}$	ولتاژ باس λ م در زمان λ م.
ϵ	مقدار تغییرات مجاز ولتاژ در سیستم توزیع
$X_{i,k,t}$	متغیر باینری برای تعیین اینکه وسیله k ام در باس λ م در زمان λ م در طرح برداشت هوشمند بار شرکت می‌کند یا خیر.
$X_{i,f,t}$	متغیر باینری برای تعیین اینکه فیدر فشار ضعیف f ام در باس λ م در زمان λ م در طرح قطع بار با اولویت فیدر شرکت می‌کند یا خیر.
$X_{i,t}$	متغیر باینری برای تعیین اینکه باس λ م در زمان λ م در طرح قطع بار شرکت می‌کند یا خیر.
$LC_{i,f,t}$	میزان قطع بار برای فیدر فشار ضعیف f ام در باس λ م در زمان λ م.
$LC_{i,t}$	مقدار قطع بار در باس λ م در زمان λ م.
$LS_{i,k,t}$	مقدار برداشت هوشمند بار برای وسیله k ام در باس λ م در زمان λ م.

۱- مقدمه

یکی از جذابیت‌های برجسته شبکه‌های هوشمند، توانایی بازیابی آن پس از وقوع یک رخداد خطا در شبکه است. شبکه‌های هوشمند به وسیله تکنولوژی‌های جدید دیجیتالی نظیر نظارت، کنترل اتوماتیک، ارتباط دو جانبه و مدیریت داده توسعه می‌یابند. با استفاده از تجهیزات کنترلی و ارتباطی شبکه هوشمند، می‌توان تدابیری اتخاذ نمود تا در مواقع وقوع یک خطا، بهترین تصمیم برای بازیابی بهینه بار گرفته شود. کاهش مدت زمان خاموشی، به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم و اطمینان از تامین بار، از اهداف مهم در بازیابی بهینه بار به حساب می‌آیند. برای تحقق این اهداف تا کنون راهکارهای مختلفی ارائه گردیده است. یکی از راهکارها، استفاده از منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها برای افزایش توان تولید و راهکار بعدی، قطع بار^۱ است. طبقه‌بندی بار در هر سیستم با توجه به سطح اتوماسیون شبکه توزیع، متفاوت است. در شبکه‌های هوشمند اختیاراتی نظیر ورود که با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته از جمله IOT^۲ و استفاده از کنترلرهای هوشمند، امکان دسترسی به تمامی تجهیزات موجود در هر خانه به منظور کنترل و مدیریت بارها فراهم گردد.

در [۱] یک چارچوب مدل سازی بازیابی سرویس توزیع معرفی شده است که می‌تواند توالی کلیدزنی بهینه و برآورد زمان بازیابی را در حضور سوئیچ‌های قابل کنترل از راه دور، سوئیچ‌های عملیاتی دستی و DG^۳ های قابل توزیع، تعیین نماید. مدل پیشنهادی به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط طراحی شده است. در [۲] یک مدل برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP^۴) برای توالی کلیدزنی بهینه بازیابی سیستم‌های توزیع برق سه فاز نامتقارن ارائه شده است. در [۳] استراتژی بازیابی چندمرحله‌ای برای حل مسئله بازیابی خدمات در سیستم‌های توزیع با توجه به عدم قطعیت مدت زمان قطع، پیشنهاد شده است. در [۴]، یک چارچوب بازیابی خدمات ترتیبی (SSR^۵) برای ایجاد راه حل‌های بازیابی سیستم‌های توزیع در صورت قطع برق در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. در [۵] استراتژی بازیابی برای استفاده از PHEV^۶ ها برای برداشت بار قابل اعتماد و روند بازیابی سریع تر فراهم شده است. مسئله بهینه‌سازی برای یافتن توالی برداشت بار به حداقل رساندن انرژی بازیابی شده، به عنوان یک مسئله MILP^۷ طراحی شده است. در [۶]، یک مدل تصمیم‌گیری بازیابی مقاوم بر اساس نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی پیشنهاد شده است که در آن عدم قطعیت در بار و خروجی DG ها مورد توجه قرار می‌گیرد. در [۷]،

یک روش بازیابی سریع و مؤثر خدمات برای سیستم توزیع متوسط همراه با ژنراتورهای پراکنده با ترکیب جزیره سازی عمدی ژنراتورهای پراکنده و تجدید پیکربندی شبکه برای به حداقل رساندن بازیابی بارهای خارج از سرویس پیشنهاد شده است. در [۸]، حداقل سازی مشتریان بدون انرژی و کاهش هزینه‌های بازیابی خدمات در روش پیشنهادی ابتکاری مبتنی بر گراف برای پیدا کردن راه حل بازیابی خدمات در شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است. در [۹]، یک روش چند مرحله‌ای برای بازیابی خدمات ارائه شده است تا به طور بهینه، ترتیبی از اقدامات کنترل برای سوئیچ‌های کنترل شده، ESS^۸ و DG های قابل توزیع را برای کمک به اپراتور سیستم ایجاد کند. در [۱۰]، از مفهوم اتوماسیون چندعامله در شبکه‌های هوشمند برای ایجاد یک چارچوب خودترمیمی برای استفاده در بازیابی خدمات استفاده شده است. در [۱۱]، یک سیستم MAS^۹ کاملاً غیر متمرکز را بر اساس روشی برای بازیابی خدمات

شبکه‌های توزیع شعاعی پیشنهاد می‌کند. در این روش، استفاده از قوانین سیستم، اولویت مشتریان و حضور ژنراتورهای پراکنده مورد توجه قرار می‌گیرد. در [۱۲] در شرایط خطا در یک فیدر سیستم توزیع فعال، استراتژی بازیابی هدفمند در مرحله اول، شامل فعال کردن خوشه‌های گره‌هایی است که هرکدام با یک منبع منحصر به فرد عرضه می‌شوند. این منبع می‌تواند یک DG یا یک سوئیچ باشد که از یک فیدر مجاور تأمین می‌شود. در [۱۳]، یک مدل بهینه‌سازی تحلیلی و سراسری برای مسئله بازیابی ارائه شده است. یک فرمول ریاضی جدید برای حل مسئله تجدید پیکربندی ارائه شده است که تعداد متغیرهای باینری مورد نیاز را کاهش می‌دهد. در [۱۴]، یک چارچوب تصادفی جدید برای مسئله بازیابی سیستم توزیع (DSR^{۱۰}) پیشنهاد شده است. در این چارچوب، برنامه‌ریزی دینامیکی (DP^{۱۱}) برای حل مسئله DSR برای یک سیستم توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد که متناسب با فناوری‌های مختلف و اهداف تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره سازی می‌باشد. در [۱۵] یک سیستم چندمنظوره برای سیستم بازیابی اتوماتیک (MARS^{۱۲}) که به یک شبکه توزیع برق واقعی اعمال می‌شود، ارائه شده است. عوامل MARS در ساخت افزار خارجی به دستگاه‌های الکترونیکی هوشمند تعبیه شده است. در [۱۶]، به بررسی تأثیر مدیریت خودکار خروج بر قابلیت اطمینان و خودترمیمی شبکه توزیع پرداخته شده است. در الگوریتم پیشنهادی از روش مونت کارلو برای ایجاد سناریوهای خروج تجهیزات استفاده شده است. در [۱۷]، از روش مبتنی بر نظریه گراف و برش‌های اساسی برای بازیابی شبکه توزیع هوشمند استفاده شده است. پس از انتخاب شبکه منتخب با حداقل تعداد کلیدزنی، روش پیشنهادی تضمین می‌کند که

¹ Load Curtailment

² Internet Of Things

³ Distributed Generation

⁴ Mixed Integer Nonlinear Programming

⁵ Sequential Service Restoration

⁶ Plug-in Hybrid Electric Vehicle

⁷ Mixed Integer Linear Programming

⁸ Energy Storage System

⁹ Multi Agent System

¹⁰ Distribution System Restoration

¹¹ Dynamic Programming

¹² Multi-Agent system for Automatic Restoration System

ساختار جدید شبکه، محدودیت‌های سیستم را نقض نمی‌کند. در [۱۸]، تأثیر عدم قطعیت بار بر اولویت اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار بررسی شده است. عدم قطعیت بار توسط توزیع نرمال در نظر گرفته شده است و روش پیشنهادی در این مقاله نشان می‌دهد که عدم قطعیت بار تأثیرات اساسی روی اولویت بندی برنامه‌های پاسخگویی بار دارد. در [۱۹]، به تأثیر پاسخگویی بار در بهره‌وری و مدیریت انرژی در شبکه پرداخته شده است. در این مقاله از الگوریتم خوشه بندی طیفی، تئوری گراف و همچنین مفهومی آنروبی برای دسته بندی و رده بندی مشترکین استفاده شده است. در [۲۰] روشی برای ارزش گذاری پاسخگویی بار بعنوان یک منبع مجازی ارائه گردیده است. در این مقاله علاوه بر قابلیت پاسخگویی بار در کاهش هزینه‌های تامین بار، کارایی آن در کاهش هزینه‌های تامین رزرو، روشن و خاموش شدن واحدها و از دست رفتن بار لحاظ گردیده است. در [۲۱]، روش‌های مختلفی برای پاسخگویی بار تحت عنوان مدل‌های دینامیکی و استاتیکی مطرح شده است. در این مقاله مدلی جامع از برنامه‌های پاسخگویی بار با استفاده از مفهوم جدیدی از کشش پذیری ارائه شده است که موجب بهبود کارایی و دقت مدل می‌شود. در [۲۲]، مدیریت انرژی در ریز شبکه‌های چندگانه با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی ارائه گردیده است. در این مقاله، برنامه پاسخگویی بار با هدف هموار کردن منحنی بار و کاهش هزینه‌های بهره برداری مورد استفاده قرار گرفته است. در [۲۳]، مشترکین به سه دسته مختلف: داوطلب، عادی و حساس تقسیم می‌شوند و الگوریتم جدیدی جهت کنترل سطح مصرف مشترکین توزیع دارای کنترلر هوشمند براساس اولویت، پیشنهاد شده است. در [۲۴]، خود ترمیمی و مدیریت بار با استفاده از روش یادگیری تقویتی انجام شده است. روش ارائه شده با برخی از حالات ایجاد شده برای مقایسه نتایج با قطع و اضافه بار مورد آزمایش قرار گرفته است. در [۲۵]، مفهوم بازیابی با ایجاد یک ریز شبکه تعریف شده است. ابتدا مسئله غیرخطی به یک مسئله خطی تبدیل می‌شود. سپس مسئله خطی شده توسط جعبه ابزار YALMIP حل می‌شود. در [۲۶]، تأثیر منابع انرژی تجدید پذیر، بارها و عدم قطعیت آنها بر بازیابی سیستم توزیع بررسی شده است. همچنین برای بازیابی یک سیستم توزیع، رخداد‌های شدید عملیاتی پیشنهاد و تأثیر برنامه‌های پاسخگویی بار روی بهبود عملکرد سیستم توزیع در دوره بازیابی بررسی شده است. در [۲۷]، رویکرد مبتنی بر تصمیم گیری مارکوف برای محاسبه سیاست‌های بازیابی پیشنهاد شده است. در [۲۸]، نظریه گراف مبتنی بر الگوریتم PSO برای بازیابی سیستم توزیع ارائه شده است. در این مقاله تأثیر طرح بازیابی و برداشت بار روی قابلیت اطمینان سیستم توزیع بررسی شده است.

در این مقاله طرحی با عنوان برداشت هوشمند بار^{۱۳} ارائه شده است. این طرح به سیستم امکان دسترسی به بارهای داخل خانه‌های هوشمند را می‌دهد تا

در صورت لزوم هنگامی که در شبکه توزیع خطایی رخ دهد و یا گرفتگی^{۱۴} بار ایجاد شود، بتواند بارها را بر اساس اولویت بندی از قبل تعیین شده به نحوی که هم هزینه‌های بهره‌برداری در سیستم کاهش پیدا کنند و هم کمترین بار برداشته شود، کاهش داده و به این ترتیب قابلیت اطمینان سیستم توزیع را بهبود بخشد. برای نشان دادن اهمیت طرح ارائه شده در این مقاله، سطح اتوماسیون شبکه توزیع نمونه به منظور کنترل هوشمند بارها در سه سناریو تعریف شده است و بسته به اینکه شرکت توزیع برق کدام تکنولوژی از این سناریوها را در اختیار داشته باشد، بازیابی بهینه بار صورت می‌پذیرد. همچنین 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 تنظیم همانند لامپها می‌توانند با کاهش میزان نور خود در مواقع اضطراری، میزان مصرف خود را کم کنند. بارهای قابل جابجایی همانند ماشین لباسشویی می‌توانند در صورتی که در حال کار نباشند، بار خود را به ساعت دیگر انتقال دهند و در مواقعی که این دسته از وسایل در حال کار باشند، باید تا اتمام سیکل کاری، به کار خود ادامه دهند. بارهای قابل وقفه را نیز می‌توان در هر زمان قطع کرد. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه RBTS اصلاح شده پیاده سازی شده است.

از نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- در نظر گرفتن بارهای مصرف کننده نهایی برای به حداقل رساندن هزینه خاموشی با استفاده از زیرساخت‌های عملیاتی IOT بطوریکه با توجه به نظر مشترک و اهمیت بار بتوان با کمترین هزینه، شبکه را در شرایط کمبود انرژی و یا بروز اتفاق مدیریت کرد.
 - ۲- این مدل می‌تواند به طراحی بازارهای خرید خاموشی با در نظر گرفتن ارزش بار قطع شده منتهی گردد.
 - ۳- با استفاده از این مدل و تکمیل آن، موضوع انعطاف پذیری می‌تواند در شبکه توزیع با کمک بارهای پاسخگو ایجاد گردد.
 - ۴- در سطوح مختلف اتوماسیون می‌توان از این مدل در شبکه‌های توزیع بصورت عملیاتی استفاده کرد.
- در بخش دوم این مقاله الگوریتم پیشنهادی و در بخش سوم، مدل سازی اجزا شامل توابع هدف و قیود شرح داده شده است. در ادامه و در بخش چهارم، نتایج عددی ارائه گردیده است و در نهایت نتیجه گیری مقاله و تحقیقات آینده در بخش پنجم عنوان گردیده است.

۲- الگوریتم پیشنهادی

¹⁴ Congestion

¹³ Smart Load Shedding

۳- مدلسازی اجزا

در روش پیشنهادی، تابع هدف شامل: هزینه قطع بار، هزینه برداشت بار، میزان بار قطع شده و میزان بار برداشت شده می‌باشد که هدف اصلی آن مینیمم کردن هزینه‌های تحمیلی به مشترکین با کمترین هزینه خروج است. در ادامه برای سناریوهای مختلف، توابع هدف به ترتیب ارائه خواهد شد. همچنین سطح اتوماسیون شبکه توزیع نمونه در این مقاله به منظور کنترل هوشمند بار، در سه سناریو تعریف شده است و برای هر سناریو نیز دو مورد در نظر گرفته شده است.

سناریو اول: اتوماسیون در سطح پست‌های توزیع:

در این سناریو فرض بر این است که سطح اتوماسیون توزیع جهت صدور فرمان قطع بار در مواقع بروز خطا و در طول دوره بازیابی بار، در سطح پست‌های توزیع باشد. برای این سناریو دو مورد در نظر گرفته شده است.

مورد ۱: پست‌های توزیع بدون در نظر گرفتن اولویت بندی بار

مورد ۲: پست‌های توزیع با در نظر گرفتن اولویت بندی بار

سناریو دوم: اتوماسیون در سطح فیدرهای فشارضعیف:

در این مرحله یک گام به جلوتر رفته و فرض بر این است که سطح اتوماسیون توزیع جهت صدور فرمان قطع بار در مواقع بروز خطا و در طول دوره بازیابی بار، در سطح فیدرهای فشار ضعیف باشد. برای این سناریو نیز دو مورد در نظر گرفته شده است.

مورد ۱: فیدرهای فشارضعیف بدون در نظر گرفتن اولویت بندی بار

مورد ۲: فیدرهای فشارضعیف با در نظر گرفتن اولویت بندی بار

سناریو سوم: اتوماسیون در سطح بار مشترکین:

در این سناریو فرض بر این است که بهره‌بردار شبکه امکان کنترل و دسترسی به بارهای مشترکین را جهت صدور فرمان قطع و یا برداشت هوشمند بار در مواقع بروز خطا و در طول دوره بازیابی بار داشته باشد. برای این سناریو نیز دو مورد در نظر گرفته شده است.

مورد ۱: اولویت بندی بارهای مشترکین بدون در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف.

مورد ۲: اولویت بندی بارهای مشترکین با در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف.

۳-۱- توابع هدف

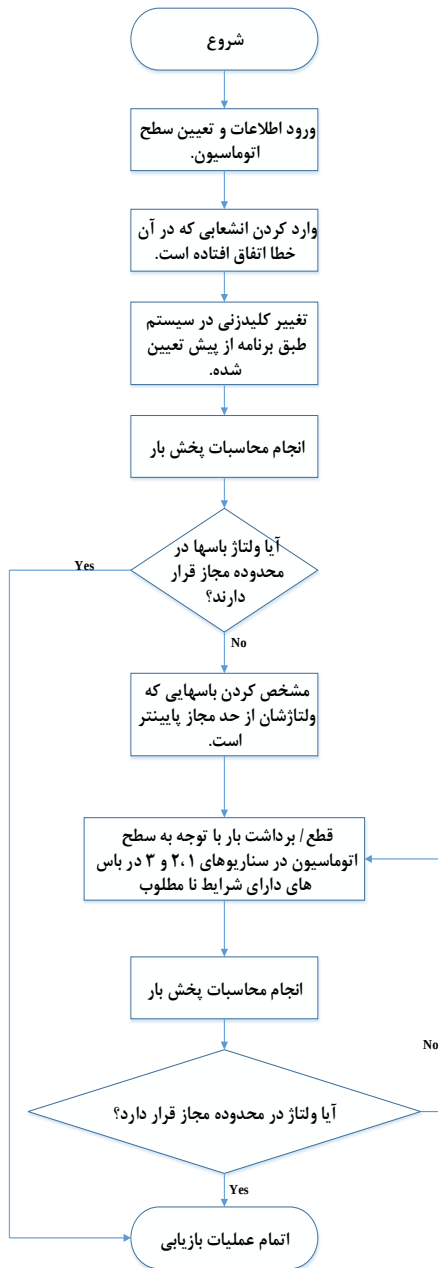
با توجه به سطح اتوماسیون توزیع در شبکه نمونه، برای هر سناریو و موردهای آن یک تابع هدف تعریف گردیده است.

تابع هدف ۱ برای سناریوی اول: محاسبه هزینه قطع بار، زمانی که امکان دسترسی در سطح پست‌های توزیع وجود دارد و قطع بار فقط از محل پست‌های توزیع، امکان پذیر باشد.

در هنگام وقوع یک رخداد خطا در شبکه‌های توزیع برق، توان در بخشی از شبکه قطع می‌شود و یا به عبارتی، بخشی از شبکه بدون برق می‌شود. برای رفع این خطا، فرآیند FLISR¹⁵ اجرا می‌گردد. در این فرآیند، ابتدا خطا و محل آن شناسایی می‌گردد. در مرحله بعد جدا سازی محل خطا صورت می‌پذیرد و بعد از آن، عملیات بازیابی بار در شبکه انجام می‌شود تا مشترکینی که دچار خاموشی می‌شوند، حداقل شوند. با توجه به تعریف فرآیند FLISR، این پروسه دارای دو مرحله اصلی است. مرحله اول مکان‌یابی خطا و مرحله دوم بازیابی بار در شبکه است. مباحث مربوط به مکان‌یابی خطا و روش‌های آن، خارج از موضوع این مقاله است. تمرکز این مقاله بر روی ارائه روشی بهینه برای بازیابی بار در شبکه توزیع است. عملیات بازیابی سرویس برای تمامی برق در شبکه پائین دست خطا را می‌توان با استفاده از دو روش انجام داد. روش اول استفاده از فیدرهای پشتیبان و روش دوم جزیره سازی منطقه خطادار است. از آنجایی که در شبکه توزیع نمونه در این مقاله هیچ منبع تولید پراکنده‌ای در نظر گرفته نشده است، لذا امکان جزیره سازی منطقه خطادار وجود ندارد. همچنین در صورت جدا سازی منطقه خطادار، ممکن است امکان تامین بار در شبکه پائین دست خطا توسط فیدرهای پشتیبان به طور کامل وجود نداشته باشد که یکی از دلایل آن، پائین بودن ظرفیت فیدرهای فشارضعیف و دلیل دیگر طولانی بودن طول این فیدرها است به طوری که با انجام عملیات مانور ممکن است بعضی از قسمت‌های شبکه با افت ولتاژ روبرو شوند. در این شرایط برای انجام عملیات بازیابی، باید قسمتی از بار توسط بهره‌بردار برداشته شود تا وضعیت شبکه به شرایط مطلوب برسد.

در این مقاله روشی ارائه شده است که میزان بار برداشت شده در فرآیند بازیابی بار، با کمترین هزینه خروج و حداکثر رضایتمندی مشترکین حاصل گردد. در روش پیشنهادی، با در نظر گرفتن سطح اتوماسیون شبکه توزیع و اطلاعات موجود، در گام اول پست‌های توزیع، فیدرهای فشارضعیف و بارهای مشترکین با توجه به میزان اهمیت بارها، اولویت بندی می‌شوند. پس از وقوع رخداد خطا در شبکه و جداسازی منطقه خطادار، منطقه پائین دست خطا از طریق فیدرهای پشتیبان تغذیه می‌شود. سپس وضعیت شبکه با انجام محاسبات پخش بار بررسی می‌شود. در صورتیکه آرایش شبکه در شرایط مطلوبی قرار داشته باشد و تمام بار در منطقه پائین دست خطا توسط فیدرهای پشتیبان تامین گردد، فرآیند بازیابی به اتمام خواهد رسید. اما در صورتیکه امکان تامین بار توسط فیدرهای پشتیبان وجود نداشته باشد و شرایط سیستم از لحاظ محدودیت ولتاژ برآورده نشود، در این مرحله با توجه به سطح اتوماسیون شبکه توزیع و اطلاعات موجود، عملیات قطع یا برداشت هوشمند بار انجام خواهد شد و سپس مجدداً وضعیت شبکه با انجام محاسبات پخش بار بررسی می‌شود. این فرآیند تا زمانی که وضعیت شبکه به شرایط مطلوب برسد ادامه خواهد داشت و پس از آن به اتمام می‌رسد. توضیحات فوق در فلوچارت پیشنهادی در شکل (۱) به اختصار عنوان شده است.

¹⁵ Fault Location Isolation and Service Restoration



شکل (۱) - فلوچارت پیشنهادی

۲-۳- قیود

یکی از مهم ترین قیود شبکه، برابری بار - تولید است که در قالب معادلات پخش بار معرفی می شود. در این مقاله از پخش بار نوع Full AC استفاده شده و هیچ تقریبی در این زمینه به کار گرفته نشده است [۱۶].

$$P_{i,t} = V_{i,t} \sum_j V_{j,t} (G_{i,j} \cos \delta_{i,j,t} + B_{i,j} \sin \delta_{i,j,t}) \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$Q_{i,t} = V_{i,t} \sum_j V_{j,t} (G_{i,j} \sin \delta_{i,j,t} - B_{i,j} \cos \delta_{i,j,t}) \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$P_{i,t} = p_{i,t}^G - p_{i,t}^D \quad (9)$$

مورد ۱: بدون در نظر گرفتن اولویت بندی پست های توزیع:

$$\min F_{1-1} = \sum_t \sum_{i=1}^n C_{i,t,1}^{LC} \times LC_{i,t} \times X_{i,t} \quad (1)$$

مورد ۲: با در نظر گرفتن اولویت بندی پست های توزیع:

$$\min F_{1-2} = \sum_t \sum_{i=1}^n C_{i,t,2}^{LC} \times LC_{i,t} \times X_{i,t} \times W_{i,t} \quad (2)$$

تابع هدف ۲ برای سناریوی دوم: محاسبه هزینه قطع بار، زمانی که امکان دسترسی در سطح فیدرهای فشار ضعیف وجود دارد و قطع بار فقط از محل فیدرهای فشار ضعیف امکان پذیر است.

مورد ۱: بدون در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف:

$$\min F_{2-1} = \sum_t \sum_{i=1}^n \sum_{f=1}^j C_{i,f,t,1}^{LC} \times LC_{i,f,t} \times X_{i,f,t} \quad (3)$$

مورد ۲: با در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف:

$$\min F_{2-2} = \sum_t \sum_{i=1}^n \sum_{f=1}^j C_{i,f,t,2}^{LC} \times LC_{i,f,t} \times W_{i,f,t} \times X_{i,f,t} \quad (4)$$

در سناریو سوم، علاوه بر قطع بار در شبکه توزیع نمونه، برداشت هوشمند بار نیز امکان پذیر است و امکان دسترسی به بارهای خانه هوشمند وجود دارد. لذا با توجه به ماهیت هر وسیله برقی، می توان توان بار را بر حسب اولویت آن، کاهش داد.

تابع هدف ۳ برای سناریوی سوم: محاسبه هزینه برداشت هوشمند بار، زمانی که امکان کنترل و دسترسی به بارهای اولویت بندی شده مشترکین وجود دارد.

مورد ۱: بدون در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف:

$$\min F_{3-1} = \sum_t \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^z \sum_{k=1}^l C_{i,k,t,1}^{LS} \times LS_{i,k,t} \times W_{i,k,t} \times X_{i,k,t} \quad (5)$$

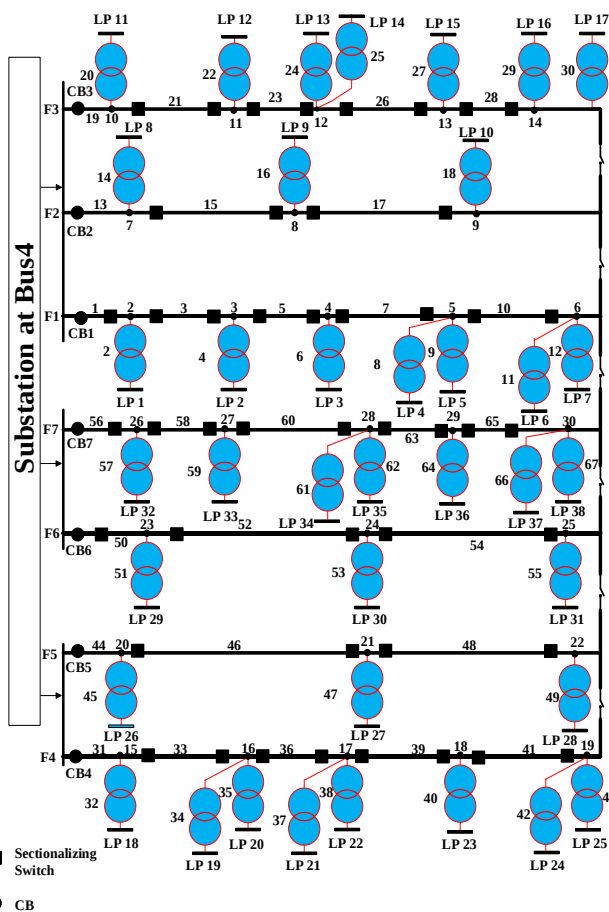
مورد ۲: با در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف:

$$\min F_{3-2} = \sum_t \sum_{i=1}^n \sum_{f=1}^j \sum_{h=1}^z \sum_{k=1}^l C_{i,k,t,2}^{LS} \times LS_{i,k,t} \times W_{i,f,k,t} \times X_{i,k,t} \quad (6)$$

	۳۰، ۲۷، ۲۴، ۲۱	
--	----------------	--

جدول (۲) - اولویت‌بندی فیدرهای فشار ضعیف و هزینه قطع بار برای سناریو دوم

ردیف	اولویت‌بندی فیدرهای فشار ضعیف به ترتیب درجه اهمیت بارها	شماره فیدر در هر پست توزیع	هزینه قطع بار (\$/Kw) (سناریو دوم - مورد ۲)
۱	اولویت ۱	۱۰، ۹	۵
۲	اولویت ۲	۸، ۶، ۴، ۲	۴
۳	اولویت ۳	۷، ۵، ۳، ۱	۳



شکل (۲) - شبکه توزیع مورد مطالعه

همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، و سایل برقی موجود در خانه‌های هوشمند به دو دسته بارهای قابل کنترل و بارهای غیر قابل کنترل دسته‌بندی شده‌اند. بارهای قابل کنترل نیز بر حسب میزان اهمیت بارها از دید مشترکین و به منظور قطع یا برداشت هوشمند بار در دوره باز یابی، به

رابطه (۹) در واقع سمت چپ معادله (۷) را می‌سازد. در واقع این عبارت توان خالص تزریقی به شبکه را از باس نام با در نظر گرفتن بار محلی آن باس نشان می‌دهد [۱۶].

$$Q_{i,t} = q_{i,t}^G - q_{i,t}^D \quad (10)$$

رابطه (۱۰) نیز مشابه رابطه (۹) اما برای توان‌های راکتیو است که سمت چپ معادلات پخش بار راکتیو را در رابطه (۸) می‌سازد.

رابطه (۱۱) نیز بیان می‌کند که مجموع توان‌های تولیدی اکتیو می‌تواند برابر یا بیشتر از مجموع بارهای مصرفی باشد [۱۶].

$$\sum_i (p_{i,t}^G \geq \sum_i p_{i,t}^D \quad (11)$$

در شبکه قدرت لازم است که محدوده ولتاژ همیشه در بازه معینی قرار گیرد تا مشترکین، در تغذیه بارهای خود دچار مشکل نشوند و پایداری ولتاژ نیز حفظ شود. این قید نیز مربوط به همین مسئله است [۱۶].

$$1 - \epsilon \leq V_{i,t} \leq 1 + \epsilon \quad (12)$$

ϵ بنا بر استاندارد، در این مقاله ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

شبکه نمونه مطابق شکل (۲)، یک سیستم RBTS اصلاح شده با ۷ فیدر فشار متوسط، ۳۸ نقطه بار (پست توزیع) و ۳۰ گره است. همچنین تعداد ۶ عدد تای سوئیچ در بین باس‌های ۹-۶، ۹-۱۴، ۲۲-۱۹، ۳۰-۲۵، ۶-۳۰ و ۲۲-۲۵ در نظر گرفته شده است. مقاومت هر خط ۱۰/۷ اهم و راکتانس هر خط نیز ۰/۱ اهم می‌باشد [۲۸]. توان نصب شده در تمامی پست‌های توزیع به صورت یکسان ۱۰۰۰ کیلووات فرض شده است. هر پست توزیع دارای ۱۰ فیدر فشار ضعیف است که توان نصب شده در تمامی فیدرهای فشار ضعیف به طور یکسان ۱۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. همچنین در هر فیدر فشار ضعیف، ۱۰ خانه هوشمند قرار دارد که توان نصب شده در هر خانه هوشمند به طور یکسان ۱۰ کیلووات می‌باشد. پست‌های توزیع و فیدرهای فشار ضعیف بر حسب درجه اهمیت بارها به ترتیب با اولویت ۱، ۲ و ۳ بیان شده‌اند که اطلاعات مربوط به اولویت‌بندی پست‌های توزیع و فیدرهای فشار ضعیف به همراه هزینه قطع بار در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است. هزینه قطع بار برای مورد ۱ در سناریوهای اول و دوم، ۵ دلار بر کیلووات در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) - اولویت‌بندی پست‌های توزیع و هزینه قطع بار برای سناریو اول

ردیف	اولویت‌بندی پست‌های توزیع به ترتیب درجه اهمیت بارها	شماره پست توزیع	هزینه قطع بار (\$/Kw) (سناریو اول - مورد ۲)
۱	اولویت ۱	۱، ۴، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۲۸، ۲۵، ۲۲، ۱۹	۵
۲	اولویت ۲	۲، ۵، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۶، ۲۹	۴
۳	اولویت ۳	۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸	۳

قطع بار / برداشت بار (\$/Kw)	بار با اولويت ۱	بار با اولويت ۲	بار با اولويت ۳
	۲	۱/۵	۱
فیدر فشارضعیف با اولویت ۳			
	بار با اولويت ۱	بار با اولويت ۲	بار با اولويت ۳
	۱/۵	۱	۰/۵

۴-۱ مطالعه موردی

برای اعتبارسنجی طرح پیشنهادی، یک مورد مطالعاتی بررسی می‌گردد. برای این منظور فرض بر این است که در شکل (۲) یک خطا در خط شماره ۳ رخ دهد. در این حالت ابتدا محل خطا ایزوله شده و سپس با توجه به سطح اتوماسیون شبکه توزیع نمونه، منطقه بدون برق (پایین دست خطا)، با وصل شدن تائیسوئینچ ۲۲-۱۹ و با قطع یا برداشت هوشمند بارهای مورد نیاز، بازیابی می‌شود. نتایج شبیه سازی برای هر سناریو محاسبه و ارائه گردیده است.

در هر سه سناریو، منحنی پروفیل ولتاژ قبل از خطا و در شرایط بهره برداری عادی با رنگ مشکی، منحنی پروفیل ولتاژ بعد از خطا و پس از آرایش جدید سیستم که نشان دهنده برقرار نبودن محدودیت ولتاژ در سیستم است، با رنگ آبی و منحنی پروفیل ولتاژ پس از انجام عملیات بازیابی و رسیدن به شرایط مطلوب، با رنگ سبز نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های قریز، صورتی، زرد، بنفش و نارنجی در سناریوهای مختلف نیز نشان دهنده پروفیل ولتاژ در طول دوره بازیابی پس از هر مرحله قطع یا برداشت هوشمند بار به منظور رسیدن سیستم به شرایط مطلوب است.

سناریو اول: اتوماسیون در سطح پست‌های توزیع:

مورد ۱: پست‌های توزیع بدون در نظر گرفتن اولویت بندی بار: با اجرای این سناریو مطابق شکل (۳)، تعداد ۲۰۰ خانه در هر یک از باس‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۹ و تعداد ۱۰۰ خانه در هر یک از باس‌های ۲۲ و ۲۳ دپارفت ولتاژ (پائین‌تر از حد مجاز) می‌شوند. برای برقراری وضعیت مطلوب در سیستم و بازیابی بار، ابتدا کل نقطه بارهای LP19 و LP20 در باس ۱۶ که دارای پایین‌ترین حد ولتاژ هستند، قطع می‌شوند. از آنجایی که با قطع کل نقطه بارهای باس ۱۶ قید ولتاژ برآورده نشده است، باس بعدی که از نظر حد ولتاژ در محدوده پایینی قرار دارد، برای قطع بار انتخاب می‌شود. برای این منظور کل نقطه بار LP21 در باس ۱۷ نیز قطع می‌شود. مشاهده می‌گردد پس از قطع کل نقطه بار LP21، ولتاژ سیستم به شرایط عادی باز می‌گردد. جدول (۵) مقدار توان قطع شده و هزینه قطع بار را برای این سناریو نشان می‌دهد.

ترتیب به بارهای قابل جابجایی با اولویت ۱، بارهای قابل وقفه با اولویت ۲ و بارهای قابل تنظیم با اولویت ۳، دسته‌بندی شده اند. از آنجایی که میزان توان نصب شده برای هر خانه هوشمند ۱۰ کیلووات در نظر گرفته شده است، مقدار توان نصب شده برای بارهای قابل وقفه ۳۱۰۰ وات، بارهای قابل جابجایی ۳۵۰۰ وات و بارهای قابل تنظیم ۲۶۰۰ وات می‌باشد. همچنین در طرح پیشنهادی، بارهای قابل تنظیم می‌توانند در حالت اضطراری به ۱ کیلووات کاهش یابند. بارهای قابل وقفه تنها می‌توانند قطع شوند و بارهای قابل جابجایی در صورتی که در حال کار نباشد، می‌توانند به ساعت دیگر منتقل شوند و در غیر اینصورت تا اتمام سیکل کاری باید به کار خود ادامه دهند. به همین دلیل ۵۰۰ وات از بارهای قابل جابجایی در حال کار در نظر گرفته شده است و ۳ کیلووات از آنها می‌توانند در حالت اضطراری به ساعات بعدی انتقال یابند.

جدول (۳) - دسته‌بندی بارهای نصب شده در یک خانه هوشمند

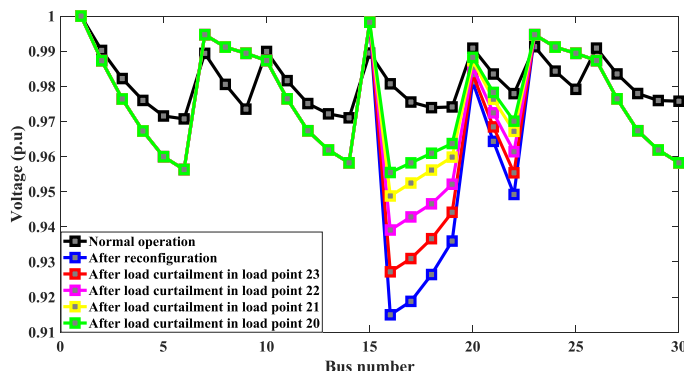
ردیف	دسته‌بندی بارها			
	بارهای قابل کنترل (W)			بارهای غیر قابل کنترل (W)
	اولویت ۱: بارهای قابل جابجایی	اولویت ۲: بارهای قابل وقفه	اولویت ۳: بارهای قابل تنظیم	
۱	ماشین ظرف‌شویی (۱۱۰۰)	سشوار (۱۵۰۰)	فریزر (۵۰)	آبگرمکن (۵۰۰)
۲	ماشین لباسشویی (۱۰۰۰)	جارو برقی (۱۰۰۰)	یخچال (۵۰)	لپ‌تاب (۵۰)
۳	مخلوط‌کن برقی (۲۰۰)	چرخ خیاطی (۱۰۰)	روشنایی (۵۰۰ وات)	کیس کامپیوتر (۲۰۰)
۴	مایکروویو (۱۲۰۰)	کولر آبی (۵۰۰)	اسپیکت (۲۰۰۰)	مانیتور (۵۰)
جمع کل	۳۵۰۰	۳۱۰۰	۲۶۰۰	۸۰۰

در سناریو سوم، هزینه برداشت هوشمند بارها بر اساس اولویت بندی بار و با توجه به دسته بندی فیدرهای فشار ضعیف، در جدول (۴) ارائه گردیده است. در بخش بعدی این مقاله، با توجه به سطح اتوماسیون شبکه توزیع از اطلاعات ارائه شده در این بخش استفاده خواهد شد.

جدول (۴) - هزینه قطع بار / برداشت بار برای سناریو سوم

هزینه	فیدر فشارضعیف با اولویت ۱		
	بار با اولویت ۱	بار با اولویت ۲	بار با اولویت ۳
	۲/۵	۲	۱/۵
	فیدر فشارضعیف با اولویت ۲		

سناریو در مقایسه با مورد ۱ افزایش یا کاهش یابد، اما بارهای با اولویت بالاتر در شبکه باقی می‌مانند.



شکل (۴) - پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازبایی بار برای

سناریو اول - مورد ۲

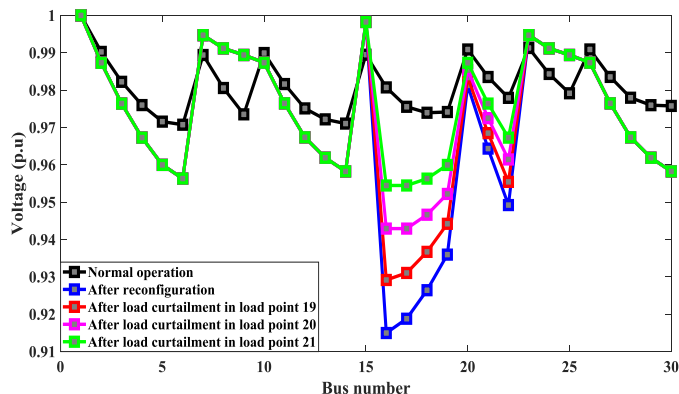
جدول (۶) - نتایج شبیه سازی برای سناریو اول - مورد ۲

مدت زمان اجرای برنامه (s)	محل قطع بار			هزینه قطع بار (\$/Kw)	مقدار توان قطع شده (Kw)	سناریو اول (مورد ۲)
	شماره باس	نقطه بار				
		بار قطع شده	شماره			
-	۱۸	کل بار	۲۳	۴۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۷	کل بار	۲۲	۳۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۷	کل بار	۲۱	۳۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۶	کل بار	۲۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	
۰/۸۸	-	-	-	۱۵۰۰۰	۴۰۰۰	جمع کل

سناریو دوم: اتوماسیون در سطح فیدرهای فشارضعیف:

مورد ۱: فیدرهای فشارضعیف بدون در نظر گرفتن اولویت بندی بار:

با اجرای سناریوی دوم، تعداد ۲۰۰ خانه در هر یک از باس‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۹ و تعداد ۱۰۰ خانه در هر یک از باس‌های ۱۸ و ۲۲ دچار افت ولتاژ می‌شوند. از آنجا که در این سناریو سطح دسترسی به فیدرهای فشار ضعیف امکان‌پذیر است، لذا برای برقراری تعادل توان و رسیدن شبکه به شرایط مطلوب، ابتدا کل نقطه بارهای LP19 و LP20 در باس ۱۶ و سپس تعداد ۷ فیدر فشار ضعیف از نقطه بار LP21 در باس ۱۷ قطع می‌شوند. نتایج شبیه سازی در جدول (۷) ارائه شده است. همچنین مطابق شکل (۵) مشاهده می‌گردد که ولتاژ پس از عملیات بازبایی به حالت عادی برگشته است. در این سناریو، هزینه قطع بار و مقدار توان قطع شده در مقایسه با سناریو اول کاهش یافته است.



شکل (۳) - پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازبایی بار برای

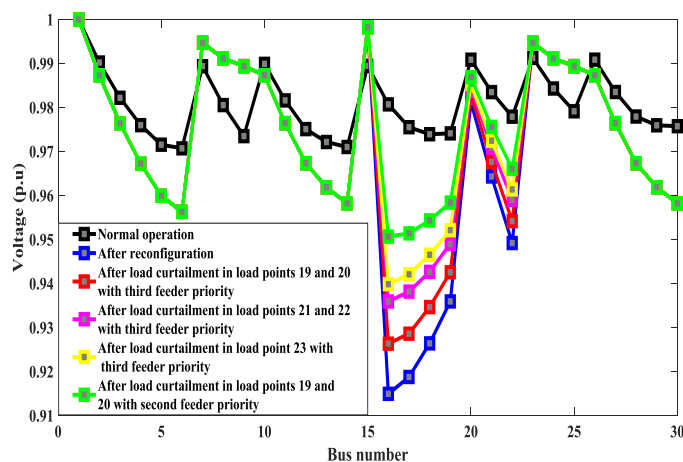
سناریو اول - مورد ۱

جدول (۵) - نتایج شبیه سازی برای سناریو اول - مورد ۱

مدت زمان اجرای برنامه (s)	محل قطع بار			هزینه قطع بار (\$/Kw)	مقدار توان قطع شده (Kw)	سناریو اول (مورد ۱)
	شماره باس	نقطه بار				
		بار قطع شده	شماره			
-	۱۶	کل بار	۱۹	۵۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۶	کل بار	۲۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۷	کل بار	۲۱	۵۰۰۰	۱۰۰۰	
۰/۱۴	-	-	-	۱۵۰۰۰	۳۰۰۰	جمع کل

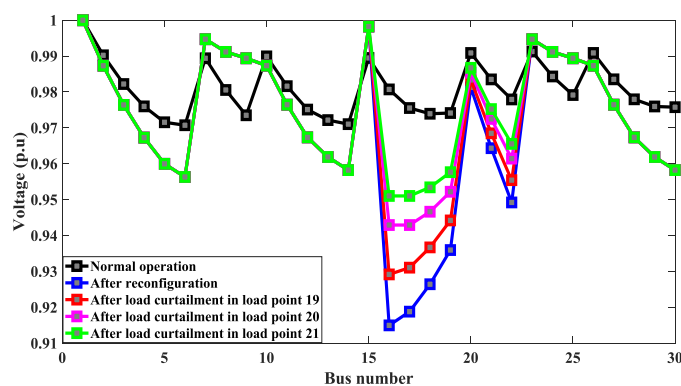
مورد ۲: پست‌های توزیع با در نظر گرفتن اولویت بندی بار:

در این مورد اولویت بندی پست‌های توزیع در نظر گرفته شده است. با اجرای این مورد، باس‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۲ دچار افت ولتاژ می‌شوند. برای بهبود وضعیت سیستم در این حالت، باید بخشی از بار قطع شود. باس ۱۶ و ۱۹ دارای اولویت اول، باس ۱۷ دارای اولویت دوم و باس ۱۸ دارای اولویت سوم از لحاظ اهمیت بارها هستند. مطابق شکل (۴)، ولتاژ باس ۱۶ در پایین‌ترین حد قرار دارد، بنابراین باید بار در این باس قطع شود. اما از آنجایی که باس ۱۶ دارای بالاترین اولویت بار و هزینه قطع بار بالا است، ابتدا باس ۱۸ به دلیل اولویت پایین‌تر و هزینه قطع بار کمتر، قطع می‌شود. باس انتخابی بعدی برای قطع بار بر اساس اولویت بار، باس ۱۷ است. سپس بین باس ۱۶، ۱۹ و ۲۲ به دلیل وضعیت بد ولتاژ در باس ۱۶، این باس برای قطع انتخاب خواهد شد. مطابق شکل (۴)، به ترتیب با قطع نقطه بارهای LP23، LP22، LP21 و LP20، ولتاژ سیستم به شرایط عادی باز می‌گردد. نتایج شبیه سازی در جدول (۶) ارائه شده است. در مقایسه با مورد اول، مقدار توان قطع شده افزایش و هزینه قطع بار تغییر نمی‌کند. به این دلیل که الگوریتم برای نگه داشتن بار با اولویت بالا، مجبور است بارهای با اولویت پایین‌تری را قطع کند ولی چون این بارها دارای هزینه کمتری هستند، بنابراین مقدار هزینه نسبت به مورد ۱ ثابت مانده است. همچنین با توجه به محل وقوع خطا ممکن است در بعضی از مواقع، مقدار توان قطع شده و هزینه قطع بار در این



شکل (۶) - پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازیابی بار برای

سناریو دوم - مورد ۲



شکل (۵) - پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازیابی بار برای

سناریو دوم - مورد ۱

جدول (۷) - نتایج شبیه سازی برای سناریو دوم - مورد ۱

مدت زمان اجرای برنامه (S)	محل قطع بار			هزینه قطع بار (\$/Kw)	مقدار توان قطع شده (Kw)	سناریو دوم (مورد ۱)
	شماره باس	نقطه بار				
		بار قطع شده	شماره			
-	۱۶	کل بار	۱۹	۵۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۶	کل بار	۲۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰	
-	۱۷	۷ فیدر	۲۱	۳۵۰۰	۷۰۰	
۰/۱۹	-	-	-	۱۳۵۰۰	۲۷۰۰	جمع کل

مورد ۲: فیدرهای فشار ضعیف با در نظر گرفتن اولویت بندی بار:

با توجه به اینکه در این سناریو فیدرهای فشار ضعیف اولویت بندی شده‌اند، با اجرای این مورد، باس‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۲ دچار افت ولتاژ می‌شوند که برای برقراری تعادل توان، تعداد ۸ فیدر فشار ضعیف از باس ۱۶ برای اولویت سوم و دوم فیدرهای فشار ضعیف (۴ فیدر فشار ضعیف با اولویت سوم از نقطه بار LP19، ۴ فیدر فشار ضعیف با اولویت دوم از نقطه بار LP19، ۴ فیدر فشار ضعیف با اولویت دوم از نقطه بار LP20)، تعداد ۸ فیدر فشار ضعیف از باس ۱۷ (۴ فیدر فشار ضعیف با اولویت سوم از نقطه بار LP21، ۴ فیدر فشار ضعیف با اولویت سوم از نقطه بار LP22) و ۴ فیدر فشار ضعیف با اولویت سوم از باس ۱۸ قطع می‌شوند. نتایج شبیه سازی در جدول (۸) ارائه شده است. همچنین در شکل (۶) مقدار پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازیابی نشان داده شده است. ولتاژ پس از عملیات بازیابی بهینه بار به حالت عادی برگشته است.

جدول (۸) - نتایج شبیه سازی برای سناریو دوم - مورد ۲

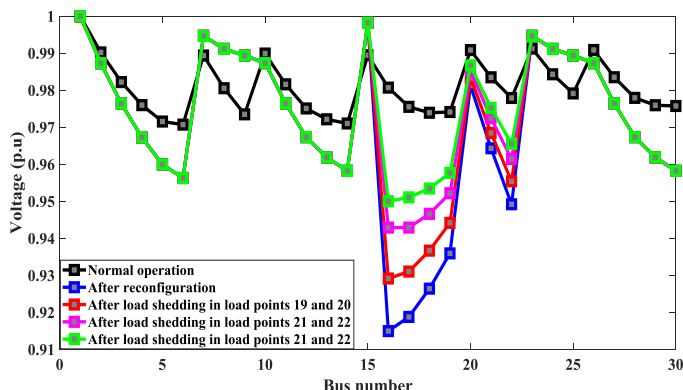
مدت زمان اجرای برنامه (S)	محل قطع بار			هزینه قطع بار (\$/Kw)	مقدار توان قطع شده (Kw)	سناریو دوم (مورد ۲)
	شماره باس	نقطه بار				
		بار قطع شده	شماره			
-	۱۶	۸ فیدر با اولویت ۳	۲۰ و ۱۹	۲۴۰۰	۸۰۰	
-	۱۷	۸ فیدر با اولویت ۳	۲۲ و ۲۱	۲۴۰۰	۸۰۰	
-	۱۸	۴ فیدر با اولویت ۳	۲۳	۱۲۰۰	۴۰۰	
-	۱۶	۸ فیدر با اولویت ۲	۲۰ و ۱۹	۳۲۰۰	۸۰۰	
۲ / ۰۵	-	-	-	۹۲۰۰	۲۸۰۰	جمع کل

سناریو سوم: اتوماسیون در سطح بار مشترکین:

مورد ۱: اولویت بندی بارهای مشترکین بدون در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف:

در این سناریو بارهای قابل کنترل در خانه‌های هوشمند اولویت بندی شده‌اند. با اجرای این سناریو باس‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۲ دچار افت ولتاژ می‌شوند. برای ایجاد شرایط مطلوب در سیستم و برقراری تعادل توان، برداشت هوشمند بارهای با اولویت ۱، ۲ و ۳ برای تعداد ۲۰۰ خانه در باس ۱۶، برداشت هوشمند بارهای با اولویت ۲ و ۳ برای تعداد ۲۰۰ خانه و اولویت ۱ برای ۱۵۶ خانه در باس ۱۷ انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۹) ارائه شده است. در شکل (۷) مقدار پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازیابی نشان داده شده است. در این سناریو هزینه قطع بار نسبت به سناریوهای قبلی

کاهش چشمگیری داشته است. همچنین مقدار توان قطع شده نیز کاهش یافته است.



شکل (۷) - پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازیابی بار برای سناریو سوم - مورد ۱

جدول (۹) - نتایج شبیه سازی برای سناریو سوم - مورد ۱

مقدار توان قطع شده (Kw)	هزینه قطع بار (\$/Kw)	محل برداشت بار		مدت زمان اجرای برنامه (S)
		نقطه بار		
		شماره	بار برداشت شده	
۱۴۲۰	۲۱۸۸	۱۹ و ۲۰	۲۰۰ خانه (تمام) اولویت های برداشت بار)	-
۱۲۸۸	۲۱۴۲	۲۱ و ۲۲	۲۰۰ خانه (اولویت های ۲ و ۳ برداشت بار)	-
		۲۱ و ۲۲	۱۵۶ خانه (اولویت های ۱ برداشت بار)	-
۲۷۰۸	۴۳۳۰	-	-	۲ / ۶۵

مورد ۲: اولویت بندی بار های مشترکین با در نظر گرفتن اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف:

در این سناریو اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف نیز در نظر گرفته شده است. همانند مورد ۱، با اجرای این سناریو، مطابق شکل ۸ باس های ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۲ دچار افت ولتاژ می شوند. در این شرایط برای بهبود وضعیت سیستم، برداشت هوشمند بار بر حسب اولویت بندی بار در خانه های هوشمند و همچنین اولویت بندی فیدرهای فشار ضعیف صورت می گیرد. در این

سناریو مراحل مختلف بازیابی، با استفاده از برداشت هوشمند بار انجام می شود. برداشت بار تا زمانی ادامه می یابد که مقدار ولتاژ به محدوده مجاز (۰/۹۵) باز گردد. مطابق شکل (۸) برای رسیدن به محدوده مجاز ولتاژ، نیاز به هفت مرحله برداشت بار وجود دارد. مراحل برداشت هوشمند بار به همراه مقدار توان قطع شده در هر مرحله در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۱۰) - نتایج شبیه سازی برای سناریو سوم - مورد ۲

مقدار توان قطع شده (Kw)	هزینه قطع بار (\$/Kw)	محل برداشت بار		مدت زمان اجرای برنامه (S)
		نقطه بار		
		شماره	بار برداشت شده	
۵۶۸	۶۴۸	۱۹ و ۲۰	۸۰ خانه تمام اولویت های برداشت بار (اولویت ۳ فیدر)	-
۵۶۸	۶۴۸	۲۱ و ۲۲	۸۰ خانه تمام اولویت های برداشت بار (اولویت ۳ فیدر)	-
۲۸۴	۳۲۴	۲۳	۴۰ خانه تمام اولویت های برداشت بار (اولویت ۳ فیدر)	-
۵۶۸	۶۴۸	۲۴ و ۲۵	۸۰ خانه تمام اولویت های برداشت بار (اولویت ۳ فیدر)	۱۹
۵۶۸	۹۳۲	۱۹ و ۲۰	۸۰ خانه تمام اولویت های برداشت بار (اولویت ۲ فیدر)	۱۶
۴۳۶	۶۶۸	۲۱ و ۲۲	۸۰ خانه اولویت های ۱ و ۲ برداشت بار و ۳۶ خانه اولویت ۳ برداشت بار (اولویت ۲ فیدر)	۱۷
۳۹۹۲	۳۸۶۸	-	-	-
جمع کل				۳/۷۳

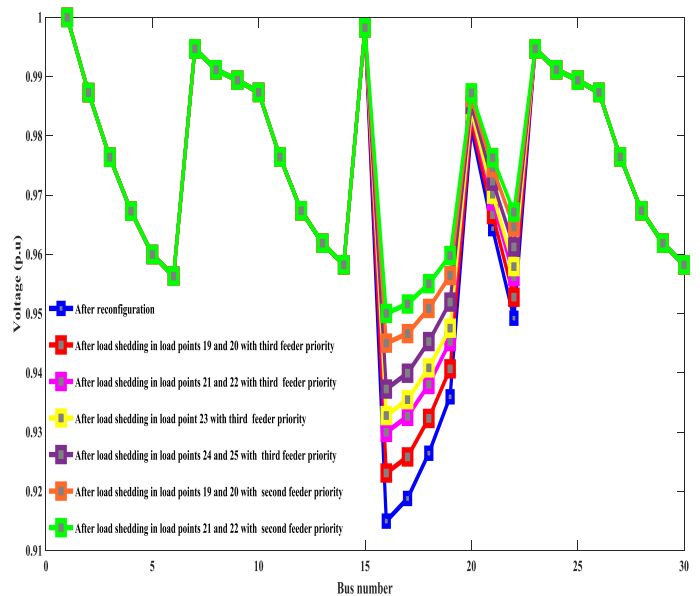
سناریو سوم - مورد ۱	۲۷۰۸	۴۳۳۰	۲/۶۵
سناریو سوم - مورد ۲	۲۹۹۲	۳۸۶۸	۳/۷۳

۵- نتیجه گیری

در این مقاله طرحی جدید با عنوان برداشت هوشمند بار ارائه شده است تا در مواقعی که بعد از وقوع خطا، امکان تامین بار در شبکه و جود ندا شته با شد، بازیابی بار در شبکه با کمترین هزینه خروج و در کوتاه ترین زمان ممکن انجام شود. در روش پیشنهادی، انواع بارهای موجود در خانه های هوشمند مدلسازی و اولویت بندی شده اند. بارهای قابل کنترل بر حسب میزان اهمیت بار ها، به بارهای قابل جابجایی، قابل وقفه و قابل تنظیم دسته بندی شده اند. همچنین سه سناریو بر اساس سطح اتوماسیون توزیع، برای اعتبار سنجی روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. هدف اصلی، نشان دادن اهمیت سطح اتوماسیون توزیع به منظور کاهش مدت زمان خاموشی مشترکین و جلب حداکثر رضایتمندی آنها در عملیات بازیابی بهینه بار می باشد. با توجه به نتایج شبیه سازی، هر چه سطح اتوماسیون در شبکه توزیع به سمت کنترل هوشمند بارهای مشترکین با شد، میزان قطع یا برداشت هوشمند بار و هزینه های بهره برداری سیستم نیز به شدت کاهش می یابد. همچنین روش پیشنهادی، قادر به بازیابی و بهره برداری اضطراری بهینه در انواع سیستم های توزیع با سطوح مختلف اتوماسیون است. از آنجایی که زمان انجام عملیات بازیابی بار، نقش بسیار مهمی در طراحی مدل ارائه شده در این مقاله ایفا می کند، لذا در تحقیقات پیش رو مطالعات بیشتری در مورد زمان اجرای برنامه و ارائه روش های جدید برای کاهش این زمان انجام خواهد شد.

مراجع

- [1] Chen, Bo, et al. "Toward a MILP modeling framework for distribution system restoration." *IEEE Transactions on Power Systems* 34.3 (2018): 1749-1760.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Chen, Bo, et al. "Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids." *IEEE Transactions on Power Systems* 33.2 (2017): 1507-1520.
- [5] Sun, Wei, et al. "Optimal distribution system restoration using phev." *IET Smart Grid* 2.1 (2018): 42-49.
- [6] Chen, Kening, et al. "Robust restoration decision-making model for distribution networks based on information gap decision theory." *IEEE Transactions on Smart Grid* 6.2 (2014): 587-597.
- [7] 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.



شکل (۸) - پروفیل ولتاژ قبل و بعد از دوره بازیابی بار برای سناریو سوم - مورد ۲

۲-۴- مقایسه نتایج

مطابق جدول (۱۱)، هر چه سطح اتوماسیون در شبکه توزیع به سمت کنترل بارهای مشترکین بالاتر رود، در طول دوره بازیابی بهینه بار، مقدار بار قطع یا برداشت شده کاهش می یابد و هزینه های بهره برداری سیستم که شامل هزینه قطع یا برداشت هوشمند بار می باشد نیز به شدت کم می شود. همچنین یکی از نکات مهم در زمینه بازیابی بهینه بار، سرعت انجام عملیات می باشد. به عبارتی، زمان انجام عملیات بازیابی برای بهره بردار سیستم بسیار حائز اهمیت است به دلیل اینکه کاهش مدت زمان خاموشی مشترکین و کسب حداکثر رضایتمندی آنان از مهمترین اهداف بازیابی محسوب می شود. در این مقاله حداکثر زمان دوره بازیابی بهینه بار در بدترین شرایط، برای سناریو سوم (مورد ۲) با زمان ۳/۷۳ ثانیه حاصل شده است. بنابراین روش پیشنهادی از نظر زمان محاسبات نیز بسیار موثر عمل می کند.

جدول (۱۱) - مقایسه نتایج

شماره سناریو	مقدار توان قطع شده / برداشت شده (Kw)	هزینه قطع بار / برداشت بار (\$/Kw)	مدت زمان اجرای برنامه (s)
سناریو اول - مورد ۱	۳۰۰۰	۱۵۰۰۰	۰/۱۴
سناریو اول - مورد ۲	۴۰۰۰	۱۵۰۰۰	۰/۲۸
سناریو دوم - مورد ۱	۲۷۰۰	۱۳۵۰۰	۰/۱۹
سناریو دوم - مورد ۲	۲۸۰۰	۹۲۰۰	۲/۰۵

- [۲۱] حسن جلیلی، محمد کاظم شیخ الاسلامی، محسن پارسا مقدم، «مدل سازی برنامه های پاسخگویی بار با استفاده از مفهوم ک شش پذیری کارا»، نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، سال پنجم، شماره دهم، ۱۳۹۵.
- [۲۲] فرید حمزه اقدم، نوید تقی زادگان کلانتری، «مدیریت انرژی در ریز شبکه های چدگانه با در نظر گرفتن قیود پخش بار و برنامه های پاسخگویی بار»، نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، سال ششم، شماره دوازدهم، ۱۳۹۶.
- [۲۳] محمد حسین صالح نژاد آریانی، محسن قایینی، «ارائه الگوریتم کنترل سطح مصرف مشترکین توزیع دارای کنترلر هوشمند و محاسبه پاداش هم کاری»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۹، شماره ۳، ۱۳۹۸.
- [24] Ferreira, Lucas Roberto, Alexandre Rasi Aoki, and Germano Lambert-Torres. "A Reinforcement Learning Approach to Solve Service Restoration and Load Management Simultaneously for Distribution Networks." IEEE Access 7 (2019): 145978-145987.
- [25] 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.
- [26] Gilani, Mohammad Amin, Ahad Kazemi, and Mostafa Ghasemi. "Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources." Energy 191 (2020): 116442.
- [27] Nozhati, Saeed, et al. "Optimal stochastic dynamic scheduling for managing community recovery from natural hazards." Reliability Engineering & System Safety 193 (2020): 106627.
- [28] Choopani, 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).
- [8] Dimitrijevic, Srdjan, and Nikola Rajakovic. "Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment." IEEE Transactions on Smart Grid 6.3 (2015): 1227-1232.
- [9] 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.
- [10] Sekhavatmanesh, Hossein, and Rachid Cherkaoui. "Distribution Network Restoration in a Multiagent Framework Using a Convex OPF Model." IEEE Transactions on Smart Grid 10.3 (2018): 2618-2628.
- [11] 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.
- [12] Sekhavatmanesh, Hossein, and Rachid Cherkaoui. "Optimal infrastructure planning of active distribution networks complying with service restoration requirements." IEEE Transactions on Smart Grid 9.6 (2018): 6566-6577.
- [13] Sekhavatmanesh, Hossein, and Rachid Cherkaoui. "Analytical Approach for Active Distribution Network Restoration Including Optimal Voltage Regulation." IEEE Transactions on Power Systems 34.3 (2018): 1716-1728.
- [14] Riahinia, Shahin, et al. "Load service restoration in active distribution network based on stochastic approach." IET Generation, Transmission & Distribution 12.12 (2018): 3028-3036.
- [15] Sampaio, Raimundo F., et al. "Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-agent systems." IET Generation, Transmission & Distribution 11.2 (2017): 475-484.
- [۱۶] مسعود زادسر، محمود رضا حق فام، «تأثیر استراتژی مدیریت خودکار خروج و خودترمیمی بر قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع هوشمند تحت نفوذ منابع انرژی گسترده»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد XX، شماره XX، ۱۳۹۶.
- [۱۷] حسین نصرت پور، علی زنگنه، «خودترمیمی بهینه شبکه های توزیع هوشمند مبتنی بر گراف درخت پوشا و بهبود قابلیت اطمینان شبکه»، مجله مهندسی برق و الکترونیک، جلد ۱۶، شماره اول، ۱۳۹۸.
- [۱۸] داریوش نظریور، افشین محبوب خواه، «بررسی تأثیر عدم قطعیت بار بر اولویت اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار»، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال هفتم، شماره چهارم، صفحه ۲۰، ۱۳۹۶.
- [۱۹] محسن کجوری نفت چالی، علیرضا فریدونیان، حمید لسانی، «ارائه روشی تطبیقی مبتنی بر تئوری گراف برای ارزیابی میزان اثرپذیری مشترکین در نتیجه مشارکت در پاسخگویی بار»، نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، سال ششم، شماره ۱۲، ۱۳۹۶.
- [۲۰] جواد صائی، محمدحسین جاویدی، «ارزیابی اقتصادی پاسخگویی بار در حضور مقادیر بالای انرژی باد در سیستم قدرت»، نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، سال دوم، شماره چهارم، ۱۳۹۲.