



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 2, 2020
Research Paper

Improving self-healing of smart distribution network by allocating switches and distributed generation resources using soft computing

Avesta Jafari¹, Abbas Shahbazian¹, Alireza Fereidunian¹, Amir Hossein Nikoofard¹
¹ Dept. of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Expansion of distribution networks to increase the reliability due to change of behavior and type of customers is a requirement. On the other side, the concern about environment and climate changes has led to use of renewable energy sources as a replacement for fossil generation sources. DGs based on RES and control switches can play an important role in improving the reliability of the grid, decreasing the costs and mitigating environmental effects. The main purpose of this article is evaluating the remote control switches and manual control and sizing of RES-based DG units including solar cells and wind turbines and simultaneous placement of these units considering their generation uncertainty. The intended function is a bi-objective function that includes reducing network costs and improving the Side Reliability Index and technical and economic constraints are considered too. The intended function is modeled as a mixed integer nonlinear programming and four evolutionary algorithms are used to solve this problem and their results are compared. Roy Billinton 4-bus network is chosen as the test network in this article.

Keywords: reliability, self-healing, smart distributed network, uncertainty, controlled switches, distributed generation resources.



2252-083X/ © 2020 The Authors. Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2019.118933.1273>

بهبود خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند با تخصیص کلیدها و منابع تولید پراکنده با

استفاده از محاسبات نرم

اوستا جعفری^۱، عباس شهبازیان^۲، علیرضا فریدونیان^۳، امیرحسین نیکوفرد^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

avestajfr@email.kntu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

ashahbazian@email.kntu.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

fereidunian@eetd.kntu.ac.ir, a.nikoofard@kntu.ac.ir

چکیده: توسعه شبکه‌های توزیع به منظور افزایش پایداری این شبکه‌ها، به دلیل تغییر رفتار و نوع مشترکین امری ضروری است. نگرانی درباره تغییرات اقلیمی و زیست محیطی، به ظهور منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی برای منابع تولید فسیلی منجر شده است. منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر و کلیدهای کنترلی می‌توانند نقش مهمی در بهبود پایداری و کاهش هزینه‌های شبکه داشته باشند. هدف اصلی این مقاله جایابی کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی هم‌زمان با جایابی و تخصیص ظرفیت منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر شامل سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید توان این منابع است. تابع هدف در نظر گرفته شده، یک تابع دوهدفه شامل کاهش هزینه‌های شبکه و بهبود شاخص پایداری سایه است. همچنین، برای این تابع هدف محدودیت‌های فنی و اقتصادی در نظر گرفته شده است. تابع هدف مدنظر به صورت یک برنامه‌ریزی غیرخطی همراه با عدد صحیح مدل شده است و برای حل این مسئله از چهار الگوریتم تکاملی، استفاده و نتایج آنها با هم مقایسه شده‌اند. شبکه مطالعه شده در این مقاله، شبکه ۴ باس روی بیلیتون است.

واژه‌های کلیدی: پایداری، خودترمیمی، شبکه توزیع هوشمند، عدم قطعیت، کلیدهای کنترلی، منابع تولید پراکنده

۱- مقدمه

برآورده کردن نیازهای مشترکین بیش از پیش شایان توجه قرار گرفته است و دیگر شبکه‌های توزیع سنتی پاسخگوی نیاز مشترکین نیستند [۱]. حدود ۸۰٪ از خاموشی‌های مشترکین نیز ناشی از وقوع خطا در شبکه توزیع است [۲]. همچنین، نگرانی درباره تغییرات اقلیمی و زیست محیطی و افزایش گازهای گلخانه‌ای باعث شده است پژوهشگران به فکر جایگزینی برای منابع تولید سنتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی سیستم‌های قدرت باشند [۳]؛ از این رو، منابع انرژی تجدیدپذیر نقشی مهمی در شبکه‌های توزیع هوشمند دارند. در سالیان اخیر به دلیل پیشرفت‌هایی که در فناوری اطلاعات و ارتباطات و منابع تولید پراکنده رخ داده، ظهور شبکه‌های هوشمند را سبب شده است [۴]. یک شبکه

امروزه یکی از اهداف مهم در برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع، بهبود پایداری شبکه توزیع است. با افزایش روزافزون استفاده از انرژی الکتریکی، تغییر رفتار و نوع مشترکین و گسترش تعداد مشترکین، نقش شبکه‌های توزیع در

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲

نام نویسنده مسئول: علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق

پروفیل ولتاژ و تلفات توان شبکه با استفاده از تغییر بهینه توپولوژی شبکه برای عملکرد این سیستم در نظر گرفته می‌شود. برای حالت غیرعادی شبکه که بیشتر مربوط به وضعیت شبکه در شرایط وقوع خطاست، هدف اصلی سیستم مدیریت شبکه افزایش سرعت اجرای فرایند FLISR است. همچنین، برای حالتی که شبکه در وضعیت هشدار قرار گرفته است، سیستم مدیریت شبکه توابع هدف کارایی را دربردارد. پژوهش‌های انجام‌شده با موضوع بهبود خودترمیمی شبکه، در لایه‌ای به نام تقویت ترمیم‌گر و بهبود عملکرد سیستم مدیریت شبکه توزیع در برابر رخداد خطا در دو بخش افزایش ایمنی شبکه و افزایش کفایت شبکه بررسی می‌شود. در [۹] افزایش ایمنی شبکه توزیع از طریق توسعه سیستم‌های حفاظتی و کنترلی بررسی شد. در [۱۰] مطالعاتی راجع به افزایش کفایت شبکه از طریق منابع تولید پراکنده انجام شده است.

هوشمند باید قادر به تشخیص و شناسایی خطا و بازیابی سرویس (FLISR) به مشترکین به صورت اتوماتیک باشد [۵]. به منظور دستیابی به این موارد در شبکه‌های هوشمند، ویژگی خودترمیمی شبکه هوشمند بیان شد که باعث افزایش چشمگیر پایایی می‌شود [۶]. در مطالعات انجام‌شده در زمینه خودترمیمی، برای آن لایه‌های مختلفی در نظر گرفته شده است. در [۷] شبکه‌های خودترمیم به دو سطح سیستم و تجهیزات تقسیم‌بندی شده‌اند. در [۸] برای خودترمیمی سه لایه در نظر گرفته شده است و ساختار پیشنهادشده برای یک شبکه خودترمیم در شکل (۱) نشان داده شده است. سیستم مدیریت شبکه توزیع، برای حالت‌های مختلف شبکه باید توابع هدف مختلفی را دنبال کند. در حالت نرمال، هدف سیستم مدیریت شبکه، بهینه‌سازی وضعیت بهره‌برداری شبکه است؛ بنابراین، توابع هدف مختلفی از جمله کاهش بارگذاری خطوط، بهبود



شکل (۱): چارچوب خودترمیمی [۱۹]

راه‌های بهبود ویژگی خودترمیمی در شبکه‌های توزیع هوشمند، استفاده از منابع تولید پراکنده است. منابع تولید پراکنده به دو صورت مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیرند [۱۲]. استفاده از این منابع هم به بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه منجر می‌شود و

مطالعات زیادی برای بررسی تأثیر تجهیزات کنترلی مانند کلیدهای کنترل از راه دور و کلیدهای کنترل دستی، تجهیزات حفاظتی مانند فیوزها، تجهیزات پایشی مانند نمایشگر خطا، بر ویژگی خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند انجام شده است [۱۱]. همان‌طور که گفته شد، یکی از

کنترلی برای بهبود پایایی صرف نظر شد. در مرجع [۲۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک جایابی چندهدفه پارکینگ خودروها انجام شده، اما رفتار تصادفی خودروهای الکتریکی در نظر گرفته نشده است. همچنین، خودروهای الکتریکی فقط برای خدمات رسانی به مشترکینی استفاده می‌شوند که در ناحیه خطا هستند. در مرجع [۲۱]، نوع و مکان بهینه تجهیزات اتوماسیون برای بهبود پایایی با یک برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح مشخص شده است. گفتنی است مدل احتمالاتی هزینه وقفه مشترکین و حضور منابع تولید پراکنده دیده شده است. و همچنین در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شد. تابع هدف این مرجع بیشتر به هزینه وابسته است و به طور مستقیم شاخص‌های پایایی در آن تأثیرگذار نیست. در این مقاله منابع تولید پراکنده به منظور تأثیر بیشتر بر بهبود پایایی جایابی نشده است.

هدف بیان شده در مرجع [۲۲] به دست آوردن مکان بهینه منابع تولید پراکنده برای بهبود پایایی در یک شبکه توزیع با در نظر گرفتن هزینه است. روش استفاده شده برای حل مسئله بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک است در مرجع [۲۳] جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به منظور حداقل کردن تلفات توان اکتیو شبکه توزیع انجام شده است. در این مقاله از سه نوع منابع تولید پراکنده شامل CHP و توربین بادی و سلول‌های خورشیدی استفاده شده است. در مرجع [۲۴] یک تابع هدف پایایی محور برای جایابی منابع تولید پراکنده به همراه ریکلوزرها ارائه شده که با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان حل شده است.

با توجه به مطالعات انجام شده، در برخی مقالات به منظور بهبود خودترمیمی شبکه و در نتیجه افزایش پایایی، جایابی بهینه تجهیزات کنترلی، حفاظتی و پایشی (تجهیزات اتوماسیون) انجام شده است. در برخی دیگر از مقالات مطالعاتی درباره تأثیر جایابی و ظرفیت‌یابی منابع تولید پراکنده برای بهبود پایایی شبکه صورت گرفته است. در مطالعاتی دیگر نیز جایابی تجهیزات کنترلی به همراه تنها ظرفیت‌یابی منابع تولید پراکنده انجام شده است. در بسیاری از مقالات، تابع هدف ارائه شده تک‌هدفه است که فقط شامل یک بخش اقتصادی یا یک بخش فنی است. به‌طور کلی

هم در افزایش پایایی شبکه توزیع تأثیرگذار است. به کارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع هوشمند همراه با چالش‌هایی است که مهم‌ترین آنها عبارت است از یافتن مکان مناسب منابع تولید پراکنده در شبکه، ظرفیت و تعداد منابع تولید پراکنده. نادیده گرفتن هر یک از این عوامل، بر عملکرد شبکه توزیع تأثیر منفی دارد [۱۳].

به طور کلی مسئله جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده می‌تواند به روش کلاسیک یا با الگوریتم‌های تکاملی (محاسبات نرم) حل شوند که هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایبی دارند. مشکل مهم استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، گیرکردن جواب در بهینه محلی [۱۴] و همچنین، کاهش چشمگیر سرعت آنها با افزایش ابعاد مسئله است. استفاده از روش حل کلاسیک در حل مسئله غیرخطی همراه با عدد صحیح نیز به دستیابی جواب بهینه سراسری منجر نمی‌شود و برای یافتن جواب بهینه سراسری باید مسئله خطی‌سازی شود [۱۵]؛ خطی‌سازی مسائل نیز خط‌هایی را به مسئله وارد می‌کند. مرجع [۱۶] بهترین روش برای حل مسائل MINLP را استفاده از الگوریتم‌های تکاملی می‌داند؛ اما به‌طور کلی برای انتخاب یکی از این دو روش برای حل مسائل MINLP بحث وجود دارد.

در مرجع [۱۷] از الگوریتم کلونی زنبور برای مسئله مکان‌یابی هم‌زمان کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی استفاده شده است. تابع هدف ارائه شده در این مقاله فقط شامل هزینه است و از شاخص‌های پایایی در تابع هدف استفاده نشده است. در مرجع [۱۸] یک برنامه‌ریزی خطی همراه با عدد صحیح به منظور تعیین تعداد، نوع و مکان تجهیزات اتوماسیون به‌طور هم‌زمان ارائه شده است. تابع هدف این مقاله شامل محاسبات اقتصادی و شاخص‌های پایایی است. در این مقاله احتمال عملکردی تجهیزات و عدم قطعیت در تولید منابع تولید پراکنده لحاظ نشده است. در مرجع [۱۹] با استفاده از تعیین مکان و سایز بهینه پارکینگ‌های خودروهای هیبریدی قابلیت خودترمیمی شبکه بهبود یافته است. در این مقاله، خودروهای هیبریدی هم واحد پشتیبان در مناطق خط‌ادیده و هم واحدهای ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف استفاده شده در این مقاله شامل هزینه و شاخص‌های پایایی است؛ اما از کلیدهای

اهمیت جابجایی هم‌زمان تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده است. تابع هدف مسئله شامل یک بخش اقتصادی و یک بخش فنی است. بخش اقتصادی شامل مجموعه هزینه‌های شبکه و بخش فنی تابع هدف شامل شاخص پایایی میانگین تداوم وقفه مشترکین (SAIDI)^(۴) است.

در ادامه مقاله، مدل‌سازی ریاضی مسئله شامل مدل سازی سرعت باد و تابش خورشید و همچنین، تابع هدف و محدودیت‌های آن ارائه شده است. در بخش سوم، روش حل مسئله شامل الگوریتم‌های استفاده‌شده، روش تصمیم‌گیری فازی و تعریف ساختار پاسخ‌های مسئله ارائه شده است. در پایان، نتایج شبیه‌سازی عددی سناریوهای در نظر گرفته شده به همراه تحلیل حساسیت بیشینه سرمایه‌گذاری و نتیجه‌گیری بیان شده‌اند.

۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله

منابع تولید پراکنده استفاده‌شده در این مقاله شامل سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی است. با توجه به عدم قطعیت در تولید توان توسط این منابع و به‌منظور دستیابی به یک طراحی عملی و قابل اتکا، محاسبه توان تولیدی این منابع با در نظر گرفتن عدم قطعیت انجام شده است. در واقع، توان تولیدی منابع تولید پراکنده به‌صورت احتمالاتی مدل شده است. روش کلی استفاده‌شده برای حل مسئله در این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است. میزان تابش خورشید و سرعت باد برای هر یک ساعت از روز به ترتیب با تابع چگالی احتمال بتا و تابع چگالی احتمال ویبول براساس اطلاعات گذشته مدل شده‌اند [۲۵]. در این مقاله، سناریوسازی برای عدم قطعیت موجود در منابع تولید با استفاده از روش مونت کارلو و فرایند کاهش سناریو با روش خوشه‌بندی K-Means انجام شده‌اند.

۲-۱- مدل‌سازی سرعت باد

تابع چگالی احتمال ریلی، بیشتر در مراجعی مانند [۲۵]، به‌عنوان مدل توصیف‌کننده رفتار سرعت باد در هر پریود پیش‌بینی‌شده، استفاده شده است. تابع توزیع احتمال ریلی در واقع نوع خاص از تابع توزیع احتمال ویبول است که در آن، پارامتر شاخص شکل برابر با ۲ است.

مقالات موجود با موضوع بهبود خودترمیمی با استفاده از تجهیزات اتوماسیون و منابع تولید پراکنده به صورت جدول (۱) دسته‌بندی شده است؛ بنابراین خلأ یک برنامه‌ریزی چندهدفه به‌منظور مکان‌یابی و ظرفیت‌سنجی کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده به‌صورت هم‌زمان مشخص است. بنابراین، کمبود مطالعه در زمینه جابجایی و ظرفیت‌سنجی کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده به‌صورت هم‌زمان و ارائه یک برنامه‌ریزی چندهدفه احساس می‌شود.

جدول (۱): طبقه‌بندی مراجع در بهبود خودترمیمی با استفاده از منابع تولید پراکنده و تجهیزات اتوماسیون

| | [۱۷] | [۲۲] | [۲۳] | [۲۴] | [۲۱] | این مقاله |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| جابجایی یک نوع از تجهیزات اتوماسیون | x | x | x | √ | x | x |
| جابجایی انواع تجهیزات اتوماسیون | √ | x | x | x | √ | √ |
| جابجایی DG | x | √ | √ | √ | x | √ |
| ظرفیت‌یابی DG | x | x | √ | x | x | √ |
| تابع | تابع | تابع | تابع | تابع | تابع | تابع |
| هدف: | هدف: | هدف: | هدف: | هدف: | هدف: | هدف: |
| شاخص | تلفات | شاخص | تلفات | شاخص | شاخص | شاخص |
| هزینه | هزینه | هزینه | هزینه | هزینه | هزینه | هزینه |
| شبکه | شبکه | شبکه | شبکه | شبکه | شبکه | شبکه |
| پایایی | پایایی | پایایی | پایایی | پایایی | پایایی | پایایی |
| هزینه | هزینه | هزینه | هزینه | هزینه | هزینه | هزینه |

در این مقاله، یک تابع چندهدفه برای تخصیص ظرفیت و مکان‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده هم‌زمان با تعیین تعداد و نوع و مکان‌یابی بهینه کلیدهای کنترلی با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و اقتصادی ارائه شده است. منابع تولید پراکنده شامل توربین‌های بادی (WT) و سلول‌های خورشیدی (PV) است که توان تولیدی آنها با در نظر گرفتن عدم قطعیت محاسبه شده است. منابع تولید پراکنده به‌عنوان تأمین‌کننده بخشی از بارهای در ناحیه ایزوله‌شده و همچنین، به‌عنوان پشتیبان برای جلوگیری از گرفتگی خطوط استفاده شده است. برای حل این مسئله دو سناریو در نظر گرفته شده است که نتایج این دو سناریو نشان‌دهنده

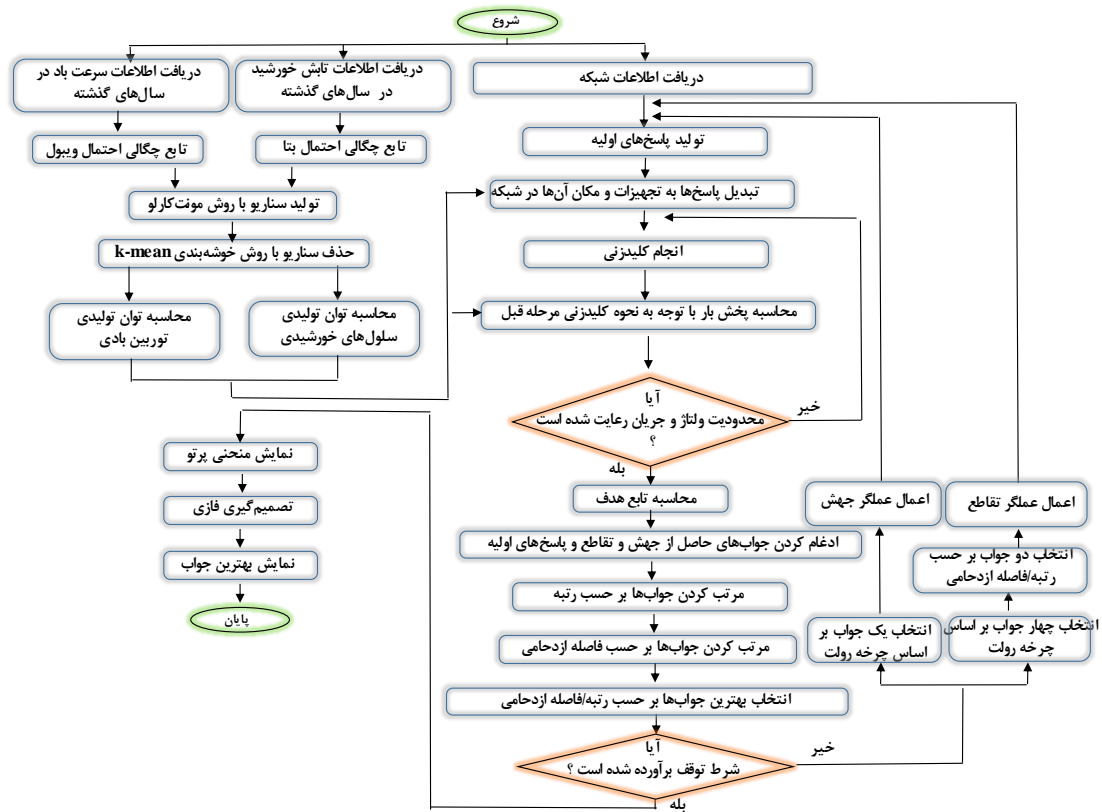
$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_{aw} \leq v_{ci} \\ P_{rated} * \frac{(v_{aw} - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})}, & v_{ci} \leq v_{aw} \leq v_r \\ P_{rated}, & v_r \leq v_{aw} \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v_{aw} \end{cases} \quad (\xi)$$

$$f_w(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$V_m = \int_0^\infty v f_w(v) dv = \int_0^\infty \left(\frac{2v^2}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad (2)$$

$$c \cong 1.128 V_m \quad (3)$$

همچنین، توان خروجی توربین بادی با استفاده از معادله (۵) به دست می آید [۲۵]:



شکل (۲): فلوچارت روش حل مسئله

$$\beta = (1 - \mu) * \left(\frac{\mu(1+\mu)}{\sigma^2} - 1\right) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\mu * \beta}{1 - \mu} \quad (7)$$

برای محاسبه توان تولیدی با سلول های خورشیدی از رابطه (۸) استفاده شده است [۲۵]:

$$P_{PV}(s_i) = \eta^{PV} * S^{PV} * s_i \quad (8)$$

۲-۲- مدل سازی تابش خورشید

توان خروجی سلول های خورشیدی به طور قطعی به میزان تابش خورشید بستگی دارد. توزیع تابش ساعتی در یک مکان خاص با تقریب مناسبی از یک توزیع احتمالاتی بتا پیروی می کند. این تابع توزیع در معادله (۵) نشان داده شده است [۲۵]:

$$f_b(s_i) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} * s_i^{\alpha-1} * (1-s_i)^{\beta-1} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

۲-۳- تابع هدف

$$\forall j \in \theta^{LP}$$

$$PW^i = \left(\frac{1}{1+At}\right)^i \quad (16)$$

$$1+At = (1+inf) \cdot (1+int) \quad (17)$$

معادله (۹) نشان دهنده تابع هدف مقاله است. این معادله از دو بخش تشکیل شده است؛ بخش اول تابع هدف (F1) مجموعه هزینه ها و بخش دوم تابع هدف (F2) شاخص پایای شبکه است. معادله (۱۰) تمامی هزینه های شبکه را نشان می دهد که از سه بخش تشکیل شده است و معادله (۱۱) نحوه محاسبه شاخص پایایی سایدی برای کل شبکه مطالعه شده را نشان می دهد. بخش اول هزینه، مطابق با معادله (۱۲)، هزینه های اولیه مربوط به خرید و نصب تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده است. در این معادله، β متغیری برای تعیین مکان و نوع کلید کنترلی و همچنین، α متغیری برای تعیین مکان و نوع منابع تولید پراکنده و ظرفیت آن است. در جدول (۲) تمام مقادیر مربوط به متغیرهای α و β گزارش شده اند.

بخش دوم هزینه، مطابق با معادله (۱۳)، هزینه تعمیرات و نگهداری سالیانه کلیه تجهیزات شبکه در طول افق زمانی برنامه ریزی است. بخش سوم هزینه شامل هزینه خروج انواع مشترکین شبکه در طول افق زمانی برنامه ریزی است که در معادله (۱۴) نشان داده شده است. در این بخش، نرخ جریمه ناشی از خروج هر یک از انواع بارها با توجه به مدت زمان خروج آن بار با استفاده از شکل (۳) و معادله (۱۵) به دست می آید و واحد آن دلار بر کیلووات است. به عبارت دیگر، معادله (۱۵) بیان می کند هزینه خاموشی هر یک از انواع بارها در سال، با توجه به مدت زمان خروج آن بارها در همان سال، به ازای هر کیلووات چقدر است. همچنین، با استفاده از معادله های (۱۶) و (۱۷)، ارزش کنونی سرمایه ها در سال برنامه ریزی محاسبه می شود.

هدف اصلی این مقاله تعیین تعداد و نوع کلیدهای کنترلی (کلیدهای کنترل از راه دور و کلیدهای کنترل دستی) و جایابی آنها در محل های کاندیدا هم زمان با تعیین ظرفیت و تعداد و جایابی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع در طول مدت زمان برنامه ریزی است. همچنین، برای دستیابی به چنین اهدافی باید محدودیت های فنی و اقتصادی برآورده شود. تابع هدف مقاله از دو بخش تشکیل شده است؛ بخش اول شامل تمامی هزینه های شبکه است که عبارت است از ۱- هزینه اولیه برای خرید و نصب کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده؛ ۲- هزینه مربوط به تعمیر و نگهداری کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده و ۳- جریمه ناشی از خروج انواع مشترکین. بخش دوم تابع هدف شامل شاخص پایایی سایدی (میانگین تداوم وقفه مشترکین) است.

در این مقاله، مسئله جایابی هم زمان کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده به صورت یک برنامه ریزی غیرخطی همراه با عدد صحیح (MINLP) مدل شده است و معادلات آن به صورت زیرند:

$$Objective\ Function = Min \{F_1, F_2\} \quad (9)$$

$$F_1 = C_{Total} = C_{Inv}^{Switch,DG} + C_{Main}^{Switch,DG} + C_{CIC} \quad (10)$$

$$F_2 = SAIDI = \frac{\sum U_j \cdot N_j}{\sum N_j} \quad (11)$$

$$C_{Inv}^{Switch,DG} = C_{Inv}^{DG} + C_{Inv}^{SA} + C_{Inv}^{SM} \\ = \sum_{i \in \theta^{DG}} \alpha_i^{DG} \cdot C_i^{DG} + \sum_{j \in \theta^S} \beta_j^S \cdot C_j^{SA} + \sum_{k \in \theta^S} \beta_k^S \cdot C_k^{SM} \quad (12)$$

$$C_{Main}^{Switch,DG} = C_{Main}^{SA} + C_{Main}^{SM} + C_{Main}^{DG} \quad (13)$$

$$= \sum_{i=1}^{PH} PW^i \cdot \left\{ \sum_{i \in \theta^{DG}} \alpha_i^{DG} \cdot C_{M,i}^{DG} + \sum_{j \in \theta^S} \beta_j^S \cdot C_{M,i}^{SA} + \sum_{j \in \theta^S} \beta_j^S \cdot C_{M,i}^{SM} \right\} \quad (14)$$

$$C_{CIC} = \sum_{i=1}^{PH} PW^i \cdot \sum_{j \in \theta^{LP}} IC_j$$

$$IC_j = P_j \cdot n_j^{cust} \cdot \sum_{z \in \theta^{LT}} \{ \omega_{jz} \cdot \sum \lambda_k \cdot C_z^{SI}(r_{jk}) \}, \quad (15)$$

مشخصی از کل بارهای موجود در شبکه باشد. این محدودیت در معادله (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. همچنین، محدودیت دیگر این است که استاندارد توان تولیدی هر یک از انواع منابع تولید پراکنده به صورت گسسته وجود داشته باشد؛ بنابراین در این مقاله، از مقادیر استاندارد ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ کیلووات برای برنامه ریزی در شبکه مورد مطالعه استفاده شده است.

بخش دوم محدودیت‌های مسئله مربوط به مسائل اقتصادی است. میزان بودجه در نظر گرفته شده برای خرید و نصب کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده محدود است. این محدودیت با استفاده از معادله (۲۲) به مسئله اعمال شده است.

$$I_{Feeder} \leq I_{Max} \quad (18)$$

$$V_{Min} \leq V_{Bus} \leq V_{Max} \quad (19)$$

$$\sum_{i \in \theta^{DG}} P_{WT} \leq P_{MAX_WT} \quad (20)$$

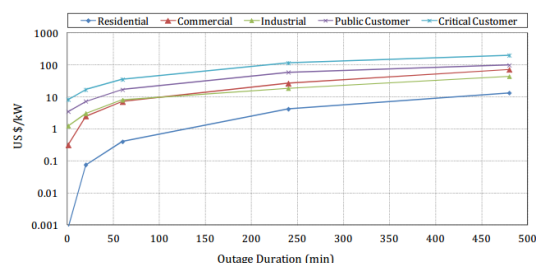
$$\sum_{i \in \theta^{DG}} P_{PV} \leq P_{MAX_PV} \quad (21)$$

$$C_{Investment} \leq C_{Budget} \quad (22)$$

محدودیت‌های مشخص شده در معادله‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) به صورت یک تابع جریمه در مسئله مدل شده‌اند که در صورت تخطی از این محدودیت‌ها، جریمه‌ای به هزینه کلی (G_{Total}) در تابع هدف اضافه خواهد شد؛ اما محدودیت‌های نشان داده شده در معادله‌های (۱۸) و (۱۹) به این صورت مدل شده‌اند که برای مثال اگر خطایی در فیدر نشان داده شده در مدار شکل (۴) اتفاق بیفتد، بریکر شماره ۱ یعنی RCCB1 عمل می‌کند و کل بارهای آن خط، یعنی LP1، LP2 و LP3 خاموش می‌شوند. سپس کلیدهای RCS1 و MCS1 باز می‌شوند تا خطای رخ داده را ایزوله کنند. بعد از آن، RCCB1 مجدداً وصل می‌شود تا بار LP1 تغذیه شود. اکنون با بسته شدن کلید مانور TS بارهای LP2 و LP3 از طریق خط ۲ تغذیه می‌شوند؛ این امر در صورتی ممکن است که محدودیت‌های جریان و ولتاژ با اضافه شدن

جدول (۲): تجهیزات مسئله و متغیرهای مربوط به آنها

| متغیرهای مسئله | نام تجهیزات | متغیرهای مسئله | نام تجهیزات |
|----------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| $\alpha = \beta = 0$ | عدم وجود تجهیز | $\alpha = 6$ | $P_{PV} = 150$ kw |
| $\alpha = 1$ | $P_{WT} = 100$ kw | $\alpha = 7$ | $P_{WT} = 175$ kw |
| $\alpha = 2$ | $P_{PV} = 100$ kw | $\alpha = 8$ | $P_{PV} = 175$ kw |
| $\alpha = 3$ | $P_{WT} = 125$ kw | $\beta = 1$ | MCS |
| $\alpha = 4$ | $P_{PV} = 125$ kw | $\beta = 2$ | RCS |
| $\alpha = 5$ | $P_{WT} = 150$ kw | | |



شکل (۳): جریمه ناشی از وقفه انواع بارها [۱۷]

۲-۴- محدودیت‌های مسئله

محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای این مسئله شامل دو بخش است که عبارت‌اند از محدودیت‌های فنی و محدودیت‌های اقتصادی. محدودیت‌های فنی در نظر گرفته شده برای این مسئله شامل موارد زیر است: ۱- محدودیت ظرفیت حرارتی خطوط شبکه؛ یعنی جریان عبوری از تمام خطوط موجود در شبکه باید کوچک‌تر از ظرفیت خطوط شبکه باشند. این محدودیت در معادله (۱۸) نشان داده شده است. ۲- محدودیت ولتاژ باس‌های شبکه؛ این محدودیت شرایطی را در شبکه مطالعه شده تضمین می‌کند که در آن ولتاژ باس‌های شبکه در یک بازه مشخص قرار گیرند. این محدودیت در معادله (۱۹) آمده است. ۳- محدودیت حفظ توپولوژی شبکه؛ یعنی در این مسئله فرض شده شبکه مدنظر همواره به صورت شعاعی بهره‌برداری شده است. ۴- محدودیت حداکثر توان مجاز تولیدی توسط منابع تولید پراکنده؛ به عبارت دیگر، مجموع توان تولیدی هر یک از منابع تولید پراکنده استفاده شده در شبکه باید درصد

شده که یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است. همان‌طور که گفته شد، فرایند کلی که برای حل این مسئله انجام شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین در این مقاله از سه نوع الگوریتم تکاملی تک هدفه شامل الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) برای حل سناریوهای مختلف استفاده شده است.

۳-۱- روش تصمیم‌گیری فازی

خروجی حاصل از به کار بردن الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه شامل دسته‌ای از پاسخ‌های بهینه غیرغالب است که به اصطلاح پاسخ‌های پرتو نامیده می‌شوند. تاکنون روش‌های گوناگونی به منظور تعیین پاسخ بهینه نهایی از میان پاسخ‌های بهینه غیرغالب ارائه شده که عموماً براساس روش‌های فازی‌اند. در این مقاله، از روش تصمیم‌گیری فازی برای تعیین پاسخ بهینه نهایی از میان پاسخ‌های بهینه غیرغالب استفاده شده است. روابط مربوط به این روش تصمیم‌گیری در معادلات (۲۳) و (۲۴) ارائه شده‌اند. در رابطه (۲۳) مقدار نرمال تابع هدف f_i برای پاسخ بهینه K با توجه به بیشینه (f_i^{max}) و کمینه (f_i^{min}) مقدار این تابع هدف محاسبه می‌شود. پس از محاسبه مقدار نرمال تمامی توابع هدف، مقدار نرمال برای پاسخ بهینه K از طریق معادله (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$\mu_i^k = \frac{[f_i^{max} - f_i^k]}{[f_i^{max} - f_i^{min}]}, i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (23)$$

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^k}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \mu_i^k}, k = 1, \dots, m \quad (24)$$

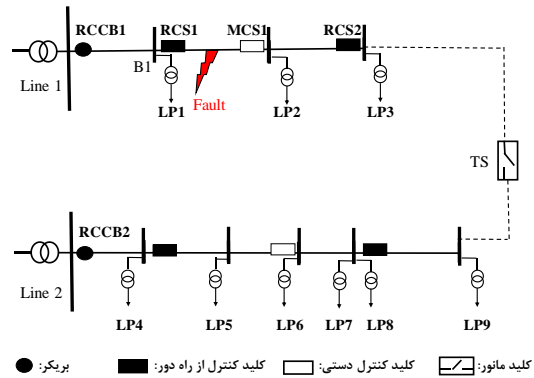
۳-۲- تعریف پاسخ‌های اولیه

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0-2 | 0-2 | 0-2 | ... | 0-2 | 0-8 | 0-8 | 0-8 | ... | 0-8 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

جایابی و انتخاب انواع تجهیزات کنترلی جایابی و انتخاب انواع منابع تولید پراکنده

شکل (۵): ساختار پاسخ مسئله

این دو بار به خط ۲ همچنان رعایت شود. در این حالت، هیچ باری خاموشی را تجربه نمی‌کند؛ اما اگر هریک از این دو محدودیت رعایت نشوند، کلید RCS2 به جای MCS1 باز می‌شود تا فقط بار LP3 به خط ۲ اضافه شود. در این حالت، فقط بار LP2 خاموشی را تجربه می‌کند؛ اما اگر یکی از محدودیت‌ها نقض شود، دو بار LP2 و LP3 خاموش می‌مانند.



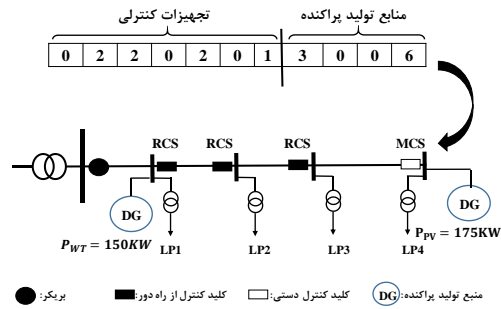
شکل (۴): دو فیدر نمونه مطالعه‌شده

منابع تولید پراکنده در چنین وضعیتی نقش کلیدی دارند. این منابع می‌توانند بخشی یا تمام توان مورد نیاز بارهایی را فراهم کنند که خاموش ماندند؛ مانند زمانی که کلید RCS2، باز و بار LP2 از شبکه خارج شده است و وجود یک منبع تولید پراکنده در LP2 باعث کاهش هزینه ناشی از وقفه مشترکین می‌شود و پایایی سیستم را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، وجود منابع تولید پراکنده در خط ۲ باعث تأمین توان بخشی از بارها می‌شود و در نتیجه از افت ولتاژ غیرمجاز در باس‌ها و عبور جریان بیش از حد در خطوط، موقع بسته بودن کلید مانور TS، جلوگیری می‌کند. در این حالت، منبع تولید پراکنده وظیفه پشتیبانی را برعهده دارد که در نهایت، به کاهش هزینه وقفه مشترکین و بهبود پایایی شبکه منجر می‌شود.

۳-۳ روش حل

برای حل چنین مسائلی که یک برنامه‌ریزی غیرخطی همراه با عدد صحیح است و نیز محدودیت‌هایی دارد، از الگوریتم‌های تکاملی می‌توان استفاده کرد. در این مقاله از نسخه دوم الگوریتم نامغلوب ژنتیک (NSGA-II) استفاده

صنعتی، عمومی و حساس. همچنین، رشد بار ۳٪ [۲۱] برای شبکه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در این مسئله کلیدهای کنترلی می‌توانند در دو طرف همهٔ باس‌ها قرار بگیرند، به جز باس‌های آخر هر فیدر که کلیدها فقط قبل از آنها می‌توانند قرار گیرند؛ بنابراین، در مجموع ۵۱ محل برای نصب کلیدهای کنترلی در این شبکه وجود دارد. همچنین، محل نصب منابع تولید پراکنده در باس‌ها است؛ بنابراین، ۲۹ محل کاندیدا برای نصب منابع تولید پراکنده وجود دارد. حداکثر توان مجاز تولیدی کل توسط سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی به ترتیب برابر با ۲۰۰۰ کیلووات و ۳۰۰۰ کیلووات در نظر گرفته شد. مدت زمان عملکرد کلیدهای کنترل از راه دور و کلیدهای کنترل دستی به ترتیب برابر با ۱۵۰۰۰ دلار و ۶۰۰۰ دلار است. احتمال عملکرد صحیح کلیدهای دستی و کنترل از راه دور به ترتیب برابر با ۹۷٪ و ۹۸٪ [۹] است. همچنین، هزینه تعمیرات و نگهداری کلیدها برابر با ۳٪ هزینه خرید و نصب آنها در نظر گرفته شد [۱۸]. برای نشان دادن تأثیر نوع سنجی، ظرفیت‌یابی و جایابی هم‌زمان کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده، بر شاخص‌های پایایی و هزینه‌های شبکه مطالعه شده، دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریوی اول، تأثیر نوع سنجی، ظرفیت‌یابی و جایابی هم‌زمان تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده به صورت دو تابع هدف جدا بررسی شده‌اند. در واقع، یک بار تابع هدف فقط شامل هزینه‌ها و بار دیگر فقط شامل شاخص پایایی ساییدی است؛ البته در هر دو حالت، تمامی محدودیت‌های بیان‌شده در بخش ۲-۴ بر تابع هدف اعمال شده‌اند. سناریوی دوم شامل تخصیص ظرفیت منابع تولید پراکنده و نوع سنجی کلیدهای کنترلی و جایابی هم‌زمان آنها در شبکه به منظور حداقل کردن هم‌زمان هزینه‌ها و شاخص ساییدی است.

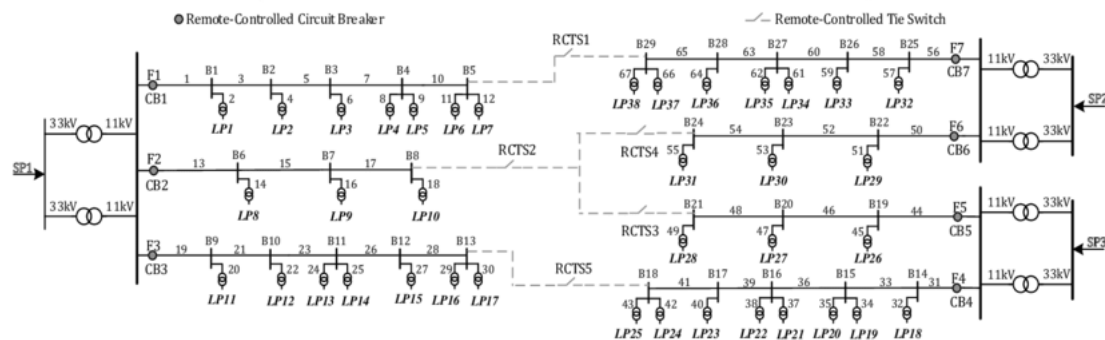


شکل (۶): نحوهٔ تبدیل پاسخ به تجهیزات شبکه

پاسخ‌های اولیهٔ تولیدشده، ساختاری مانند شکل (۵) دارند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این پاسخ اولیه از دو بخش تشکیل شده است: بخش اول به انتخاب نوع و محل کلیدهای کنترلی مربوط است. این بخش می‌تواند مقادیر ۰، ۱ یا ۲ بگیرند که عدد صفر به معنای نبود کلید کنترلی در محل کاندیدا و عددهای ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهندهٔ وجود کلیدهای کنترل دستی و کلیدهای کنترل از راه دور در محل کاندیدا مدنظر است. بخش دوم پاسخ اولیه، به انتخاب نوع منابع تولید پراکنده و مکان آنها مربوط است. این بخش از پاسخ اولیه می‌تواند یکی از اعداد صحیح ۰ تا ۸ باشد که عدد صفر به معنای نبود منبع تولید پراکنده در محل کاندیدای مدنظر است و هریک از اعداد ۱ تا ۸ مربوط به یک نوع از این منابع تولید پراکنده می‌شود که در جدول (۲) آمده است. با توجه به مطالب گفته‌شده، شکل (۶) نحوهٔ تبدیل پاسخ اولیه به منابع تولید پراکنده و کلیدهای کنترلی را در مکان‌های موردنظر نشان می‌دهد.

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این مقاله، مطالعه‌ای دربارهٔ تأثیر روش جایابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و کلیدهای کنترلی بر پایایی شبکه چهار باس روی بیلیتئون صورت گرفته است. مدت زمان افق برنامه‌ریزی مسئله، برابر با ۱۵ سال و میزان نرخ سود و تورم به ترتیب برابر با ۷٪ و ۶٪ در نظر گرفته شده است [۱۷]. در این مسئله پنج نوع مشترک در نظر گرفته شد که عبارت‌اند از مشترکین خانگی، تجاری،



شکل (۷): دیاگرام تک خطی شبکه چهار باس بیلبیتون [۲۶]

شاخص پایایی سایدی نسبت به شبکه اولیه به ترتیب ۷۶٪ و ۸۲٪ بهبود یافته است. همچنین، با انتخاب تابع هدف هزینه، میزان کاهش هزینه کل نسبت به شبکه اولیه برابر ۴۳٪ است و با انتخاب تابع هدف سایدی، هزینه کل شبکه ۲۶٪ کاهش می‌یابد.

در این سناریو علاوه بر الگوریتم GA که نتایج آن در جدول (۳) آمده‌اند، از الگوریتم‌های TLBO و DE نیز برای حل مسئله استفاده شده است و نتایج استفاده از این الگوریتم‌ها در جدول (۴) گزارش شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پاسخ‌های به‌دست‌آمده از این سه الگوریتم تقریباً مشابه یکدیگرند؛ اما الگوریتم TLBO در یافتن بهترین جواب در ۲۰ تکرار از سناریوی اول نسبت به الگوریتم‌های TLBO و DE موفق‌تر عمل کرده است. همچنین، با به دست آوردن میانگین ۲۰ پاسخ به‌دست‌آمده، الگوریتم GA عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته و میانگین پاسخ‌های آن بهتر است. کمترین تغییرات در دو حالت بهترین پاسخ و میانگین پاسخ‌ها در ۲۰ تکرار از سناریوی اول، به الگوریتم DE مربوط است که برای این الگوریتم مزیت به شمار می‌رود. با توجه به جدول (۵)، شاخص CAIDI نسبت به شبکه اولیه در دو تابع هدف هزینه و سایدی، به ترتیب ۴۵٪ و ۵۸٪ و برای شاخص ENS ۷۸٪ و ۷۵٪ بهبود می‌یابند.

۴-۱- سناریوی اول: بهینه‌سازی جداگانه دو تابع

هدف

در این سناریو، مسئله جایابی و تعیین نوع منابع تولید پراکنده و تجهیزات کنترلی با استفاده از یک تابع هدف تک هدفه حل شده است. این سناریو از دو بخش تشکیل شده که عبارت است از ۱- تابع هدف شامل حداقل کردن هزینه‌ها و ۲- تابع هدف مسئله شامل حداقل کردن شاخص سایدی. در این سناریو تمامی محدودیت فنی و اقتصادی بیان شده در بخش ۲-۴ در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده در این سناریو در جدول (۳) آورده شده‌اند که بیان می‌کنند نتایج حاصل از جایابی و انتخاب انواع تجهیزات در دو تابع هدف کاملاً با یکدیگر متفاوت‌اند. وقتی تابع هدف فقط شامل مجموع هزینه‌ها باشد، تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده در فیذرها و باس‌هایی قرار می‌گیرند که با توجه به معادله (۱۳)، بارهایی با هزینه وقفه مشترکین بیشتر دارند. همچنین، وقتی تابع هدف مسئله شاخص پایایی سایدی باشد، این تجهیزات در مکان‌هایی قرار می‌گیرند که تأثیر عمده بر نقطه بارهایی با تعداد مشترکین بیشتر داشته باشند؛ به همین دلیل هزینه ناشی از وقفه مشترکین، وقتی هدف تنها کمینه‌کردن مجموع هزینه‌هاست، کمتر از حالتی است که هدف تنها کم کردن شاخص سایدی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با انتخاب تابع هدف هزینه و سایدی،

جدول (۳): نتایج سناریوی اول

| شماره فیدر | مکان MCS | مکان RCS | اندازه و مکان باس PV | اندازه و مکان باس WT | SAIDI | هزینه وقفه مشترکین (K\$) | هزینه کل (K\$) |
|------------|----------|-------------|---|---------------------------------------|--------|--------------------------|----------------|
| شبکه اولیه | - | - | - | - | ۲/۲۷۴۶ | ۱۸۱۱ | ۱۸۱۱ |
| ۱ | 3U | 10D | B4(100KW), B5(100KW) | - | - | - | - |
| ۲ | 15D, 17U | 17D | B2(100KW) | - | - | - | - |
| ۳ | 26D | 28D | B3(125KW) | B1(100KW), B2(125KW), B5(100KW) | ۰/۵۲۷۸ | ۷۸۸ | ۱۰۲۵ |
| ۴ | 36D, 41U | 39D | B3(125KW) | B1(100KW) | - | - | - |
| ۵ | 46D | 48D | B3(100KW) | - | - | - | - |
| ۶ | 54D | 52D | - | B1(100KW) | - | - | - |
| ۷ | 58D | 65D | B4(125KW) | - | - | - | - |
| ۱ | 10D | 3U | B1(125KW), B2(100KW), B4(125KW), B5(125KW) | B3(125KW) | - | - | - |
| ۲ | 15D | - | - | - | - | - | - |
| ۳ | 21D, 26U | 26D | B2(125KW), B5(100KW) | B3(150KW), B4(125KW) | ۰/۴۰۲۶ | ۱۱۰۱ | ۱۳۳۹ |
| ۴ | 41D | 36D, 39D | B2(125KW), B3(175KW), B4(100KW) | B1(125KW), B5(125KW) | - | - | - |
| ۵ | 46U | - | - | - | - | - | - |
| ۶ | 52D | - | - | - | - | - | - |
| ۷ | 63D | 60D, 65D | B2(125KW), B4(100KW) | B3(100KW) | - | - | - |

جدول (۴): مقایسه الگوریتم‌های مختلف در سناریوی اول

| میانگین پاسخها | | | | بهترین پاسخ | | | | |
|--------------------|--------|----------------------|--------|--------------------|--------|----------------------|--------|------|
| تابع هدف: هزینه | | تابع هدف: شاخص سایدی | | تابع هدف: هزینه | | تابع هدف: شاخص سایدی | | |
| C _{Total} | SAIDI | C _{Total} | SAIDI | C _{Total} | SAIDI | C _{Total} | SAIDI | |
| ۱۰۲۵ | ۰/۵۲۷۸ | ۱۱۰۱ | ۰/۴۰۲۶ | ۱۰۲۳ | ۰/۵۲۷۲ | ۱۰۹۷ | ۰/۴۰۱۶ | GA |
| ۱۰۲۶ | ۰/۵۲۹۰ | ۱۱۰۲ | ۰/۴۰۲۶ | ۱۰۲۵ | ۰/۵۲۸۹ | ۱۱۰۰ | ۰/۴۰۲۴ | DE |
| ۱۰۲۶ | ۰/۵۲۸۱ | ۱۱۰۱ | ۰/۴۰۲۷ | ۱۰۲۲ | ۰/۵۲۶۹ | ۱۰۹۹ | ۰/۴۰۱۴ | TLBO |

است. شکل (۸) منحنی پرتو حاصل از بهینه کردن هم‌زمان هزینه و سایدی را برای سرمایه‌گذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. منحنی قرمز رنگ برای هزینه سرمایه‌گذاری برابر با سناریوی اول یعنی ۲۰۰ هزار دلار است. تمامی نقاط به‌دست آمده در این منحنی یک جواب برای مسئله است؛ اما در این سناریو با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی، یک

۴-۲- سناریوی دوم: بهینه‌سازی هم‌زمان نامغلوب دو تابع هدف

در این سناریو مسئله جایابی و تعیین ظرفیت تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده به صورت یک تابع دو هدفه مدل شده که با استفاده از الگوریتم NSGA-II حل شده

۱۲ بهبود خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند با تخصیص کلیدها و منابع تولید پراکنده با استفاده از محاسبات نرم

به وقتی تابع هدف تنها شامل هزینه است، به میزان ۰.۵٪ افزایش یافته است؛ درحالی که شاخص سایدی در این سناریو ۱.۱۸٪ کاهش یافته است. همچنین، هزینه کل در این سناریو نسبت به زمانی که تابع هدف تنها شامل شاخص پایایی سایدی است، به میزان ۱.۱۸٪ کاهش یافته است؛ درحالی که شاخص سایدی تنها ۰.۶٪ افزایش یافته است. میزان شاخص AENS نسبت به هر دو حالت از سناریوی اول بهتر شده است.

جواب از منحنی پرتو استخراج می شود که در جدول (۶) آورده شده است. با توجه به جدول (۶)، در این سناریو از ۷ کلید کنترل دستی، ۷ کلید کنترل اتوماتیک و مجموع توان های تولیدی سلول های خورشیدی و توربین های بادی نصب شده به ترتیب برابر با ۱۰۷۵ کیلووات و ۵۷۵ کیلووات استفاده شده که به هزینه وقفه مشترکین برابر با ۸۵۵ هزار دلار، هزینه کل برابر با ۱/۰۹ میلیون دلار و شاخص سایدی برابر با ۰/۴۳۲۳ منجر شده است. با مقایسه این نتایج با جدول (۵) دیده می شود که هزینه کل در این سناریو نسبت

جدول (۵): مقایسه نتایج تابع هدف های مختلف

| تابع هدف | SAIDI | CAIDI | ASAI | AENS | Ppv (kw) | Pwt (kw) | Nmcs | NrCS | CIC (k\$) | C _{Total} (k\$) |
|--------------------|--------|-------|---------|-------|----------|----------|------|------|-----------|--------------------------|
| شبکه اولیه | ۲/۲۷۴۶ | ۳/۳۱ | ۰/۹۹۹۷ | ۸/۷۷۶ | - | - | - | - | ۱۸۱۱ | ۱۸۱۱ |
| هزینه | ۰/۵۲۷۸ | ۱/۸۰ | ۰/۹۹۹۹۳ | ۱/۹۱۹ | ۵۲۵ | ۷۷۵ | ۹ | ۷ | ۷۸۸ | ۱۰۲۵ |
| شاخص سایدی | ۰/۴۰۲۶ | ۱/۳۷ | ۰/۹۹۹۹۵ | ۲/۱۰۷ | ۱۳۲۵ | ۷۵۰ | ۸ | ۶ | ۱۱۰۱ | ۱۳۳۹ |
| هزینه و شاخص سایدی | ۰/۴۳۲۳ | ۱/۴۷ | ۰/۹۹۹۹۵ | ۱/۸۷۸ | ۱۰۷۵ | ۵۷۵ | ۷ | ۷ | ۸۵۵ | ۱۰۹۳ |

جدول (۶): نتایج سناریوی دوم

| تابع هدف | شماره فیدر | MCS | RCS | اندازه و مکان باس PV | اندازه و مکان باس WT | SAIDI | هزینه وقفه مشترکین (K\$) | هزینه کل (K\$) |
|--------------------|------------|-----|----------|---------------------------------|----------------------|--------|--------------------------|----------------|
| شاخص سایدی و هزینه | ۱ | 5D | 10D | B3(125KW), B4(100KW) | - | ۰/۴۳۲۳ | ۸۵۵ | ۱۰۹۳ |
| | ۲ | 15D | 17D | B2(125KW) | - | | | |
| | ۳ | 23D | 26D | B2(100KW), B3(100KW), B5(100KW) | B3(125KW), B4(125KW) | | | |
| | ۴ | 36U | 36D, 39U | B2(100KW) | B3(100KW) | | | |
| | ۵ | 48D | - | B3(100KW) | B2(100KW) | | | |
| | ۶ | 52U | - | - | B2(125KW) | | | |
| | ۷ | 58D | 65D, 63D | B3(100KW), B4(125KW) | - | | | |

تجهیزات و سپس برای منابع تولید پراکنده حل شده است. درواقع، شاخص های پایایی و هزینه وقفه مشترکین و هزینه کلی مسئله در حالت هم زمان بهتر از حالت حل مسئله به صورت دو مرحله ای است. این بهبود نتایج، زمانی صادق است که تابع هدف مسئله هم هزینه و هم سایدی باشد.

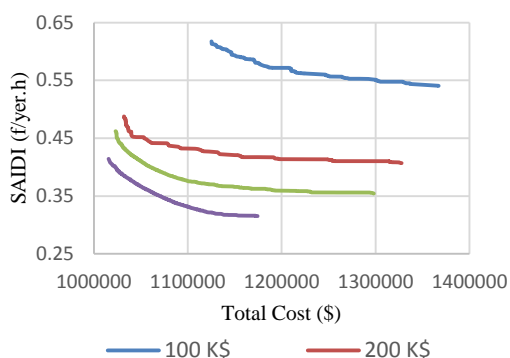
برای نشان دادن تأثیر جایابی هم زمان تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده، ابتدا مکان بهینه تجهیزات کنترلی به دست آمده است. سپس با توجه به این نتیجه، ظرفیت و مکان بهینه منابع تولید پراکنده به دست آمده و در جدول (۷) گزارش شده اند. با توجه به جدول (۷)، وقتی نوع سنجی، ظرفیت یابی و جایابی تجهیزات کنترلی و منابع تولید پراکنده به طور هم زمان انجام شده اند، نتایج بهتری نسبت به حالتی که دست آمده که ابتدا مسئله برای

۵- بحث: حساسیت به سقف سرمایه‌گذاری

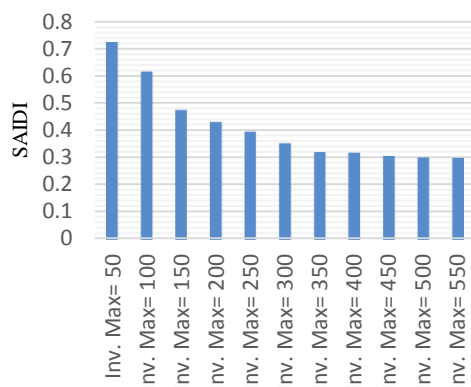
اولیه

در برنامه‌ریزی‌های مربوط به شبکه برق، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه اهمیت زیادی دارد؛ بنابراین در این مقاله، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، یک محدودیت در برنامه‌ریزی مسئله لحاظ شده است. تعداد کلیدهای به‌کاررفته و تعداد و نوع منابع تولید پراکنده در سرمایه‌گذاری‌های مختلف در جدول (۸) گزارش شده‌اند. در سرمایه‌گذاری‌هایی با بودجه کم، کلیدهای دستی و منابع تولید پراکنده با ظرفیت کم به تعداد بیشتری جایابی شده‌اند و با افزایش سرمایه‌گذاری، کلیدهای کنترل از دور و منابع تولید پراکنده با توان تولیدی بالا به شبکه اضافه می‌شوند و تعدادشان افزایش می‌یابد. دلیل به‌کارگیری کلیدهای کنترل از راه دور در سرمایه‌گذاری‌های بالاتر این است که سرعت عملکرد بالاتری نسبت به کلیدهای کنترل دستی دارند؛ بنابراین، ایزولاسیون محل خطا با سرعت بیشتری امکان‌پذیر می‌شود. دلیل استفاده از منابع تولید پراکنده با توان تولید بالا این است که توان مشترکین بیشتری را می‌توانند تأمین کنند؛ در نتیجه، بارها خاموشی کمتری را تجربه می‌کنند. شکل (۸) منحنی پرتو حاصل از سرمایه‌گذاری‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش سرمایه‌گذاری هم شاخص پایایی و هم هزینه کل کاهش محسوسی می‌یابند. در واقع، با افزایش سرمایه‌گذاری، کلیه جواب‌های به‌دست‌آمده، جواب‌های حاصل در سرمایه‌گذاری کمتر را مغلوب می‌کنند. همچنین، نتایج شاخص سایدی و هزینه وقفه مشترکین در سرمایه‌گذاری‌های گوناگون نشان می‌دهند سرمایه‌گذاری بیشتر از یک مقدار مشخص، تأثیر بسیار کمی بر شاخص سایدی و هزینه وقفه مشترکین دارد؛ این موضوع در شکل

(۹) نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش سرمایه‌گذاری اولیه، شاخص پایایی سایدی کاهش چشمگیری می‌یابد؛ اما این روند در یک حدی از سرمایه‌گذاری تقریباً متوقف می‌شود و با سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر از این مقدار، کاهش محسوسی در شاخص میانگین تداوم وقفه سیستم مشاهده نمی‌شود.



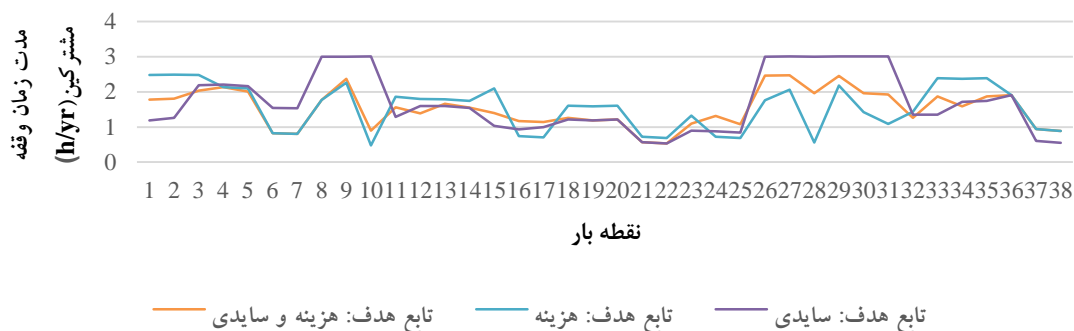
شکل (۸): منحنی پرتو در سرمایه‌گذاری‌های مختلف



شکل (۹): مقایسه شاخص سایدی در سرمایه‌گذاری‌های مختلف

جدول (۷): مقایسه نتایج در دو حالت حل هم‌زمان و دو مرحله‌ای

| C_{Total} (k\$) | CIC (k\$) | N_{RCS} | N_{MCS} | P_{WT} (kw) | P_{PV} (kw) | AENS | CAIDI | SAIDI | | |
|----------------------|--------------|-----------|-----------|------------------|------------------|-------|-------|--------|----------------|------------|
| ۱۰۲۵ | ۷۸۸ | ۷ | ۹ | ۷۷۵ | ۵۲۵ | ۱/۹۱۹ | ۱/۸۰ | ۰/۵۲۷۸ | حل هم‌زمان | تابع هدف: |
| ۱۱۰۰ | ۹۳۱ | ۳ | ۹ | ۷۵۰ | ۶۲۵ | ۲/۳۴ | ۲/۱۸ | ۰/۶۴۰۷ | حل دو مرحله‌ای | هزینه |
| ۱۳۳۹ | ۱۱۰۱ | ۶ | ۸ | ۷۵۰ | ۱۳۲۵ | ۲/۱۰۷ | ۱/۳۷ | ۰/۴۰۲۶ | حل هم‌زمان | تابع هدف: |
| ۱۳۶۵ | ۱۱۲۷ | ۵ | ۴ | ۱۲۷۵ | ۱۵۷۵ | ۲/۱۹۳ | ۱/۴۳ | ۰/۴۲۰۱ | حل دو مرحله‌ای | شاخص سایدی |



شکل (۱۰): مقایسه مدت زمان وقفه مشترکین در سناریوهای مختلف

جدول (۸): مکان و نوع تجهیزات در سرمایه گذاری های مختلف

| CIC (k\$) | SAIDI | سلول خورشیدی | | | | توربین بادی | | | | N _{RCS} | N _{MCS} | پیشینه سرمایه گذاری (k\$) |
|-----------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| | | P ₁₀₀ | P ₁₂₅ | P ₁₅₀ | P ₁₇₅ | P ₁₀₀ | P ₁₂₅ | P ₁₅₀ | P ₁₇₅ | | | |
| ۱۲۱۷ | ۰/۷۲۵۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۷ | ۵۰ |
| ۱۰۰۰ | ۰/۶۱۷۴ | ۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲ | ۹ | ۱۰۰ |
| ۹۶۰ | ۰/۴۷۷۴ | ۶ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۴ | ۰ | ۰ | ۴ | ۸ | ۱۵۰ |
| ۸۵۵ | ۰/۴۳۲۳ | ۷ | ۳ | ۰ | ۰ | ۲ | ۳ | ۰ | ۰ | ۷ | ۷ | ۲۰۰ |
| ۸۰۳ | ۰/۳۹۷۳ | ۶ | ۸ | ۰ | ۰ | ۲ | ۴ | ۰ | ۰ | ۹ | ۷ | ۲۵۰ |
| ۷۴۳ | ۰/۳۵۵۴ | ۳ | ۶ | ۰ | ۳ | ۳ | ۳ | ۰ | ۱ | ۱۱ | ۸ | ۳۰۰ |
| ۷۰۱ | ۰/۳۲۳۱ | ۳ | ۶ | ۱ | ۳ | ۳ | ۴ | ۱ | ۱ | ۱۴ | ۷ | ۳۵۰ |
| ۶۵۶ | ۰/۳۱۹۴ | ۳ | ۴ | ۰ | ۵ | ۱ | ۸ | ۰ | ۱ | ۱۵ | ۷ | ۴۰۰ |
| ۶۳۱ | ۰/۳۰۹۸ | ۲ | ۴ | ۱ | ۴ | ۱ | ۳ | ۲ | ۱ | ۱۶ | ۸ | ۴۵۰ |
| ۶۲۷ | ۰/۳۰۲۱ | ۲ | ۴ | ۰ | ۶ | ۴ | ۷ | ۰ | ۲ | ۱۸ | ۱۱ | ۵۰۰ |

۶- نتیجه گیری

پرتو به دست می آید. پاسخ به دست آمده، بهینه ترین آرایش کلیدهای کنترلی و منابع تولید پراکنده را نشان می دهد که با استفاده از این آرایش عملیات خودترمیمی به مطلوب ترین شکل انجام می گیرد؛ یعنی هزینه های وقفه مشترکین و شاخص سایدی را کاهش می دهد و همچنین، محدودیت های اقتصادی و فنی را رعایت می کند. به منظور بررسی دقیق تر، حساسیت مسئله نسبت به محدودیت حداکثر میزان سرمایه گذاری بررسی شد که نتایج آن نشان دهنده استفاده از کلیدهای کنترل از راه دور و منابع تولید پراکنده با ظرفیت تولیدی بیشتر در سرمایه گذاری های بالا است.

علائم و نشانه ها

در این مقاله مسئله تخصیص ظرفیت توربین های بادی و سلول های خورشیدی، نوع سنجی کلیدها و جایابی هم زمان آنها در یک شبکه هوشمند توزیع با استفاده از الگوریتم های NSGA-II و TLBO، DE، GA ارائه شد. تابع هدف ارائه شده در این مقاله شامل مسائل اقتصادی و شاخص پایایی سایدی است. برای این مسئله دو نوع کلید کنترلی شامل کلید کنترل از راه دور و کلید کنترل دستی و هشت نوع منابع تولید پراکنده با ظرفیت تولیدی و هزینه های متفاوت در نظر گرفته شده اند. برای نشان دادن تأثیر در نظر گرفتن هم زمان منابع تولید پراکنده و کلیدهای کنترلی بر پایایی شبکه، دو سناریو ارائه شده اند. با استفاده از روش تصمیم گیری فازی، نامغلوب ترین جواب از منحنی

- Applications in Power, Vol. 14, No. 1, PP. 44-49, 2001.
- [3] S. Daud, A. Fazliana, C. Gan, "Optimal Placement and Sizing of Renewable Distributed Generation via Gravitational Search Algorithm", *Mechanics & Materials*, Vol. 785, PP. 556-560, 2015.
- [4] T. Li, B. Xu, "The Self-healing Technologies of Smart Distribution Grid", In Proc. Of China International Conference on Electricity Distribution, Nanjing, China, 2010.
- [5] Kostlov, P.M.S. Carvalho, "Towards self-healing in distribution networks operation: Bipartite graph modelling", *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, PP. 51-56, 2011.
- [6] Fereidunian, "A cybernetic approach to healer reinforcement in smart grid", in proceeding of SGC, NRI, Iran, 2014.
- [7] X. Gao, X. Ai, "The application of self healing technology in smart grid", in proceeding of Power and Energy Engineer Conference, China, 2011.
- [8] Shahsavari, A. Fereidunian, and H. Lesani, "A healer reinforcement approach to smart grid selfhealing by redundancy improvement", in proceeding of Elect. Power Dist. Networks Conference, Kermanshah, Iran, 2013.
- [9] A. Shahbazian and A. Fereidunian, "Using Linear Programming of Control Systems in Smart Distribution Network with Reliability-Centered Approach ", *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, 2016. (Pr).
- [10] A.jafari, A. Shahbazian and A. Fereidunian, "Improving Smart Grid Self-Healing by Simultaneously Allocating Control switch and Distributed Generation Sources ", 8th Energy Smart Grid Conference. 2018. (Pr).
- [11] M. Farajollahi, M. Fotuhi-Firuzabadi, A. Safdarian, " Simultaneous Placement of Fault Indicator and Sectionalizing Switch in Distribution Networks", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 10, No. 2, PP. 2278-2287, 2018.
- [12] Alhamali, M. E. Farhang, G. Bevan, D. M. Hepburn, "Determination of Optimal Site and Capacity of DG Systems in Distribution Network based on Genetic Algorithm", in proc. Of International Univer. Power Engine. Conference, Greece, 2017.
- [13] J. Gantz, M. Amin, A. Giacomoni, "Optimal capacity partitioning of multi-use customer-premise energy storage systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 25, No. 3, pp. 1292-1299, 2014.
- [14] I. G. Sardou, "Optimal Multi-objective Development Scheduling of Electric Vehicles in Distribution Network using Particle Swarm Optimization", *Scientific Journal of omputational Intelligence in Electrical Engineering*, 2018. (Pr).
- [15] M. Izadi, M. Farajollahi, A. Safdarian, M. Fotuhi-iruzabadi, " A multistage MILP-based model for integration of remote control switch into distribution networks", in proceeding of PMAPS, china, 2016.
- [16] M. R. Garey, D. S. Johnson, " Computers and intractability: a guide to the theory of NP-

- θ^{LP} : مجموعه نقطه بارهای شبکه
- $\theta^{DG,S}$: مجموعه محل‌های کاندیدا نصب منابع تولید پراکنده/کلیدهای کنترلی
- int, inf : نرخ تورم و بهره
- N_j : تعداد مشترکین در هر نقطه بار
- U_j : میانگین سالانه وقفه مشترک نقطه بار j
- α^{DG} : متغیر نشان‌دهنده مکان و نوع منبع تولید پراکنده
- β^S : متغیر نشان‌دهنده مکان و نوع کلیدهای کنترلی
- Si : میزان تابش خورشید (KW/m^2)
- α, β : پارامترهای تابع توزیع بتا
- S^{PV} : مساحت کل سلول خورشیدی
- C^{Total} : کل هزینه‌های مسئله
- $C^{Switch,DG}_{Inv}$: هزینه خرید و نصب تمامی تجهیزات
- $C^{Switch,DG}_{Main}$: هزینه تعمیرات و نگهداری تمامی تجهیزات
- $C^{SA,SM,DG}_{Inv}$: کل هزینه خرید و نصب کلید کنترل از راه دور / کنترل دستی / منبع تولید پراکنده
- $C^{SA,SM,DG}_{Main}$: کل هزینه تعمیرات و نگهداری کلید کنترل از راه دور / کنترل دستی / منبع تولید پراکنده
- $C_i^{SA,SM,DG}$: هزینه خرید و نصب کلید کنترل از راه دور / کنترل دستی / منبع تولید پراکنده نام
- $C_{M,i}^{SA,SM,DG}$: هزینه تعمیرات و نگهداری کلید کنترل از راه دور / کنترل دستی / منبع تولید پراکنده نام
- C_{CIC} : کل هزینه ناشی از وقفه انواع مشترکین شبکه در طول مدت برنامه‌ریزی
- IC_j : هزینه خاموشی مشترکین نقطه‌بار j در سال
- C_z^S : هزینه ناشی از ارائه‌ندادن سرویس به مشترکین نوع z
- r_{ij} : مدت‌زمان خاموشی مشترکین نقطه‌بار i به دلیل خطا j
- ω_z^i : درصد مشارکت مشترکین نوع z در نقطه‌بار i
- pw_i : ضریب اقتصادی برای بیان ارزش کنونی سرمایه در سال نام

مراجع

- [1] J.A. Momoh, "Electric Power Distribution Automation, Protection, and Control", in proc. Of CRC Press Conference, USA, 2017.
- [2] R. E. Rown, A. P. Hanson, H. L. Willis, F.A. Luedtke, M. F. Born, "Assessing the reliability of distribution system," *IEEE Trans. On Computer*

- of Automated Distribution Networks With Probability Customer Interruption Cost Model in the Presence of DG Units”, IEEE Trans on Smart Grid, Vol. 8, No. 1, PP. 305-315, 2016.
- [22] M. rahmani-andebili, ” Distributed Generation Placement Planning Modeling Feeder’s Failure Rate and Customer’s Load Type”, IEEE Trans, on IE, Vol 63, No 3, PP. 1598-1606, 2016.
- [23] H. Mirsaedi, SH. Haydari, A. Fereidunian and H. lesani." Improving Smart Grid Self-Healing by Allocating Distributed Generation Sources with Uncertainty generation ", 21th Electrical Power Distribution Conference. 2016. (Pr).
- [24] L. Wang, Ch. Singh, “Reliability-Constrained Optimum Recloser Placement in Distributed Generation Using Ant Colony System Algorithm”, IEEE Trans. On Syst., Man, and Cybernetics, Vol. 38, No. 6, PP. 757-764, 2008.
- [25] S. bagheri, H.Talebi and A. Fereidunian "Resilient, Comfort and Economic Operation of Smart Nanogrid ", Journal of Control KNTU. 2018. (Pr).
- [26] R.N. Allan, R. Billinton, I. SJarief , L. Goel, K. S. So, “A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results”, IEEE Trans. on Power System, Vol 6, No 2, PP. 813–820, 1991.
- completeness”, Series of books in the mathematical sciences (1st ed.), ISBN: 0716710455, New York: Freeman, 1979.
- [17] Shahsavari, A. Fereidunian, S.M. Mazhari, H. Lesani, “A Joint Automatic and Manual Switch Placement via an Artificial Bee Colony Based Algorithm within Distribution Systems”, International Trans. on Electrical Energy Systems, Vol. 25, No. 11, PP. 2745–2768, 2015.
- [18] Z. Popović, B. Brbaklić, S. Knežević, ”A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks”, Electric Power Systems Research, Vol. 148, PP. 136-146, 2017.
- [19] S. Mohammadi-Hosseinnejad, A. Shahsavari, A. Fereidunian, H. Lesan, ”A Healer Reinforcement Approach to Self-Healing in Smart Grid by PHEVs Parking Lot Allocation”, IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 12, No. 6, PP. 2020-2030, 2016.
- [20] M. Moradijoz, M. P. Moghaddam, M. R. Haghifam, E. Alishahi, ”A multi-objective optimization problem for allocating parking lots in a distribution network”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 46, PP. 115–122, 2013.
- [21] Heidari, V. G. Agelidis, M. Kia, J. Pou, J. Aghaei, M. Shafie-khah, “Reliability Optimization

¹ Fault Location, Isolation and Service Restoration

² Wind Turbine

³ Photovoltaic

⁴ System Average Interruption Duration Index

⁵ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

⁶ Genetic Algorithm

⁷ Differential Evolution

⁸ Teaching-Learning Based Optimization