

مکان یابی بهینه تولیدات پراکنده جهت آزادسازی خط با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی

حسین فدائی دوست^{*}، مهدیه اسلامی^۱

۱ گروه برق، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

چکیده

شبکه های توزیع انرژی الکتریکی مدرن، تفاوت های قابل توجهی نسبت به شبکه های توزیع سنتی کرده اند. حضور منابع تولید پراکنده، گسترش بسترهای مخابراتی و ایجاد شبکه های هوشمند، از جمله این تغییرات است. تفاوت های ایجاد شده در شبکه های توزیع مدرن، مستلزم تغییر نگاه در برنامه ریزی های شبکه های توزیع است. استفاده بهینه از امکانات جدیدی که در اختیار این شبکه ها قرار گرفته است موجب می شود تا نه تنها شبکه از نظر فنی غنی گردد، بلکه از نظر اقتصادی نیز، توجیح پذیر و عملی گردد. در این تحقیق، با هدف کمینه سازی تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و آزادسازی ظرفیت خطوط به کمک مکان یابی صحیح منابع تولید پراکنده و با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی جهت بهینه سازی تابع چند هدفه بر روی یک شبکه توزیع استاندارد IEEE پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که منابع تولید پراکنده، تلفات را به میزان ۷/۵ درصد و انحرافات ولتاژ را در حدود ۱۰ درصد بهبود داده اند. همچنین ظرفیت خطوط به میزان ۵ درصد بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: تلفات الکتریکی، ظرفیت خطوط، پروفایل ولتاژ، شبکه های توزیع، الگوریتم جستجوی هارمونی

دریافت مقاله: ۲۹/۰۴/۱۴۰۴

پذیرش مقاله: ۲۸/۰۸/۱۴۰۴

۱- مقدمه

در سال های گذشته، با پیشرفت های صورت گرفته و همچنین افزایش دغدغه های زیست محیطی در جهت استفاده از سوخت های فسیلی، موجب شده تا تولید انرژی الکتریکی به سمت منابع تجدیدپذیر سوق یابد. که معمولاً در سطح شبکه های توزیع به کار گرفته می شوند و با توجه به اینکه مکان مشخص و ثابتی را نمیتوان برای آنها در نظر گرفت، به آنها منابع تولید پراکنده اطلاق می شود. بر حسب مکان و ظرفیت این منابع، نقش و اثر آنها در شبکه های توزیع بسیار متفاوت است. برای مثال، با تأمین بار در محل مصرف توسط این منابع می توان ظرفیت خطوط را آزاد، تلفات را کاهش و همچنین به واسطه کاهش تلفات، ولتاژ را نیز بهبود بخشید. در شبکه های سنتی شبکه های انتقال و توزیع، شبکه های پسیو و مصرف کننده بودند و با

مطرح شدن منابع تولید پراکنده به شبکه های اکتیو مبدل شدند که در آنها، جهت انتقال توان صرفاً یکطرفه نبود. مهمترین چالش حضور منابع تولید پراکنده، بهم خوردن هماهنگی در سیستم های حفاظتی ناشی از تغییرات جریان خطا و تغییرات بار نامی در شبکه می باشد. در کنار این معایب، محاسنی همچون آزادسازی ظرفیت خطوط، کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و ... مطرح گردید. مصطفی شعبان و همکارانش (۲۰۱۳)، نشان داده اند که منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع می توانند باعث بهبود قابلیت اطمینان، به تعویق انداختن هزینه های سرمایه گذاری و کاهش تلفات شبکه شوند [۱]. در سال (۲۰۱۳) بر روی مسئله بهبود کیفیت توان شبکه از جهت هارمونیک ها، در حضور منابع تولید پراکنده را تحقیق شده است. آنها از پخش بار هارمونیک پیشرو-پسرو برای مطالعه اثر منابع

* fadaeidoost@yahoo.com

^۱ گروه برق دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

تولید پراکنده روی هارمونیک های جریان و ولتاژ شبکه بهره برده است [۲]. بیسواس، طی تحقیقی نشان داده که منابع تولید پراکنده علاوه بر بهبود وضعیت هارمونیک ها در شبکه، روی بهبود افت ولتاژهای شبکه نیز اثر مطلوب دارد [۳] (۲۰۱۴). اثر منابع تولید پراکنده بر روی بهبود حد پایداری ولتاژ با حضور منابع تولید پراکنده در باس های مختلف توسط اتحادی و همکارانش (۲۰۱۴) نشان داده شده است [۴]. یزدان پناهی و همکارانش (۲۰۱۴)، به مکان یابی بهینه منابع پراکنده به منظور کاهش عدم هماهنگی های ایجاد شده در سیستم حفاظتی و همچنین کاهش حضور هارمونیک ها در شبکه پرداخته اند [۵]. در سال (۲۰۱۵) سنتیل کومار و همکارانش، عنوان کرده اند که بر حسب اندازه، نوع و مکان منابع پراکنده، اثرات آنها بر سیستم حفاظتی تغییر می کند [۶]. محققین در سال (۲۰۰۱) الگوریتم فراابتکاری جدیدی تحت عنوان جستجوی هارمونی را عرضه کردند که قدرت جستجوی بالا و تنظیمات نسبتا ساده و سرعت بالایی داشت. گیم و همکارانش [۷] طی تحقیقات هلون (۲۰۱۵) برای بهینه سازی و طراحی پارامترهای ترانسفورماتور از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده کرد و با وجود تعداد بالای پارامترهای مسئله، بهینه سازی در زمان خوب و با قدرت بالایی در جستجوی فضای جواب، به جواب رسیده است. [۸] و همچنین فی دینگ از این الگوریتم برای بازآرایی شبکه توزیع در یک شبکه هوشمند بهره برده است. هدف این تحقیق از بازآرایی شبکه توزیع، کاهش تلفات است [۹]. میرناهیدول و همکارانش، در سال ۲۰۱۵ از این

الگوریتم به منظور تعیین پارامترهای کنترل کننده PI بکار رفته در یک اینورتر منبع ولتاژ در حالت عملکرد جزیره ای و همچنین متصل به شبکه استفاده کرده اند [۱۰]. سیازوان احمد و همکاران، در سال ۲۰۲۵ مکان یابی تولیدات پراکنده را با همزمان استفاده از الگوریتم شکارچی دریایی و الگوریتم مرغ دریایی توان اکتیو را کاهش دادند [۱۲]. در این تحقیق در بر گیرنده اهداف زیر می باشد: هدف علمی این تحقیق ارائه روشی چند منظوره جهت مکان یابی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع خواهد بود. هدف کاربردی این تحقیق، ارائه خط مشی روشن در تعیین استراتژی های شرکت های توزیع، جهت مکان یابی و سرمایه گذاری های اصولی در حوزه منابع تولید پراکنده خواهد بود. در این تحقیق به مکان یابی بهینه منابع تولید پراکنده با اهداف کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش ظرفیت خطوط پرداخته شده است. مسئله مکان یابی در این تحقیق به صورت یک مسئله بهینه سازی و فرمول بندی شده است و برای حل آن از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده است. از این رو سعی شده، بهینه کردن میزان حضور این منابع در شبکه، به نحوی که هماهنگی حفاظتی حفظ شده و نفوذ هارمونیک ها در شبکه کمینه شود. قیود دیگر عبارت است از: حفظ تعادل توان، حفظ تعادل ولتاژ و زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی که باید طبق استاندارد IEEE-519 باشد. این برنامه ریزی در این مقاله به صورت یک مسئله NLP مدلسازی شده و روی شبکه ۳۰ باس IEEE مورد آزمون قرار گرفته است.

۲- فرمول بندی مسئله بهینه سازی

۲-۱- تابع هدف

تابع هدفی که در این تحقیق جهت مکان یابی منابع تولید پراکنده استفاده می شود در رابطه (۱) آورده شده است.

$$1) \min \sum k \sum i \left(100 \times |V_{i,k} - 1| + P_{loss,k} + (fu_k - fc_k) \right) \times pr_k$$

V: ولتاژ باس

pr: احتمال رخداد حالت مورد مطالعه

fu: میزان استفاده از ظرفیت تغذیه کننده بر حسب مگاوار

fc: میزان ظرفیت تغذیه کننده بر حسب مگاوار

در این رابطه متغیرها به شرح ذیل می باشد:

k: نشان دهنده حالت مورد مطالعه (حالت های خروجی

منبع تولید پراکنده)

i: شماره باس

P_{loss} : تلفات بر حسب مگاوات

تابع هدف از سه عبارت تشکیل شده است. هدف عبارت اول، بهبود پروفایل ولتاژ است. در این رابطه، مقدار انحراف ولتاژ نسبت به مقدار یک پریونیت محاسبه شده است و تابع هدف قصد کمینه سازی این عبارت را دارد. باید توجه داشت که قید برقراری ولتاژ در حدود ماکزیمم و مینیمم خودش، بعنوان یک قید اصلی در مسئله برقرار است که در ادامه و در بخش قیود به آن پرداخته می شود، اما این عبارت تابع هدف بیان می کند که مقدار ولتاژ نسبت به مقدار یک پریونیت انحراف نداشته باشد. جمله دوم در عبارت تابع هدف، شامل تلفات است. مقدار تلفات بر حسب مگاوات گزارش می شود که این عبارت قصد کمینه کردن تلفات در حضور منابع تولید پراکنده را دارد و در نهایتا عبارت سوم در تابع هدف، مقدار ظرفیت اشغال شده خطوط و تغذیه کننده های شبکه را مد نظر قرار می دهد

و بیان می کند که ظرفیت هر تغذیه کننده نباید از مقدار ظرفیت مجازش بیشتر گردد. البته در این عبارت، اگر ظرفیت تغذیه کننده از حالت طبیعی خود کمتر باشد، مقدار منفی به تابع هدف افزوده می شود. در واقع طبق این عبارت، هدف طراح و برنامه ریز شبکه، خالی کردن ظرفیت خطوط شبکه تا حد امکان در حضور منابع تولید پراکنده خواهد بود. خطوط و تغذیه کننده های شبکه را مد نظر قرار می دهد و بیان می کند که ظرفیت هر تغذیه کننده نباید از مقدار ظرفیت مجازش بیشتر گردد. البته در این عبارت، اگر ظرفیت تغذیه کننده از حالت طبیعی خود کمتر باشد، مقدار منفی به تابع هدف افزوده می شود. در واقع طبق این عبارت، هدف طراح و برنامه ریز شبکه، خالی کردن ظرفیت خطوط شبکه تا حد امکان در حضور منابع تولید پراکنده خواهد بود.

۲-۲-۲- قیود مسئله

۲-۲-۱- قید پخش توان

$$2) P_{G,i} - P_{L,i} = \sum_{k=1}^n V_i V_k V_{ik} \times \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \forall_i$$

$$3) Q_{G,i} - Q_{L,i} = \sum_{k=1}^n V_i V_k V_{ik} \times \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \forall_i$$

قید فوق، برابری توان های تولیدی و مصرفی را متذکر می شود که لازمه بقای یک سیستم قدرت است. در این عبارت، اندیس های i, k به ترتیب بیان گر باس و حالت مورد مطالعه است.

۲-۲-۲- قید محدودیت ولتاژ باس ها:

$$4) V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$$

۲-۲-۳- قید ظرفیت تغذیه کننده:

$$5) f_{c_{b,min}} \leq f_{c_b} \leq f_{c_{b,max}}$$

۲-۲-۴- بیشترین ضریب نفوذ واحد های تولید پراکنده:

$$6) \sum_{i=1}^n P_{DGD_i} + \sum_{i=1}^n P_{DGW_i} \leq 0.6 \times P_{max} + 0.3 \times \sum_{i=1}^n P_{L_i}$$

هدف از این قید، محدود کردن سطح اتصال کوتاه سیستم به ۶۰ درصد از مقدار نامی، در حالت مینیمم بودن بار شبکه است.

۲-۲-۵- گسسته در نظر گرفتن ظرفیت واحد های تولید پراکنده:

$$7) P_{DGD_i} = g_i \times a_i \times 0.1 \text{ MW} \quad \forall_i \in DGB$$

$$8) P_{DGW_i} = w_i \times b_i \times 0.1 \text{ MW} \quad \forall_i \in DG$$

در این عبارت نمادهای a, b, w, g به ترتیب بیانگر عدد صحیح، مقدار باینری و مقدار باینری است. i نمایانگر باس هایی است که قرار است در آنها واحد تولید پراکنده نصب شود.

۲-۲-۶- باس های کاندید:

$$9) g_i = 0, w_i = 0 \quad \forall_i \in A \parallel B - DGB$$

۲-۲-۷- محدودیت تعداد واحد های تولید پراکنده ی

نصب شده:

$$10) \sum_{i=1}^n g_i \leq M_D, \sum_{i=1}^n w_i \leq M_W$$

این قید بیان می کند که تعداد کل واحد های تولید پراکنده در سیستم برای واحدهای بادی و دیزلی به MD و MW

۳- نتایج و شبیه سازی

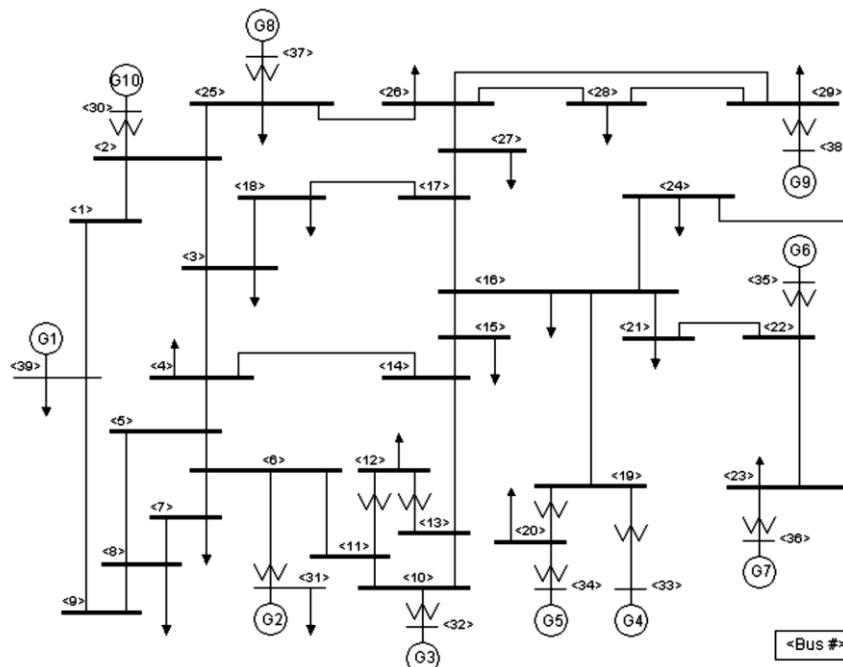
در این بخش به پیاده سازی راه کار پیشنهادی برای مکان یابی منابع تولید پراکنده پرداخته شده است. همانطور که در معرفی تابع هدف این تحقیق (رابطه ۱-۳) بیان شد، کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و همچنین آزادسازی ظرفیت خطوط از اهداف این تحقیق بوده است. برای این منظور از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده گردیده است. از میان انواع منابع تولید پراکنده، از منابع تولید پراکنده دیزلی و همچنین توربین های بادی در مکان یابی منابع تولید پراکنده استفاده شده است. در ادامه ضمن معرفی شبکه مورد مطالعه، سناریوهای مختلفی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۳-۲- معرفی شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه در این تحقیق، شبکه ۳۹ شینه و ۱۰ ژنراتوری IEEE مطابق شکل (۱) می باشد (آتهای تی و همکاران، ۱۹۷۹) [۱۱]. برای برای حل

محدود می باشد. در این مقاله هر دوی این پارامترها برابر پنج در نظر گرفته شده است.

بهینه سازی مسئله مراحل مکان یابی منابع تولید پراکنده، در ابتدا شبکه توزیع مورد نظر در محیط نرم افزار متلب پیاده سازی شد، در چهارباسب منتخب از میان باسب های یک تا سی و نه که در آنها تولید متمرکزی وجود نداشت، برای نصب واحدهای تولید پراکنده انتخاب و در آنها واحد دیزلی و توربین بادی با ظرفیت مشخص نصب گردید. سپس با انتخاب های متوالی مکان ها و ظرفیت های مختلف برای واحد های دیزلی و همچنین توربین های بادی بهترین مکان جهت نصب منابع تولید پراکنده با اهداف مورد نظر حاصل گردید. مطابق جدول (۱)، ساختار ملودی در الگوریتم جستجوی هارمونی برای مکان یابی و در جدول (۲) مقدار پارامترهای تنظیم شده در الگوریتم جستجوی هارمونی قرار داده شده است. همچنین باید توجه داشت که بیشترین ظرفیت در نظر گرفته منابع دیزلی و بادی برابر با ۱۰ مگاوات در هر باسب بوده و تنها یک واحد از این منابع تولید پراکنده نصب گردیده است.



شکل ۱: شبکه ۳۹ باسب IEEE

باسب انتخابی اول	باسب انتخابی دوم	باسب انتخابی سوم	باسب انتخابی چهارم	ظرفیت واحد دیزلی	ظرفیت واحد بادی
------------------	------------------	------------------	--------------------	------------------	-----------------

جدول ۱: ساختار ملودی در الگوریتم جستجوی هارمونی برای مکان یابی

مقدار	پارامتر
۱۰۰	بیشترین تکرار
۳۰	تعداد ملودی ها
۲۰	تعداد ملودی های ساخته شونده جدید در حین ساخت موزیک
۰,۵	نرخ در نظر گیری حافظه HMCR
۰,۱	نرخ تنظیمات PAR
۰,۲	پهنای باند
۰,۹۹۵	ضریب میرایی

جدول ۲: مقدار پارامترهای تنظیم شده در الگوریتم جستجوی هارمونی

۴-۲- مطالعه سناریو اول

تابع هدف رابطه (۱۱) به عنوان سناریو اول بهینه سازی شده و مکان یابی منابع توربین بادی و دیزلی بر اساس آن صورت گرفت در این رابطه، $V_{i,k}$ ، ولتاژ هر باس i در حالت k را بوده که بیانگر بهبود پروفایل ولتاژ شبکه است.

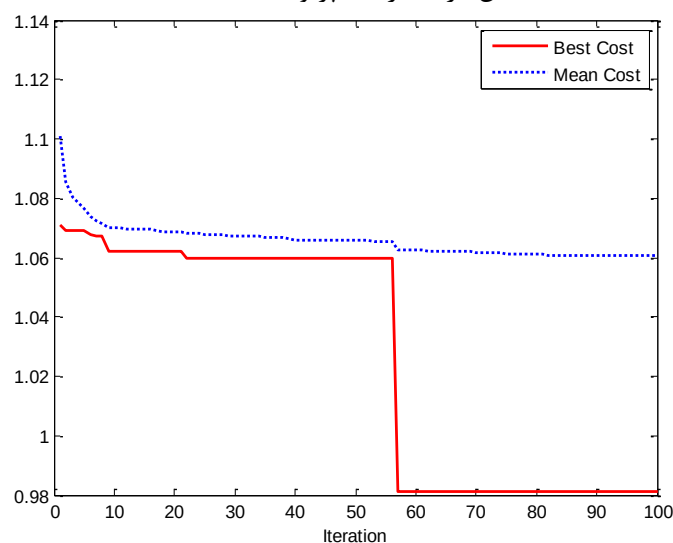
$$11) \min \sum_k \sum_i (|V_{i,k} - 1|) \times p_{rk}$$

جدول (۳)، ساختار ملودی بهینه را نشان می دهد که چهار درایه اول آن، باس های منتخب جهت نصب منابع تولید پراکنده را نشان می دهد. همچنین درایه پنجم، ظرفیت بهینه توربین بادی و درایه ششم، ظرفیت بهینه واحد دیزل ژنراتور را نشان می دهد.

ظرفیت بهینه دیزل ژنراتور	ظرفیت بهینه توربین بادی	باس منتخب چهارم	باس منتخب سوم	باس منتخب دوم	باس منتخب اول
۷,۱۷۹۵۸۶	۷,۵۲۰۵۹۷	۳	۵	۹	۱۷

جدول ۳: ساختار ملودی بهینه حاصل از سناریو اول

تغییرات فرایند بهینه سازی و مکان یابی، شامل انحرافات ولتاژ تابع هدف در شکل (۲) نشان داده شده است. منحنی خط پرنرنگ، روند بهبود تابع هدف که همان انحرافات ولتاژ نسبت به مقدار یک پریونیت است را نشان می دهد و منحنی نقطه چین نیز، بهبود وضعیت میانگین پاسخ ها در فرایند مکان یابی را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنی ها روند نزولی داشته و با تکرار الگوریتم، وضعیت بهتر شده است. طبق این منحنی، با نصب واحد های دیزلی و توربین بادی هریک با ظرفیت $7/5$ و $7/2$ مگاوات، در باس های ۳، ۵، ۹ و ۱۷، مقدار نهایی انحرافات ولتاژ به مقدار $0/98$ محدود می شود. در واقع این مقدار، جمع انحرافات تک تک باس های شبکه (همه ۳۹ باس) از مقدار یک پریونیت است.



شکل ۲: روند بهبود انحرافات ولتاژ در فرایند مکان یابی منابع تولید پراکنده

۵-۲- مطالعه سناریو دوم

در این سناریو، تابع هدف مطابق رابطه (۱۱) بوده که آزادسازی ظرفیت خطوط را نشان می دهد در این رابطه، همانطور که اشاره شد، fu_k بیانگر مقدار ظرفیت استفاده شده از خط است که باید کمینه شود

همچنین Pr احتمال در نظر گرفته شده برای هر حالت از تولیدات توربین بادی است.

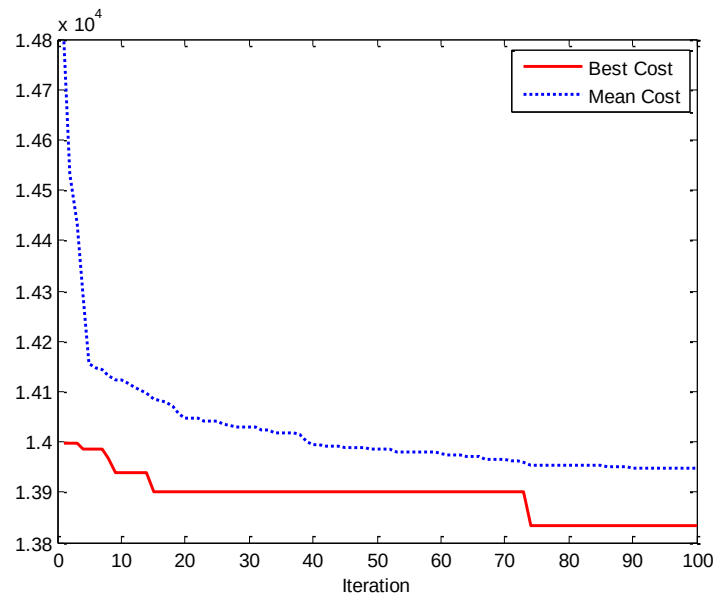
$$12) \min \sum_k \sum_i (fu_k) \times Pr_k$$

مطابق این تابع هدف و با راه اندازی الگوریتم برای جستجوی فضای جواب، باس های ۵، ۹، ۷ و ۱۵ بعنوان باس های بهینه انتخاب شده و همچنین ظرفیت بهینه برای نصب منابع تولید پراکنده بادی و دیزلی، به ترتیب

برابر با ۹/۳۳ و ۲/۵ در نظر گرفته شده است. در مقایسه با سناریو قبلی، به نظر می رسد که هرچه ظرفیت منابع تولید پراکنده افزایش یابد، مقدار ظرفیت خطوط افزایش می یابد و در نتیجه، لزوما کاهش ظرفیت خطوط و افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده، هم سونیستند. جدول (۴)، ساختار ملودی بهینه را نشان می دهد که چهار درایه اول آن، باس های منتخب جهت نصب منابع تولید پراکنده را نشان می دهد. همچنین درایه پنجم، ظرفیت بهینه توربین بادی و درایه ششم، ظرفیت بهینه واحد دیزل ژنراتور را نشان می دهد.

ظرفیت بهینه دیزل ژنراتور	ظرفیت بهینه توربین بادی	باس منتخب چهارم	باس منتخب سوم	باس منتخب دوم	باس منتخب اول
۲,۵۲۷۴۳۷	۹,۳۳۴۰۴۴	۵	۹	۷	۱۵

جدول ۴: ساختار ملودی بهینه بدست آمده از سناریو دوم



شکل ۳: روند بهبود ظرفیت اشغال شده خط در فرایند مکان یابی منابع تولید پراکنده

شکل (۳)، نشان می دهد که تابع هدف شامل ظرفیت اشغال شده خط، چه تغییراتی کرده است. منحنی خط پررنگ، روند بهبود تابع هدف و منحنی نقطه چین نیز، بهبود وضعیت میانگین پاسخ ها را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنی ها روند نزولی دارند و تکرار الگوریتم، وضعیت بهتر شده است. طبق این منحنی، با نصب واحد

های دیزلی و توربین بادی هریک با ظرفیت ۲/۵ و ۹/۳۳ مگاوات، در باس های ۵، ۹، ۷ و ۱۵، مقدار نهایی و کل ظرفیت اشغال شده خطوط به مقدار ۱۳/۹ گیگاوات محدود شده است. در واقع این مقدار، جمع ظرفیت توان عبوری از خطوط شبکه است.

۲-۶ مطالعه سناریو سوم

در این سناریو، تابع هدف مطابق رابطه (۱۲) و با هدف کاهش تلفات تنظیم شده است. در این رابطه، همانطور که در بخش سوم آمده است، $P_{loss,k}$ بیانگر مقدار تلفات خط

بر حسب مگاوات است که باید کمینه شود. همچنین Pr احتمال در نظر گرفته شده برای هر حالت از تولیدات توربین بادی است.

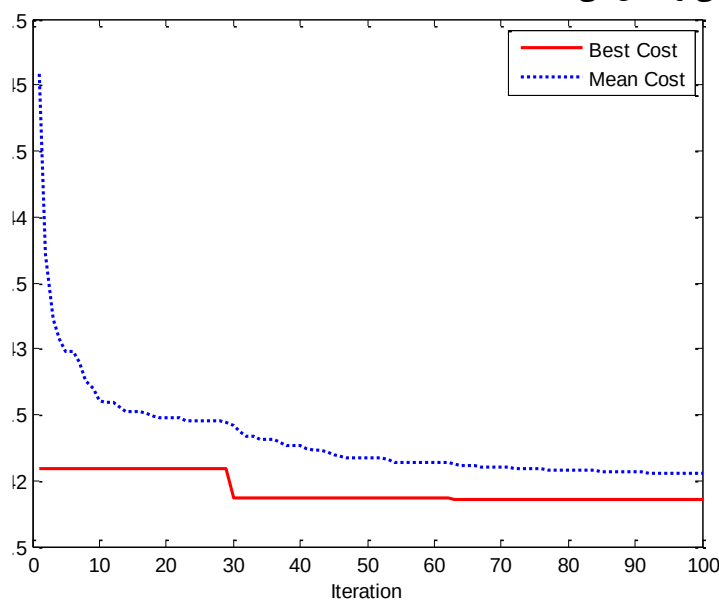
$$13) \min \sum_k \sum_i (P_{loss,k}) \times Pr_k$$

طبق تابع هدف و پس از بهینه سازی جستجوی فضای جواب، باس های ۷، ۱۲، ۱۹ و ۲۸ بعنوان باس های بهینه انتخاب و ظرفیت بهینه نصب منابع مطابق جدول (۵) تولید پراکنده بادی و دیزلی، به ترتیب برابر با ۹/۶ و ۸/۸

ظرفیت بهینه دیزل ژنراتور	ظرفیت بهینه توربین بادی	باس منتخب چهارم	باس منتخب سوم	باس منتخب دوم	باس منتخب اول
۸,۸۱۵۸۷۷	۹,۵۹۶۵۱۹	۷	۱۲	۱۹	۲۸

جدول ۵: ساختار ملودی بهینه حاصل از سناریو سوم

شکل (۴)، نشان دهنده تغییرات فرایند بهینه سازی و مکان یابی، تابع هدف شامل تلفات است. منحنی خط پر رنگ در این شکل، روند بهبود تابع هدف که همان جمع تلفات خط است را نشان می دهد و منحنی نقطه چین نیز، بهبود وضعیت میانگین پاسخ ها در فرایند مکان یابی را نشان می دهد.



شکل ۴: روند بهبود تلفات در فرایند مکان یابی منابع تولید پراکنده

های ۷، ۱۲، ۱۹ و ۲۸، مقدار نهایی و کل تلفات به مقدار ۴۱/۸ مگاوات محدود شده است. در واقع این مقدار، جمع تلفات توان عبوری از خطوط شبکه است.

مشاهده می شود که منحنی ها روند نزولی دارند و رفته رفته با تکرار الگوریتم جست و جوی هارمونی، وضعیت بهتر شده است. طبق این منحنی، با نصب واحد های دیزلی و توربین بادی هریک با ظرفیت ۸/۸ و ۹/۶ مگاوات، در باس

۷-۲- مطالعه سناریو چهارم

ولتاژ، ظرفیت خطوط و تلفات را نشان می دهد.

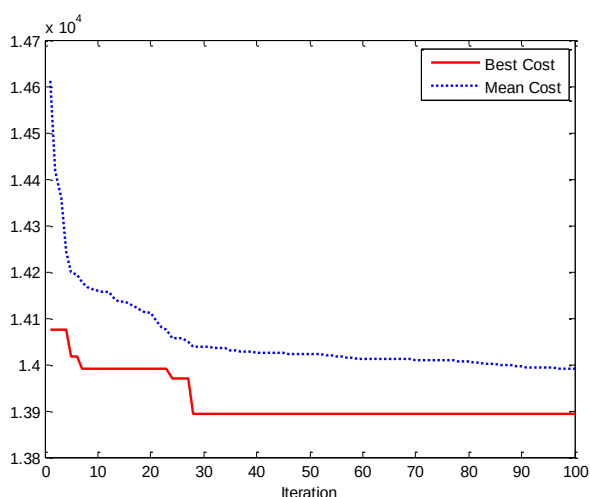
در این سناریو، تابع هدف مطابق رابطه (۱۳) تنظیم شده است. این تابع هدف در جدول (۶) حاصل جمع انحرافات

$$14) \min \sum_k \sum_i (100 \times |V_{l,k} - 1| + P_{loss,k} + (fu_k - fc_k)) Pr_k$$

ظرفیت بهینه دیزل ژنراتور	ظرفیت بهینه توربین بادی	باس منتخب چهارم	باس منتخب سوم	باس منتخب دوم	باس منتخب اول
۲,۴۷۱۲۴۹	۳,۲۱۷۳۹۷	۶	۱	۹	۲۳

جدول ۶: ساختار ملودی بهینه حاصل از سناریو چهارم

۴۱/۸ مگاوات محدود شده که جمع تلفات توان عبوری از خطوط شبکه است. جمع ظرفیت توان عبوری از خطوط شبکه است و میزان ظرفیت خطوط به میزان ۵ درصد نسبت به حالتی که منابع تولید پراکنده به صورت نامنظم در شبکه قرار گرفته بودند، کاهش یافت. ممکن است در فرایند مکان یابی در شبکه با اهداف مجزا، یک باس بهینه در تمام توابع هدف مشترک باشد و در این صورت، آن باس بعنوان یک باس استراتژیک در توسعه شبکه های توزیع خواهد بود. ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده بادی نسبت به منابع دیزلی، بیشتر است. علت این موضوع نیز، بازدهی کوچکتر از یک در منابع بادی به دلیل عدم قطعیت آنها است. در نهایت الگوریتم جستجوی هارمونی، عملکرد مطلوبی را در فرایند مکان یابی منابع تولید پراکنده از خود نشان داد و سرعت همگرایی بالایی نیز داشت.



شکل ۵: روند بهبود تابع هدف در فرایند مکان یابی منابع تولید پراکنده

شکل (۵)، نشان می دهد که در فرایند بهینه سازی و مکان یابی، تابع هدف مورد بررسی چه تغییراتی کرده است. منحنی قرمز رنگ در این شکل، روند بهبود تابع هدف را نشان می دهد و منحنی آبی رنگ نیز، بهبود وضعیت میانگین پاسخ ها در فرایند مکان یابی را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنی ها روند نزولی دارند و رفته رفته با تکرار الگوریتم جست و جوی هارمونی، وضعیت بهتر شده است.

۳- نتیجه گیری

همانطور که مشاهده گردید منابع تولید پراکنده در صورت مکان یابی صحیح مزایای فراوانی برای شبکه های توزیع انرژی الکتریکی دارند که در این تحقیق، سه مورد از مزیت های این منابع مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفت. مکان یابی بهینه این منابع، می توانند انحرافات ولتاژ، تلفات شبکه های توزیع و ظرفیت خطوط شبکه را کاهش داده و پروفایل ولتاژ شبکه را بهبود دهند. به نحوی که طبق سناریو اول با نصب واحد های دیزلی و توربین بادی هریک با ظرفیت ۷/۲ و ۷/۵ مگاوات، مقدار نهایی انحرافات ولتاژ از عدد معیار نزدیک به ۱،۰۷ با کاهش به مقدار ۰/۹۸ بر حسب پریونیت محدود می شود که بهبود حدود ۱۰ درصدی را نشان می دهد. طبق سناریو دوم با نصب واحد های دیزلی و توربین بادی هریک با ظرفیت ۲/۵ و ۹/۳۳ مگاوات، مقدار کل ظرفیت اشغال شده خطوط از مقدار ۱،۴ گیگاوات به مقدار ۱۳/۹ گیگاوات محدود شده که این مقدار جمع ظرفیت توان عبوری از خطوط شبکه است و تلفات انرژی به میزان ۷/۵ درصد بهبود یافته است. بر طبق سناریو سوم با نصب واحد های دیزلی و توربین بادی هریک با ظرفیت ۸/۸ و ۹/۶ مگاوات، مقدار کل تلفات شبکه به مقدار

منابع:

- [1]. Shaaban M. Yasser F. Atwa M. Ehab F. Saadany E. 2013. "DG allocation for benefit maximization in distribution networks." Power Systems, IEEE Transactions on 28.2: 639-649.
- [2]. Abdelsalam Abdelazeem A. Ehab F. El-Saadany. 2013. "Probabilistic approach for optimal planning of distributed generators with controlling harmonic distortions." Generation, Transmission & Distribution, IET 7.10 : 1105-1115.
- [3]. Biswas S. Swapan K. Goswami Avhishek C. 2014. "Optimal distributed generation placement in shunt capacitor compensated distribution systems considering voltage sag and harmonics distortions." Generation, Transmission & Distribution, IET 8.5: 783-797.
- [4]. Ettehad, M., H. Ghasemi, and S. Vaez-Zadeh. "Voltage stability-based DG placement in distribution networks." Power Delivery, IEEE Transactions on 28.1 (2013): 171-178.

- [5]. Yazdanpanahi H. Wilsun X. Yun Wei L. 2014. "A Novel Fault Current Control Scheme to Reduce Synchronous DG's Impact on Protection Coordination." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 29.2 :542-551.
- [6]. Adhikari Ananta V. Senthil Kumar. 2015. "A Protection Coordination Index for Evaluating Distributed Generation Impacts on Protection for Meshed Distribution Systems Using Hybrid GA-NLP Approach." *International Journal of Innovative Research and Development* 4.3.
- [7]. Geem ZW. Kim J.-H. Loganathan G.V. 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation* 76 (2): 60–68.
- [8]. Holland J H. 2015. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- [9]. Ding F. Kenneth L. 2015. "Hierarchical Decentralized Network Reconfiguration for Smart Distribution Systems—Part II: Applications to Test Systems." *Power Systems, IEEE Transactions on* 30.2: 744-752.
- [10]. Mir Nahidul. 2015. "Harmony Search Algorithm-Based Controller Parameters Optimization for a Distributed-Generation System." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 30.1: 246-255.
- [11]. Athay T. Podmore R. Virmani S. 1972. "A practical method for the direct analysis of transient stability." *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 2 573-584.
- [12]. Syazwan Ahmad Sabri. Siti Rafidah Abdul Rahim. 2025. "A Comparative Study on DG Placement Using Marine Predator and Osprey Algorithms to Enhance Loss Reduction Index in the Distribution System, *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, Vol. 21, No. 02, June 2025