

جایابی بهینه سکشنالایزر و خازن برای افزایش بهره‌وری سیستم توزیع شهرک صنعتی خوی با منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

حسین شایقی^۱، استاد؛ مسعود علیلو^۲، کارشناس ارشد

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - hshayeghi@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - masoud.alilou@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، به جایابی همزمان انواع منابع تولید پراکنده، خازن و سکشنالایزر برای افزایش بهره‌وری سیستم توزیع پرداخته شده است. بعد از جایابی ادوات بر اساس مدل بار ثابت، عملکرد شبکه بر اساس شاخص‌های فنی تحت مدل بار متغیر با ولتاژ و فرکانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. توربین بادی و فتوولتائیک، منابع تولید پراکنده تجدیدپذیری هستند که در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو، بهبود شاخص ولتاژ و شاخص‌های قابلیت اطمینان توابع هدفی هستند که در بهینه‌سازی مکان و اندازه ادوات در نظر گرفته می‌شوند. برای حل مسئله جایابی بهینه ادوات از الگوریتم ترکیبی پیشنهادی متشکل از الگوریتم کرم شب‌تاب و الگوریتم ازدحام ذرات به صورت چندهدفه استفاده شده است. علاوه بر این از روش فازی برای انتخاب بهترین ذره از صفحه پارتو به عنوان بهینه‌ترین پاسخ مسئله استفاده می‌شود. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع استاندارد ۶۹ شینه IEEE و سیستم توزیع واقعی از شبکه برق‌رسانی شهرستان خوی مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی نتایج نشان از کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در بهبود شاخص‌های فنی شبکه توزیع با جایابی همزمان ادوات را داراست.

واژه‌های کلیدی: ادوات حفاظتی، الگوریتم هوشمند ترکیبی، بانک خازنی، بهینه‌سازی چندهدفه، مدل بار، منابع تولید پراکنده.

Optimal Placement of Sectionalizer and Capacitor for Improvement Efficiency of Industrial Distribution Networks in Khoy City Considering DG

H. Shayeghi¹, Professor; M. Alilou², MSc

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: hshayeghi@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: masoud.alilou@yahoo.com

Abstract: In this paper, simultaneous allocation of multi-distributed generation, capacitor bank and sectionalizer are utilized to improve efficiency of the distribution network. After placement of devices based on constant load model, technical performance of the system is evaluated under loads sensitive to voltage and frequency. Wind turbine and photovoltaic are renewable distributed generation units that along other devices are been studied. The proposed multi-objective functions are composed of reduction active and reactive power loss, improvement of voltage index and reliability indices. A hybrid optimization algorithm using Combination of firefly algorithm and particle swarm optimization is proposed to solve the multi-objective optimal allocation problem. Moreover, a method based on fuzzy mechanism is employed to extract one of the Pareto-optimal solutions as the best compromise one. The proposed method is implemented on a IEEE 69-bus distribution network and also actual 100-bus distribution system in Khoy-Iran. The results approve the effectiveness of the proposed method with simultaneous placement of different devices for improving technical performance of distribution network.

Keywords: Protective device, hybrid intelligent algorithm, capacitor bank, load model, multi-objective optimization, distributed generation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۷ و ۱۳۹۴/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۶

نام نویسنده مسئول: حسین شایقی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

منابع تولید پراکنده^۱ (DG) در حالت کلی منابع تولید توان الکتریکی هستند که مستقیماً به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند و یا در مکان مشتری قرار می‌گیرند. منابع تولید پراکنده، به نام‌های دیگری همچون تولید در محل، تولید غیرمتمرکز، انرژی پراکنده و تولید انرژی الکتریکی از منابع انرژی خیلی کوچک نامیده می‌شوند [۱]. انتخاب بهینه مکان و اندازه منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع باعث بهبود شاخص‌های فنی شبکه از جمله تلفات و قابلیت اطمینان می‌شوند. توربین بادی و فتوولتائیک دو نوع منابع تولید پراکنده‌ای هستند که تمایل استفاده از آن‌ها در سال‌های اخیر به دلایلی همچون تجدیدپذیر بودن و قابلیت جایابی در نزدیکی بار روبه رشد بوده است [۲]. در کنار همه فواید منابع تولید پراکنده، اتصال این منابع به شبکه‌های توزیع باعث تغییر جهت جریان، تغییر سطوح خطا و یا مدت‌زمان وقوع خطا می‌شوند، بنابراین ضروری است تا طرح‌های حفاظتی سیستم برای افزایش امنیت و قابلیت اطمینان شبکه تغییر کرده و دوباره برای کاهش خطا جایابی شوند [۳].

منابع تولید پراکنده و ادوات حفاظتی همچون سکشنالایزر، تجهیزاتی هستند که در کنار یکدیگر در زمان وقوع خطا باعث کاهش انرژی توزیع نشده شبکه می‌شوند. اگر DG به‌تنهایی در نظر گرفته شود در صورت وقوع خطا در هر شاخه از فیدر، کلید اصلی شبکه را قطع کرده و در نتیجه تأثیری بر شاخص‌های قابلیت اطمینان نخواهد داشت. در طرف دیگر اگر سکشنالایزر به‌تنهایی در شبکه جایابی شود، در صورت وقوع خطا در پایین‌دست سکشنالایزر، آن عمل کرده و بارهای بالادست قطع خواهند شد ولی اگر خطا در بالادست آن صورت گیرد، کلید اصلی و سکشنالایزر خطا را ایزوله می‌کنند اما از آنجایی که برای بارهای پایین‌دست هیچ منبع انرژی وجود ندارد، بار نقاط پایین‌دست هم قطع شده و سکشنالایزر تأثیر چشم‌گیری بر روی انرژی توزیع نشده شبکه نخواهد داشت. توان راکتیو بر تلفات سیستم، پروفیل ولتاژ و در حالت کلی بر بهره‌وری شبکه تأثیر مستقیم دارد. به همین دلیل یکی از مهم‌ترین وظایف ناظر سیستم، کنترل توان راکتیو شبکه و در صورت نیاز جبران توان راکتیو برای حفظ پایداری شبکه است. جهت جبران توان راکتیو، معمول و ارزان‌ترین روش استفاده از بانک‌های خازنی است [۴]. مطالعاتی که در سیستم توزیع برای جایابی منابع تولید پراکنده، خازن و ادوات حفاظتی انجام گرفته است را می‌توان به ۴ دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

جایابی منابع تولید پراکنده: این گروه از مطالعات به جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع و بررسی اثرات آن‌ها بر روی شاخص‌های فنی شبکه پرداخته‌اند. در این حوزه مطالعات متفاوتی انجام گرفته که منابع [۵-۹] نمونه‌ای از آن‌ها هستند. منابع [۵-۷] مطالعاتی هستند که به‌صورت چندهدفه به جایابی منابع تولید پراکنده پرداخته‌اند. کاهش تلفات، مینیمم کردن هزینه‌ها، افزایش سودآوری شبکه و بهبود شاخص‌های ولتاژی همچون پروفیل و پایداری ولتاژ توابع هدفی هستند

که در پژوهش‌های پیشین پرکاربرد بوده‌اند. مطالعه انواع منابع تولید پراکنده و جایابی بهینه آن‌ها نیز در مطالعاتی همچون منابع [۸-۹] انجام گرفته‌اند.

جایابی بانک خازنی: مطالعاتی که بانک‌های خازنی را مورد مطالعه قرار داده‌اند و اثرات جایابی بهینه آن‌ها در سیستم توزیع را ارزیابی کرده‌اند در گروه دوم قرار می‌گیرند [۱۰-۱۲]. جایابی بهینه مکان و اندازه بانک خازنی در سیستم توزیع شعاعی با مدل بار غیرخطی در [۱۰] انجام گرفته است. در منبع [۱۱] جایابی مکان بانک خازنی شنت در سیستم توزیع با منحنی بار روزانه انجام گرفته و اندازه بهینه برای بانک خازنی ثابت و قابل تغییر انتخاب شده است. جایابی بهینه خازن شنت در سیستم توزیع با مینیمم کردن تلفات با استفاده از الگوریتم نوین تجمعی زنبور عسل در [۱۲] انجام شده است.

جایابی ادوات حفاظتی: مطالعات قرار گرفته در این بخش‌بندی، پژوهش‌هایی هستند که به جایابی ادوات حفاظتی در سیستم توزیع پرداخته و یا طرح‌های حفاظتی برای افزایش امنیت و قابلیت اطمینان شبکه برنامه‌ریزی کرده‌اند. پژوهش‌های مختلفی انجام گرفته‌اند که به‌عنوان مثال می‌توان به منابع [۱۳-۱۵] اشاره کرد. در [۱۳] روشی هوشمند بر اساس الگوریتم ژنتیک برای جایابی بهینه مکان سکشنالایزر در سیستم هوشمند شعاعی استفاده شده است. نویسندگان در منبع [۱۴]، از روش هوشمند نوینی برای جایابی کلیدهای حفاظتی در شبکه استفاده کرده‌اند. هدف از پژوهش انجام گرفته در [۱۵]، جایابی بهینه کلیدهای حفاظتی دستی و اتوماتیک در سیستم توزیع شعاعی با استفاده از الگوریتم بهبود یافته پرش قورباغه است.

جایابی دوتایی ادوات: مطالعاتی هم وجود دارند که به‌جای جایابی تک‌به‌تک ادوات به جایابی دوتایی ادوات پرداختند که آن‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد: جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و ادوات حفاظتی [۱۶، ۱۷] و جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و بانک خازنی [۱۸، ۱۹]. جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و کلیدهای حفاظتی در سیستم توزیع شعاعی با استفاده از الگوریتم هوشمند ژنتیک در [۱۶] انجام گرفته است. نویسندگان در [۱۷]، با استفاده از روش چندهدفه فازی به جایابی بهینه سکشنالایزر در سیستم توزیع با منبع تولید پراکنده پرداخته‌اند. جایابی بهینه منابع تولید پراکنده و بانک خازنی برای افزایش بهره‌وری سیستم توزیع با استفاده از الگوریتم نوین جستجوی باکتری جهت‌داده‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در [۱۸] انجام گرفته است. نویسندگان در [۱۹] جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و بانک خازنی در سیستم توزیع شعاعی با هدف کاهش تلفات انرژی با در نظر گرفتن مدل غیرخطی بار را انجام داده‌اند.

۱-۱- روش پیشنهادی

همان‌طور که ذکر شد تا به امروز مطالعات متفاوتی در مورد جایابی منابع تولید پراکنده، بانک خازنی و ادوات حفاظتی در شبکه‌های توزیع انجام شده، اما تاکنون مطالعه‌ای بر روی جایابی و ظرفیت‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده، بانک خازنی و ادوات حفاظتی، به دلیل پیچیدگی موضوع

غیرممکن است، بار به صورت متغیر با ولتاژ و فرکانس در نظر گرفته می شود.

بنابراین در این مقاله با استفاده از ترکیب الگوریتم کرم شب تاب و الگوریتم ازدحام ذرات به جایابی همزمان انواع منابع تولید پراکنده، خازنی و سکشنالایزر به صورت چندهدفه پرداخته شده است. البته برای انتخاب بهترین پاسخ در صفحه پارتو از روش فازی استفاده می شود. توربین بادی و فتوولتائیک منابع تولید پراکنده ای هستند که مورد مطالعه قرار می گیرند. کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو، بهبود شاخص ولتاژ و قابلیت اطمینان اهداف مورد نظر در جایابی همزمان ادوات هستند. روش پیشنهادی در شبکه استاندارد ۶۹ شینه و سیستم توزیع واقعی از شبکه برق رسانی شهرستان خوی مورد ارزیابی قرار می گیرد. ارزیابی نتایج نشان گر کارایی بالای روش پیشنهادی در جایابی همزمان ادوات با بهبود شاخص های فنی سیستم توزیع است.

۲- منابع تولید پراکنده

منابع تولید پراکنده را می توان بر اساس تکنولوژی به دودسته تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر تقسیم کرد. در این پژوهش، منابع تجدیدپذیر توربین بادی و فتوولتائیک دو نوع تولید پراکنده ای هستند که مورد مطالعه قرار گرفته و در ادامه به اختصار توضیح داده می شوند [۱، ۲۱، ۲۲].

توربین بادی: توربین بادی انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. در توربین های بادی معمولاً از ژنراتورهای آسنکرون (القایی) استفاده می شود. توان تولیدی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، وابستگی مستقیمی به شرایط محیطی دارند که در مورد هر نوع منبع تولید پراکنده، این وابستگی متفاوت است. چگالی هوا، شرایط آب و هوایی، انرژی جنبشی توربین بادی، سرعت باد ورودی و خروجی به توربین بادی و نرخ سرعت از مهم ترین عواملی هستند که در انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین بادی تأثیر می گذارند. توربین های بادی تزریق کننده توان اکتیو و مصرف کننده توان راکتیو هستند. در معادلات پخش بار، توربین بادی به صورت باس مدل PQ با توان راکتیو متغیر مدل سازی می شود. توان راکتیو توربین بادی متصل به شبکه با رابطه شماره (۱) محاسبه می شود.

$$Q_{DG} = -(0.5 + 0.04P_{DG}^2) \quad (1)$$

فتوولتائیک: فتوولتائیک انرژی خورشید را با استفاده از سلول های خورشیدی یا سطوح فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. مساحت سلول خورشیدی، میزان تابش انرژی خورشیدی و میزان بهره وری سلول خورشیدی از مهم ترین پارامترهایی هستند که بر میزان انرژی الکتریکی تولید شده توسط فتوولتائیک تأثیر می گذارند. منابع تولید پراکنده استفاده کننده از انرژی خورشیدی فقط توانایی تزریق توان اکتیو به شبکه را دارا هستند. بنابراین در محاسبات پخش بار، به صورت باس مدل P شبیه سازی می شوند.

صورت نگرفته است. منابع تولید پراکنده در صورت جایابی و اندازه یابی بهینه در شبکه باعث بهبود شاخص های فنی سیستم همچون تلفات و پروفیل ولتاژ می شوند. زمانی که در کنار منابع تولید پراکنده به جایابی بهینه ادوات حفاظتی پرداخته می شود، با ایجاد نواحی جزیره ای در هنگام وقوع خطا باعث کاهش انرژی از دست رفته و در نتیجه بهبود شاخص های قابلیت اطمینان می شود. بنابراین بحث مهمی که در جایابی ادوات حفاظتی همراه منابع تولید پراکنده مطرح می شود، ایجاد نواحی جزیره ای در هنگام وقوع خطا برای کاهش انرژی از دست رفته است.

در این مقاله جهت بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه از دو وسیله حفاظتی بریکر و سکشنالایزر استفاده می شود. سکشنالایزر وسیله ای حفاظتی است که به صورت اتوماتیک بخش خطا دار را در شبکه توزیع قطع می کند. معمولاً سکشنالایزر در بالادست رله بازبست قرار می گیرد. سکشنالایزر تعداد عمل باز و بسته شدن رله بازبست را می شمارد. پس از تعداد مشخصی که رله بازبست عمل می کند، سکشنالایزر باز شده و بخش خطا دار را ایزوله می کند. این خاصیت که به رله بازبست اجازه تعداد مشخصی باز و بسته شدن را می دهد، در زمان وقوع خطاهای اولیه اثر خود را بیش تر نشان داده و مانع از قطع طولانی شبکه خطا دار می شود [۲۰].

نحوه جایابی ادوات حفاظتی به طوری است که کلید قدرت به عنوان حفاظت کننده نهایی فیدر در ابتدای فیدر قرار می گیرد و سکشنالایزرها با توجه به مکان DG و بانک خازنی طوری بر روی شاخه اصلی و یا شاخه های فرعی جایابی می شوند که بیش ترین پایداری در شبکه در هنگام وقوع خطا حاصل شود. البته باید به این نکته هم توجه کرد که شرط پایداری جزیره ایجاد شده، برقراری شرایط و محدودیت های شبکه همچون محدودیت ولتاژ باس ها است. پس بعد از ایجاد منطقه جزیره ای، باید در این محدوده پخش بار صورت بگیرد که اگر قیود مسئله رعایت شده باشد، جزیره به کار خود ادامه دهد و گرنه جزیره هم مانند بارهای بالادست سکشنالایزر بی برق خواهد شد. در این میان وجود بانک خازنی در دو حالت قابل بررسی است. اولاً اینکه قرارگیری بانک خازنی در محدوده حفاظتی سکشنالایزر می تواند به منبع تولید پراکنده در تأمین انرژی و همچنین پایداری جزیره کمک کند. در حالت دوم بانک خازنی در کل مدار طوری جایابی شود که به کمک انرژی تزریقی منبع تولید پراکنده، باعث بهبود سایر شاخص های فنی شبکه شود.

علاوه بر جایابی همزمان منبع تولید پراکنده، بانک خازنی و ادوات حفاظتی یکی دیگر از اهداف مسئله، بررسی اثر منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در ترکیب با سایر ادوات است؛ به همین دلیل توربین بادی و فتوولتائیک مورد بررسی قرار می گیرند. بعد از این که به جایابی انواع منابع تولید پراکنده، بانک خازنی و ادوات حفاظتی در مدل بار ثابت پرداخته شد. برای آزمایش الگوریتم پیشنهادی در شرایط واقعی تر بهره برداری از شبکه توزیع که در آن امکان ثابت بودن بار تا حدودی

در رابطه (۴)، I_L شاخص تلفات شبکه توزیع و I_V شاخص ولتاژ تعریف شده است. شاخص قابلیت اطمینان هم با عبارت I_R نشان داده شده است. در ادامه نحوه محاسبه توابع شرح داده شده است.

۴-۱- شاخص تلفات

تابع تلفات به عنوان مهم ترین شاخص فنی شبکه با ترکیب تلفات توان اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (۵) تعریف شده است.

$$I_L = L/L_0 \quad (5)$$

$$L = C_p P_L + C_q Q_L \quad (6)$$

$$L_0 = C_p P_{L0} + C_q Q_{L0} \quad (7)$$

در روابط فوق، C_i ها ضرایب ترکیب تلفات هستند. L_0 و L به ترتیب شاخص تلفات توان قبل و بعد از اتصال ادوات به سیستم توزیع هستند که با استفاده از روابط (۶ و ۷) محاسبه می شوند. در این روابط، P_L و Q_L به ترتیب مقدار تلفات اکتیو و راکتیو شبکه بعد از اتصال ادوات بوده و P_{L0} و Q_{L0} نیز به ترتیب مقدار تلفات اکتیو و راکتیو اولیه سیستم توزیع هستند. جهت محاسبه تلفات توان اکتیو ($loss_P$) و راکتیو ($loss_Q$) از روابط (۸ و ۹) استفاده شده است. در این روابط، R_i و X_i به ترتیب مقدار مقاومت و راکتانس شاخه نام هستند. I_i جریان شاخه نام بوده و N_{br} هم تعداد شاخه های شبکه توزیع است.

$$loss_P = \sum_{i=1}^{N_{br}} R_i |I_i|^2 \quad (8)$$

$$loss_Q = \sum_{i=1}^{N_{br}} X_i |I_i|^2 \quad (9)$$

۴-۲- شاخص ولتاژ

شاخص ولتاژ تعریف شده به صورت ترکیب شاخص پروفیل ولتاژ^۳ (VP) و شاخص پایداری ولتاژ^۴ (VS) با رابطه (۱۰) بیان می شود. برای انتخاب بهینه ضرایب ترکیب شاخص پروفیل و پایداری ولتاژ شبکه، چندین شبیه سازی با تغییر ضرایب بین [۰ و ۱] انجام گرفت و در نهایت با ارزیابی نتایج، مقدار بهینه ضرایب C_{vp} و C_{vs} انتخاب گردید که مقدار آن ها در بخش آزمایش عددی آورده شده اند.

$$I_V = VI/VI_0 \quad (10)$$

$$VI = C_{vp} \times VP + C_{vs} \times (1 - VS) \quad (11)$$

$$VI_0 = C_{vp} \times VP_0 + C_{vs} \times (1 - VS_0) \quad (12)$$

۴-۲-۱- پروفیل ولتاژ

یکی از فواید جایابی مناسب منابع تولید پراکنده، بهبود پروفیل ولتاژ است. این شاخص نشان دهنده انحراف ولتاژ باس ها از ولتاژ نامی است. بنابراین هرچه قدر مقدار این شاخص به صفر نزدیک تر باشد، عملکرد

با توجه به وابستگی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر به شرایط محیطی، نمی توان از این منابع به طور مداوم و پایدار استفاده کرد. به عنوان مثال در مدت زمان غروب تا طلوع خورشید، امکان استفاده مستقیم از انرژی خورشید امکان پذیر نیست. از طرف دیگر در جایابی همزمان منبع تولید پراکنده و سکشنالایزر، پایداری حالت جزیره ای از اهمیت بسزایی برخوردار است که با ناپایدار بودن انرژی تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر به خطر می افتد. از این رو امروزه برای افزایش بهره وری منابع تجدیدپذیر و پایداری نواحی جزیره ای تشکیل شده، در کنار منابع تولید پراکنده از سیستم های ذخیره انرژی^۲ (BSS) استفاده می شود. در این حالت در زمان هایی که میزان انرژی تولیدی منبع تولید پراکنده بیش تر از میزان تقاضای شبکه باشد، انرژی مازاد در باطری ذخیره می شود و در زمان هایی هم که به دلایل محیطی، منبع تجدیدپذیر توانایی تولید انرژی را ندارد، از انرژی ذخیره شده در باطری استفاده می شود. بنابراین منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده، همواره با همراه ذخیره کننده انرژی در شبکه جایابی می شوند و قابلیت تزریق میزان انرژی مورد نیاز سیستم را به صورت پایدار دارا هستند [۲۳].

۳- مدل بار

در پخش بار مرسوم در سیستم توزیع، بار متصل به باس ها را ثابت فرض می کنند. در حالی که دامنه ولتاژ باس ها و فرکانس سیستم در میزان توان واقعی مورد نیاز سیستم تأثیر می گذارند؛ در نتیجه با ثابت فرض کردن مقادیر توان اکتیو و راکتیو بارها نمی توان به نتایج مطلوب رسید. برای آزمایش روش پیشنهادی در شرایط واقعی تر بهره برداری در شبکه توزیع که در آن امکان ثابت بودن بار تا حدودی غیرممکن است، بار به صورت متغیر نیز در نظر گرفته می شود. در این مطالعه، بار باس ها وابسته به ولتاژ باس و فرکانس سیستم در نظر گرفته شده اند. مدل ریاضی وابستگی ولتاژ و فرکانس بارها به صورت روابط (۲، ۳) بیان می شود [۲۴].

$$P_i = P_{i0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{k_{pv}} [1 + k_{pf}(f - f_0)] \quad (2)$$

$$Q_i = Q_{i0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{k_{qv}} [1 + k_{qf}(f - f_0)] \quad (3)$$

در روابط (۲ و ۳)، P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو باس i هستند. P_{i0} و Q_{i0} نیز توان های اکتیو و راکتیو باس i قبل از اعمال ضرایب وابستگی هستند. V_i و V_{i0} به ترتیب ولتاژ واقعی و نامی باس i هستند و فرکانس واقعی و نامی سیستم نیز به ترتیب با f و f_0 نشان داده شده اند. k_i ها نیز ضرایب وابستگی در مدل بارهای مختلف هستند.

۴- توابع هدف

توابع هدف استفاده شده، شامل سه شاخص تلفات، ولتاژ و قابلیت اطمینان است که در رابطه (۴) بیان شده اند.

$$\text{objective function} : I_L, I_V, I_R \quad (4)$$

۴-۳- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک سیستم عبارت است از توانایی آن سیستم در انجام وظیفه تحت شرایط محیطی و بهره‌برداری معین برای یک بازه زمانی خاص. در مورد سیستم توزیع، قابلیت اطمینان به قطع برق مشترکین و ایجاد اختلال در عملکرد تجهیزات مربوط می‌شود [۲۶].

شاخص متوسط فراوانی قطعی سیستم^۵ (SAIFI)، شاخص متوسط مدت‌زمان قطعی سیستم^۶ (SAIDI) و شاخص متوسط انرژی توزیع نشده^۷ (AENS)، شاخص‌های نقاط بار سیستم توزیع هستند که در تعریف شاخص قابلیت اطمینان استفاده شده‌اند. بنابراین شاخص قابلیت اطمینان استفاده‌شده با رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$I_R = C_{r1} \times \frac{SAIFI}{SAIFI_0} + C_{r2} \times \frac{SAIDI}{SAIDI_0} + C_{r3} \times \frac{AENS}{AENS_0} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) $SAIFI$ ، $SAIDI$ و $AENS$ شاخص‌های قابلیت اطمینانی بعد از اتصال ادوات بوده و $SAIFI_0$ ، $SAIDI_0$ و $AENS_0$ نیز شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار قبل از اتصال ادوات هستند. برای محاسبه شاخص‌های قابلیت نقاط بار از روابط (۱۶-۱۸) استفاده شده است [۲۶]. در این روابط N_i تعداد مشتری، r_i نرخ قطعی، u_i زمان خروج و $L_{a(i)}$ متوسط بار وصل شده به نقطه بار i ام هستند.

$$SAIFI = \frac{\sum N_i r_i}{\sum N_i} \quad (16)$$

$$SAIDI = \frac{\sum N_i u_i}{\sum N_i} \quad (17)$$

$$AENS = \frac{\sum L_{a(i)} u_i}{\sum N_i} \quad (18)$$

شاخص‌های $SAIFI$ و $SAIDI$ به ترتیب بیان‌گر متوسط تعداد دفعات و متوسط مدت‌زمانی هستند که هر مشترک در طول سال با قطعی مواجه می‌شوند. شاخص $AENS$ نیز که مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص قابلیت اطمینانی سیستم توزیع است، متوسط انرژی تأمین نشده سیستم را به ازای هر مشترک نشان می‌دهد و از نظر مدیران شرکت‌های توزیع به دلیل ارتباط مستقیم با درآمد، سود و ضرر شرکت از اهمیت فراوانی برخوردار است. هرچقدر این شاخص‌ها به صفر نزدیک‌تر باشند نشانگر قابلیت اطمینان و امنیت بالای سیستم توزیع است؛ با اضافه کردن تعداد زیاد ادوات حفاظتی و سایر تجهیزات کنترلی به شبکه می‌توان تا حدود زیادی قابلیت اطمینان را بهبود بخشید ولی مهم‌ترین نکته در سیستم توزیع، برقراری تعادلی منطقی بین تعداد و هزینه ادوات حفاظتی با میزان قابلیت اطمینان سیستم است.

۴-۴- قیود مسئله

در طی اجرای الگوریتم پیشنهادی و جایابی همزمان ادوات، محدودیت‌های زیر وجود دارند:

۱- قیود توازن بار [۱۰]

شبکه بهتر خواهد شد. جهت محاسبه پروفیل ولتاژ از رابطه (۱۳) استفاده شده است.

$$VP = \sum_{i=1}^n (V_i - V_b)^2 \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، n تعداد باس‌های شبکه، V_b ولتاژ مبنای شبکه (برابر یک پریونیت) و V_i ولتاژ نقطه بار i است.

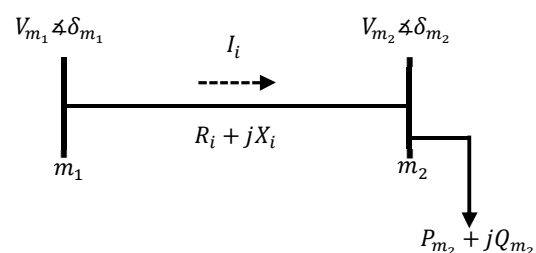
۴-۲-۲- پایداری ولتاژ

شاخص پایداری ولتاژ، توانایی سیستم در نگهداری ولتاژ باس‌ها در سطح قابل قبول است. این قابلیت در زمانی که بار نرمال سیستم افزایش یافته و در اثر آن، توان اکتیو تزریق‌شده به شبکه نیز افزایش می‌یابد، ولتاژ و توان را کنترل می‌کند. شاخص پایداری ولتاژ عددی بین [۰ و ۱] است که هرچقدر این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشانگر پایداری بودن شبکه است. برای محاسبه شاخص پایداری ولتاژ شبکه، ابتدا با استفاده از رابطه (۱۴) این شاخص برای هر باس محاسبه شده و در نهایت کمینه مقدار شاخص در باس‌ها به عنوان شاخص پایداری ولتاژ سیستم در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

$$VS_{m_2} = |V_{m_1}|^4 - \{4[P_{m_2}X_i - Q_{m_2}R_i]^2\} - \{4|V_{m_1}|^2[P_{m_2}R_i + Q_{m_2}X_i]\} \quad (14)$$

در این رابطه، i شماره شاخه شبکه، R_i و X_i به ترتیب مقاومت و راکتانس خط i هستند. V_{m_1} نیز ولتاژ باس m_1 است. در یک سیستم ۲ شینه همچون شکل ۱، P_{m_2} و Q_{m_2} به ترتیب کل بار اکتیو و راکتیو تغذیه‌شده توسط باس m_2 هستند. برای گسترش دادن این رابطه برای شبکه‌های گسترده و محاسبه VS_{m_2} که شاخص پایداری ولتاژ برای باس m_2 ($m_2 = 2, 3, \dots, N$) است (N تعداد باس‌های سیستم)، میزان توان اکتیو و راکتیو باس m_2 تغییر خواهد کرد به‌طوری‌که:

P_{m_2} برابر با مجموع کل بار اکتیو گذرنده از باس m_2 (مجموع بارهای اکتیو مصرف‌شده در شین‌های بعد از باس m_2 تا انتهای خط و یا شاخه فرعی) و بار اکتیو مصرف‌شده در همین باس است.
 Q_{m_2} برابر با مجموع کل بار راکتیو گذرنده از باس m_2 (مجموع بارهای اکتیو مصرف‌شده در شین‌های بعد از باس m_2 تا انتهای خط و یا شاخه فرعی) و بار راکتیو مصرف‌شده در همین باس است.



شکل ۱: سیستم نمونه ۲ شینه

الگوریتم PSO و سپس با استفاده از الگوریتم FA به روزرسانی می شوند. مراحل الگوریتم ترکیبی پیشنهادی را به صورت زیر می توان نام برد:

۱. تولید اولیه مکان و سرعت برای تمامی ذرات

۲. محاسبه توابع هدف برای تمامی ذرات

۳. ارزیابی توابع هدف و انتخاب بهترین تجربه فردی و گروهی ذرات $(g_{best}, x_{i_{best}})$

۴. اعمال الگوریتم PSO و به روزرسانی سرعت و مکان ذرات با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲) [۲۸].

$$\dot{V}_i = \omega V_i + c_1 r_1 (x_{i_{best}} - x_i) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i) \quad (21)$$

$$\dot{x}_i = x_i + \dot{V}_i \quad (22)$$

در این روابط، ω ضریب اینرسی بوده، r_1 و r_2 ضرایب تصادفی بین $[0 - 1]$ هستند. c_1 و c_2 نیز ضرایب تعادل بین تجربه فردی و تجربه گروهی ذرات در به روزرسانی سرعت هستند [۲۸].

۵. محاسبه توابع هدف برای تمامی ذرات

۶. اعمال الگوریتم FA و به روزرسانی مکان ذرات با استفاده از رابطه (۲۳) [۲۷].

$$\dot{x}_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (23)$$

در این رابطه γ ضریب جذب انتخاب شده است $(\gamma = 1)$. β_0 میزان جذب در $(r = 0)$ است و r فاصله بین دو ذره I و J است. قسمت سوم رابطه (۲۳) پارامتری تصادفی است [۲۷].

۷. تکرار بهینه سازی از مرحله دوم تا زمانی که تعداد تکرار به بیشینه مقدار فرض شده برسد.

برای تحلیل الگوریتم ترکیبی HFAPSO، این الگوریتم با الگوریتم های PSO و FA مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج و تحلیل الگوریتم پیشنهادی بر روی چند تابع هدف استاندارد در بخش پیوست آورده شده است. برای چندهدفه کردن الگوریتم پیشنهادی نیز از روش مرجع [۲۹] که بر اساس مرتب سازی نامغلوب است، استفاده شده است. در این روش، هر ذره بر اساس همه توابع هدف با سایر ذرات مورد مقایسه قرار می گیرد. از آنجاکه احتمال برتری ذره ای نسبت به سایر ذرات در همه توابع هدف کم است، به همین دلیل ذرات به صورت نامغلوب و عدم برتری ذره ای نسبت به سایر ذرات مرتب سازی می شوند. به عبارت دیگر، از صفحه های پارتو برای بهینه سازی توابع هدف و مرتب کردن ذرات استفاده می شود. اولین صفحه پارتو، بالاترین وزن را به خود اختصاص می دهد و آخرین صفحه نیز کمترین وزن را دارد [۲۹].

بعد از انجام بهینه سازی چندهدفه و تشکیل صفحات پارتو، برای انتخاب بهترین ذره به عنوان پاسخ بهینه جایابی از منطق فازی استفاده می شود. در روش فازی با استفاده از تحلیل هرکدام از توابع هدف و نتایجی که هر ذره به دست آورده است، بهترین نتیجه حاصل شده از بهینه سازی چندهدفه انتخاب می شود. در این روش برای هرکدام از توابع هدف، تابع عضویت خطی تشکیل می شود. تابع عضویت را می توان

۲- ولتاژ روی بارها بخصوص در نواحی جزیره ای تشکیل شده نباید از محدوده مجاز تجاوز کند و با رابطه زیر قابل بیان است:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (19)$$

۳- انرژی قابل تزریق توسط منابع تولید پراکنده باید در محدوده نشان داده شده توسط رابطه (۲۰) باشد.

$$P_{DG}^{min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG}^{max} \quad (20)$$

۴- در یک شاخه بیش از یک سکشنالایزر قابل جایابی نیست.

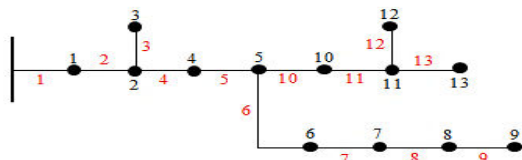
۵- الگوریتم ترکیبی پیشنهادی جایابی

۵-۱- الگوریتم بهینه سازی

الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی برای جایابی همزمان چندهدفه ادوات مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی HFAPSO^A و روش فازی است. الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی، ترکیب الگوریتم کرم شبتاب^۹ (FA) و بهینه سازی ازدحام ذرات^{۱۰} (PSO) است. در الگوریتم کرم شبتاب که از رفتار اجتماعی کرم های شبتاب الهام می گیرد، برای هر کرم شبتاب مصنوعی قدرت جذبی در نظر گرفته می شود که کرم های دیگر به سوی کرمی با قدرت جذب بیش تر حرکت می کنند. نهایتاً یک حشره به عنوان جذاب ترین حشره انتخاب می شود که همان پاسخ بهینه مسئله مورد نظر است [۲۷]. در الگوریتم PSO نیز که از رفتار اجتماعی حیواناتی همچون پرندگان در طبیعت الهام گرفته، نحوه عملکرد بدین صورت است که هر ذره جهت رسیدن به بهترین هدف از بهترین تجربه فردی و بهترین تجربه گروهی استفاده می کند. بدین صورت که در طی اجرای الگوریتم بهترین مکانی که هر ذره تا به حال داشته باشد به عنوان بهترین تجربه فردی هر ذره $(x_{i_{best}})$ انتخاب می شود. در بین بهترین تجربه های فردی ذرات، مکانی که در بین کل ذرات بهترین نتیجه باشد به عنوان بهترین تجربه گروهی ذرات (g_{best}) تعیین می شود. در حالت کلی مکان هر ذره با مفهوم سرعت به روزرسانی می شود [۲۸].

نرخ همگرایی الگوریتم FA نسبت به الگوریتم PSO در هنگام اجرا بیشتر است ولی گاهی در تعداد تکرارهای زیاد، الگوریتم PSO به جواب بهینه تری می رسد. زمانی که این دو الگوریتم باهم ترکیب می شوند، با توجه به برقراری ارتباط سراسری میان ذرات در الگوریتم FA و مکانیسم ساده جست و جو در کنار دقت بالای الگوریتم PSO، فضای حرکت ذرات محدودتر می شود؛ و با به روزرسانی دومرحله ای در هر تکرار، هم احتمال انحراف الگوریتم کاهش یافته و هم نتایج بهینه تر در مدت زمان کمتری نسبت به الگوریتم های دیگر حاصل می شوند.

الگوریتم های PSO و FA در عین سادگی، دارای نرخ همگرایی و دقت مناسب هستند. ترکیب این الگوریتم ها باعث افزایش نرخ همگرایی و دقت الگوریتم بهینه سازی شده است. این الگوریتم ترکیبی همچنین باعث کارایی مناسب الگوریتم در مسائل پیچیده تر شده است. نحوه عملکرد الگوریتم بدین صورت است که ابتدا ذرات با استفاده از



شکل ۲: نمونه شماره گذاری باس ها و خطوط در الگوریتم پیشنهادی

۶- آزمایش عددی و ارزیابی نتایج

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی با استفاده از شبکه استاندارد ۶۹ شینه و سیستم توزیع واقعی از شبکه برق رسانی شهرستان خوی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این پژوهش، فرض شده است که همه باس ها توانایی جایابی منابع تولید پراکنده را دارا هستند. ضرایب وابستگی در مدل بار برای بارهای ثابت، صفر در نظر گرفته می شوند. در حالی که این ضرایب برای بارهای مختلف مثل مسکونی، صنعتی و تجاری متفاوت است. مقادیر ضرایب استفاده شده در این مطالعه به صورت جدول ۱ است. از نظر وابستگی فرکانس در مدل بار، فرکانس نامی برابر ۱ پرینیت بوده و برای شبکه نیز دو فرکانس ۰/۹۸ و ۱/۰۲ پرینیت در نظر گرفته شده است. بانک های خازنی دارای ظرفیت ثابت بین ۱۵۰ الی ۱۵۰۰ کیلووار در پله های ۱۵۰ کیلوواری هستند. سایر اطلاعات مورد نیاز برای اجرای الگوریتم پیشنهادی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: مدل بار و مقادیر ضرایب وابستگی به ولتاژ و فرکانس

نوع بار	k_{pv}	k_{qv}	k_{pf}	k_{qf}
ثابت	۰	۰	۰	۰
مسکونی	۱/۷	۲/۶	۱	-۱/۷
تجاری	۰/۶	۲/۵	۱/۵	-۱/۱
صنعتی	۰/۱	۰/۶	۲/۶	۱/۶

جدول ۲: اطلاعات مورد نیاز شبیه سازی

شاخص	مقدار	شاخص	مقدار
C_p	۰/۶	C_q	۰/۴
C_{vs} و C_{vp}	۰/۵	C_{r2} و C_{r1}	۰/۳۳
C_{r3}	۰/۳۴	C_2 و C_1	۲
β_0	۲	α	۰/۲
V_{min}	۰/۹ pu	V_{max}	۱/۱ pu
P_{DG}^{min}	۰/۱ MW	P_{DG}^{max}	۲ MW

به صورت رابطه (۲۴) تعریف کرد. در این رابطه، f_i^{min} و f_i^{max} به ترتیب بیشینه و کمینه مقداری هستند که از بهینه سازی هر کدام از توابع هدف به صورت تک هدفه، حاصل می شوند. تابع عضویت مطابق شکل ۲ تابعی خطی بین صفر و یک است، در حالی که $\mu_i^k = 0$ نامطلوب ترین و $\mu_i^k = 1$ مطلوب ترین نتیجه حاصل شده هستند. در نهایت برای هر ذره نامغلوب، مقدار نرمالایز شده عضویت با استفاده از رابطه (۲۵) محاسبه می شود. در این رابطه، NO تعداد توابع هدف و NK تعداد ذره های نامغلوب مسئله هستند. بعد از محاسبه مقدار نرمالایز شده تابع عضویت، ذره ای که دارای بیشترین مقدار تابع عضویت است به عنوان بهترین ذره معادل بهترین پاسخ مسئله جایابی ادوات انتخاب می شود.

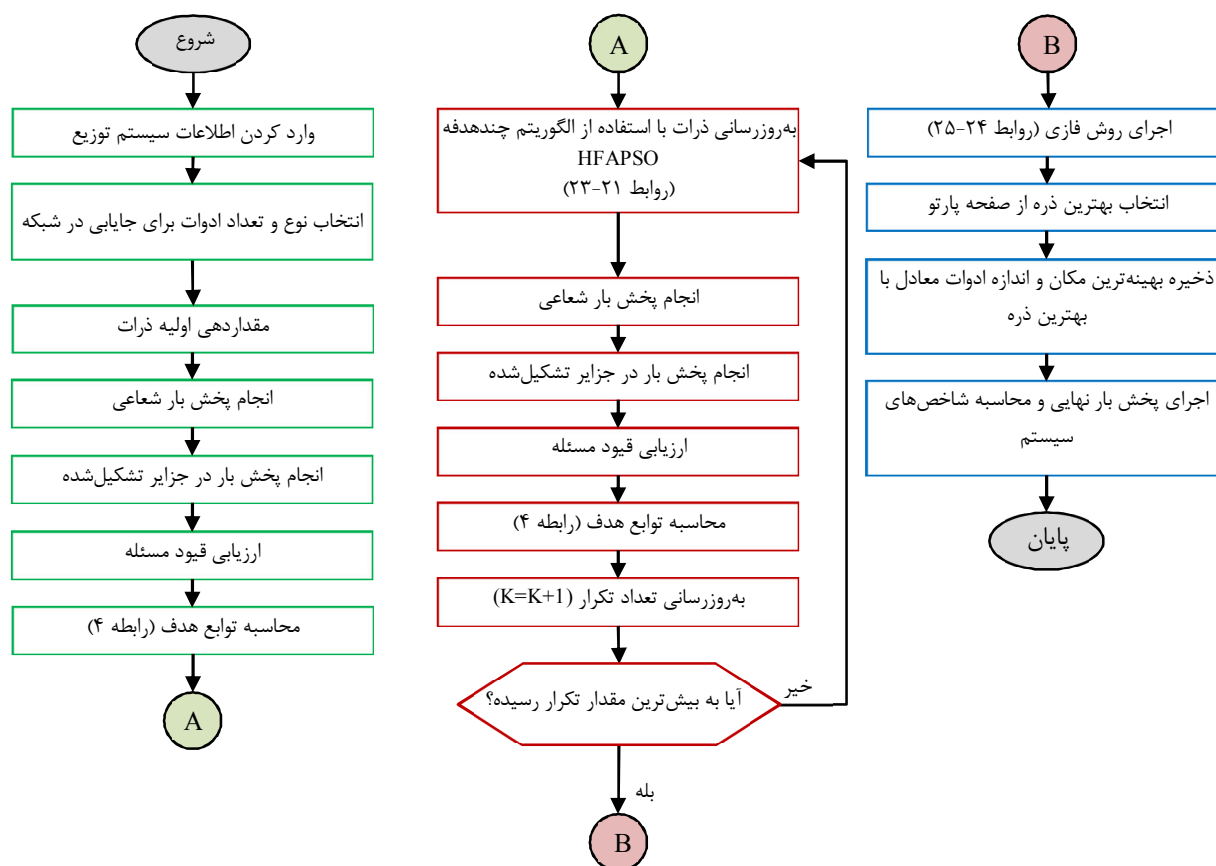
$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & f_i^k \leq f_i^{min} \\ \frac{f_i^{max} - f_i^k}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} < f_i^k < f_i^{max} \\ 0 & f_i^{max} \leq f_i^k \end{cases} \quad (24)$$

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{NO} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{NK} \sum_{i=1}^{NO} \mu_i^k} \quad (25)$$

۵-۲ الگوریتم جایابی

با توجه به مطالب گفته شده، برای رسیدن به بهینه ترین مکان و اندازه ادوات ابتدا با استفاده از الگوریتم چندهدفه HFAPSO، توابع هدف تعریف شده به صورت چندهدفه و نامغلوب بهینه می شوند. پس از اعمال الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی و بهبود توابع هدف، برای انتخاب بهترین مکان و تعداد مناسب ادوات از روش فازی استفاده می شود. در این پژوهش برای ساده سازی شبیه سازی از روش شماره گذاری ترتیبی استفاده شده است. به طوری که شماره گذاری شین ها به ترتیب از اولین شین فیدر شروع شده و در شین های واقع بر روی شاخه اصلی ادامه خواهد داشت، البته هنگام رسیدن به شاخه های فرعی، ابتدا شین های آن شاخه شماره گذاری می شوند. شاخه ها هم شماره شین انتهایی خود را می گیرند. نحوه شماره گذاری در شکل ۲، نشان داده شده است.

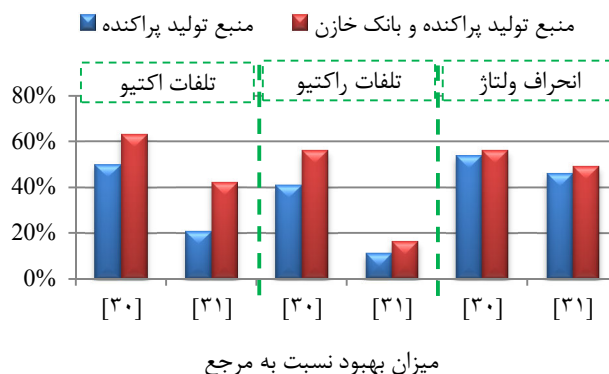
روند نامی کلی برای جایابی همزمان منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، بانک خازنی و سکشنالایزر در سیستم توزیع شعاعی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، ستون اول مربوط به اقدامات اولیه است؛ در این مرحله اقداماتی همچون انتخاب نوع و تعداد ادوات، مقداردهی اولیه و محاسبات اولیه توابع هدف انجام می گیرد. ستون دوم مربوط به حلقه اصلی الگوریتم پیشنهادی است که در آن توابع هدف با استفاده از الگوریتم هوشمند HFAPSO به صورت چندهدفه و با در نظر گرفتن قیود مسئله بهینه سازی می شوند. در نهایت بهینه ترین جایابی ادوات در ستون سوم با استفاده از روش فازی انتخاب می شود.



شکل ۳: فلوچارت حل مسئله جایابی همزمان منابع تولید پراکنده، خازن و سکشنالایزر با استفاده از روش پیشنهادی

۴. حالت ۴: شبکه با بار تجاری و فرکانس ۱/۰۲ پر یونیت
۵. حالت ۵: شبکه با بار تجاری و فرکانس ۰/۹۸ پر یونیت
۶. حالت ۶: شبکه با بار صنعتی و فرکانس ۱/۰۲ پر یونیت
۷. حالت ۷: شبکه با بار صنعتی و فرکانس ۰/۹۸ پر یونیت

البته با توجه به این که مرجع معتبری در مورد جایابی همزمان DG، خازن و ادوات حفاظتی در دسترس نبود، ابتدا به اعتبارسنجی روش جایابی ادوات در شبکه ۳۸ شینه استاندارد با استفاده از مقایسه نتایج جایابی همزمان منبع تولید پراکنده نوع ثابت با ضریب توان ۰/۹ و بانک خازنی با مراجع [۳۰ و ۳۱] پرداخته شده است. با اعمال روش پیشنهادی، منبع تولید پراکنده با حداکثر ظرفیت قابل تولید در شین شماره ۶ جایابی شد و در کنار آن بانک خازنی ۶۰۰ کیلوواری در شین ۳۰ قرار گرفت. این جایابی ادوات باعث می شود که تلفات سیستم توزیع نسبت به مراجع ذکر شده در حدود ۵۹-۲۵ درصد و انحراف ولتاژ در حدود ۴۸-۵۶ درصد بهبود یابد. جزئیات میزان بهبود هر کدام از شاخص های تلفات اکتیو، راکتیو و انحراف ولتاژ در شکل ۴ نشان داده شده است. با ارزیابی نتایج می توان گفت که روش پیشنهادی از کارایی مناسبی در جایابی ادوات برخوردار است؛ البته در ادامه و با ارزیابی نتایج جایابی همه ادوات در سیستم ۶۹ شینه و شبکه واقعی، بهتر می توان این نتیجه گیری را انجام داد.



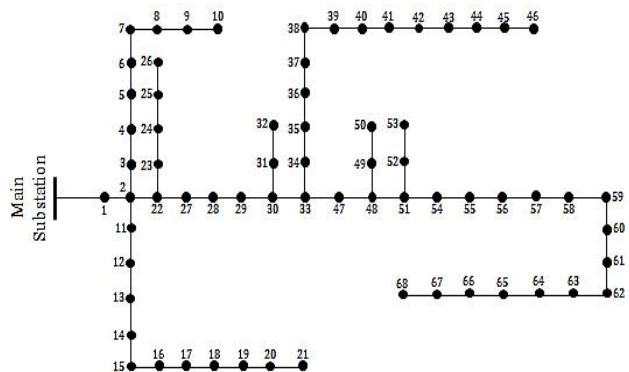
شکل ۴: میزان بهبود شاخص های فنی شبکه ۳۸ باس در جایابی DG و خازن نسبت به مراجع [۳۰ و ۳۱]

برای ارزیابی روش پیشنهادی در سیستم توزیع با مدل بار غیرخطی، ابتدا جایابی همزمان منابع تولید پراکنده، خازن و سکشنالایزر در سیستم توزیع با مدل بار ثابت انجام می گیرد. سپس با توجه به مکان و اندازه ادوات جایابی شده، الگوریتم پیشنهادی در مدل بارهای مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای ارزیابی روش در مدل بارهای مختلف، ۷ مدل باری زیر مورد ارزیابی قرار می گیرند.

۱. حالت ۱: مدل بار ثابت
۲. حالت ۲: شبکه با بار مسکونی و فرکانس ۱/۰۲ پر یونیت
۳. حالت ۳: شبکه با بار مسکونی و فرکانس ۰/۹۸ پر یونیت

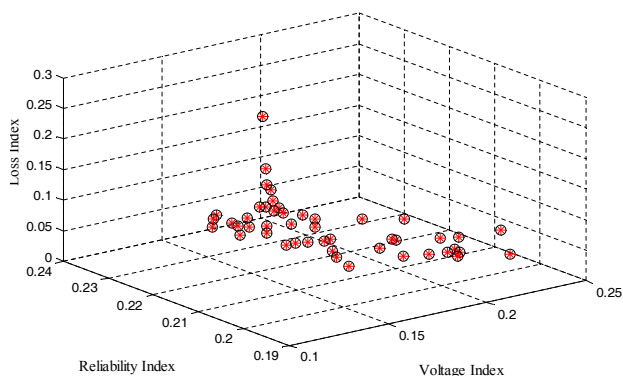
۱-۶- سیستم توزیع ۶۹ شینه

اولین شبکه مورد آزمایش، سیستم توزیع شعاعی ۶۹ شینه IEEE است [۳۲]. دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: سیستم توزیع ۶۹ شینه

برای رسیدن به بهینه‌ترین مکان و اندازه منابع تولید پراکنده، خازن و سکشنالایزر، الگوریتم چندهدفه HFAPSO به توابع هدف (معادله ۴) اعمال می‌شود. شکل ۶ صفحه پارتو و یا ذرات نامغلوب بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی برای جایابی ادوات موردنظر را نشان می‌دهد. پس از اعمال الگوریتم چندهدفه و بهینه‌سازی توابع هدف، با استفاده از روش فازی بهترین ذره به عنوان بهینه‌ترین جایابی ادوات انتخاب می‌شود. در این شبکه نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی، با نتایج حاصل از جایابی ادوات با استفاده از الگوریتم‌های FA و PSO



شکل ۶: بهینه‌سازی چندهدفه توابع هدف با استفاده از الگوریتم HFAPSO (صفحه پارتو) در شبکه ۶۹ شینه

جدول ۳: مکان و اندازه بهینه ادوات در شبکه ۶۹ شینه

نوع ترکیب واحدهای DG	مکان تولید پراکنده (ظرفیت (MW) - مکان (شماره باس))	بانک خازنی (ظرفیت (Mvar) - مکان (شماره باس))			مکان سکشنالایزر (شماره شاخه)		
		HFAPSO	FA	PSO	HFAPSO	FA	PSO
۱ توربین بادی	۴۲-۲	۴۲-۲	۴۲-۲	۴۲-۲	۴۲-۱/۵	۴۳-۱/۳۵	۴۳-۱/۵
۲ فتوولتائیک	۴۲-۲	۴۲-۱/۷۵۹	۴۲-۱/۷۵۹	۴۲-۱/۷۵۹	۴۲-۱/۵	۴۶-۰/۹	۴۶-۱/۵
۳ توربین بادی	۴۱-۱/۹۹۶	۴۲-۱/۷۲۶	۴۲-۱/۷۲۶	۴۲-۱/۷۲۶	۴۲-۱/۵	۴۵-۱/۳۵	۴۵-۱/۳۵
فتوولتائیک	۳۳-۱/۵۳۵	۳۳-۲	۳۳-۲	۳۳-۲	۴۴-۱/۵	۳۰-۱/۵	۵۳-۰/۹

با توجه به ساختار شبکه شین شماره ۴۲ یکی از بهینه‌ترین شین‌ها برای جایابی منبع تولید پراکنده است. این امر در جدول ۳ کاملاً مشهود است. جایابی منبع تولید پراکنده در این شین باعث بهبود تلفات و ولتاژ شبکه می‌شود. برای بهبود شاخص قابلیت اطمینان به عنوان یکی از مهم‌ترین اهداف این مطالعه، علاوه بر جایابی منبع تولید پراکنده‌ای در شین ۴۲، باید روی شاخه فرعی متصل به شین ۳۳ هم سکشنالایزر جایابی شود؛ این جایابی باعث می‌شود که در صورت وقوع خطا بر روی این شاخه فرعی، سکشنالایزر خطا را ایزوله کرده و مابقی سیستم از شبکه بالادست تغذیه شود. در مقابل اگر خطا در بالادست سکشنالایزر اتفاق بیافتد، سکشنالایزر

۱. قبل از شین ۳۳ که مصرف‌کننده ۳۰ درصد از کل توان شبکه است.

۲. بعد از شین ۴۷ که در حدود ۲۰ درصد از مشترکین و بار شبکه به این قسمت متصل است.

۳. شاخه فرعی متصل به شین ۳۳ که با داشتن ۸۰۰۰ مشترک، در حدود ۵۰ درصد از توان تأمین مدار را مصرف می‌کند و همچنین شین ۴۲ با مصرف ۱۲۴۴ کیلووات و ۸۸۸ کیلوواتر توسط ۵۶۸۰ مشترک، پربارترین شین شبکه است.

شاخص تلفات در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم توزیع است. شبکه استاندارد ۶۹ شینه در مدل بار ثابت به ترتیب دارای ۰/۲۲۴۹ و ۰/۱۰۲۱ تلفات توان اکتیو و راکتیو است؛ البته این مقدار تلفات در مدل‌های مختلف بار تغییر می‌کند. مقادیر شاخص تلفات در طی جایابی ادوات مختلف در مدل بارهای فرض شده در جدول ۴ قابل مشاهده است. با ارزیابی اطلاعات این جدول می‌توان گفت که جایابی همزمان ادوات با همه الگوریتم‌ها باعث کاهش تلفات شبکه شده است؛ اما در جایابی ادوات با استفاده از الگوریتم HFAPSO، مقدار تلفات شبکه نسبت به الگوریتم‌های PSO و FA بیش‌تر کاهش پیدا کرده است.

عمل کرده و بارهای پایین دست در صورت عملی شدن شرایط منطقه جزیره‌ای توسط منبع تولید پراکنده قرار گرفته شده در شین ۴۲ تغذیه خواهند شد. این کار باعث بهبود قابل توجه شاخص قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. با توجه به مکان قرارگیری منابع تولید پراکنده و سکشنالایزر، بانک خازنی از دو نظر باعث بهبود شاخص‌های فنی شبکه می‌شوند: کمک به منبع تولید پراکنده در تأمین انرژی محدوده حفاظتی سکشنالایزر و پایداری جزیره و همچنین کاهش تلفات و بهبود شاخص ولتاژ به همراه انرژی تزریقی منبع تولید پراکنده. با دلایلی مشابه، می‌توان گفت که سایر ادوات جایابی شده نیز با توجه به ساختار شبکه در بهینه‌ترین مکان‌ها قرار گرفته‌اند. البته در ادامه با تحلیل شاخص‌های فنی، بهتر می‌توان این نتیجه را گرفت.

جدول ۴: مقادیر شاخص تلفات در طی جایابی ادوات با استفاده از الگوریتم‌های مختلف در مدل بارهای مختلف

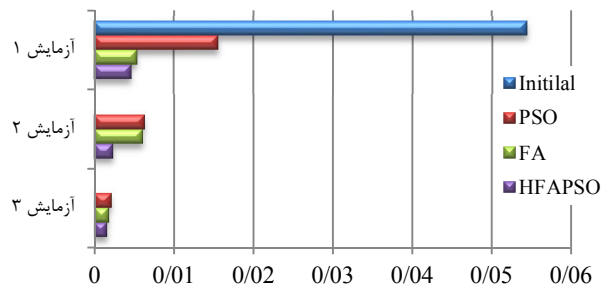
شماره آزمایش	الگوریتم	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷
اولیه		۰/۱۷۵۸	۰/۱۳۲۱	۰/۱۳۰۶	۰/۱۵۰۸	۰/۱۴۱۸	۰/۱۸۵۰	۰/۱۵۲۲
۱	PSO	۰/۰۴۶۵	۰/۰۳۹۷	۰/۰۳۷۶	۰/۰۴۴۸	۰/۰۳۹۴	۰/۰۵۳۲	۰/۰۳۸۵
	FA	۰/۰۳۱۰	۰/۰۲۷۹	۰/۰۳۱۱	۰/۰۲۸۹	۰/۰۳۰۹	۰/۰۳۳۳	۰/۰۲۸۷
	HFAPSO	۰/۰۲۶۰	۰/۰۲۳۴	۰/۰۲۶۱	۰/۰۲۴۵	۰/۰۲۵۹	۰/۰۲۸۱	۰/۰۲۴۱
۲	PSO	۰/۰۴۴۵	۰/۰۴۰۹	۰/۰۴۴۸	۰/۰۴۲۱	۰/۰۴۴۳	۰/۰۴۷۲	۰/۰۴۱۷
	FA	۰/۰۳۰۳	۰/۰۲۷۸	۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۹۲	۰/۰۲۸۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۲۷۳
	HFAPSO	۰/۰۲۱۹	۰/۰۲۰۹	۰/۰۲۰۳	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۱۳
۳	PSO	۰/۰۳۸۱	۰/۰۳۷۰	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۷۴	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۸۹	۰/۰۳۸۰
	FA	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۱۹
	HFAPSO	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۷۲	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۸۰	۰/۰۱۸۰	۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۶۷

جدول ۵: مقادیر شاخص ولتاژ در مدل بارهای مختلف با جایابی ادوات مختلف با استفاده از الگوریتم HFAPSO

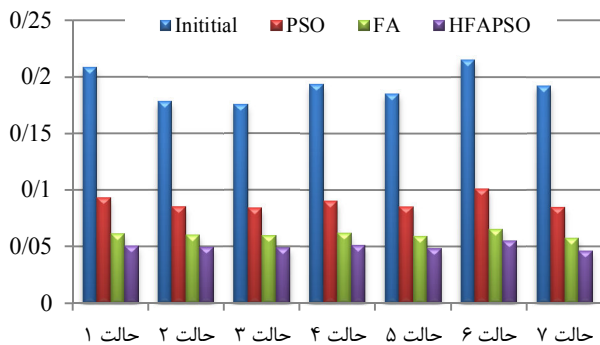
شماره آزمایش	شاخص ولتاژی	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷
اولیه		۰/۰۹۹۳	۰/۰۷۷۰	۰/۰۷۴۸	۰/۰۸۸۲	۰/۰۸۱۸	۰/۱۰۵۷	۰/۰۸۶۴
۱	VP _{ins}	۰/۶۸۳۳	۰/۷۲۰۸	۰/۷۲۴۳	۰/۷۰۱۶	۰/۷۱۱۳	۰/۶۷۵۱	۰/۷۰۲۴
	VS _{ins}	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۰۳
	VP	۰/۸۹۲۷	۰/۸۹۴۰	۰/۸۹۵۰	۰/۸۹۲۲	۰/۸۹۵۹	۰/۸۸۵۹	۰/۸۹۹۴
۲	VP	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۹۲
	VS	۰/۹۰۰۴	۰/۹۰۲۶	۰/۹۰۴۸	۰/۸۹۹۵	۰/۹۰۴۸	۰/۸۹۳۴	۰/۹۰۸۲
	VP	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۴۳
۳	VS	۰/۹۱۲۶	۰/۹۱۳۷	۰/۹۱۴۸	۰/۹۱۱۷	۰/۹۱۵۶	۰/۹۰۶۷	۰/۹۱۸۹

هرکدام از ترکیب‌های مختلف منابع تولید پراکنده با خازن و سکشنالایزر در مدل‌های مختلف بار دارای عملکرد مناسبی هستند. جایابی ادوات توسط الگوریتم پیشنهادی علاوه بر اینکه تلفات توان اکتیو و راکتیو را به مقدار فراوانی کاهش می‌دهد، بلکه باعث خطی‌تر شدن تغییرات تلفات در انواع مدل بار نیز می‌شود. نرخ تغییرات شاخص تلفات در تغییر مدل بار در آزمایش‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. شاخص تلفات در مدل‌های مختلف بار قبل از اتصال ادوات در محدوده‌ای ۰/۰۵ تغییر می‌کند، درحالی‌که بعد از اتصال هرکدام از

در اتصال فقط یک منبع تولید پراکنده به همراه بانک خازنی و سکشنالایزر در شبکه (آزمایش‌های ۱-۲)، مطابق جدول ۴ مشاهده می‌شود که فتوولتائیک با کاهش ۸۸ درصدی تلفات توان اکتیو و ۸۵ درصدی تلفات توان راکتیو دارای بهترین عملکرد است. در مقابل توربین بادی به ترتیب با کاهش ۸۶ و ۸۲ درصدی در تلفات توان اکتیو و راکتیو عملکرد ضعیف‌تری دارد. متفاوت بودن عملکرد منابع تولید پراکنده، به تکنولوژی استفاده شده در منابع تولید پراکنده و نوع خروجی هرکدام بستگی دارد.



شکل ۷: مقدار تغییرات شاخص تلفات در تغییر مدل بار



شکل ۸: مقدار شاخص ولتاژ در آزمایش ۱ در الگوریتم‌های مختلف

جدول ۶: جزئیات آماری ولتاژ شبکه ۶۹ سینه در طی اجرای الگوریتم پیشنهادی

ولتاژ ماکزیمم (max_v, pu)	ولتاژ مینیمم (min_v, pu)	محدوده تغییرات ($max_v - min_v$)	میانگین	واریانس
اولیه	۰/۹۰۹۲ در باس ۴۶	۰/۰۹۰۸	۰/۹۷۲۹۹	۰/۰۰۰۷۳۰۵۴
آزمایش ۱	۰/۹۷۲۰ در باس ۶۸	۰/۰۲۸۰	۰/۹۹۱۰۵	۰/۰۰۰۱۰۲۱۴
آزمایش ۲	۰/۹۷۴۱ در باس ۶۸	۰/۰۳۴۲	۰/۹۹۳۱۹	۰/۰۰۰۱۰۷۶۱
آزمایش ۳	۰/۹۸۰۰ در باس ۶۸	۰/۰۲۰۶	۰/۹۹۴۴۰	۰/۰۰۰۰۴۸۱

جدول ۷: تأثیر ادوات جایابی شده بر روی شاخص قابلیت اطمینان

اولیه	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳
۲/۲۳۴	۰/۷۶۱۳۹	۰/۷۶۱۳۹	۰/۶۱۷۳۹
۱/۸۱۶۳	۰/۴۷۰۳۰	۰/۴۷۰۳۰	۰/۳۹۷۸۸
۰/۳۹۹۷	۰/۱۰۵۹۴	۰/۱۰۵۹۴	۰/۰۸۹۳۳

برای بررسی بهتر روش پیشنهادی از نظر قابلیت اطمینان، محدوده‌های حفاظتی در طی جایابی ترکیب‌های مختلف ادوات در شکل ۹ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در آزمایش‌های (۱ و ۲) شبکه به ۲ ناحیه حفاظتی تقسیم شده است. ادوات به نحوی در شاخه فرعی متصل به شین ۳۳ قرار گرفته‌اند که در هنگام وقوع خطا، شرایط پایداری نواحی جزیره‌ای برقرار شده و بارها بتوانند به کار خود ادامه دهند. در آزمایش‌های (۱ و ۲) تقسیم شبکه به دو ناحیه ۵۰ درصدی از لحاظ بار باعث شده است که قابلیت اطمینان سیستم توزیع ۶۹/۹۵ درصد بهبود یابد. در آزمایش شماره ۳ نیز، شبکه به ۳ ناحیه حفاظتی تقسیم شده است. بهبود ۷۵/۱۹

تعداد مختلف ادوات با استفاده از الگوریتم HFAPSO این تغییرات به محدوده کمتر از ۰/۰۰۵ کاهش می‌یابد. این کاهش ۹۰ درصدی باعث می‌شود که در صورت تغییر کاربری برخی باس‌ها از مدل باری به مدل دیگر بهره‌وری شبکه تغییر چندانی نکند.

همواره یکی از شروط عملکرد مناسب سیستم توزیع، پایداری ولتاژ در محدوده مجاز است. در این پژوهش، شاخص ولتاژ ترکیبی از شاخص‌های پروفیل و پایداری ولتاژ است که میزان تأثیر هر کدام از جایابی‌ها با استفاده از روش پیشنهادی در مدل‌های مختلف بار بر روی آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. با ارزیابی اطلاعات این جدول مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی هم مقدار شاخص پروفیل ولتاژ را کاهش داده است و هم مقدار شاخص پایداری ولتاژ را افزایش داده است؛ در نتیجه پایداری سیستم بهبود یافته است. الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های PSO و FA نیز عملکرد مناسبی از خود نشان داده است؛ به عنوان مثال، همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ولتاژ در جایابی ادوات در آزمایش اول با استفاده از الگوریتم HFAPSO، علاوه بر این که نسبت به شرایط اولیه ۶۶ درصد پایدارتر شده، ۳۱ درصد نسبت به الگوریتم PSO و ۱۵ درصد نسبت به الگوریتم FA نیز پایدارتر شده است.

برای بررسی بهتر روش پیشنهادی، ولتاژ شبکه به صورت آماری مورد مقایسه قرار گرفته است. اطلاعات آماری شامل کمینه و بیشینه ولتاژ، محدوده تغییرات ولتاژ شین‌ها، میانگین و واریانس ولتاژ شبکه در طی اجرای روش پیشنهادی در جدول ۶ آورده شده است. با ارزیابی اطلاعات موجود در این جدول مشاهده می‌شود که محدوده تغییرات ولتاژ در آزمایش‌های مختلف ۶۳-۷۷ درصد کاهش پیدا کرده است؛ در ضمن واریانس ولتاژ نیز ۸۶-۹۴ درصد بهبود یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که روش پیشنهادی از نظر ولتاژ عملکرد مناسبی داشته است.

یکی از مهم‌ترین اهدافی که در این پژوهش دنبال شده، بهبود امنیت و شاخص قابلیت اطمینان سیستم توزیع است. شاخص قابلیت اطمینان تعریف‌شده ترکیبی از شاخص‌های SAIFI، SAIDI و AENS بوده که در حالت اولیه به ترتیب برابر با ۲/۲۳۴، ۱/۸۱۶۳ و ۰/۳۹۹۷ هستند. مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینانی در طی اجرای روش پیشنهادی در جدول ۷ آورده شده است.

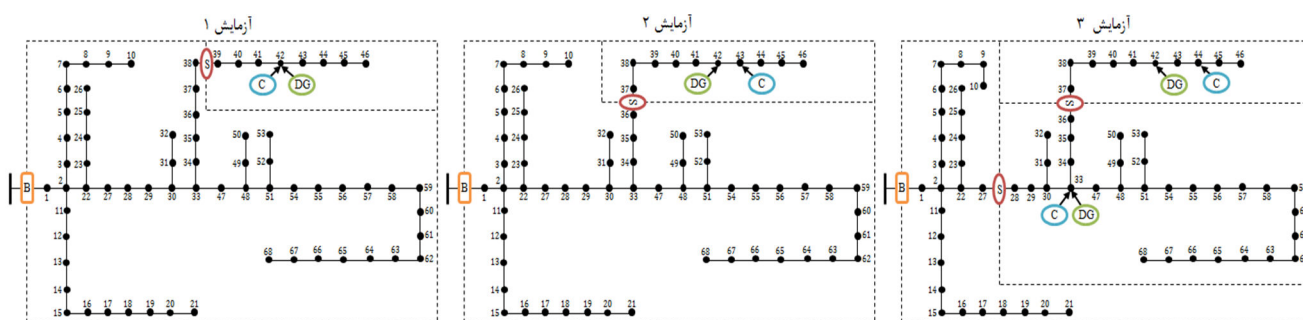
می‌دهد. بعد از بهینه‌سازی توابع هدف برای انتخاب بهترین ذره معادل بهینه‌ترین مکان و اندازه ادوات، روش فازی اجرا شده است. مکان و اندازه بهینه ادوات در طی آزمایش‌های مختلف در جدول ۸ آورده شده است. سیستم واقعی مورد مطالعه، شبکه صنعتی ۲۰ کیلوولتی بوده که دارای ۲ فیدر است. این سیستم توسط ۱۳۸ مشترک، ۱۴۰۴۱/۶ کیلووات توان اکتیو و ۸۷۰۵/۹۹ کیلووات توان راکتیو مصرف می‌کند. فیدر ۱ (شین ۱ الی ۴۴) با داشتن ۶۸ مصرف‌کننده، ۷۱۷۸ کیلووات و ۴۴۵۰/۴۹ کیلووات توان مصرف می‌کند؛ شین ۴۱ با مصرف ۱۰۲۰ کیلووات و ۶۳۲/۴ کیلووات توسط یک مشترک، پربارترین شین فیدر ۱ است. فیدر ۲ (شین ۴۵ الی ۱۰۰) با داشتن ۷۰ مصرف‌کننده، ۶۸۶۳/۶ کیلووات و ۴۲۵۵/۵ کیلووات توان مصرف می‌کند؛ باس ۸۸ با مصرف ۳۸۲/۵ کیلووات و ۲۳۷/۱۵ کیلووات توسط یک مشترک، پربارترین شین فیدر ۲ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار زیاد توان توسط تعداد کم مشترکین مصرف می‌شود؛ این یکی از ویژگی‌های سیستم‌های صنعتی است. این ویژگی باعث می‌شود که مقدار متوسط انرژی از دست‌رفته (AENS) در صورت وقوع خطا در شبکه، نسبت به سیستم‌های مشابه مسکونی یا تجاری بیش‌تر شود.

درصدی شاخص قابلیت اطمینان سیستم توزیع، نتیجه قرارگیری ادوات در آزمایش شماره ۳ است. در نهایت با بررسی نتایج جایابی و میزان اثرگذاری ادوات بر روی شاخص‌های امنیتی می‌توان بیان کرد که الگوریتم پیشنهادی در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان نیز عملکرد مناسبی داشته و امنیت و پایداری شبکه را تا حد فراوانی بهبود بخشیده است.

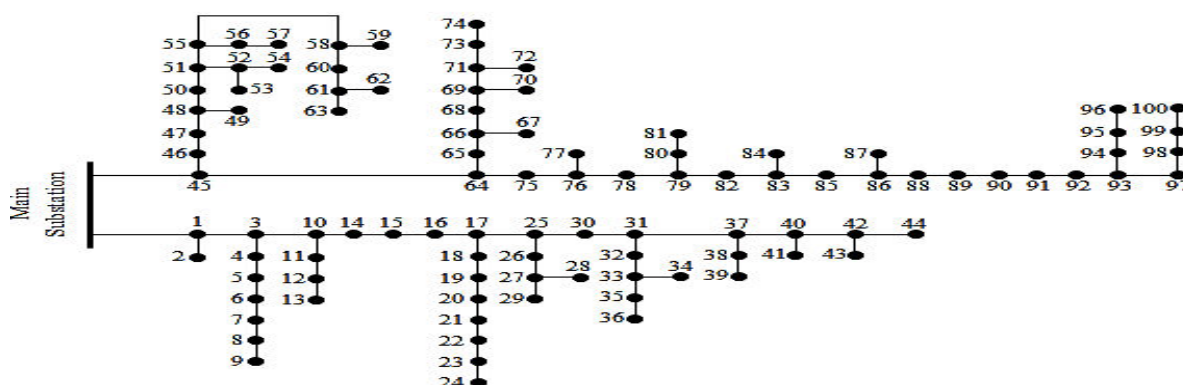
۶-۲- سیستم توزیع واقعی

بعد از این‌که روش پیشنهادی در شبکه استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت؛ برای بررسی کارایی آن در شرایط واقعی، الگوریتم پیشنهادی به شبکه‌ای واقعی که بخشی از سیستم برق‌رسانی شهرک صنعتی شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی است، اعمال می‌شود. اطلاعات این سیستم شامل اطلاعات خطوط، بار و مشترکین با استفاده از مطالعات میدانی به دست آورده شده است. دیاگرام تک‌خطی این سیستم توزیع واقعی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

برای رسیدن به بهترین مکان و اندازه ادوات موردنظر ابتدا الگوریتم چندهدفه HFAPSO جهت بهینه‌سازی توابع هدف اجرا می‌شود. شکل ۱۱ نمونه همگرایی توابع هدف بعد از اجرای الگوریتم هوشمند را نشان



شکل ۹: محدوده‌های حفاظتی در طی اجرای روش پیشنهادی در آزمایش‌های مختلف

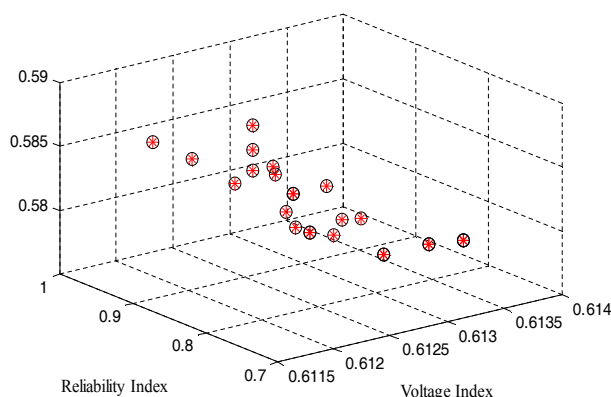


شکل ۱۰: دیاگرام تک‌خطی سیستم توزیع واقعی از شبکه برق‌رسانی شهرستان خوی

بادی مصرف کننده توان راکتیو است، در نزدیکی DG نسبت به آزمایش ۲ قرار گرفته است.

مقادیر تلفات اکتیو و راکتیو سیستم توزیع در طی جایابی ادوات در مدل بارهای مختلف در جدول ۹ آورده شده است. با استفاده از جایابی ادوات با استفاده از روش پیشنهادی، شاخص تلفات به اندازه ۵۴-۳۲ درصد کاهش می یابد. در طی اجرای آزمایش ها، فتوولتائیک به همراه خازن در آزمایش ۲ در حدود ۳۵ درصد تلفات را کاهش داده است؛ در نتیجه نسبت به ترکیب توربین بادی و خازن که تلفات را ۳۲ درصد کاهش می دهند، عملکرد مناسبی از خود نشان داده است.

شکل ۱۲، تغییرات تلفات اکتیو و راکتیو در مدل بارهای مختلف را نشان می دهد. مطابق این شکل می توان گفت که جایابی ادوات با استفاده از روش پیشنهادی علاوه بر این که مقدار تلفات اکتیو و راکتیو شبکه را تا حد زیادی بهبود می بخشد، باعث خطی تر شدن تغییرات تلفات در انواع مدل های بار می شوند. شاخص تلفات در مدل های مختلف بار قبل از اتصال ادوات در محدوده ۰/۰۳۱ تغییر می کند، در حالی که بعد از جایابی ادوات این محدوده به کمتر از ۰/۰۱۴ کاهش پیدا می کند. این کاهش ۶۰ درصدی باعث می شود که در صورت تغییر مدل کاربری باسی از مدلی به مدل بار دیگر، بهره وری شبکه تغییر چندانی نکند.



شکل ۱۱: نمونه همگرایی توابع هدف در سیستم توزیع واقعی با اجرای الگوریتم HFAPSO

در اتصال فقط یک واحد DG در کنار سایر ادوات (آزمایش ها ۱، ۲)، سکشنالایزرها طوری جایابی شده اند که در حدود ۴۰ درصد از شبکه را حفاظت می کنند. در این آزمایش ها همچنین مشاهده می شود که بانک های خازنی با توجه به نوع تکنولوژی منابع تولید پراکنده در شبکه قرار گرفته اند؛ به عنوان مثال خازن در آزمایش ۱ با توجه به اینکه توربین

جدول ۸: مکان و اندازه بهینه ادوات در سیستم توزیع واقعی با اجرای روش پیشنهادی

شماره آزمایش	نوع ترکیب واحدهای DG	منابع تولید پراکنده (ظرفیت (kW) - مکان (شماره باس))	بانک خازنی (ظرفیت (kVar) - مکان (شماره باس))	مکان سکشنالایزر (شماره شاخه)
۱	توربین بادی	۹۰ - ۲۰۰۰	۹۰ - ۱۵۰۰	۶۴
۲	فتوولتائیک	۹۰ - ۲۰۰۰	۷۵ - ۱۵۰۰	۶۴
۳	توربین بادی فتوولتائیک	۹۱ - ۱۸۵۷/۱ ۳۸ - ۲۰۰۰	۴۳ - ۱۵۰۰ ۷۸ - ۱۵۰۰	۱۷ ۶۴

جدول ۹: مقادیر تلفات توان اکتیو و راکتیو در سیستم توزیع واقعی در طی اجرای روش پیشنهادی

شماره آزمایش	شاخص تلفات	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷
اولیه	اکتیو (MW)	۰/۱۹۷۵	۰/۱۸۷۸	۰/۱۸۳۹	۰/۱۹۶۹	۰/۱۸۴۶	۰/۳۱۴۹	۰/۱۷۷۹
	راکتیو (MVar)	۰/۱۱۵۷	۰/۱۱۰۰	۰/۱۰۷۸	۰/۱۱۵۴	۰/۱۰۸۱	۰/۱۲۵۹	۰/۱۰۴۳
۱	اکتیو (MW)	۰/۱۳۴۴	۰/۱۲۸۷	۰/۱۲۶۲	۰/۱۳۴۹	۰/۱۲۵۸	۰/۱۴۸۴	۰/۱۱۹۵
	راکتیو (MVar)	۰/۰۷۸۸	۰/۰۷۵۴	۰/۰۷۴۰	۰/۰۷۹۰	۰/۰۷۳۷	۰/۰۸۶۹	۰/۰۷۰۰
۲	اکتیو (MW)	۰/۱۳۱۱	۰/۱۲۵۸	۰/۱۲۳۰	۰/۱۳۱۹	۰/۱۲۲۵	۰/۱۴۴۹	۰/۱۱۶۴
	راکتیو (MVar)	۰/۰۷۶۸	۰/۰۷۳۷	۰/۰۷۲۱	۰/۰۷۷۳	۰/۰۷۱۸	۰/۰۸۴۹	۰/۰۶۸۲
۳	اکتیو (MW)	۰/۰۹۱۴	۰/۰۸۷۸	۰/۰۸۵۷	۰/۰۹۲۴	۰/۰۸۴۹	۰/۱۰۲۹	۰/۰۷۹۵
	راکتیو (MVar)	۰/۰۵۳۵	۰/۰۵۱۴	۰/۰۵۰۲	۰/۰۵۴۱	۰/۰۴۹۸	۰/۰۶۰۳	۰/۰۴۶۶

جدول ۱۰ تأثیر هرکدام از جایابی های ادوات با استفاده از روش پیشنهادی بر روی شاخص ولتاژ در مدل بارهای مختلف داده شده است. با ارزیابی نتایج می توان گفت که مقدار پروفیل ولتاژ کاهش یافته و مقدار پایداری ولتاژ افزایش پیدا کرده است؛ در نتیجه روش پیشنهادی

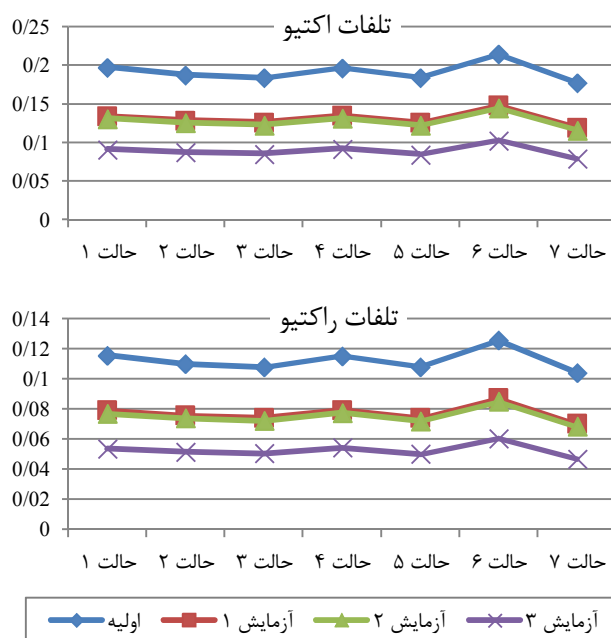
در سیستم توزیع واقعی در حالت اولیه و مدل بار ثابت، پروفیل ولتاژ برابر ۰/۰۲۰۶ و پایداری ولتاژ برابر ۰/۹۱۳۷ است. روش پیشنهادی به اندازه ای که بتواند مقدار شاخص پروفیل ولتاژ را کاهش دهد و مقدار شاخص پایداری ولتاژ را افزایش دهد، عملکرد مناسبی داشته است. در

بهبود پیدا می‌کند. جزئیات شاخص‌های قابلیت اطمینانی سیستم توزیع واقعی در طول جایابی ادوات در جدول ۱۱ آورده شده است. شکل ۱۳ نحوه تشکیل نواحی جزیره‌ای در هنگام وقوع خطا را نشان می‌دهد. مطابق این شکل در آزمایش‌های (۱ و ۲) شبکه به ۳ ناحیه حفاظتی و در آزمایش ۳ به ۴ ناحیه حفاظتی تقسیم می‌شود؛ این جزیره‌ها باعث می‌شوند که در هنگام وقوع خطا، سایر نواحی با استفاده از انرژی تزریقی DG و یا به کمک شبکه بالادست بکار خود ادامه دهند و میزان انرژی ازدست‌رفته سیستم توزیع به مراتب کاهش یابد. در نتیجه الگوریتم پیشنهادی از نظر قابلیت اطمینان نیز عملکرد مناسبی داشته است و با جایابی ادوات در مکان و اندازه‌های بهینه، باعث شده است که در هنگام وقوع خطا با تشکیل نواحی جزیره‌ای میزان انرژی ازدست‌رفته کاهش پیدا کند و در نتیجه امنیت و قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد.

کارایی قابل قبولی داشته است. از نظر آماری نیز روش پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته است، به‌طوری‌که محدوده تغییرات ولتاژ در آزمایش‌های مختلف ۳۹-۳۲ درصد کاهش پیدا کرده است؛ در ضمن انحراف معیار ولتاژ نیز ۶۷-۶۳ درصد بهبود یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که روش پیشنهادی از نظر ولتاژ نیز اثربخشی مناسبی داشته است.

همان‌طور که گفته شد، شبکه‌های صنعتی به دلیل مصرف بالای توان توسط تعداد کم مشترکین، نسبت به سایر شبکه‌ها مقدار انرژی ازدست‌رفته بیش‌تری دارند. بنابراین یکی از مهم‌ترین اهداف اعمال روش پیشنهادی به این شبکه، بهبود قابلیت اطمینان سیستم توزیع است.

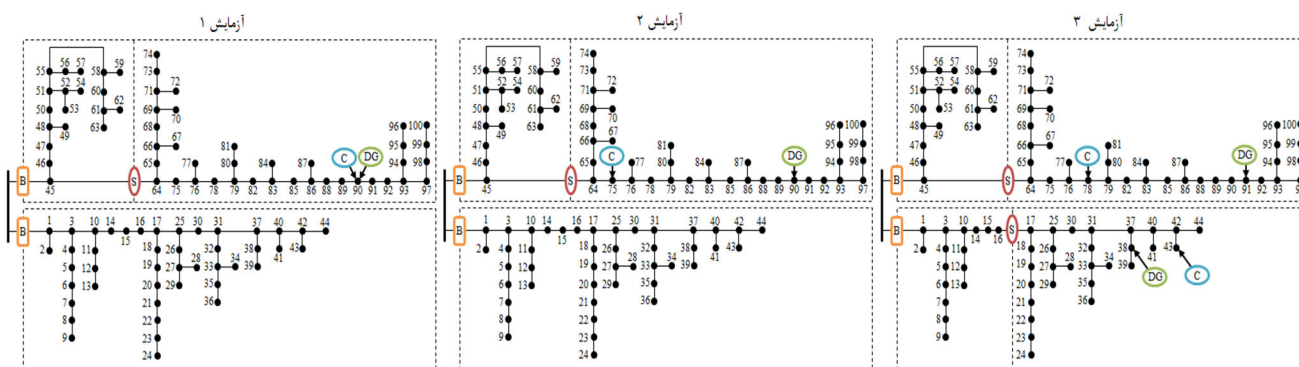
در شرایط اولیه مقدار شاخص‌های SAIFI، SAIDI و AENS به ترتیب برابر با ۸/۰۵۷۲، ۹/۴۲۷ و ۱۱۰۳/۸۵ هستند که بعد از قرارگیری ادوات با استفاده از روش پیشنهادی به میزان ۲۰-۴۷ درصد



شکل ۱۲: تغییرات تلفات سیستم توزیع واقعی در مدل بارهای مختلف

جدول ۱۰: مقادیر شاخص‌های ولتاژی سیستم توزیع واقعی در مدل بارهای مختلف با ادوات جایابی شده توسط روش پیشنهادی

شماره آزمایش	شاخص ولتاژ	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷
اولیه	VP _{ins}	۰/۰۲۰۶	۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۹۱	۰/۰۲۰۵	۰/۰۱۹۲	۰/۰۲۲۵	۰/۰۱۸۶
	VS _{ins}	۰/۹۱۳۷	۰/۹۱۶۳	۰/۹۱۷۲	۰/۹۱۴۱	۰/۹۱۶۸	۰/۹۱۰۱	۰/۹۱۸۰
۱	VP	۰/۰۱۱۳	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۲۶	۰/۰۰۹۹
	VS	۰/۹۳۷۷	۰/۹۳۸۸	۰/۹۳۹۵	۰/۹۳۷۶	۰/۹۳۹۵	۰/۹۳۵۱	۰/۹۴۰۶
۲	VP	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۹۵
	VS	۰/۹۳۷۷	۰/۹۳۸۸	۰/۹۳۹۵	۰/۹۳۷۶	۰/۹۳۹۵	۰/۹۳۵۱	۰/۹۴۰۶
۳	VP	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۷۳
	VS	۰/۹۴۲۹	۰/۹۴۳۲	۰/۹۴۳۳	۰/۹۴۲۹	۰/۹۴۳۴	۰/۹۴۲۰	۰/۹۴۳۷



شکل ۱۳: محدوده‌های حفاظتی سیستم توزیع واقعی با جایابی ادوات با استفاده از روش پیشنهادی

جدول ۱۱: مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینانی در سیستم توزیع واقعی

اولیه	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳
SAIFI	۸/۰۵۷۲	۶/۱۸۴۸	۵/۱۰۶۹
SAIDI	۹/۴۲۷	۷/۲۳۶۲	۵/۹۷۵۱
AENS	۱۱۰۳/۸۵	۸۸۸/۹۶۹۳	۵۸۶/۶۶۸۵

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، جایابی همزمان منابع تجدیدپذیر، بانک خازنی و سکشنالایزر در مدل بار ثابت و متغیر انجام گرفته است. کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو، بهبود شاخص ولتاژ و شاخص‌های قابلیت اطمینان توابع هدفی هستند که در جایابی ادوات دنبال می‌شوند. برای بهینه‌سازی توابع هدف از ترکیب الگوریتم‌های کرم شبتاب و ازدحام ذرات استفاده شده و برای انتخاب بهترین ذره از صفحه پارتو از روش فازی استفاده شده است. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از آزمایش‌هایی بر روی شبکه استاندارد ۶۹ شینه و سیستم توزیع واقعی از شبکه برق‌رسانی شهرستان خوی اجرا گردید. خلاصه‌ای از نتایج به شرح زیر است:

۱- فارغ از نوع منابع تولید پراکنده، اتصال این ادوات به همراه بانک خازنی باعث بهبود شاخص‌های تلفات و ولتاژ می‌شود. زمانی که ادوات حفاظتی نیز به صورت بهینه به این ترکیب اضافه می‌شوند، شاخص‌های قابلیت اطمینان نیز تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کنند.

۲- منابع تولید پراکنده و بانک خازنی بیش‌تر در نزدیکی مراکز بار جایابی می‌شوند که هم شرایط ناحیه جزیره‌ای را فراهم کنند و هم با کاهش تراکم بار خطوط شاخص‌های فنی شبکه را بهبود بخشند. سکشنالایزرها برای بیش‌تر کردن قابلیت اطمینان در نزدیکی منابع طوری جایابی می‌شوند که با ایجاد نواحی جزیره‌ای، در صورت وقوع خطا کمترین انرژی توزیع نشده حاصل شود.

۳- هر دو نوع منبع تولید پراکنده تجدیدپذیر نقش مؤثری در بهبود شاخص‌های فنی شبکه دارند. البته فتوولتائیک بیشترین و توربین بادی

کمترین تأثیر را داشته‌اند. این تفاوت عملکرد به تکنولوژی استفاده شده در منبع تولید پراکنده ارتباط مستقیم دارد.

۴- الگوریتم پیشنهادی در انواع مدل بار عملکرد مناسبی داشته و علاوه بر بهبود شاخص‌های فنی شبکه باعث خطی‌تر شدن تغییرات شاخص تلفات و ولتاژ در انواع مدل بار شده است. این کاهش قابل توجه باعث می‌شود که در صورت تغییر کاربری برخی باس‌ها از مدل باری به مدل بار دیگر بهره‌وری شبکه تغییر چندانی نکند.

۵- همه ادوات به تنهایی باعث افزایش کارایی سیستم توزیع می‌شوند؛ ولی با استفاده از روش پیشنهادی و جایابی همزمان این تأثیرات چند برابر می‌شود.

سپاسگزاری

تهیه‌کنندگان این مقاله بر خود واجب می‌دانند که از آقایان مهندس مهدی علی‌بیگل و مهندس نوید قره‌باغی، کارشناسان محترم اداره توزیع برق شهرستان خوی به خاطر همکاری‌هایی که در جمع‌آوری اطلاعات شبکه توزیع واقعی داشته‌اند، تشکر نماید.

پیوست

در این بخش، الگوریتم هوشمند پیشنهادی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از چندین تابع آزمایش تکنمایی و چندنمایی استفاده شده است. این توابع که در اکثر مطالعات الگوریتم‌های هوشمند به کار برده می‌شوند در جدول الف قابل مشاهده هستند [۳۳ و ۳۴]. برای ارزیابی الگوریتم ترکیبی HFAPSO، نتایج اجرای آن بر روی توابع آزمایش با نتایج الگوریتم‌های FA و PSO مورد مقایسه قرار می‌گیرند. هرکدام از سه الگوریتم HFAPSO، FA و PSO در شرایط یکسان ۲۰ بار برای هرکدام از توابع آزمایش اجرا شده‌اند (تعداد تکرار حلقه بهینه‌سازی برابر ۲۰۰ و بعد تابع برابر ۳۰ است). بعد از اجرای الگوریتم‌ها، اطلاعات آماری به دست آمده شامل میانگین، بهترین نتیجه و انحراف معیار در جدول ب آورده شده است.

جدول الف: توابع آزمایش برای ارزیابی الگوریتم ترکیبی HFAPSO

توابع

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$$

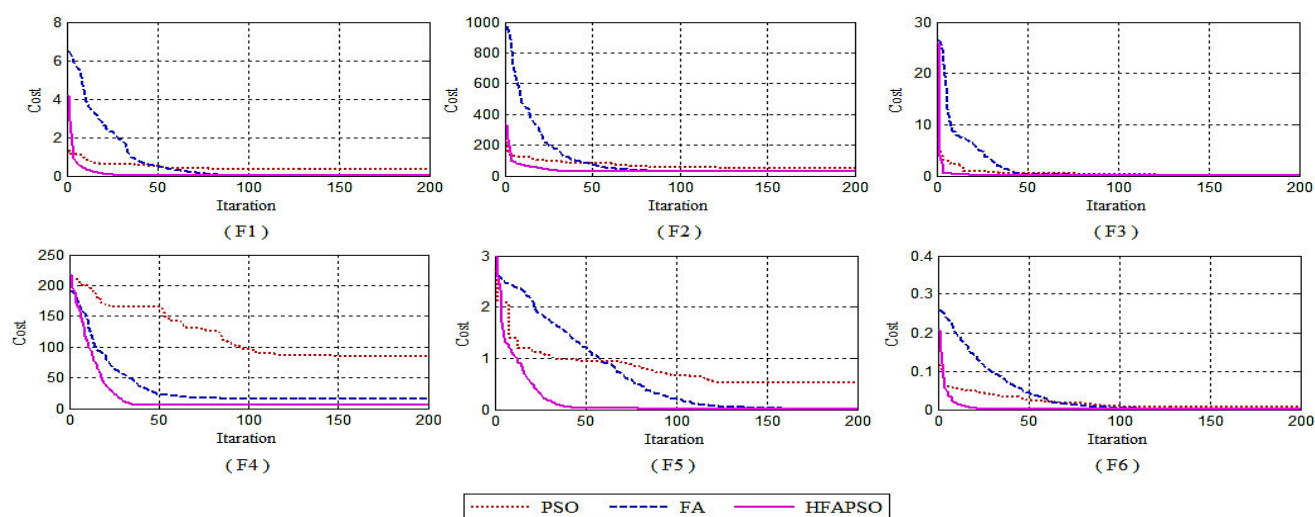
$$f_3(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1]$$

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$$

$$f_5(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$$

$$f_6(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$$

با توجه به جدول ب، مشاهده می‌شود که الگوریتم HFAPSO نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد مثبت‌تری از خود نشان داده است. شکل الف تغییرات توابع هدف در طی اجرای الگوریتم‌های هوشمند را نشان می‌دهد. این شکل به خوبی سرعت همگرایی بالای الگوریتم ترکیبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد؛ الگوریتم HFAPSO نسبت به الگوریتم‌های FA و PSO در تعداد کم‌تری از تکرارها به جواب بهینه می‌رسد. در نتیجه با ارزیابی نتایج موجود در جدول ب و شکل الف می‌توان گفت که الگوریتم هوشمند پیشنهادی در عین داشتن سرعت مناسب در رسیدن به جواب بهینه، دارای دقت مناسب بوده و همچنین در مسائل پیچیده دارای جواب بهینه و قابل اتکاتر است.



شکل الف: تغییرات توابع هدف در اجرای الگوریتم ترکیبی HFAPSO

جدول ب: نتایج اجرای الگوریتم‌های HFAPSO، FA و PSO در توابع آزمایش

توابع آزمایش						الگوریتم
F6	F5	F4	F3	F2	F1	
۰/۰۰۸۶۸	۰/۵۳۰۱۶	۷۶/۴۴۷۸	۰/۱۵۸۸۶	۴۵/۵۲۵۰	۰/۱۱۶۳۸۰	PSO
۰/۰۰۷۷۰	۰/۴۳۱۴۰	۶۶/۹۶۹۷	۰/۱۰۶۷۰	۴۰/۸۲۷۱	۰/۰۷۲۶۲۳	
۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۴۱۱۵	۶/۳۳۸۴۶	۰/۰۳۸۴۹	۲/۲۷۱۴۷	۰/۰۲۵۳۱۵	
۰/۰۰۲۱۶	۰/۰۰۶۵۸	۱۲/۶۴۹۶	۰/۰۸۲۷۶	۲۷/۷۰۰۸	۰/۰۰۱۲۵۳	FA
۰/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۵۱۰	۱۰/۹۵۹۵	۰/۰۶۱۸۰	۲۷/۱۸۲۶	۰/۰۰۰۱۰۳	
۰/۰۰۰۵۱	۰/۰۰۱۰۸	۱/۲۶۱۰۷	۰/۰۱۱۱۳	۰/۲۱۳۲۶	۰/۰۰۰۰۱۴	
۱/۶۱۸E-۴	۰/۰۰۴۳۹	۳/۱۱۵۱۰	۰/۰۱۴۰۵	۲۵/۷۴۳۸	۷/۳۷۸E-۵	HFAPSO
۱/۳۸۵E-۴	۰/۰۰۳۸۰	۲/۰۰۴۸۰	۰/۰۱۱۳۰	۲۵/۵۰۴۰	۵/۹۸۰E-۵	
۲/۱۱۷E-۵	۰/۰۰۰۲۷	۰/۸۲۹۷۲	۰/۰۰۱۸۳	۰/۱۳۱۷۸	۶/۳۹۲E-۶	

- swarm optimization algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 271-279, 2008.
- [16] I. Goroochi Sardou, M. Banejad, R. Hooshmand, and A. Dastfan, "Modified shuffled frog leaping algorithm for optimal switch placement in distribution automation system using a multi-objective fuzzy approach," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, pp. 493-502, 2012.
- [17] M. Raoofat, "Simultaneous allocation of DGs and remote controllable switches in distribution networks considering multilevel load model," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, pp. 1429-1436, 2011.
- [۱۸] رحمت‌اله هوشمند، حسین محکم‌ی و امین خدابخشیان، «روشی جدید در جایابی بهینه خازن‌ها و ژنراتورهای توزیع‌شده در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتری جهت‌داده‌شده با PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۳۹، شماره ۲، صفحه ۶۱-۷۲، ۱۳۸۸.
- [19] S. Kansal, V. Kumar, and B. Taygi, "Composite active and reactive power compensation of distribution networks," *7th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 1-6, 2012.
- [20] S.M. Sajjadi, M.R. Haghifam, and T. Salehi, "Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index," *Electrical Power and Energy System*, vol. 46, pp. 366-375, 2013.
- [21] J.M. Gers, and E.J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 2nd Edition, the Institution of Engineering and Technology.
- [22] C.H. Yammani, S. Maheswarapu, and S. Matam, "Optimal placement of multi DGs in distribution system with considering the DG bus available limits," *Energy and Power*, vol. 2, pp. 18-23, 2012.
- [23] N.C. Hien, N. Mithulananthan, and R.C. Bansal, "Location and sizing of distributed generation units for loadability enhancement in primary feeder," *IEEE Systems Journal*, vol. 7, pp. 797-805, 2013.
- [24] A. Aref, M. Davoudi, F. Razavi, and M. Davoodi, "Optimal DG placement in distribution networks using intelligent system," *Energy and Power Engineering*, vol. 4, pp. 92-98, 2012.
- [25] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE Transaction and Power Systems*, vol. 10, pp. 523-538, 1995.
- [26] S.M. Sajjadi, M.R. Haghifam, and J. Salehi, "Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, pp. 366-375, 2013.
- [27] R. Billinton, and R.N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques*, Plenum Publishing, 2nd Ed., 1992.
- [28] D. Sedighzadeh, and E. Masehian, "Particle swarm optimization methods, taxonomy and applications," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 1, pp. 486-502, 2009.
- [29] X. Yang, "Firefly algorithms for multimodal optimization," *arXiv: 1003.1466v1 [math.OA]*, 2010.
- [30] J. Moshtaghi, and S. Ghasemi, "Optimal distribution system reconfiguration using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)," *Journal of Operation and*
- [1] R. Viral, and D.K. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5146-5165, 2012.
- [2] D.Q. Hung, N. Mithulananthan, and R.C. Bansal, "Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks," *IEEE Transaction and Energy Conversion*, vol. 25, pp. 814-820, 2010.
- [3] S.A.M. Javadian, M.R. Haghifam, M. Fotuhi Firoozabad, and S.M.T. Bathaee, "Analysis of protection system's risk in distribution networks with DG," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, pp. 688-695, 2013.
- [4] M. Aman, G. Jasmon, A. Bakar, and H. Mokhlis, "Optimal shunt capacitor placement in distribution system-a review and comparative study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 429-439, 2014.
- [5] T. Niknam, S. Taheri, J. Aghaei, S. Tabatabaei, and M. Nayeripour, "A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4817-4830, 2011.
- [6] M.H. Moradi, and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 34, pp. 66-74, 2012.
- [۷] یوسف پورجمال و علی عجمی، «یک روش برای جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۲، شماره ۲، صفحه ۶۵-۷۵، ۱۳۹۱.
- [8] S. Porkar, P. Poure, A. Abbaspour, and S. Saadate, "A novel optimal distribution system planning framework implementing distributed generation in a deregulated electricity market," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 828-837, 2010.
- [9] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, "Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks," *Electrical Power and Energy System*, vol. 23, pp. 752-760, 2013.
- [10] R. Ebrahimi, M. Ehsan, and H. Nouri, "A profit-centric strategy for distributed generation planning considering time varying voltage dependent load demand," *Electrical Power and Energy System*, vol. 44, pp. 168-178, 2013.
- [11] H. Shayeghi, M. Karimi, and P. Farhadi, "Solving optimal capacitor placement problem using improved bi-strategy differential evolutionary algorithm considering varying load conditions," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 7, pp. 4092-4104, 2012.
- [12] R. Baghipour, and S.M. Hosseini, "A hybrid algorithm for optimal location and sizing of capacitors in the presence of different load models in distribution network," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 2, pp. 10-21, 2014.
- [13] S. Taher, and R. Bagherpour, "A new approach for optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distorted distribution systems using hybrid honey bee colony algorithm," *Electrical Power and Energy System*, vol. 49, pp. 430-480, 2013.
- [14] G. Levitin, S. Mazal, and D. Elmakis, "Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply," *Electrical Power and Energy System*, vol. 35, pp. 149-155, 1995.
- [15] A. Moradi, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle

- Automation in Power Engineering*, vol. 1, pp. 12-21, 2013.
- [31] Deependra Singh, Devender Singh, and K.S. Verma, "Multi objective optimization for DG planning with load models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 427-436, 2009.
- [32] A.M. El-Zonkoly, "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 50-59, 2011.
- [33] A. Kavousi Fard, and T. Niknam, "Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty," *IEEE Transactions on Power Delivery*, In press, 2013.
- [34] J. Digalakis, and K. Margaritis, "On benchmarking functions for genetic algorithms," *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 77, pp. 481-506, 2001.

زیرنویس‌ها

-
- ^۱ Distributed Generation
- ^۲ Battery Storage System
- ^۳ Voltage Profile
- ^۴ Voltage Stability
- ^۵ System Average Interruption Frequency Index
- ^۶ System Average Interruption Duration Index
- ^۷ Average Energy not Supplied Index
- ^۸ Hybrid Firefly Algorithm and Particle Swarm Optimization
- ^۹ Firefly Algorithm
- ^{۱۰} Particle Swarm Optimization