

Optimal Placement and Sizing of Distributed Generations and Capacitors for Reliability Improvement and Power Loss Minimization in Distribution Networks

Majid Salari¹, M.Sc, Fariborz Haghghatdar-Fesharaki^{1,2}, Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
salarpogc@gmail.com, fr_haghghat@yahoo.com

Abstract:

Optimal placement and sizing of equipment in engineering systems is one of the most important and challenging practical problems. Installation of capacitors and distributed generations (DGs) in distribution systems has many benefits, such as improving the reliability as well as reducing the power loss, however, includes high investment costs. Hence, the maximum use of these benefits highly depends on choosing suitable locations for installation. In this paper, the Success Rate Group Search Algorithm (SRGSO) is used for optimal placement and sizing of DG sources and capacitor banks simultaneously in distributed systems. The used objective function includes costs of Expected interruption (ECOST), Energy Not Supplied (ENS), active power losses and DG and capacitor investment, operation and maintenance. To evaluate the effectiveness of the proposed algorithm in finding the optimal solution, various capacitor and DG placement scenarios are simulated on the IEEE 33-bus radial distribution test system. The simulation results show that the proposed method is more effective and has higher capability for solving the problem of capacitor and DG placement, compared to previously proposed methods. Using the proposed method in this paper, the value of active power losses as well as bus voltage profile are improved more than other investigated methods.

Keywords: optimal placement, capacitor bank, distributed generation, reliability, Srgso algorithm

Received: 8 June 2020

Revised: 9 September 2020

Accepted: 20 September 2020

Corresponding Author: Dr. Fariborz Haghghatdar-Fesharaki

Citation: M. Salari, F. Haghghatdar-Fesharaki, "Optimal placement and sizing of distributed generations and capacitors for reliability improvement and power loss minimization in distribution networks", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 43, pp. 83-93, Autumn 2020 (in Persian).

جایابی و تعیین اندازه بهینه خازن‌ها و منابع تولید پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان و حداقل نمودن تلفات در شبکه‌های توزیع

مجید سالاری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، فریبرز حقیقت‌دار فشارکی^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

salarpogc@gmail.com

fr_haghighat@yahoo.com

چکیده: مسأله جایابی و تعیین اندازه بهینه تجهیزات در سیستم‌های مهندسی یکی از مهمترین و پرچالش‌ترین مسایل کاربردی است. نصب خازن و منابع تولید پراکنده (DG ها) در سیستم‌های توزیع مزایای زیادی همچون بهبود قابلیت اطمینان و کاهش تلفات توان را در پی خواهد داشت. البته هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالایی را هم در بر دارد. در نتیجه استفاده حداکثری از این مزایا تا حد زیادی منوط به انتخاب مکان مناسب جهت نصب آنها است. در این مقاله از الگوریتم جستجوی گروهی با نرخ موفقیت برای جایابی همزمان DG و خازن در سیستم توزیع شعاعی استفاده شده است. تابع هدف مورد استفاده شامل هزینه‌های مربوط به وقفه قابل انتظار مشتری (ECOST)، انرژی تامین نشده (ENS)، تلفات توان اکتیو سیستم و هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری بانک خازنی و DG است. به منظور ارزیابی اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در یافتن جواب بهینه، سناریوهای مختلف نصب DG و خازن در محیط نرم افزار MATLAB R2014a در سیستم توزیع شعاعی ۳۳ شینه استاندارد IEEE شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های ارائه شده قبلی، قابلیت و توانایی بالایی در حل مسأله جایابی خازن و DG دارد. با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، مقادیر تلفات توان اکتیو و پروفایل ولتاژ باس‌ها نسبت به سایر روش‌های بررسی شده، بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: جایابی بهینه، بانک خازنی، منابع تولید پراکنده، قابلیت اطمینان، الگوریتم جستجوی گروهی بهبود یافته

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر فریبرز حقیقت‌دار فشارکی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

شبکه توزیع به دلیل حضور مشتریان صنعت برق، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سیستم قدرت به شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر، منابع انرژی سنتی به‌طور فزاینده‌ای با مشکلات جدی زیست محیطی مواجه شده‌اند. علاوه بر این، تقاضای رو به رشد انرژی برق، چالش‌هایی را برای بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت متعارف ایجاد نموده است. در نتیجه، صنعت برق همواره به دنبال یافتن راه حل‌های جایگزین برای رسیدگی به مسائل مربوط به محیط زیست و بهره‌برداری بوده است [۱، ۲]. یکی از اقدام‌های موثر در این زمینه، تخصیص واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت و در نزدیکی مصرف‌کننده است [۳]. امروزه در تمام نقاط جهان، سیستم‌های تولید برق در حال تبدیل از نیروگاه‌های متمرکز به منابع کوچک تولید برق پراکنده در نزدیکی بار هستند [۴]. با پیشرفت فن‌آوری‌های مربوط به DG و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ارزان قیمت، درصد نفوذ این منابع تولید انرژی در شبکه‌های توزیع در حال افزایش است. استفاده از DG موجب کاهش تلفات سیستم، بهبود پروفیل ولتاژ، پایداری شبکه، صرفه‌جویی در مصرف سوخت، کاهش هزینه‌ها و آلودگی محیط زیست می‌گردد [۵]. نصب خازن‌های موازی در سیستم‌های توزیع همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. نصب بهینه خازن در شبکه‌های توزیع موجب بهبود پروفیل ولتاژ، جبران توان راکتیو، اصلاح ضریب قدرت، کاهش تلفات توان و انرژی و بهبود کیفیت توان می‌شود. با اضافه شدن خازن به سیستم توزیع، ولتاژ باس‌های انتهایی تقویت شده و با جلوگیری از پدیده کاهش ولتاژ، موجب بهبود کیفیت توان می‌شود [۶]. تنوع و تعدد تجهیزات مورد استفاده در شبکه توزیع و ارتباط مستقیم آن‌ها با مصرف‌کنندگان، باعث شده که سطح قابلیت اطمینان در شبکه توزیع از اهمیت خاصی برخوردار باشد. با جایابی بهینه DG و خازن می‌توان توان‌های اکتیو و راکتیو شبکه توزیع را کنترل نمود. کاهش جریان خطوط منجر به کاهش تلفات اکتیو و راکتیو شبکه و بهبود پروفیل ولتاژ گره‌ها شده و با کاهش احتمال خرابی خطوط، اطمینان-پذیری سیستم افزایش می‌یابد [۷]. مزایای مذکور، زمانی حاصل می‌شود که اندازه و مکان صحیحی از DG وجود داشته باشد. مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب نامناسب در اندازه و موقعیت DG، ممکن است تلفات سیستم را به گونه‌ای افزایش دهد که این مقدار بیش از زمانی شود که DG حضور نداشته است [۸]. موضوع جایابی مولدهای تولید پراکنده مورد توجه بسیاری از محققین در دهه‌های اخیر بوده است [۹، ۱۰]. در مرجع [۱۱] یک روش تحلیلی برای تعیین مکان بهینه DG با حداقل کردن تلفات ارائه شده است. در مرجع [۱۲] با توجه به شاخص‌های تلفات توان و افت ولتاژ، یک تابع هدف چند منظوره تعریف شده و مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. مسأله جایابی بهینه مولدهای تولید پراکنده با استفاده از روش‌های مختلف مبتنی بر هوش مصنوعی الهام گرفته از طبیعت مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه الگوریتم‌های ژنتیک [۱۳]، ازدحام ذرات [۱۴]، کلونی زنبور مصنوعی [۱۵]، خفاش [۱۶]، علف‌های هرز مهاجم [۱۷]، قطرات آب [۱۸]، وال [۱۹]، سنجاقک [۲۰] و الگوریتم جستجوی موجودات همزیست [۲۱] برای این منظور بکار گرفته شده‌اند. نصب و جایابی خازن‌ها نیز در سیستم‌های توزیع، موضوع مقالات فراوانی بوده است. همچنین در زمینه جایابی خازن‌ها می‌توان به استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها [۲۲]، بهینه‌سازی مبتنی آموزش - یادگیری [۲۳]، الگوریتم‌های بهینه‌سازی بویایی کوسه [۲۴] و جستجوی فاخته [۲۵] اشاره نمود. در مرجع [۲۶] این مسأله با بکارگیری منطق فازی و الگوریتم ایمنی و در مرجع [۲۷] با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شاخص تشدید حل شده است. به‌منظور بهره‌وری همزمان از مزایای استفاده از خازن و DG در شبکه‌های توزیع، جایابی بهینه همزمان خازن و DG در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۲۸] این موضوع به‌منظور کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتری صورت گرفته است. برخی از محققین با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی [۲۹] و چرخه آب [۳۰] به حل این مسأله پرداخته‌اند. همچنین با ادغام روش‌های جستجوی هارمونی، ازدحام ذرات و کلونی زنبور مصنوعی، روش جدیدی جهت جایابی بهینه همزمان خازن و DG در مرجع [۳۱] پیشنهاد شده است. در مرجع [۳۲] جایابی بهینه همزمان خازن و DG با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک بهبودیافته و جستجوی محلی انجام شده است. همچنین این مسأله در مرجع [۳۳] با استفاده از یک روش تحلیلی و در نظر گرفتن بارهای متغیر بررسی شده است.

هدف کلیه مقالات عنوان شده، بهینه‌سازی جایابی خازن، DG و یا هر دو با استفاده از انواع روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی بوده، بطوریکه علاوه بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری سیستم، کلیه پارامترهای شبکه بهبود یابد. در این مقاله روشی برای جایابی و تعیین اندازه بهینه DG و بانک خازنی در یک سیستم توزیع شعاعی با استفاده از الگوریتم جستجوی

گروهی بهبود یافته ارائه شده است. جایابی خازن در مرجع [۳۴] با استفاده از الگوریتم جستجوی گروهی معمولی انجام شده است. در این مقاله جایابی بهینه همزمان منابع تولید پراکنده و خازن با استفاده از الگوریتم جستجوی گروهی بهبود یافته انجام شده که تا کنون در مقالات قبلی بدان پرداخته نشده است. همچنین در این مقاله برخلاف مقالات قبلی مسأله استفاده همزمان از پارامتر شاخص بهبود شامل مولفه های فنی شبکه در کنار تابع هدف اقتصادی، موجب پرهیز از مطالعه صرفاً فنی یا اقتصادی مسأله شده است. بدین ترتیب به مصرف کننده این امکان را می‌دهد که با توجه به میزان اهمیت پارامترهای فنی مورد نظر و با صرف هزینه اضافی، نسبت به انتخاب جایابی، تصمیم‌گیری نماید. به کمک این الگوریتم و همچنین استفاده از شاخص بهبود تعریف شده، نتایج حاصل از بهینه‌سازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. به‌منظور ارزیابی قابلیت‌ها و توانایی روش پیشنهادی در این مقاله، سیستم توزیع شعاعی ۳۳ شینه استاندارد IEEE به عنوان سیستم آزمایش در نظر گرفته شده است. نتایج با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای به حداقل رساندن تلفات توان، بهبود پروفایل ولتاژ و شاخص‌های قابلیت اطمینان برای حالت‌های مختلف نصب DG و خازن بررسی شده است. الگوریتم پیشنهادی، ساده و پیاده‌سازی آن آسان بوده و دارای سرعت همگرایی بالایی است. این الگوریتم عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های استفاده شده در موضوع جایابی دارد. مقادیر تلفات توان اکتیو و حداقل ولتاژ باس‌ها پس از جایابی، در این روش بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر الگوریتم‌های ارائه شده در مقالات دارد. ساختار مقاله به این صورت است. در بخش دوم به معرفی شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه اشاره می‌شود. در بخش سوم تابع هدف پیشنهادی به همراه قیود مسأله عنوان می‌گردد. سپس در بخش چهارم، الگوریتم جستجوی گروهی بهبود یافته معرفی می‌شود. در بخش پنجم به‌منظور ارزیابی اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در یافتن جواب بهینه‌ی مسأله، سناریوهای مختلف نصب DG و خازن در محیط نرم افزاری برای یک سیستم تست نمونه شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج سایر روش‌های بهینه‌سازی منتشر شده در مقالات علمی، مقایسه شده و مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش ششم نتایج به‌دست آمده جمع‌بندی شده و نتیجه‌گیری می‌شود.

۲- معرفی شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه

مهم‌ترین هدف سیستم‌های توزیع، تامین انرژی پایدار و با کیفیت مطلوب برای مشتریان است که این امر گاه‌ها به دلایل مختلف اعم از خرابی تجهیزات شبکه و بروز خطاها میسر نمی‌گردد. از این‌رو افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع دارای اهمیت ویژه‌ای است. بخش مهمی از وقفه‌های مشترکین ناشی از خرابی تجهیزات در سیستم توزیع، شامل کابل‌های زیرزمینی و خطوط هوایی بدلیل عبور جریان‌های بالا از آن‌ها است. در صورت عبور جریان‌های بالاتر از حد مجاز با افزایش دمای کابل، شاهد وقوع مشکلات عایقی و در نتیجه افزایش نرخ خرابی تجهیزات خواهیم بود. از سوی دیگر، عبور جریان‌های زیاد از خطوط هوایی موجب شکم دادن کابل‌ها، کاهش فاصله آن‌ها تا زمین و افزایش احتمال وقوع شکست الکتریکی می‌شود [۳۵]. کاهش مولفه‌های اکتیو و راکتیو جریان شاخه‌های سیستم در اثر جایابی مناسب DG و خازن، موجب کاهش نرخ خرابی در کابل‌های زیرزمینی و خطوط هوایی شده و تأثیرات قابل توجهی بر بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم خواهد داشت. نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع در قالب شاخص‌های نقاط بار و کل سیستم ارائه می‌گردد. شاخص‌های اصلی قابلیت اطمینان شامل: متوسط نرخ خطا (λ_s)، متوسط زمان خروج در سال (u_s) و متوسط زمان خرابی سیستم (r_s) است. جهت ارزیابی و مقایسه سیستم‌های مختلف از دید قابلیت اطمینان، شاخص‌های تکمیلی مصرف کننده و بار توسط IEEE در قالب استاندارد ۱۳۶۶ ارائه شده است [۳۶]. شاخص‌های فرکانس متوسط قطع برق سیستم (SAIFI) و دوره زمانی متوسط قطع برق سیستم (SAIDI)، انرژی تأمین نشد (ENS) و هزینه وقفه قابل انتظار (ECOST) در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه DG و خازن در مکان‌های مناسب نصب شوند، می‌توانند به ترتیب، بخشی از تقاضای توان اکتیو و راکتیو را تأمین کنند. این تأثیرات بر قابلیت اطمینان به عنوان کاهش میزان خرابی اجزای فیدر توزیع در نظر گرفته می‌شود. بدین صورت که قبل از اضافه نمودن DG و خازن، هر فیدر i دارای نرخ خرابی جبران نشده (λ_i^{uncomp}) است. چنانچه مؤلفه موهومی یا حقیقی جریان شاخه فیدر بطور کامل جبران شود، فرض می‌شود میزان نرخ خرابی به (λ_i^{comp}) و به مقدار ۸۵ درصد کاهش می‌یابد [۲۸]. چنانچه مؤلفه موهومی یا حقیقی جریان شاخه به‌طور کامل جبران نشود، نرخ خرابی به‌صورت رابطه خطی با ضریب جبران‌سازی تعیین می‌شود. جهت تعیین نرخ خرابی

در این حالت، ابتدا ضریب جبران‌سازی i امین شاخه (α_i) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha_i = \frac{I_F^{new}}{I_F^{old}} * \frac{I_a^{new}}{I_a^{old}} \quad (1)$$

که I_F^{old} ، I_F^{new} ، به ترتیب مولفه‌های راکتیو جریان i امین شاخه قبل و بعد از جبران‌سازی و I_a^{old} و I_a^{new} به ترتیب مولفه‌های اکتیو آن قبل و بعد از جبران‌سازی هستند. سپس مقدار نرخ خرابی جدید شاخه i ام با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{i-new} = \alpha_i (\lambda_i^{uncomp} - \lambda_i^{comp}) + \lambda_i^{comp} \quad (2)$$

۳- فرمول‌بندی مساله

به منظور تعیین جایابی بهینه واحدهای DG و بانک خازنی در سیستم توزیع، تابع هدف اقتصادی به همراه قیود مساله بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

۳-۱- تابع هدف

یکی از مؤثرترین پارامترهای تصمیم‌گیری در اجرای هر طرح، بحث هزینه‌ی اجرای آن طرح است. در این مقاله به منظور جایابی واحدهای DG و بانک خازنی، مطابق رابطه (۳) از یک تابع هدف مبتنی بر هزینه استفاده شده است.

$$TCOST = ECOST + COST_{ENS} + K_P P_{LOSS} + CC \quad (3)$$

که در آن، TCOST هزینه کل سیستم، ECOST هزینه وقفه قابل انتظار، $COST_{ENS}$ هزینه مربوط به انرژی تامین نشده، P_{LOSS} تلفات توان اکتیو، K_P ضریب هزینه تلفات و CC هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری بانک خازنی و DG است.

۳-۲- قیود مساله

شرایط حاکم بر مساله عمدتاً شامل محدودیت‌های بهره‌برداری و مواردی است که باید در رابطه با کیفیت توان و پایداری سیستم لحاظ شوند. این قیود مربوط به روابط بین ولتاژ، جریان و توان عبوری بین شینه‌ها و همچنین معادلات پخش بار در یک سیستم قدرت هستند. میزان تلفات شبکه و ولتاژ گره‌ها با استفاده از روش پخش بار پسر- پیشرو [۳۷] که یکی از مؤثرترین روش‌های تحلیل پخش بار در سیستم‌های توزیع شعاعی است، محاسبه می‌شود. اندازه ولتاژ در هر شینه باید در یک حد مجاز باشد. پس از جایابی خازن و DG در شبکه، مقدار ولتاژ هر شینه بایستی در محدوده معقولی تغییر کند. چنانچه ولتاژ شینه کمتر از مقدار کمینه ولتاژ تعریف شده باشد، بیانگر عدم تخصیص مناسب بانک‌های خازنی و واحدهای تولید پراکنده از لحاظ مکان و ظرفیت است. تجاوز مقدار ولتاژ از مقدار بیشینه ولتاژ مجاز نیز مشکلات اضافه ولتاژ را ایجاد می‌کند. این محدودیت به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد [۳۸].

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

که در آن V_i ولتاژ شینه i ام، V_{min} و V_{max} به ترتیب، حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز شینه‌ها است. مجموع توان راکتیو تزریق شده به شبکه توسط خازن و DG، باید کمتر از یا مساوی با میزان بار راکتیو موجود در شبکه باشد. چنانچه این ظرفیت بیشتر در نظر گرفته شود، مشکلات اضافه ولتاژ در شبکه به وجود خواهد آمد. محدودیت توان راکتیو به صورت رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$Q_c^{Total} + Q_{DG}^{Total} \leq Q_D \quad (5)$$

روابط (۶) و (۷) شرط همگرایی پخش بار توان اکتیو و راکتیو را بیان می‌کنند.

$$P_{gi} - P_{di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

در روابط فوق، V_i و δ_i به ترتیب اندازه و زاویه ولتاژ شینه i ام، P_{gi} و Q_{gi} توان اکتیو و راکتیو تولیدی در شینه i ام، P_{di} و Q_{di} بارهای اکتیو و راکتیو شینه i ام، Y_{ij} و θ_{ij} اندازه و زاویه ادمیتانس بین شینه i ام و j ام، S_i^{DG} توان ظاهری DG در شینه i ام و Q_D و Q_{DG}^{Total} ، Q_c^{Total} به ترتیب مجموع توان راکتیو بانک خازنی، DG و مورد نیاز شبکه هستند.

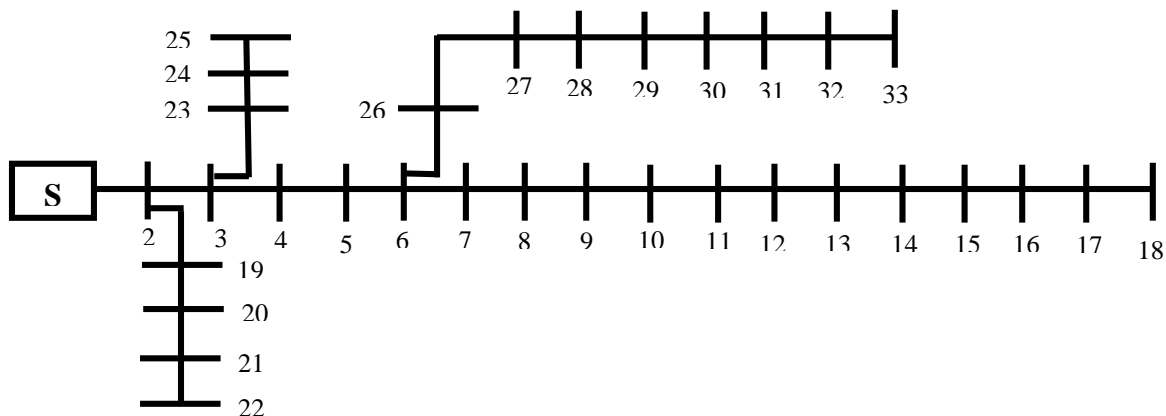
۴- معرفی الگوریتم جستجوی گروهی بهبود یافته (SRGSO)

الگوریتم بهینه‌ساز جستجوی گروهی (GSO)، یک الگوریتم تکاملی الهام گرفته از رفتار جستجوی حیوانات بوده و در سال ۲۰۰۹ توسط هی و همکارانش معرفی گردید [۳۹]. اعضای موجود در گروه به سه دسته مولد، برداشت‌کننده و تکاور تقسیم می‌شوند. در هر تکرار، یک عضو گروه که بهترین مقدار برازندگی را دارد، به عنوان مولد انتخاب شده و محیط را برای جستجوی منابع بهتر اسکن می‌کند. بخشی از اعضای گروه به عنوان برداشت‌کننده انتخاب شده و جستجو را با هدف پیوستن به منابع یافت شده توسط مولد ادامه می‌دهند. مابقی اعضا نیز تحت عنوان تکاور از موقعیت فعلی خود بصورت تصادفی حرکت کرده و در محیط جستجو پراکنده می‌شوند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای این الگوریتم، پارامتر حداکثر فاصله تعقیب است. این پارامتر بیانگر حداکثر اندازه‌ی قدم قابل برداشت توسط عضو مولد و اعضای تکاور در هر تکرار بوده و در طول دوره تکامل ثابت است. به‌منظور بهبود این الگوریتم، از الگوریتم جستجوی گروهی بهبود یافته استفاده شده است [۴۰].

در این الگوریتم، مقدار پارامتر حداکثر فاصله تعقیب در هر تکرار به‌صورت تطبیقی توسط بازخوردی از موفقیت اعضای گروه تعیین می‌شود. استراتژی پیشنهادی تلاش می‌کند تا با هماهنگ کردن میزان گام‌های اعضای مولد و تکاور، سرعت همگرایی گروه را متعادل سازد. الگوریتم GSO با ترکیب روش‌های جستجوی استفاده شده در الگوریتم‌های جستجوی مستقیم، ازدحام ذرات و سایر الگوریتم‌های تکاملی، شبیه به یک الگوریتم اکتشافی هیبرید عمل کرده و می‌تواند مسائلی را که برای روش‌های ابتکاری تکی مشکل هستند، راحت‌تر حل نماید. این الگوریتم، یک الگوریتم مفهومی ساده بوده و پیاده‌سازی آن آسان می‌باشد. همچنین نسبت به اکثر پارامترها به جز درصد تکاورها، حساسیت نداشته و قادر به حل انواع مسائل بهینه‌سازی از جمله مسائل مقیاس بزرگ می‌باشد. الگوریتم جستجوی گروهی برای حل مسائل پیوسته، حتی با توابع هدف ناهموار (با تعداد زیادی از مینیمم‌های محلی) بسیار مناسب است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مساله بر روی یک شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باسه استاندارد IEEE در محیط نرم افزار MATLAB R2014a انجام شده و مقادیر بهینه پارامترهای شبکه استخراج و مطالعه شده است. دیاگرام تک‌خطی سیستم مورد مطالعه با ولتاژ نامی ۱۲/۶۶ کیلوولت و مجموع بار در شرایط اوج ۳۷۱۵+j۲۳۰۰ کیلو ولت آمپر در شکل (۱) نشان داده شده است [۴۱].



شکل (۱): دیاگرام تک‌خطی سیستم توزیع تست ۳۳ باسه
Figure (1): Single line diagram of the 33 bus distribution test system

به‌منظور استفاده از الگوریتم پیشنهادی جهت جابجایی و تعیین اندازه بهینه DG و بانک خازنی در سیستم توزیع شعاعی، ماتریس اعضای گروه با ابعاد $n \times m$ تعریف می‌گردد که در آن n تعداد اعضای گروه و m تعداد بعد مساله است. ابعاد گروه شامل اندازه و مکان DGها و خازن‌ها بوده و بصورت رابطه (۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$\text{Group} = [n \times m]$$

$$m = [DGsize_1 DGloc_1 \dots DGsize_n DGloc_n CAPsize_1 CAPloc_1 \dots CAPsize_n CAPloc_n] \quad (8)$$

که در آن $DGsize$ ، $DGloc$ ، $CAPsize$ و $CAPloc$ به ترتیب اندازه و مکان DG ها و خازن‌ها است. اندازه اسمی و هزینه مربوط به DG ها و خازن‌های قابل تخصیص در جدول (۱) آورده شده است.

جهت بررسی پارامترهای شبکه در اثر جایابی DG و بانک خازنی در سیستم مورد آزمایش و انتخاب حالت بهینه، چهار سناریو مورد مطالعه قرار گرفته است. سناریوی اول مربوط به حالت پایه و بدون در نظر گرفتن خازن و DG است. در سناریوهای دوم و سوم، به ترتیب جایابی خازن و DG به صورت جداگانه و با تعداد متفاوت لحاظ شده است. در سناریوی چهارم نیز جایابی همزمان خازن و DG با تعداد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

Table (1): Available DG and capacitor size and costs

جدول (۱): سایز و هزینه DG و خازن‌های موجود

DG	سایز (kw)	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۷۵۰	۲۰۰۰
	هزینه (\$)	۷۵۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰	۲۱۰۰	۲۳۰۰	۲۵۰۰
خازن	سایز (kvar)	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰۰
	هزینه (\$)	۷۵۰	۹۷۵	۱۱۴۰	۱۳۲۰	۱۶۵۰	۲۰۴۰	۳۳۶۶	۴۰۸۰

در فرآیند مطالعه، برای هر سناریو پارامترهای شبکه محاسبه و با مقدار مشابه در حالت پایه مقایسه شده و میزان بهبود مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه تابع هدف در نظر گرفته شده، صرفاً اقتصادی است، به منظور انتخاب بهترین حالت در هر سناریو، شاخص بهبود (Index) متشکل از پارامترهای فنی شبکه با احتساب ضرایب وزنی، مطابق رابطه (۹) تعریف می‌گردد.

$$Index = \sum_{i=1}^5 k_i f_i \text{ و } \sum_{i=1}^5 k_i = 1 \text{ و } k_i \in [0,1] \quad (9)$$

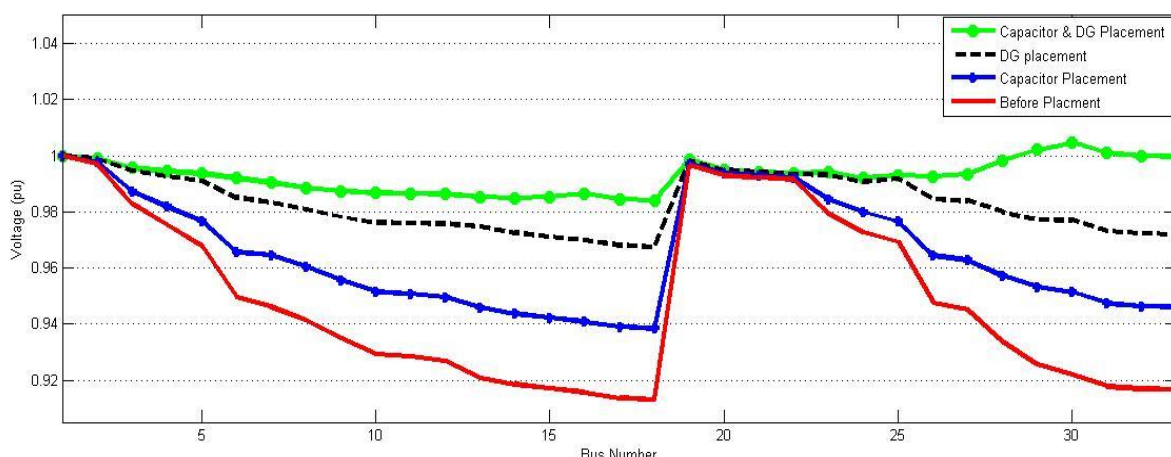
هر یک از پارامترهای شاخص بهبود، از تقسیم مقدار آن پارامتر پس از جایابی به مقدار حالت پایه و مطابق رابطه (۱۰) به دست می‌آیند:

$$f_1 = \frac{ENS}{ENS_{Base}} \text{ و } f_2 = \frac{P_{loss}}{P_{loss_{Base}}} \text{ و } f_3 = \frac{VDI}{VDI_{Base}} \text{ و } f_4 = \frac{SAIFI}{SAIFI_{Base}} \text{ و } f_5 = \frac{SAIDI}{SAIDI_{Base}} \quad (10)$$

که در آن f_1 الی f_5 به ترتیب شاخص‌های مربوط به ENS ، P_{loss} ، VDI ، $SAIFI$ و $SAIDI$ بوده و همچنین k_1 الی k_5 ضرایب وزنی هر شاخص با توجه به میزان اهمیت آن و به ترتیب برابر با $0/2$ ، $0/3$ ، $0/2$ ، $0/15$ و $0/15$ است. پارامتر انحراف ولتاژ (f_3) بیانگر مجموع مقدار انحراف اندازه ولتاژ باس‌ها نسبت به مقدار یک پریونیت بوده و با استفاده از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$VDI = \sum_{i=1}^{NB} |V_i - 1| \quad (11)$$

هر چقدر میزان شاخص بهبود به دست آمده در هر حالت کمتر باشد، بیانگر عملکرد بهتر آن سیستم بوده و به عنوان گزینه بهتر انتخاب می‌گردد. نتایج جایابی بهینه و مقادیر پارامترهای شبکه ۳۳ باسه به همراه میزان بهبود آن‌ها نسبت به حالت پایه، برای سناریوهای مختلف، پس از ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم برای تعداد خازن و DG مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد سناریوی جایابی همزمان خازن و DG نسبت به سناریوهای دیگر دارای کمترین مقدار تابع هزینه، ENS ، P_{loss} ، انحراف ولتاژ و $SAIDI$ می‌باشد. بطوریکه در این سناریو مقدار تابع هزینه $29/77$ درصد، انرژی تامین نشده $14/62$ درصد، تلفات توان $90/54$ درصد، انحراف ولتاژ $86/05$ درصد و $SAIDI$ به میزان $8/33$ درصد نسبت به حالت پایه بهبود پیدا کرده است. میزان بهبود پروفایل ولتاژ در سناریوهای مختلف نسبت به حالت پایه در شکل (۲) نمایش داده شده است. مقادیر مربوط به $ECOST$ ، $SAIFI$ و $SAIDI$ در سناریوی جایابی DG بیشترین کاهش را داشته است. شاخص بهبود $INDEX$ در سناریوی جایابی همزمان خازن و DG دارای کمترین مقدار بوده و بیانگر بهترین گزینه جایابی است.



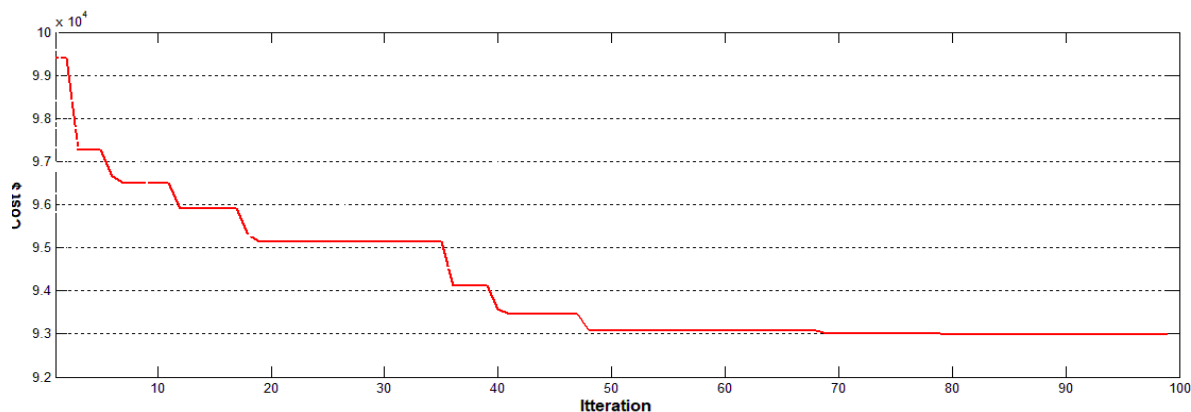
شکل (۲): پروفایل ولتاژ ولتاژ سناریوهای مختلف
Figure (2): Voltage profile of different scenarios

Table (2): Results of 33 bus System Simulation
جدول (۲): نتایج شبیه سازی سیستم ۳۳ باسه

	حالت پایه	جایابی خازن	جایابی DG	جایابی خازن و DG
Capacitor size in Kvar (Bus)	-	۱۵۰ (۵) - ۳۰۰ (۷) - ۳۰۰ (۱۳) ۴۵۰ (۲۴) - ۹۰۰ (۳۰)	-	۳۰۰ (۱۰) - ۱۲۰۰ (۳۰)
DG size in Kw (Bus)	-	-	۷۵۰ (۷) - ۵۰۰ (۱۳) ۷۵۰ (۲۵) - ۱۰۰۰ (۳۰)	۵۰۰ (۱۶) - ۷۵۰ (۲۵) ۱۲۵۰ (۳۰)
TCOST in \$ (% Reduction)	۱۲۸۲۹۰	۱۰۸۶۲۰ (۱۵/۳۳)	۹۷۰۹۲ (۲۴/۳۱)	۹۰۰۹۳ (۲۹/۷۷)
ECOST in \$ (% Reduction)	۸۴۹۴۵	۷۴۷۳۷ (۱۲/۰۲)	۷۴۶۲۹ (۱۲/۱۴)	۷۴۰۵۰ (۱۲/۸۲)
ENS in kwh (% Reduction)	۳۷۷۹۸	۳۲۴۸۸ (۱۴/۰۵)	۳۲۵۳۰ (۱۳/۹۳)	۳۲۲۶۸ (۱۴/۶۲)
P _{Loss} in kw (% Reduction)	۲۱۰/۹۹۵۰	۱۳۰/۷۱ (۳۸/۰۵)	۶۸/۱۹۲ (۶۷/۶۸)	۱۹/۹۵ (۹۰/۵۴)
VDI in p.u (% Reduction)	۱/۸۰۴۵	۱/۱۶۳۲ (۳۵/۵۴)	۰/۵۶۷۷ (۶۸/۵۴)	۰/۲۵۱۶ (۸۶/۰۵)
SAIFI in f/y (% Reduction)	۰/۲۶۰۴	۰/۲۴۱۶ (۷/۲۳)	۰/۲۴۴۴ (۷/۶۷)	۰/۲۳۸۶ (۸/۳۳)
SAIDI in h/y (% Reduction)	۰/۲۴۵۹	۰/۲۰۱۰ (۱۸/۲۷)	۰/۱۹۲۳ (۲۱/۷۹)	۰/۱۹۶۲ (۲۰/۲۱)
INDEX	۱	۰/۷۴۸۴	۰/۵۹۲۰	۰/۴۸۴۱

در هر بار اجرای برنامه، حلقه الگوریتم ۱۰۰۰ مرتبه تکرار می‌گردد و در صورت عدم دستیابی به نتیجه بهتر طی ۲۰۰ مرتبه تکرار حلقه، برنامه متوقف خواهد شد. روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی برای ۱۰۰ تکرار اول در شکل (۳) نشان داده شده است.

به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های ارائه شده در مقالات، مقادیر مربوط به تلفات توان و میزان بهبود آن پس از جایابی و همچنین کمترین مقدار اندازه ولتاژ در سناریوهای مختلف در جداول (۳) و (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در تمامی سناریوها علاوه بر کاهش هزینه اقتصادی TCOST، موجب بهبود مقادیر افت توان و شاخص‌های قابلیت اطمینان شده است.



شکل (۳): روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی
Figure (3): Convergence process of the proposed algorithm

Table (3): Results comparison in different algorithms for scenarios 1,2

جدول (۳): مقایسه نتایج در الگوریتم‌های مختلف برای سناریوهای ۱ و ۲

		SRGSO	WCA[۳۰]	Pso [۴۲,۳۰]	IMDE [۴۲]	FGA [۴۲]	BFOA [۴۲]	Analytical approach [۴۲]
حالت پایه	P _{Loss} (Kw)	۲۱۰/۹۹۵	۲۱۱	۲۱۱	۲۱۱	۲۱۱	۲۱۱	۲۱۱
	V _{min} (p.u.) (Bus No)	۰/۹۰۴ (۱۸)	۰/۹۰۴ (۱۸)	۰/۹۰۴ (۱۸)	۰/۹۰۴ (۱۸)	۰/۹۰۴ (۱۸)	۰/۹۰۴ (۱۸)	۰/۹۰۴ (۱۸)
	TCOST(\$)	۱۲۸۲۹۰	۱۲۸۲۹۰	۱۲۸۲۹۰	۱۲۸۲۹۰	۱۲۸۲۹۰	۱۲۸۲۹۰	۱۲۸۲۹۰
جابایی خازن	Capacitor size in Kvar (Bus)	۱۵۰ (۵) - ۳۰۰ (۷) ۳۰۰ (۱۳) - ۴۵۰ (۲۴) ۹۰۰ (۳۰)	۳۹۷/۳ (۱۴) ۴۵۱/۱ (۲۴) ۱۰۰۰ (۳۰)	۹۰۰ (۲) - ۴۵۰ (۷) ۴۵۰ (۳۱) - ۳۰۰ (۱۵) ۴۵۰ (۲۹)	۴۷۵ (۱۴) ۱۰۳۷ (۳۰)	۹۵۰ (۱۸) ۷۰۰ (۳۰)	۳۵۰ (۱۸) ۸۲۰ (۳۰) ۲۷۷ (۳۳)	۱۰۰۰ (۳۳)
	TCOST(\$)	۱۰۸۶۲۰	۱۰۸۹۹۰	۱۱۱۱۲۰	۱۱۰۲۴۰	۱۵۱۹۵۰	۱۱۶۲۳۰	۱۲۲۲۷۰
	P _{Loss} (Kw)	۱۳۰/۷۱	۱۳۰/۹۱۲	۱۳۲/۴۸	۱۳۹/۷	۱۴۱/۳	۱۴۴/۰۴	۱۶۴/۶
	V _{min} (p.u.) (Bus No)	۰/۹۳۸۴ (۱۸)	۰/۹۵۱ (۱۸)	۰/۹۴۵ (*)	۰/۹۴۲ (۱۸)	۰/۹۲۹ (۱۸)	۰/۹۳۶ (*)	۰/۹۱۶ (۱۸)
	SAIFI (f/y)	۰/۲۴۱۶	۰/۲۴۳۲	۰/۲۴۸۶	۰/۲۵۰۵	۰/۳۳۲۳	۰/۲۶۳۱	۰/۲۸۱۹
	SAIDI (h/y)	۰/۲۰۱۰	۰/۲۰۶۶	۰/۲۰۶۵	۰/۲۱۴۴	۰/۵۹۴۷	۰/۲۵۹۴	۰/۲۹۱۰

Table (4): Results comparison in different algorithms for scenarios 3,4
 جدول (۴): مقایسه نتایج در الگوریتم‌های مختلف برای سناریوهای ۳ و ۴

		SRGSO	WCA[۳۰]	Pso [۴۲و۳۰]	IMDE [۴۲]	FGA [۴۲]	BFOA [۴۲]	Analytical approach [۴۳]
جایابی DG	DG size in Kw (Bus)	۷۵۰ (۷) - ۵۰۰ (۱۳) ۷۵۰ (۲۵) ۱۰۰۰ (۳۰)	۸۵۴/۶ (۱۴) ۱۱۰۱/۷ (۲۴) ۱۱۸۱ (۲۹)	۱۱۷۶/۸ (۸) ۹۸۱/۶ (۱۳) ۸۲۹/۷ (۳۲)	۸۴۰ (۱۴) ۱۱۳۰ (۳۰)	۶۰۰ (۷) ۱۱۰۰ (۳۲)	۶۳۳ (۷) ۹۰ (۱۸) ۹۴۷ (۳۳)	۱۰۰۰ (۱۸)
	TCOST(\$)	۹۷۰۹۲	۹۹۳۵۳	۱۰۴۶۷۰	۱۰۰۷۶۰	۱۰۶۷۸	۱۰۸۷۸۰	۱۲۵۰۷۰
	P _{Loss} (KW)	۶۸/۱۹	۷۱/۰۵۲	۱۰۵/۳۵	۸۴/۲۸	۱۱۹/۷	۹۸/۳	۱۴۲/۳۴
	V _{min} (p.u.) (Bus No)	۰/۹۶۷۴(۱۸)	۰/۹۷۳(۳۳)	۰/۹۸۰(۳۰)	۰/۹۷۱(۳۳)	۰/۹۳۵(۱۸)	۰/۹۶۴(*)	۰/۹۳۱(۳۳)
	SAIFI(f/y)	۰/۲۴۴۴	۰/۲۴۴۶	۰/۲۵۳۴	۰/۲۴۹۲	۰/۲۵۸۶	۰/۲۶۳۵	۰/۲۸۵۶
	SAIDI(h/y)	۰/۱۹۲۳	۰/۲۰۶۳	۰/۲۱۵۱	۰/۲۰۹۱	۰/۲۲۵۱	۰/۲۴۸۴	۰/۳۴۰۳
جایابی خازن و DG	Capacitor size in Kvar (Bus)	۳۰۰ (۱۰) ۱۲۰۰ (۳۰)	۴۶۵ (۲۳) ۵۶۵ (۳۰) ۵۳۵ (۱۱)	۱۴۵۷ (۳۰)	۲۵۴/۸ (۱۶) ۹۳۲/۳ (۳۰)	۶۵۰ (۱۶) ۸۰۰ (۳۳)	۱۶۳ (۱۸) ۵۴۱ (۳۰) ۳۳۸ (۳۳)	۵۰۰ (۳۲) ۴۰۰ (۳۳)
	DG size in Kw (Bus)	۷۵۰ (۲۵) ۵۰۰ (۱۶) ۱۲۵۰ (۳۰)	۹۷۳ (۲۵) ۱۰۴۰ (۲۹) ۵۶۳ (۱۱)	۲۵۱۱ (۶)	۱۰۸۰ (۱۰) ۸۹۶/۴ (۳۱)	۶۰۰ (۷) ۱۱۰۰ (۳۲)	۵۴۲ (۱۷) ۱۶۰ (۱۸) ۸۹۵ (۳۳)	۵۵۹ (۱۷) ۴۴۷ (۱۸)
	TCOST(\$)	۹۰۰۹۳	۹۳۴۷۵۰	۹۹۰۵۸	۹۲۸۶۰	۱۱۰۳۵۰	۱۱۳۴۲۰	۱۱۴۴۲۰
	P _{Loss} (KW)	۱۹,۹۵	۲۴/۶۸	۵۹/۷۰	۳۲/۰۸	۵۹/۵	۴۱/۴۱	۸۴/۲۸
	V _{min} (p.u.) (Bus No)	۰/۹۸۴(۱۸)	۰/۹۸۰(۳۳)	۰/۹۵۵(۱۸)	۰/۹۷۹(۲۵)	۰/۹۶(۱۸)	۰/۹۷۸(*)	۰/۹۶۱(۳۰)
	SAIFI(f/y)	۰/۲۳۸۶	۰/۲۴۳۳	۰/۲۵۳۴	۰/۲۴۵۹	۰/۲۸۷۰	۰/۲۸۸۰	۰/۲۸۵۶
	SAIDI(h/y)	۰/۱۹۶۲	۰/۲۰۳۲	۰/۲۱۸۲	۰/۲۰۲۹	۰/۲۹۴۴	۰/۳۷۷۲	۰/۳۴۰۳

* شماره باس در مقالات مذکور ارائه نشده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گروهی برای جایابی بهینه همزمان خازن و DG در شبکه توزیع ارائه شد. در تابع هدف اقتصادی پیشنهاد شده، هزینه‌های مربوط به تلفات، قابلیت اطمینان شبکه و سرمایه‌گذاری لحاظ شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه تست ۳۳ باسه استاندارد برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد، جایابی همزمان خازن و DG در شبکه توزیع مورد تست، علاوه بر کاهش میزان هزینه، موجب کاهش تلفات و بهبود پروفایل ولتاژ نسبت به حالات جایابی جداگانه خازن و DG و حالت پایه می‌گردد. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از جایابی همزمان خازن و DG بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر روش‌های ارائه شده در مقالات، بهبود یافته است. جایابی بهینه همزمان منابع تولید پراکنده و خازن با استفاده از الگوریتم جستجوی گروهی بهبود یافته تا کنون در مقالات مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده همزمان از پارامتر شاخص بهبود شامل مولفه‌های فنی شبکه در کنار تابع هدف اقتصادی، موجب پرهیز از مطالعه صرفاً فنی یا اقتصادی مساله شده و به مصرف‌کننده این امکان را می‌دهد با در نظر گرفتن میزان اهمیت پارامترهای فنی مورد نظر و با صرف هزینه اضافی، نسبت به انتخاب جایابی تصمیم‌گیری نماید که این مهم نیز در مقالات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است.

References

مراجع

- [1] A. Ansari, F. Haghghatdar-Fesharaki, "Placement of phasor measurement units in power networks and optimal distribution of measurement redundancy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 36, pp. 3-14, Winter 2019 (in Persian).
- [2] M. Mahdavian, N. Behzadfar, "A review of wind energy conversion system and application of various induction generators". vol. 8, no. 4, pp. 55-66, *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, Winter 2020 (in Persian).
- [3] M. Doostan, S. Navaratnan, S. Mohajeryami, V. Cecchi, "Concurrent placement of distributed generation resources and capacitor banks in distribution systems", *Proceeding of the IEEE/NAPS*, pp. 1-6, Denver, CO, USA, Nov. 2016 (doi: 10.1109/NAPS.2016.7747935).
- [4] S. Nawaz, A.K. Bansal, M.P. Sharma, "Allocation of DG and capacitor units for power loss reduction in radial distribution system", *Proceeding of the IEEE/ICRAIE*, pp. 1-6, Jaipur, India, Dec. 2016 (doi:10.1109/ICRAIE.2016.7939475).
- [5] K.S. Sambaiah, "A review on optimal allocation and sizing techniques for DG in distribution systems", *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 8, no. 3, pp.1236-1256, Sept. 2018.
- [6] N. Gnanasekaran, S. Chandramohan, P. SathishKumar, A.M. Imran, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using shark smell optimization algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 907-916, June 2016 (doi:10. 1016/j.asej.2016.01.006).
- [7] R. Baghipour, S. M.Hosseini, "Placement of DG and capacitor for loss reduction, reliability and voltage improvement in distribution networks using BPSO", *I.J. Intelligent Systems and Applications*, vol.12, no.12, pp. 57-64, Nov. 2012 (doi:10.5815/ijisa.2012.12.08).
- [8] A. J. Mena, J. A. M. Garcia, "An efficient approach for the siting and sizing problem of distributed generatio", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 69, pp.167-172, July 2015 (doi: 10. 1016/j.ijepes. 2015.01.011).
- [9] H. Bagheri, M. Shakarami, "Novel fuzzy-iwo method for reconfiguration simultaneous optimal DG units allocation", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, no. 21, pp. 13-20, Spring 2015 (in Persian).
- [10] M. Fooladgar, E. Rokrok, B. Fani, G. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 20, pp. 37-54, Winter 2015 (in Persian).
- [11] C. Wang, M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems", *IEEE Trans.power syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, Nov. 2004 (doi: 10.1109/TPWRS. 2004.836189).
- [12] L. F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin, G. P. Harrison, "Evaluating distributed generation impacts with a multi objective index", *IEEE Trans.power delivery*, vol. 21, no. 3, p.p. 1452-1458, July. 2006, (doi: 10.1109/TPWR-D.2005.860262).
- [13] S. Ganguly, D. Samajpati, "Distributed generation allocation with on-load tap changer on radial distribution networks using adaptive genetic algorithm", *Applied Soft Computing*, vol. 59, pp. 45-67, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.asoc.2017.05.041).
- [14] A. Kaviani-Arani, "Optimal placement and sizing of distributed generation units using Co-Evolutionary particle swarm optimization algorithms", *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 247-256, Feb. 2015 (doi: 10.11591/telkomnika.v13i2.7026).
- [15] N. Mohandas, R. Balamurugan, L. Lakshminarasimman, "Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using ABC algorithm united with chaos", *International journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 66, pp. 41-52, March 2015 (doi: 10.101-6/j.ijepes.2014.10.033).
- [16] CH. Yammani, S. Maheswarapu, M. S. Kumari, "Optimal Placement and sizing of DER's with load models using BAT algorithm", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Springer, vol. 39, no. 6, pp. 4891-4899. June. 2014 (doi: 10.1007/S13369-014-1174-8).
- [17] D. R. Prabha, T. Jayabarathi, "Optimal placement and sizing of multiple distributed generating units in distribution networks by invasive weed optimization algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 683-694, June. 2016 (doi: 10.1016/j.asej.2015.05.014).
- [18] H. B. Tolabi, M. H. Ali, M. Rizwan "Novel hybrid fuzzy-intelligent water drops approach for optimal feeder multi objective reconfiguration by considering Multiple-Distributed generation", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 91-102, Summer and Autumn 2014.

- [19] D. B. Prakash, C. Lakshminarayana, "DG placements in radial distribution system for multi objectives using Whale optimization algorithm", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 2797-2806, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.aej.2017.11.003).
- [20] U. Sultana et al, "Placement and sizing of multiple distributed generation and battery swapping stations using Grasshopper optimizer algorithm", *Energy*, vol. 165, pp. 408-421, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.09.083).
- [21] T. P. Nguyen, D. N. VO, T. T. Tran, "Optimal number, location, and size of distributed generators in distribution systems by symbiotic organism search based method", *Power Engineering and Electrical Engineering*, vol.15, no. 5, pp. 724-735, Jan. 2017 (doi: 10.15598/aeec.v15i5.2355).
- [22] C. H. Chang, "Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by Ant colony search algorithm", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.23, no. 4, pp. 1747-1755, Nov. 2008 (doi: 10.1109/TPWRS.2008.2002169).
- [23] S. Sultana, P. K. Roy, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization", *International journal of Electrical Power and Energy Systems*, pp. 387-398, Jan. 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2013.07.011).
- [24] N. Gnanasekaran, S. Chandramohan, P. S. Kumar, A. M. Imran, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using shark smell optimization algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 907-916, June. 2016 (doi: 10.1016/j.asej.2016.01.006).
- [25] K. R. Devabalaji, T. Yuvaraj, K. Ravi, "An efficient method for solving the optimal sitting and sizing problem of capacitor banks based on cuckoo search algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 589-597, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.asej.2016.04.005).
- [26] G. w. Chang, W. C. Chang, C. S. Chuang, D. Y. Shih, "Fuzzy logic and immune-based algorithm for placement and sizing of shunt capacitor banks in a distorted power network", *IEEE Trans. power delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2145-2153, Oct. 2011 (doi: 10.1109/TPWRD.2011.2167246).
- [27] J. H. D. Onaka et al, "A posteriori decision analysis based on resonance index and NSGA-II applied to the capacitor banks placement problem", *Electric Power Systems Research*, vol.151, pp. 296-307, May. 2017 (doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.041).
- [28] E. R. Biju, M. Anitha, "Placement of DG and capacitor for loss reduction and reliability improvement in radial distribution systems using BFA", *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no 20, pp. 9604-9613, Nov. 2015.
- [29] V. Kona, R. Kollu, "A Multi-Objective approach for DG and capacitor placement using harmony search algorithm", *Proceeding of the IEEE/ICOAC*, pp. 320-325, Chennai, India, Dec. 2017 (doi:10.1109/ICOAC.2017.8441380).
- [30] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A. S. Abbas, "Optimal placement and sizing of distributed generation and capacitor banks in distribution systems using water cycle algorithm", *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3629-3636, Dec. 2018 (doi: 10.1109/JSYST.2018.2796847).
- [31] K. Muthukumar, S. Jayalalitha, "Optimal placement and sizing of distributed generators and shunt capacitors for power loss minimization in radial distribution networks using hybrid heuristic search optimization technique", *International journal Electrical Power and Energy Systems*, pp. 299-319, vol. 78, June. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.019).
- [32] E. A. Almabsout, R. A. EL-Sehiemy, O. N. Ucan, O. Bayat, "A hybrid local Search-Genetic algorithm for simultaneous placement of DG units and shunt capacitors in radial distribution systems", *IEEE Access*, vol.8, pp. 54465-54481, Mar. 2020 (doi:10.1109/ACCESS.2020.2981406).
- [33] S. Kamel, A. Amin, A. Selim, M. H. Ahmed, "Optimal placement of DG and capacitor in radial distribution systems considering load variation", *Proceeding of the IEEE/ICCCEEE*, Khartoum, Sudan, Sept. 2019 (doi: 10.1109/ICCCEEE46830.2019.9071384).
- [34] M. Abbasi, "Optimal capacitor placement to improve distribution network efficiency by considering reliability of capacitors", *Proceeding of the ICEECET Norway*, 1395 (https://www.civilica.com/Paper-ICEECET03-ICEECET03_002.html).
- [35] R. E. Brown, "Electric power distribution reliability", New York. Basel, Marcel Dekker Inc., 2009.
- [36] IEEE 1366-2012, "IEEE Guide for electric power distribution reliability indices IEEE", Power & Energy Society, May.2012.
- [37] J. A. M. Rupa, S. Ganesh, "Power flow analysis for radial distribution system using backward/forward sweep method", *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, no. 10, pp. 1628-1632, 2014.
- [38] A. Zeinalzadeh, Y. Mohammadi, M. H. Moradi, "Optimal multi objective placement and sizing of multiple DGs and shunt capacitor banks simultaneously considering load uncertainty via MOPSO approach", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 336-349, vol. 67, May. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.010).

- [39] S. He, Q. H. Wu, J. R. Saunders, "Group search optimizer :An optimal algorithm inspired by animal searching behavior", IEEE Trans. on Evolutionary Computation, pp. 973-990, vol. 13, no. 5, Oct. 2009 (doi: 10.1109/T-EVC.2009.2011992).
- [40] M. Hasanzadeh, S. Sadeghi, A. Rezvani, M. R. Meybodi, " Success rate group search optimiser", Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, pp. 53-69, no. 5, Nov. 2014 (doi:10.1080/0952813X.2014.971467).
- [41] S. Banerjee, P. K. Ghosh, "Study of loading status for all branches in chronological order at different conditions in a radial distribution systems using reactive loading index technique", Proceeding of the IEEE/PEDES, New Delhi, India, Dec. 2010 (doi: 10.1109/PEDES.2010.5712450).
- [42] A. Khodabakhshian, M. H. Andishgar, "Simultaneous placement and sizing of DGs and shunt capacitors in distribution systems by using IMDE algorithm", Electrical Power and Energy Systems, pp. 599-607, vol. 82, Nov. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.04.002).
- [43] S. Gopiya, D. K. Khatod, M. P. Sharma, "Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks", Electrical Power and Energy Systems, pp. 967-973, vol. 53, Dec. 2013 (doi: 10. 1016/j.ijepes.2013.06.008).

زیر نویس ها:

1. System average interruption frequency index
2. System average interruption duration index
3. Energy not supplied
4. Expected interruption cost
5. Success rate group search algorithm
6. Group search algorithm
7. S. HE
8. Producer
9. Scrounger
10. Ranger