دوره شانزدهم، شماره پاییز و زمستان ۱۴۰۲

مجله فناوری اطلاعات در طراحی مهندسی

Information Technology in Engineering Design

http://ited.sinaweb.net

ارائه یک تابع هدف اقتصادی جهت بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم‌های تولید پراکنده مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی حسابی

سیّدوحید زیارت‌نیا [۱] سیّدعابد حسینی*[۲]

[۱] گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

[۲] گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران*

(تاریخ دریافت :۱۴۰۲/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷)

چکیده

استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده (DG) تأثیرات به سزایی ازجمله افزایش پایداری پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات توان و حل مشکلات مربوط به پایداری ولتاژ دارد. این مقاله به ارائه تابع هدف به‌منظور جایابی و تعیین اندازه بهینه در سیستم‌های DG در راستای بهینه‌سازی چندمنظوره نظیر افزایش پروفیل ولتاژ، کاهش اتلاف توان و صرفه اقتصادی به کمک الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌ساز حسابی (AOA) می‌پردازد. در روش پیشنهادی، برای تعیین محل و اندازه بهینه در سیستم‌های DG از رویکردهای کمترین تلفات و بهبود سطح پروفیل ولتاژ پس از توان تزریقی به سیستم در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع استفاده می‌شود. این پژوهش بر روی یک شبکه ۳۳ گذرگاه IEEE به کمک AOA اجرا شده است و نتایج آن با دو الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌ساز ازدحام ذرات (PSO) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی در زمینه جایابی و تعیین اندازه بهینه در سیستم‌های DG به سبب دارا بودن عملگرهای کارآمد و پارامترهای مناسب نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی اشاره‌شده برتری دارد. به‌عنوان نمونه روش AOA نسبت به PSO و GA به ترتیب ۳۳/۴ و ۳۲/۸ درصد سود بیشتری حاصل کرده است. به‌طور ویژه نتایج نشان می‌دهد AOA از سرعت بالاتر در همگرایی و یافتن مکان بهینه در سیستم‌های DG برخوردار است.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌ساز حسابی، سیستم تولید پراکنده، افزایش پروفیل ولتاژ، تابع هدف

*عهده‌دار مکاتبات:

سیّدعابد حسینی

نشانی: گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

پست الکترونیکی: hosseyni@mshdiau.ac.ir

۱-مقدمه

تعاریفی برای سیستم‌های تولید پراکنده (DG[1]) ارائه شده است، به‌عنوان نمونه یکی از آن‌ها بدین‌صورت است که منابعی با تولید نسبتاً محدود و کم هستند که ازنظر موقعیت مکانی در نزدیکی مصرف‌کننده قرار می‌گیرند. در چند دهه گذشته حضور منابع DG در سیستم‌های قدرت با روند روبه رشدی مواجه شده است [۱و۲]. استفاده از DG در سیستم‌های قدرت تأثیرات به سزایی ازجمله افزایش پایداری ولتاژ، کاهش تلفات توان و حل مشکلات مربوط به پایداری ولتاژ دارد. این تأثیرات به عوامل مختلفی ازجمله ظرفیت سیستم، جایابی محل نصب و عوامل دیگر در شبکه قدرت بستگی دارد [۳و۴].

تاکنون پژوهش‌های متعددی در خصوص مسائل مربوط به DGها انجام گرفته است. فیلیپسون در سال ۲۰۰۰ [۵] جایابی واحدهای DG در شبکه توزیع با اهداف مختلف به‌طور مستمر موردمطالعه قرار داد. هدف می‌تواند کمینه کردن تلفات مؤثر در ساختار سیستم‌های DG باشد. نارا و همکارانش در سال ۲۰۰۱ [۶] و رامیرز روسادو و همکارش در سال ۲۰۰۶ [۷] از الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه[2] برای جایابی بهینه در سیستم‌های DG استفاده کرده‌اند. دوگان و همکارانش در سال ۲۰۰۱ [۸] ایده برنامه‌ریزی برای تجدید ساختار سیستم توزیع با استفاده از DGها را برای شبکه‌های سنتی ارائه دادند. همچنین نشان دادند که این مسئله را چگونه می‌توان به‌صورت جزءبه‌جزء فرمول‌بندی کرد. مندز و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۹] از روش مونت‌کارلو[3] برای ارائه جایابی بهینه در سیستم‌های DG استفاده کردند. حداد و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۱۰] از الگوریتم کولونی زنبورعسل (BOA[4]) برای جایابی بهینه در سیستم‌های DG استفاده کردند و توانستند نتایج بهتری را نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات (PSO[5]) دریافت کنند. فاوزا و همکارانش در سال ۲۰۰۷ [۱۱] از سیستم‌های DG برای مکان‌یابی بهینه به کمک ACO استفاده کردند. فاتیان و همکارانش در سال ۲۰۰۷ [۱۲] از BOA برای جایابی بهینه در سیستم‌های DG استفاده کرده‌اند که روش آن‌ها ازنظر سرعت همگرایی و قابلیت اطمینان به بهبود دست‌یافته است. تنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ [۱۳] از سیستم‌های DG به کمک GA برای کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان در سیستم موردنظر، بهینه‌سازی و بهبود پارامترها و تعیین بهینه مکان و اندازه ظرفیت گذرگاه محاسبه کردند.

داس و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۱۴] از BOA برای بهینه‌سازی سیستم‌های DG، بر اساس نمودارهای ولتاژ-توان استفاده کردند و همچنین از DIgSILENT برای مدل‌سازی و آزمایش استفاده کرده است. آن‌ها بهبود پایداری ولتاژ را برای موارد مختلف نشان دادند. پسران و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۵] یک رویکرد جدید برای تخصیص بهینه هم‌زمان چندین منبع DG با بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از عوامل وزن و شاخص‌های پارامتر معرفی‌شده پیشنهاد نمودند. علاوه بر این، اندازه منابع DG متعدد با مشخص کردن سهم تولید به هر گذرگاه شبکه بهینه شده است. گذرگاه، نوعی اتصال‌دهنده است که برقی را که از فیدرهای ورودی وارد می‌گردد، بین فیدرهای خروجی تقسیم می‌نماید. آن‌ها سه هدف شامل تلفات توان فعال و راکتیو خطوط و انحراف ولتاژ شین در شبکه‌ها را بررسی کردند. آن‌ها جنبه‌های فنی تخصیص منبع DG برای بهینه‌سازی را نیز در نظر گرفته‌اند. بدین منظور آن‌ها از الگوریتم ژنتیک (GA[6]) و PSO به‌صورت ترکیبی روی یک جمعیت استفاده کردند.

[1] Distributed Generation
[2] Tabu search
[3] Monte Carlo
[4] Bee colony Optimization Algorithm
[5] Particle Swarm Optimization
[6] Genetic Algorithm

کاتیارا و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۶] از GA برای قرار دادن مناسب منابع DG در یک سیستم توزیع استفاده نمودند. این رویکرد بر اساس تلفات سیستم، پروفیل‌های ولتاژ و تغییرات پرش زاویه فاز است. لکشمی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۷] از الگوریتم سنجاقک ژنتیکی ترکیبی به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی برای یافتن مکان و اندازه بهینه واحدهای DG استفاده نمودند. الگوریتم آن‌ها بر روی سیستم‌های توزیع ۱۵ و ۶۹ گذرگاه در متلب پیاده‌سازی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با قرارگیری و اندازه مناسب واحدهای منبع DG می‌توان شبکه توزیع را با تلفات توان اکتیو کمتری راه‌اندازی کرد. خنیسی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۸] از الگوریتم‌های فرا ابتکاری نظیر PSO و GA برای مکان‌یابی بهینه سیستم‌های DG برای افزایش سرعت همگرایی، کاهش تلفات توان و بهینه‌سازی مکان DGها استفاده کردند.

العمار و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۹] از الگوریتم ازدحام سالپ[1] چند هدفه برای به دست آوردن مکان‌ها و اندازه بهینه قرارگیری خازن‌ها با در نظر گرفتن دمای محیط استفاده نمودند. توابع هدف یعنی کاهش تلفات توان، بهبود پایداری ولتاژ شین‌های سیستم و کاهش جریان مقاطع به‌عنوان توابع بهینه‌سازی چند هدفه شبیه‌سازی شدند. روش آن‌ها ابتدا از راه‌حل‌های بهینه پارتو برای شناسایی مسئله استفاده کرده است، سپس بهترین راه‌حل‌های بهینه با استفاده از مکانیسم مبتنی بر فازی انتخاب شدند. رامادان و همکارانش در سال ۲۰۲۲ [۲۰] به تعیین رتبه‌بندی و مکان‌یابی منابع DG برای یک تابع چند هدفه شامل حداقل کردن هزینه کل، انتشار کل و ولتاژ کل مورد انتظار پرداختند؛ اهداف آن‌ها شامل انحراف و همچنین بهبود پایداری کل ولتاژ مورد انتظار با در نظر گرفتن عدم قطعیت بارگذاری و توان خروجی است.

خان و همکارانش در سال ۲۰۲۳ [۲۱] اشاره کردند یکی از مشکلات این حوزه، یافتن مکان بهینه واحدهای DG است، زیرا قرارگیری تصادفی آن‌ها ممکن است منجر به ازدحام در مسیرهای خاصی از شبکه انتقال شود. آن‌ها یک شاخص پایداری ولتاژ پیشنهاد کردند که در تابع هدف همراه با کاهش تلفات واقعی و حداقل انحراف ولتاژ گنجانده شده است. روش آن‌ها بر روی یک شبکه ۳۰ گذرگاه آزمایش شده است و برای بهینه‌سازی تابع هدف، از الگوریتم بهینه‌سازی حسابی (AOA[2]) استفاده کردند. شرما و همکارش در سال ۲۰۲۴ [۲۲] الگوریتم بهینه‌سازی خرگوش‌های مصنوعی (ARO[3]) را برای مکان و اندازه بهینه سیستم‌های DG چندگانه در سیستم‌های توزیع شعاعی ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که نتایج ARO پیشنهادی کارآمدتر و زمان محاسباتی کمتری دارد و می‌تواند راه‌حل‌های بهتری را ارائه دهد.

قسمت اعظم تلفات الکتریکی، در شبکه‌های توزیع رخ می‌دهد؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین اهداف طراحان شبکه‌های توزیع کاهش تلفات شبکه‌های توزیع است. یکی از روش‌های کاهش تلفات شبکه توزیع به‌کارگیری منابع DG است؛ ورود DGها به صنعت برق باعث شده است، نیاز نصب فیدرهای جدید را در دوره‌های بعدی کاهش دهد که این مسئله منجر به کاهش هزینه تلفات و حتی باعث آزادسازی ظرفیت شبکه می‌شود. در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع مسئله مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه این منابع برای رسیدن به حداکثر مزایای آن‌ها امری ضروری است، به‌طوری‌که مکان‌یابی نامناسب منابع DG در شبکه باعث افزایش تلفات و بالا رفتن هزینه‌های تولید و انتقال انرژی می‌شود. بنابراین لازم است با روش‌های بهینه‌سازی، مکان و ظرفیت بهینه این منابع در شبکه توزیع تعیین گردد.

در سیستم‌های قدرت، تولید انرژی توسط نیروگاه‌های بزرگ صورت می‌گیرد و معمولاً این سیستم‌ها با رشد ۶ درصدی در سال مواجه هستند، به حدی که در دهه ۱۸۹۰ عواملی منجر به کاهش بار ۳ درصدی در سال شدند. از طرفی در همین بازه زمانی انتقال و توزیع

[1] Salp swarm algorithm
[2] Arithmetic Optimization Algorithm
[3] Artificial Rabbits Optimization

انرژی با افزایش قابل‌توجهی صورت گرفته است. در چند سال گذشته به خاطر افزایش بهره‌برداری در صنعت برق و شرکت‌های خصوصی مطرح در کشورها، تغییراتی از لحاظ مدیریت ایجاد شده است. این تغییرات، مشکلاتی از قبیل آلودگی زیست‌محیطی و در زمینه احداث خطوط انتقال به همراه دارد و به‌مرورزمان سیستم‌ها رو به سیستم‌های تولیدی کوچک در سمت بار تحت عنوان DGها سوق داده است. این سیستم‌ها دیگر نیازی به خطوط انتقال ندارند که این امر باعث مزیت چشم‌گیر در سیستم‌های DG شده است [۲۳و۲۴]. امروزه اکثر فناوری‌ها در زمینه DGها انعطافی در بخش‌هایی نظیر اندازه، عملکرد و قابلیت‌های سیستمی دارد و از طرفی تأثیر زیادی روی هزینه برق دارد. شبکه‌های توزیع شعاعی[1] معمولاً طراحی آن‌ها به صورتی است که در سمت بار هیچ ژنراتوری قرار ندارد؛ بنابراین این امر روی توان جاری و ولتاژ بار تأثیر می‌گذارد [۲۵]. سیستم‌های DG به‌صورت محلی استفاده می‌شوند و نیازی به انتقال انرژی و اتلاف انتقال ندارند که این امر باعث کاهش هزینه انتقال انرژی می‌شود [۲۵].

در دهه‌های اخیر به دلیل پیچیدگی و دشواری روزافزون مسائل دنیای واقعی، نیاز به روش‌های بهینه‌سازی قابل‌اطمینان‌تر نظیر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری شده است. این روش‌ها عمدتاً تصادفی بوده و جواب‌های بهینه را برای مسائل مختلف تخمین می‌زنند. بهینه کردن یک تابع هدف با کمینه یا بیشینه کردن مقدار آن تحقق می‌یابد. برای انجام این پژوهش، ابتدا تابع هزینه‌ای برای سیستم معرفی‌شده که این تابع هزینه نقش مهمی برای شبیه‌سازی و انجام روند بهینه‌سازی دارد. ازاین‌رو در این پژوهش برای طراحی سیستم و تابع هدف در زمینه بهبود پروفیل ولتاژ و عوامل دیگر از AOA استفاده می‌شود که می‌تواند ازنظر اقتصادی، کاهش تلفات و دیگر پارامترها، نسبت به سایر الگوریتم‌ها برتری داشته باشد. این پژوهش بر روی یک سیستم قدرت ۳۳ گذرگاه[2] و برای دوره یک‌ساله پیاده‌سازی شده است. به‌طور خلاصه، نوآوری این پژوهش ارائه تابع هدف به‌منظور جایابی و تعیین اندازه بهینه در سیستم‌های DG در راستای بهینه‌سازی چند هدفه به کمک AOA به‌منظور افزایش پروفیل ولتاژ، کاهش اتلاف توان و صرفه اقتصادی است.

ساختار این پژوهش بدین شرح است که در بخش دوم به مواد و روش‌های پژوهش پرداخته می‌شود، در بخش سوم تحلیل و ارزیابی نتایج پژوهش آورده می‌شود و درنهایت در بخش چهارم به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲- مبانی نظری پژوهش

۲-۱- سیستم‌های تولید پراکنده

سیستم‌های به‌هم‌پیوسته برق، با توجه به صرفه‌جویی‌های مقیاس، تولید انرژی الکتریکی به‌صورت مرکزی و توسط نیروگاه‌های بزرگ صورت می‌گیرد. در سال‌های اولیه پیدایش سیستم‌های به‌هم‌پیوسته، معمولاً سیستم با رشد سالانه حدود ۶ الی ۷ درصدی در مصرف انرژی الکتریکی مواجه است. در دهه ۱۹۷۲ مباحثی از قبیل بحران نفتی و مسائل زیست‌محیطی، مشکلات جدیدی را برای صنعت برق مطرح نموده است، به‌گونه‌ای که در دهه ۱۹۸۲ این عوامل و تغییرات اقتصادی، منجر به کاهش رشد بار به حدود ۱/۶ الی ۳ درصد در سال شد. در همین زمان، هزینه انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نیز به طرز قابل‌توجهی افزایش یافته است، بنابراین تولید مرکزی توسط نیروگاه‌های بزرگ، اغلب به دلیل کاهش رشد بار، افزایش هزینه انتقال و توزیع، حاد شدن مسائل زیست‌محیطی، تغییرات فناوری و قانون‌گذاری‌های مختلف غیرعملی شدند.

در دهه‌های اخیر، تجدید ساختار و خصوصی‌سازی صنعت برق مطرح و در برخی کشورها هم اِعمال گردیده است. طی این مدت، به خاطر بالا بردن بازده بهره‌برداری و تشویق سرمایه‌گذاران، صنعت برق دستخوش تغییرات اساسی از لحاظ مدیریت و مالکیت گردید،

[1] Radial distribution networks
[2] Bus

به‌طوری‌که برای ایجاد فضای رقابتی مناسب، بخش‌های مختلف آن ازجمله تولید، انتقال و توزیع از هم مستقل شدند. در محیط تجدید ساختاریافته صنعت برق، متقاعد نمودن بازیگران بازار به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بزرگ تولید و انتقال توان آسان نیست. این تغییر و تحولات ازیک‌طرف و عواملی همچون آلودگی محیط‌زیست، مشکلات احداث خطوط انتقال جدید و پیشرفت فناوری در زمینه اقتصادی نمودن ساخت واحدهای تولیدی در مقیاس کوچک در مقایسه با واحدهای تولیدی بزرگ از طرف دیگر باعث افزایش استفاده از واحدهای تولیدی کوچک تحت عنوان DGها شده است که به‌طور عمده به شبکه‌های توزیع متصل شده و نیازی به خطوط انتقال ندارند [۲۶-۲۸].

انرژی الکتریکی تولیدی توسط DGها در اکثر کشورهای پیشرفته تحول عظیمی در سیستم‌های تولید و انتقال انرژی به وجود آورده است و تمام نیازها و مزایای پایه تولید و انتقال در موارد فنی، علمی و بازرگانی را برآورده می‌کند. DGها به‌صورت محلی مورداستفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه این تولیدات نزدیک به مراکز مصرف می‌باشند، نیازی به انتقال انرژی الکتریکی خروجی آن‌ها در مسافت‌های طولانی وجود ندارد. هرچه مصرف‌کننده به تولیدکننده نزدیک‌تر باشد، هزینه تأمین انرژی الکتریکی نیز کاهش خواهد یافت [۲۹]. تعاریف مختلفی برای DGها بکار رفته است، یک تعریف آن عبارت است از «منبع انرژی الکتریکی که مستقیماً به شبکه توزیع و یا سمت مصرف‌کننده وصل می‌گردد.» مقادیر نامی این تولیدات متفاوت است، ولی معمولاً ظرفیت تولید آن‌ها از چند کیلووات تا حدود ۱۲ مگاوات (MW) است. این واحدها در پست‌ها و در فیدرهای توزیع، در نزدیکی بارها قرار می‌گیرند. مولدهای DG، صرف‌نظر از نحوه تولید توان آن‌ها، نسبتاً کوچک بوده و ظرفیت آن‌ها معمولاً کوچک‌تر از ۳۲۲ مگاوات بوده و مستقیماً به شبکه توزیع وصل می‌شوند [۳۰و۳۱].

برخی از تعاریف که کشورهای مختلف برای DG ارائه کرده‌اند را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۳۱-۳۳]:

- به‌صورت مرکزی برنامه‌ریزی نشده باشد.
- بهره‌برداری متمرکز نشده باشد.
- معمولاً به شبکه توزیع متصل شده باشد.
- کوچک‌تر از ۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات باشد.

DGها از دید شرکت توزیع و از دید مشترک متفاوت است. در واقع اگر مالک سیستم‌های DG شرکت توزیع باشد، اهداف می‌تواند آزادسازی ظرفیت شبکه توزیع، بهبود قابلیت اطمینان سیستم، تولید هم‌زمان برق و حرارت، بهبود کیفیت توان و پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات باشد. اگر مالکیت DG در اختیار مشترک باشد، اهداف می‌تواند نظیر شرکت در بازار انرژی، فروش برق به‌عنوان سرویس جانبی، بهبود قابلیت اطمینان خود یا تشویق‌های دریافتی از شرکت توزیع باشد. متأسفانه چون مالکیت بیشتر DGها در اختیار مشترکین است، بنابراین شرکت‌های توزیع کنترل کمتری روی اندازه و محل نصب DGها دارند. درنتیجه از تأثیرگذاری منفی DGها بر پارامترهای مختلف سیستم، باید یک استاندارد کلی و جامع برای کنترل، نصب و جایابی این تولیدات وجود داشته باشد [۳۴]. به‌طورکلی هدف از استفاده از منابع DG در شبکه‌های توزیع، تأمین تمام یا قسمتی از توان مصرفی شبکه به‌صورت تمام‌وقت یا پاره‌وقت است که در این میان هدف اصلی تولید توان اکتیو است [۳۰]. به‌کارگیری DGها در سیستم توزیع مزایای زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی بسیار زیادی را به دنبال دارد. برای رسیدن به این مزایا DGها باید دارای اندازه مناسب بوده و در مکان‌های مناسب نصب شوند [۳۵]. به‌طورکلی استفاده از نیروگاه‌های با DG در شبکه قدرت مزایای زیر را به همراه دارد [۳۶].

- کم کردن هزینه مربوط به تجهیزات قدرت

- کاهش تلفات انتقال قدرت
- سهولت امکان بازیافت گرما در این نیروگاه‌ها
- زمان نصب و بهره‌برداری کوتاه این نیروگاه‌ها
- تحقق خصوصی‌سازی واقعی با تبدیل سرمایه‌گذاران بزرگ به سرمایه‌گذاران کوچک
- کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و صوتی نیروگاه‌های بزرگ
- کاهش تلفات با جایابی بهینه نیروگاه‌های DG در شبکه‌های توزیع
- آزاد شدن ظرفیت سیستم‌های انتقال و توزیع اعم از خطوط و پست‌ها
- استفاده بعضی از منابع DG از منابع تجدیدپذیر
- امکان کاربرد مجزا یا متصل به شبکه

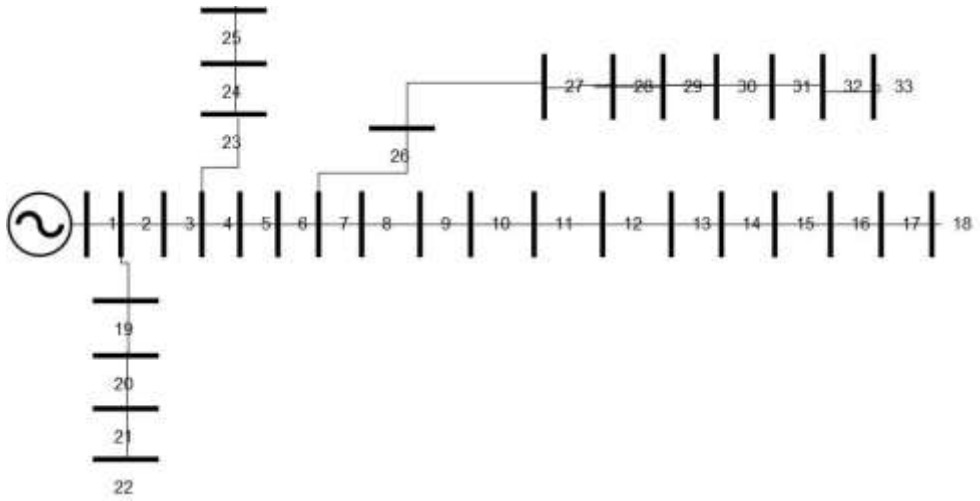
۲-۲- الگوریتم بهینه‌ساز حسابی

AOA یک روش فرا ابتکاری است که از رفتار توزیع عملگرهای اصلی ریاضی استفاده می‌کند. AOA از نظر ریاضی مدل‌سازی شده و برای اجرای فرآیندهای بهینه‌سازی در طیف وسیعی از فضاهای جستجو اجرا شده است. نتایج نشان داده است استفاده از AOA امیدوارکننده است [۳۷]. به‌طورکلی، مسائل دنیای واقعی و بهینه‌سازی دارای محدودیت‌های غیرخطی، پیچیدگی، زمان محاسباتی بالا، فضاهای جستجوی گسترده و غیر محدب را دارا هستند که حل آن‌ها را به چالش می‌کشد [۳۸-۴۰]. یک طبقه‌بندی محبوب از الگوریتم‌های فرا ابتکاری را می‌توان بر اساس الهام از الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم‌های هوش ازدحامی، روش‌های مبتنی بر فیزیک و روش‌های مبتنی بر انسان فرض کرد [۴۱-۴۳].

ازآنجاکه الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت به دنبال یافتن راه‌حل بهینه به‌طور تصادفی هستند، دستیابی به راه‌حل در یک اجرای واحد تضمین نمی‌شود. بنابراین احتمال دستیابی به راه‌حل بهینه برای مسئله با تعداد کافی از راه‌حل‌های تصادفی و تکرارهای بهینه‌سازی افزایش می‌یابد [۴۴].

۳- روش پیشنهادی

پیاده‌سازی این پژوهش بر روی یک شبکه استاندارد ۳۳ گذرگاه انجام‌گرفته و اطلاعات شبکه در جدول ۱ و سیستم توزیع شعاعی آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم توزیع شعاعی یک شبکه ۳۳ گذرگاه استاندارد

با توجه به سیستم‌های DG و تعیین جایابی و اندازه بهینه، لازم است یک تابع هدف برای سیستم تعریف که برای شبکه ۳۳ گذرگاه مراحل زیر پیاده‌سازی می‌شوند. هزینه سرمایه‌گذاری به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$C_{IDG} = \sum_{a=1}^{n} (P_{DG,a} \times IC_{DG}) \quad (۱)$$

که پارامتر C_{IDG} کل هزینه سرمایه‌گذاری DG، $P_{DG,a}$ (برحسب MW) اندازه، n تعداد DGهای نصب‌شده در شبکه و IC_{DG} (برحسب $\frac{\$}{MW}$) نیز هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است. در کنار هزینه‌های سرمایه‌گذاری بایستی هزینه‌های تعمیر و نگهداری به همراه هزینه بهره‌برداری برای DG نیز در نظر گرفته شود که در اینجا به‌صورت رابطه (۲) بیان شده است.

$$C_{OMDG} = \sum_{a=1}^{h} (P_{DG,a} \times OMC_{DG} \times T) \quad (۲)$$

که C_{OMDG} (برحسب $\frac{\$}{MWh}$) مربوط به هزینه نگهداری، بهره‌برداری و تعمیر DG است.T کل تعداد ساعت بهره‌برداری در سال ($T = 8760$) و OMC_{DG} نیز کل هزینه این قسمت است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری در طول سال ثابت بوده، ولی هزینه تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری باگذشت زمان تغییر می‌کند، پس برای واقعی شدن مقادیر هزینه‌ها در هرسال ضرایب بهره و تورم در نظر گرفته می‌شود که طبق رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$PWF(C_{OMDG}) = C_{OMDG} \times \sum_{y=1}^{p} ((1 + InfR)/(1 + IntR))^{y} \quad (۳)$$

که PWF به‌عنوان ارزش فعلی سالانه، $IntR$ و $InfR$ به ترتیب نرخ تورم و نرخ بهره و p تعداد سال‌های دوره موردمطالعه است. پس از نصب DG در سیستم به‌واسطه کاهش تلفات در سیستم هزینه خرید برق از شبکه بالادست کاهش می‌یابد. ازاین‌رو مزیت حاصل از نصب DGها توسط روابط (۴) و (۵) بیان می‌شود.

$$CP^{without\ DG} = K_{SS} \times \left(P_S^{without\ DG} + P_L^{without\ DG}\right) \times T \quad (۴)$$

$$CP^{with\ DG} = K_{SS} \times \left(P_S^{with\ DG} + P_L^{with\ DG}\right) \times T \quad (۵)$$

که پارامتر $CP^{without\ DG}$ بیانگر تلفات انرژی است زمانی که نصب DG در سیستم صورت نگرفته باشد.K_{SS} هزینه خرید برق از شبکه و $P_S^{without\ DG}$ توان تحویلی به شبکه بدون نصب DG و $P_L^{without\ DG}$ نیز تلفات شبکه بدون نصب DG است. پارامترهای رابطه (۵) نیز مشابه رابطه (۴) بوده، با این تفاوت که نصب DG در سیستم انجام شده باشد. بنابراین پس از نصب DG در شبکه،

جدول ۱: اطلاعات شبکه ۳۳ گذرگاه استاندارد IEEE

توان راکتیو (کیلووار)	توان اکتیو (کیلووات)	راکتانس (اهم)	مقاومت (اهم)	گذرگاه گیرنده	گذرگاه فرستنده
۶۰	۱۰۰	۰/۰۴۷۰	۰/۰۹۲۲	۲	۱
۴۰	۹۰	۰/۲۵۱۱	۰/۴۹۳۰	۳	۲
۸۰	۱۲۰	۰/۱۸۶۴	۰/۳۶۳۰	۴	۳
۳۰	۶۰	۰/۱۹۴۱	۰/۳۸۱۱	۵	۴
۲۰	۶۰	۰/۷۰۷۰	۰/۸۱۹۰	۶	۵
۱۰۰	۲۰۰	۰/۶۱۸۸	۰/۱۸۷۲	۷	۶
۱۰۰	۲۰۰	۰/۲۳۵۱	۰/۷۱۱۴	۸	۷
۲۰	۶۰	۰/۷۴۰۰	۰/۰۳۰۰	۹	۸
۲۰	۶۰	۰/۷۴۰۰	۰/۰۴۴۰	۱۰	۹
۳۰	۴۵	۰/۰۶۵۰	۰/۱۹۶۶	۱۱	۱۰
۳۵	۶۰	۰/۱۲۳۸	۰/۳۷۴۴	۱۲	۱۱
۳۵	۶۰	۱/۱۵۵۰	۱/۴۶۸۰	۱۳	۱۲
۸۰	۱۲۰	۰/۷۱۲۹	۰/۵۴۱۶	۱۴	۱۳
۱۰	۶۰	۰/۵۲۶۰	۰/۵۹۱۰	۱۵	۱۴
۲۰	۶۰	۰/۵۴۲۰	۰/۷۴۶۳	۱۶	۱۵
۲۰	۶۰	۱/۷۲۱۰	۱/۲۸۹۰	۱۷	۱۶
۴۰	۹۰	۰/۵۷۴۰	۰/۷۳۲۰	۱۸	۱۷
۴۰	۹۰	۰/۱۵۶۵	۰/۱۶۴۰	۱۹	۱۸
۴۰	۹۰	۱/۳۵۵۴	۱/۵۰۴۲	۲۰	۱۹
۴۰	۹۰	۰/۴۷۸۴	۰/۴۰۹۵	۲۱	۲۰
۴۰	۹۰	۰/۹۳۷۳	۰/۷۰۸۹	۲۲	۲۱
۵۰	۹۰	۰/۳۰۸۳	۰/۴۵۱۲	۲۳	۲۲
۲۰۰	۴۲۰	۰/۷۰۹۰	۰/۸۹۸۰	۲۴	۲۳
۲۰۰	۴۲۰	۰/۷۰۱۱	۰/۸۹۶۰	۲۵	۲۴
۲۵	۶۰	۰/۱۰۳۴	۰/۲۰۳۰	۲۶	۲۵
۲۵	۶۰	۰/۱۴۴۷	۰/۲۸۴۲	۲۷	۲۶
۲۰	۶۰	۰/۹۳۳۷	۱/۰۵۹۰	۲۸	۲۷
۷۰	۱۲۰	۰/۷۰۰۶	۰/۸۰۴۲	۲۹	۲۸
۶۰۰	۲۰۰	۰/۲۵۸۵	۰/۵۰۷۵	۳۰	۲۹
۷۰	۱۵۰	۰/۹۶۳۰	۰/۹۷۴۴	۳۱	۳۰
۱۰۰	۲۱۰	۰/۳۶۱۹	۰/۳۱۰۵	۳۲	۳۱
۴۰	۶۰	۰/۵۳۰۲	۰/۳۴۱۰	۳۳	۳۲

مزیت وتوان تحویلی به شبکه و درآمد حاصل از این کار که به‌واسطه کاهش تلفات انرژی به دست می‌آید، مطابق روابط (۶) و (۷) بدست می‌آید.

$$CB = CP^{without\ DG} - CP^{with\ DG} \quad (۶)$$

$$PWF(CB) = CB \times \sum_{y=1}^{p}((1+InfR)/(1+IntR))^{y} \quad (۷)$$

درنهایت تابع هدف نهایی که سود حاصل از انجام جایابی بهینه است، مطابق روابط (۸) و (۹) بیان می‌شود.

$$Cost = C_{IDG} + \mathrm{PWF}(C_{OMDG}) \quad (۸)$$

$$Total_{benefit} = PWF(CB) - Cost \quad (۹)$$

از طرفی برای تابع هدف موردنظر مقادیر ثابتی در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲: پارامترهای ثابت برای تابع هدف سیستم

هزینه خرید برق از شبکه (برحسب مگاوات)	کل هزینه (برحسب مگاوات)	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	تعداد دوره (سال)	نرخ تورم (درصد)	نرخ بهره (درصد)
۴۹	۳۶	۳۱۸۰۰۰	۱۰	۱۲.۵	۹

برای اجرا و پیاده‌سازی باید قیدهایی ازجمله قید سیستم‌های DG و سطوح ولتاژ مطابق رابطه (۱۰) در نظر گرفته شود.

$$p_{ss}(i,v) = \sum_{i=2}^{nb} P_D(i,v) + \sum_{i=2}^{nl} P_{LOSS}(j,v) - \sum_{i=2}^{ndg} P_{DG}(k,v) \quad (۱۰)$$

که P_D توان حقیقی سیستم که (برحسب MW) و P_{LOSS} توان تلفاتی سیستم (برحسب MW) و P_{DG} توان حقیقی سیستم DG است و درنهایت ndg شماره DG در سیستم موردنظر است. توان DG باید در یک شرط نامساوی بین حداکثر و حداقل مقدار خود مطابق رابطه (۱۱) قرار گیرد.

$$p_{DG}^{min} \le P_{DG} \le p_{DG}^{max} \quad (۱۱)$$
$$q_{DG}^{normal} = 0$$

در شبکهٔ توزیع دامنهٔ ولتاژ گذرگاه‌ها باید در محدودهٔ پذیرفته‌شده مطابق رابطه (۱۲) حفظ شود.

$$v_i^{min} \le v_i \le v_i^{max} \quad (۱۲)$$

که v_i^{min} و v_i^{max} به ترتیب کمینه و بیشینه دامنه ولتاژ پذیرفته‌شده برای گره‌های شبکه‌اند و v_i نیز دامنهٔ ولتاژ گره i ام شبکه است. مسائل بهینه‌سازی باید به‌گونه‌ای حل شوند که معادلات پخش بار به‌دست‌آمده در رابطه (۱۳) برقرار باشند.

$$P_i = \sum_{i=1}^{N_{Bus}} V_i V_j Y_{ij} cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (۱۳)$$
$$Q_i = \sum_{i=1}^{N_{Bus}} V_i V_j Y_{ij} sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

که P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به گذرگاه i ام شبکه‌اند، V_i و δ_i به ترتیب دامنه و زاویهٔ ولتاژ گره i ام هستند. Y_{ij} و δ_i نیز به ترتیب دامنه و زاویهٔ ادمیتانس بین گره‌های iام و jام شبکه است.

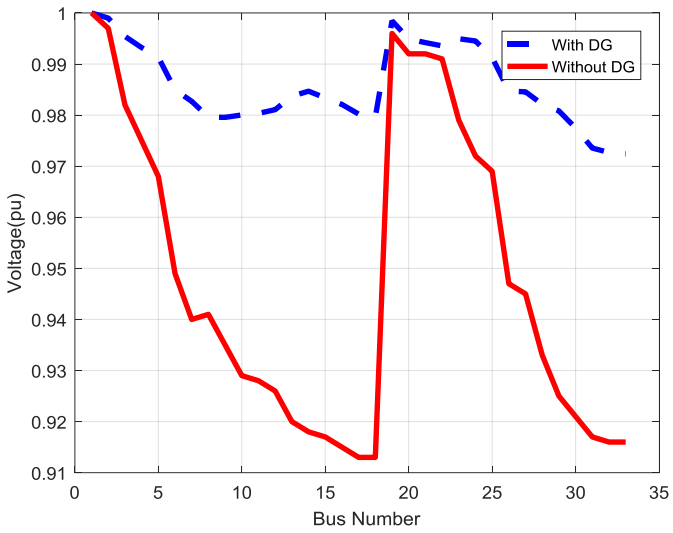
۴- تحلیل و ارزیابی نتایج

این سیستم با تابع هدف تعریف‌شده در بخش قبل به کمک AOA در نرم‌افزار متلب برای سیستم ۳۳ گذرگاه پیاده‌سازی شده و نتایج زیر به دست می‌آید. پارامترهای AOA برای شبیه‌سازی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: پارامترهای اولیه AOA

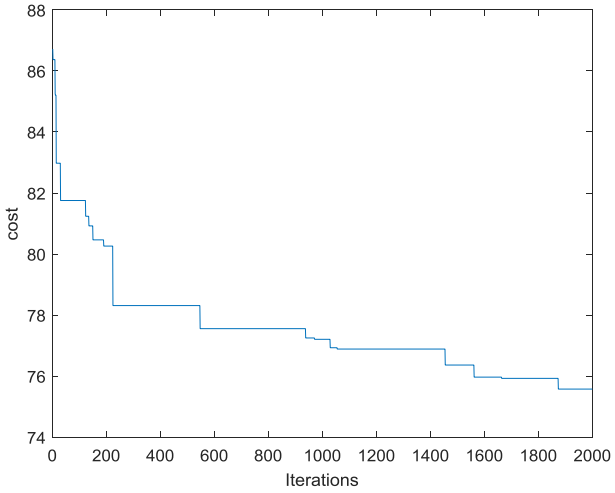
	μ	α	MOP_Min	MOP_Max	nPop	بیشینه تعداد تکرار	کران پائین	کران بالا
AOA	۰/۴۹۹	۵	۰/۱۵	۱	۱۰۰	۲۰۰۰	۰	۱

شکل ۲ موقعیت بهینه و پایداری ولتاژ را بدون DG و با DG با استفاده از AOA نشان می‌دهد.



شکل ۲: مکان بهینه و پایداری ولتاژ بدون DG و با DG با استفاده از AOA

تابع هزینه DG برحسب تعداد تکرار توسط AOA در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: بررسی تابع هزینه DG برحسب تعداد تکرار توسط AOA

۴-۱- مقایسه AOA با GA و PSO

در این بخش برای مقایسه نتایج با AOA، این سیستم با استفاده از PSO در همان تابع هدف و شرایط یکسان پیاده‌سازی میشود. پارامترهای اساسی PSO در جدول ۴ تعریف شده است.

جدول ۴: پارامترهای اولیه برای PSO

	Phi 1	Phi 2	nPop	بیشینه تعداد تکرار	کران پایین	کران بالا
PSO	۲.۷۵	۲.۷۵	۱۰۰	۲۰۰۰	۰	۱

برای مقایسه نتایج با AOA، همچنین این سیستم با استفاده از GA در همان تابع هدف و شرایط پیاده‌سازی می‌شود. پارامترهای اساسی سیستم در جدول ۵ تعریف شده است.

جدول ۵: پارامترهای اولیه GA

	اندازه تورنومنت	Mutation Rate	احتمال جهش	Extra Range Factor for Crossover	احتمال تقاطع	اندازه جمعیت	کران پایین	کران بالا
GA	۳	۰/۱	۰/۳	۰/۴	۰/۷	۵۰	۰	۱

۴-۲- ارزیابی کارآمدی اقتصادی تابع هدف

در جدول ۶ بررسی AOA با دو روش GA و PSO برای جایابی و تعیین مکان بهینه در سیستم‌های DG در نظر گرفته شده است.

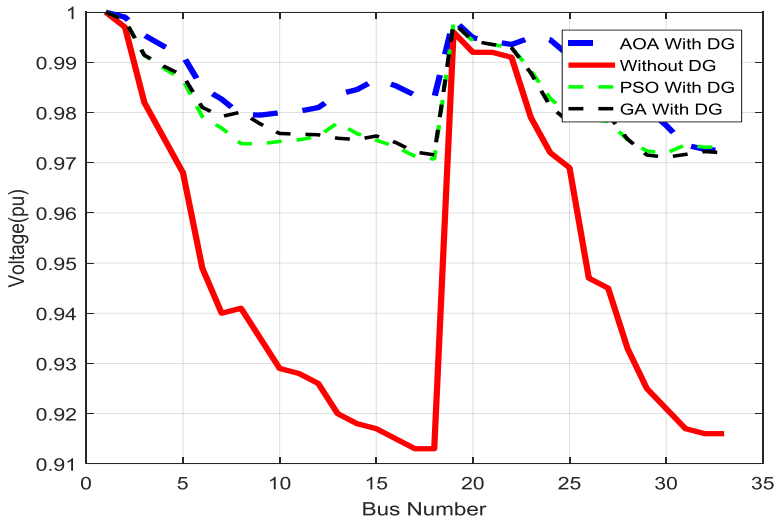
جدول ۶: مقایسه سه الگوریتم AOA، GA و PSO

الگوریتم	کاهش تلفات	سود	هزینه	درآمد	تلفات توان
GA	۶۱/۵۱۹۱	۶۹۲۲۴۳/۲۲۱	۳۸۰۰۶۵۵/۶۷۳۶	۴۴۹۲۸۹۸/۸۹۴۶	۸۱/۱۹۴۷
PSO	۶۰/۷۸۳۲	۶۸۹۱۹۶/۵۱۲۲	۳۸۰۰۶۵۵/۶۷۳۶	۴۴۸۹۵۲/۱۸۵۸	۸۲/۷۴۷۵
AOA	**۶۳/۵۷۸۰**	**۹۱۹۵۳۶/۸۳۱۸**	**۵۷۰۰۹۸۳/۵۱۰۴**	**۶۶۲۰۵۲۰/۳۴۲۲**	**۷۶/۸۵۰۴**

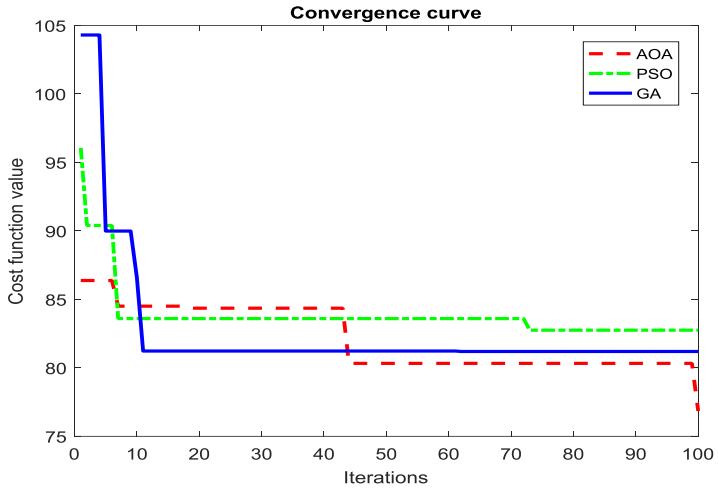
در جدول ۶ همان‌طور که مشاهده می‌شود سود حاصل از اجرا این پروژه با AOA در مقایسه با دو الگوریتم PSO و GA بیشتر است. البته تنها افزایش سود نیست بلکه در شاخص‌های موردنظر بهبود صورت گرفته است.

۴-۳- ارزیابی بهبود پروفیل ولتاژ تابع هدف و جایابی بهینه

در این بخش ارزیابی و سنجش پژوهش بر اساس جایابی بهینه و بهبود پروفیل ولتاژ در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ سیستم هدف را تحت شرایط مشابه با الگوریتم‌های PSO و GA نشان می‌دهد. تصویر به چهار بخش تقسیم می‌شود که اولین بخش شامل خطوط قرمز است که سیستم را بدون در نظر گرفتن DG نشان می‌دهد. در تصویر مشاهده می‌کنید که سطح پروفیل ولتاژ در مقایسه با حضور سیستم‌های DG به‌طور قابل‌توجهی کمتر است. بااین‌حال، افت پروفیل ولتاژ بین گذرگاه‌های ۱۵ و ۲۰ به‌طور قابل‌توجهی کاهش‌یافته است. در بخش‌های بعدی سیستم، با DG با شبیه‌سازی‌شده است. خطوط سبز و سیاه به ترتیب مربوط به PSO و GA می‌دهد و خطوط آبی مربوط به AOA هستند که مطابق شکل ۴، AOA بهترین سطوح پروفیل ولتاژ را نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. در شکل ۵ تابع هزینه بر اساس تعداد دفعات تکرار رسم شده است و سه الگوریتم یکدیگر مقایسه شده‌اند، همان‌طور که مشاهده می‌کنید AOA که با خطوط قرمزرنگ نمایش داده‌شده، از شروع لحظه همگرایی تابع هزینه بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها ارائه داده است، درنتیجه برتری AOA در بهبود تابع هزینه و بهبود پروفیل ولتاژ قابل‌مشاهده است.



شکل ۴: بررسی سه الگوریتم AOA، PSO و GA برای پارامترهای تابع هدف موردنظر



شکل ۵: بررسی تابع هزینه برحسب دفعات تکرار توسط DG به‌واسطه سه الگوریتم AOA، PSO و GA

در جدول ۷ جایابی بهینه برای AOA، GA و PSO شبیه‌سازی شده است، همان‌طور که در GA مشاهده می‌کنید جایابی در۴ گذرگاه انجام‌شده و توان‌های اکتیو و راکتیو تلفاتی آن بیان شده است. همین کار برای PSO هم اتفاق افتاده است، ولی بهینه‌سازی کامل برای جایابی و توان در AOA مشاهده می‌شود.

جدول ۷: نتایج مقایسه سه الگوریتم AOA، GA و PSO ازنظر جایابی بهینه

GA	**P-DG**	۷۲۰	۱۸۰	۵۴۰	۷۲۰	**P-loss**	**Q-loss**
	Bus-No	۳۲	۳۰	۱۵	۸	۸۱/۱۹۴۷	۵۵/۴۶۷۷

AOA	**P-DG**	۱۲۶۰	۱۰۸۰	۹۰۰		**P-loss**	**Q-loss**
	Bus-No	۲۹	۲۴	۱۵		۷۶/۸۵۰۴	۵۴/۰۸۰۸

PSO	**P-DG**	۹۰۰	۱۸۰	۱۸۰	۷۲۰	۱۸۰	**P-loss**	**Q-loss**

	Bus-No	۱۳	۲۴	۲۹	۳۱	۳۳	۸۲/۷۴۷۵	۵۶/۸۵۹۱

به طور خلاصه سیستم‌های DG نقش به سزایی در سیستم‌های قدرت دارند و از طرفی پیاده‌سازی سیستم DG توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری مزایای زیادی در زمینه اقتصادی، پایداری سیستم و قابلیت اطمینان دارند. معرفی یک تابع هدف اقتصادی در این پژوهش و پیاده‌سازی آن به کمک AOA می‌تواند نتایج خوبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها ارائه دهد. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود پیاده‌سازی سیستم موردنظر ازنظر توان تلفاتی، تابع هزینه و سود حاصل از نصب سیستم DG به‌مراتب بهتر از GA و PSO است.

۵- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

این مقاله یک تابع هدف را برای یک شبکه قدرت متشکل از ۳۳ گذرگاه پیشنهاد می‌کند. سیستم‌های DG نقش مهمی در سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند. از سوی دیگر پیاده‌سازی سیستم DG توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری مزایای زیادی ازنظر اقتصادی، پایداری سیستم و قابلیت اطمینان دارد. در اینجا، هدف اصلی طراحی یک تابع هدف جدید برای DG است. بدین منظور از AOA برای مکان‌یابی و تعیین مکان بهینه در سیستم‌های DG در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، مواردی مانند تلفات توان، هزینه، سود و جایابی در گذرگاه‌ها حاصل از نصب DG با استفاده از AOA عملکرد بهتری نسبت به GA و PSO نشان داده است. در کارهای آینده می‌توان با ارائه تابع هدف دیگر یا استفاده از سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری به شرایط پایداری قوی‌تر و کارایی اقتصادی دست‌یافت. همچنین در آینده این سیستم را می‌توان برای شبکه‌های قدرت با پیکربندی گذرگاه‌های مختلف و الگوریتم‌های مختلف برای بهبود پارامترها به‌طور هم‌زمان استفاده کرد.

مراجع

[1] Y. Zhou, L. Wang, and J.D. McCalley, "Designing effective and efficient incentive policies for renewable energy in generation expansion planning," *Appl. Energy*, Vol. 88, No. 6, pp. 2201-2209, June 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.022.

[2] H.L. Lam, P.S. Varbanov, and J.J. Klemeš, "Regional renewable energy and resource planning," *Appl. Energy*, Vol. 88, No. 2, pp. 545-550, February 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.05.019.

[3] M. Manfren, P. Caputo, and G. Costa, "Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models," *Applied Energy*. Vol. 88, No. 4, pp. 1032-1048, April 2011. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.018.

[4] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, and F. Pilo, "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 2, pp. 750-757, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846219.

[5] L. Philipson, "Distributed and dispersed generation: Addressing the spectrum of consumer needs," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, USA, February 2000. doi: 10.1109/pess.2000.868778.

[6] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, and T. Ashizawa, "Application of tabu search to optimal placement of distributed generators," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, USA, 2001. doi: 10.1109/pesw.2001.916995.

[7] I.J. Ramirez-Rosado and J.A. Dominguez-Navarro, "New multiobjective Tabu search

algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 21, No. 1, pp. 224-233, February 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2005.860946.

[8] R.C. Dugan, T.E. McDermott, and G.J. Ball, "Planning for distributed generation," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, Vol. 7, No. 2, pp. 80-88, March-April 2001, doi: 10.1109/2943.911193.

[9] V.H. Méndez, J. Rivier, J.I. de la Fuente, T. Gómez, J. Arceluz, J. Marín, and A. Madurga, "Impact of distributed generation on distribution investment deferral," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 28, No. 4, pp. 244-252, May 2006, doi: 10.1016/j.ijepes.2005.11.016.

[10] O.B. Haddad, A. Afshar, and M. A. Mariño, "Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization," *Water Resour. Manag.*, Vol. 20, pp. 661–680, 2006, doi: 10.1007/s11269-005-9001-3.

[11] S. Favuzza, G. Graditi, M.G. Ippolito, and E.R. Sanseverino, "Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas micro turbines by dynamic ant colony search algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, No. 2, pp. 580-587, May 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.894861.

[12] M. Fathian, B. Amiri, and A. Maroosi, "Application of honey-bee mating optimization algorithm on clustering," *Appl. Math. Comput.*, Vol. 190, No. 2, pp. 1502-1513, July 2007, doi: 10.1016/j.amc.2007.02.029.

[13] J.H. Teng, Y.H. Liu, C.Y. Chen, and C.F. Chen, "Value-based distributed generator placements for service quality improvements," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 29, No. 3, pp. 268-274, March 2007, doi: 10.1016/j.ijepes.2006.07.008.

[14] C.K. Das, O. Bass, T.S. Mahmoud, G. Kothapalli, M.A.S. Masoum, and N. Mousavi, "An optimal allocation and sizing strategy of distributed energy storage systems to improve performance of distribution networks," *J. Energy Storage*, Vol. 26, p. 100847, December 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100847.

[15] M. Pesaran H.A., M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, and H. Seyedi, "A hybrid genetic particle swarm optimization for distributed generation allocation in power distribution networks," *Energy*, Vol. 209, p. 118218, October 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118218.

[16] S. Katyara, M.F. Shaikh, S. Shaikh, Z.H. Khand, L. Staszewski, V. Bhan, A. Majeed, M. Ali Shah, and L. Zbigniew, "Leveraging a genetic algorithm for the optimal placement of distributed generation and the need for energy management strategies using a fuzzy inference system," *Electron.*, Vol. 10, No. 2, p. 172, 2021, doi: 10.3390/electronics10020172.

[17] G.V.N. Lakshmi, A. Jayalaxmi, and V. Veeramsetty, "Optimal Placement of Distribution Generation in Radial Distribution System Using Hybrid Genetic Dragonfly Algorithm," *Technol. Econ. Smart Grids Sustain. Energy*, Vol. 6, No. 9, 2021, doi: 10.1007/s40866-021-00107-w.

[18] I. Khenissi, R. Sellami, M.A. Fakhfakh, and R. Neji, "Power Loss Minimization Using Optimal Placement and Sizing of Photovoltaic Distributed Generation Under Daily Load Consumption Profile with PSO and GA Algorithms," *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, Vol. 32, pp.1317–1331, 2021, doi: 10.1007/s40313-021-00744-7.

[19] E.A. Al-Ammar *et al.*, "Comprehensive impact analysis of ambient temperature on multi-

objective capacitor placements in a radial distribution system," *Ain Shams Eng. J.*, Vol. 12, No. 1, pp. 717-727, March 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.05.003.

[20] A. Ramadan, M. Ebeed, S. Kamel, E.M. Ahmed, and M. Tostado-Véliz, "Optimal allocation of renewable DGs using artificial hummingbird algorithm under uncertainty conditions," *Ain Shams Eng. J.*, Vol. 14, No. 2, p. 101872, March 2023, doi: 10.1016/j.asej.2022.101872.

[21] M. T.Khan, P. Singh, A. Chauhan, R. Arya, A. Verma, L.S. Titare, and S.C. Choube, "Optimal placement of multiple distributed generators using a novel voltage stability indicator employing arithmetic optimization algorithm" Computers and Electrical Engineering, Vol. 110, p. 108853, September 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.108853.

[22] R.K. Sharma, and B.K. Naick, "A Novel Artificial Rabbits Optimization Algorithm for Optimal Location and Sizing of Multiple Distributed Generation in Radial Distribution Systems" *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-32, 2024, doi: 10.1007/s13369-023-08559-1.

[23] H. Zareipour, K. Bhattacharya, and C. Canizares, "Distributed Generation: Current Status and Challenges," 2004.

[24] V. Niemeyer, "Understanding Electric Utilities and Deregulation, Second Edition [Book Review]," *IEEE Power Energy Mag.*, Vol. 5, No. 1, pp. 64-67, Jan.-Feb. 2007, doi: 10.1109/mpae.2007.264871.

[25] E. Marmolejo, C. Duque, M.T. Torres, G. Ramos, and A. Torres, "Analysis of the prospects for Distributed Generation (DG) for Colombian Electric Power Sector," *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, October 2004. doi: 10.1109/psce.2004.1397530.

[26] U. Sultana, A.B. Khairuddin, M.M. Aman, A.S. Mokhtar, and N. Zareen, "A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage stability enhancement of distribution system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*., Vol. 63, pp. 363-378, September 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.056.

[27] N.F. Napis, A.F.A. Kadir, T. Khatib, E. E. Hassan, and M. F. Sulaima, "An improved method for reconfiguring and optimizing electrical active distribution network using evolutionary particle swarm optimization," *Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 5, p. 804, 2018, doi: 10.3390/app8050804.

[28] F. Yaprakdal, M. Baysal, and A. Anvari-Moghaddam, "Optimal operational scheduling of reconfigurable microgrids in presence of renewable energy sources," *Energies*, Vol. 12, No. 10, p. 1858, 2019, doi: 10.3390/en12101858.

[29] M.M. Aman, G.B. Jasmon, H. Mokhlis, and A.H.A. Bakar, "Optimal placement and sizing of a DG based on a new power stability index and line losses," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 43, No. 1, pp. 1296-1304, December 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.05.053.

[30] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25, No. 1, pp. 360-370, February 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2030276.

[31] N. Khalesi, N. Rezaei, and M.R. Haghifam, "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 33, No. 2, pp. 288-295, February 2011, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.08.024.

[32] S. Ganguly and D. Samajpati, "Distributed generation allocation with on-load tap changer on radial distribution networks using adaptive genetic algorithm," *Appl. Soft Comput. J.*, Vol. 59, pp. 45-67, October 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2017.05.041.

[33] A.M. El-Zonkoly, "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization," *Swarm Evol. Comput.*, Vol. 1, No. 1, pp. 50-59, March 2011, doi: 10.1016/j.swevo.2011.02.003.

[34] S. Kaur, G. Kumbhar, and J. Sharma, "A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 63, pp. 609-617, December 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.023.

[35] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, "Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 53, pp. 752-760, December 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.05.040.

[36] H. HassanzadehFard and A. Jalilian, "Optimal sizing and location of renewable energy based DG units in distribution systems considering load growth," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 101, pp. 356-370, October 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.03.038.

[37] L. Abualigah, A. Diabat, S. Mirjalili, M. Abd Elaziz, and A.H. Gandomi, "The Arithmetic Optimization Algorithm," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 376, p. 113609, April 2021, doi: 10.1016/j.cma.2020.113609.

[38] M. Alshinwan, L. Abualigah, M. Shehab, *et al.*, "Dragonfly algorithm: a comprehensive survey of its results, variants, and applications," *Multimed. Tools Appl.*, Vol. 80, pp. 14979–15016, 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10255-3.

[39] V.V. de Melo and W. Banzhaf, "Drone Squadron Optimization: a novel self-adaptive algorithm for global numerical optimization," *Neural Comput. Appl.*, Vol. 30, pp. 3117–3144, 2018, doi: 10.1007/s00521-017-2881-3.

[40] L. Abualigah, "Group search optimizer: a nature-inspired meta-heuristic optimization algorithm with its results, variants, and applications," *Neural Computing and Applications*. Vol. 33, pp. 2949–2972, 2021. doi: 10.1007/s00521-020-05107-y.

[41] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, and S. Mirjalili, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," *Knowledge-Based Syst.*, Vol. 191, p. 105190, March 2020, doi: 10.1016/j.knosys.2019.105190.

[42] A. Sadollah, H. Sayyaadi, D.G. Yoo, H.M. Lee, and J.H. Kim, "Mine blast harmony search: A new hybrid optimization method for improving exploration and exploitation capabilities," *Appl. Soft Comput. J.*, Vol. 68, pp. 548-564, July 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2018.04.010.

[43] S. Gholizadeh, M. Danesh, and C. Gheyratmand, "A new Newton metaheuristic algorithm for discrete performance-based design optimization of steel moment frames," *Comput. Struct.*, Vol. 234, p. 106250, July 2020, doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106250.

[44] S. Mirjalili, "SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-Based Syst.*, Vol. 96, pp. 120-133, March 2016, doi: 10.1016/j.knosys.2015.12.022.