کاربرد الگوریتم جستجوی گرانشی در جایابی بهینه منابع تولید پراکنده برای کاهش هزینه انرژی بازار برق تجدید ساختار یافته

علی قاسمی[۱و*]، هادی آفاق زاده[۲]، علی یوسفی[۲] ، رضا بازیار[۳و۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۸۹/۷/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۸۹/۱۲/۱۲

چکیده:

در این مقاله به بررسی تاثیر منابع تولید پراکنده (DG) بر قیمت انرژی در بازار برق تجدید ساختار یافته می‌پردازیم. تراکم خطوط سیستم از مهمترین عوامل محدود کننده رقابت و افزایش هزینه تمام شده انرژی در بازار برق تجدید ساختار یافته می‌باشد، که استفاده بهینه از DG در مدیریت تراکم و کاهش هزینه سیستم می‌تواند راهگشا باشد. بنابراین در این مقاله جهت جایابی بهینه DG برپایه پخش توان بهینه، روشی نوین بر اساس قیمت حاشیه‌ای محلی با عنوان شاخص هزینه سیستم (SCI) ارایه شده است. مکان‌های مطلوب برای جایابی DG براساس قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP) تعیین شده که شاخص LMP بصورت ضریب لاگرانژ معادله پخش توان اکتیو در هر باس تعریف می‌شود. شاخص دیگری که در یافتن مکان‌های مطلوب برای جایابی DG بکار می‌رود شاخص پرداخت مشتری (CP) است که برای هر شین از حاصلضرب LMP در بار شین مربوطه بدست می‌آید؛ و در نهایت پس از انتخاب شین بهینه جهت قرارگیری DG اندازه بهینه آن با حداقل سازی شاخص هزینه سیستم و در نظر گرفتن قیود تراکم سیستم توسط الگوریتم جستجوی گرانشی به دست می‌آید. شاخص‌های یاد شده سیستم را در دو ناحیه کاری مختلف بررسی می‌کنند و در نهایت شاخص بهینه معرفی می‌شود. روش پیشنهادی روی سیستم ۱۲ باسه اصلاح شده IEEE اجرا شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی جنبه‌های مهندسی بهره‌برداری سیستم و جنبه‌های اقتصادی بهره‌برداری بازار را تامین کرده و با تعیین بهینه مکان DG در محیط بازار برق سبب کاهش هزینه سیستم می‌شود.

کلمات کلیدی:
کاهش هزینه انرژی، مدیریت تراکم، الگوریتم جستجوی گرانشی، بازار برق، منابع تولید پراکنده

۱) دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل، باشگاه پژوهشگران جوان
۲) دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی
۳) شرکت مدیریت تولید برق آذربایجان شرقی
* نویسنده مسئول، ghasemi.agm@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

مقدمه

منابع تولید پراکنده (Distributed Generation (DG)) را می‌توان به عنوان منابع تولید توان الکتریکی که به شبکه های فوق توزیع، توزیع و مصرف کننده‌های محلی متصل می‌شوند، تعریف کرد. ظرفیت تولید این منابع در مقایسه با سایر منابع متداول تولید انرژی الکتریکی، بسیار کوچکتر و فناوری بکار رفته در تولید توان در آنها نیز متفاوت و بسیار متنوع است[۱]. تولیدات پراکنده در سال‌های اخیر، گسترش روز افزونی در سراسر جهان یافته‌اند. در سال‌های اخیر اقدامات مختلفی برای بهینه‌سازی و تغییر سیستم‌های قدرت ازساختار سنتی به ساختاری جدید بامالکیت‌های خصوصی، صورت گرفته است. در نتیجه این تغییر و نیز تحول چشمگیر درزمینه فناوری‌های تولیدات پراکنده، انتظارمی‌رود که تولیدات کوچک، همچون توربوژنراتورهای بادی، آبی و گازی کوچک، فتوولتائیک‌ها، میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی و واحدهای تولید همزمان برق – گرما – سرما نقش مهم و اساسی را درصنعت برق ایفا کنند. تحقیقات انجام گرفته به وسیله موسسه EPRI نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۱۲ نزدیک به ۲۵ درصد از تولیدات را منابع تولید پراکنده تشکیل خواهند داد، این رقم طبق تحقیقات Natural Gas Foundation (NGF) تا ۳۰ درصد نیز پیش بینی شده است[۲].

مهمترین مزیت منابع تولید پراکنده، نزدیکی به مصرف کننده و در نتیجه کاهش و یا حذف هزینه‌های مربوط به انتقال و توزیع می‌باشد. درکنار آن می‌توان به حذف محدودیت مکانی وجغرافیایی تولیدات کوچک نسبت به نیروگاه‌های بزرگ، زمان نصب کمتر، محیط زیست پاکتر، کیفیت و قابلیت اطمینان بیشتر، امکان سرمایه‌گذاری بخش خصوصی با سرمایه کمتر، پیشرفت فناوری در زمینه ساخت ژنراتورهای کوچک با توان تولیدی بالا و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید اشاره کرد.

قرار گرفتن شبکه‌های توزیع بین تولید وانتقال از یک سو و مراکز بار از سوی دیگر، آن را به طور نسبی به یک شبکه غیرفعال تبدیل کرده است، ولی استفاده از واحدهای تولیدی کوچک در سال‌های اخیر باعث تغییر وضعیت این شبکه‌ها از یک شبکه غیرفعال به یک شبکه فعال شده است؛ لذا انتظار می‌رود که اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه-های توزیع الکتریکی، آثار قابل توجهی را بر روی این قبیل شبکه‌ها به دنبال داشته باشد[۱]. این مساله به ویژه در هنگام اتصال ظرفیت‌های بالایی از این منابع تولیدی به شبکه، محتمل تر است. نصب و بهره‌برداری موازی ازمنابع تولید پراکنده در شبکه¬های الکتریکی، آثاری را به دنبال خواهد داشت و دست یافتن به نتایج مثبت این قبیل آثار، عمدتا مستلزم رعایت اصول و ضوابط خاص و انجام تحلیل‌های دقیق و مناسب است. بر این اساس از دیدگاه اصول و ضوابط حاکم براتصال منابع تولید پراکنده، استفاده ازاستانداردهایی که برای این منظور تدوین می‌شوند اجتناب ناپذیر خواهد بود[۲].

برای‌اینکه قرار دادن DG در سیستم قدرت امکان‌سنجی شود روش‌های فراوانی ارایه شده است. برنامه‌ریزی ظرفیت سرمایه‌گذاری تولید پراکنده در بازارهای برق رقابتی از دیدگاه شرکت توزیع در [۳] بررسی شده است. روشی برای طراحی بهینه DGهای متصل به شبکه به‌صورتی‌که اندازه و نوع آنها، قابلیت اطمینان و نیازمندی‌های محلی شبکه قدرت را تامین کند در [۴] ارایه شده است. علاوه بر آن بسیاری از ابزارهای بهینه‌سازی شامل روش‌های هوش مصنوعی مانند روش الگوریتم ژنتیک، روش جستجوی تابو و سایر روش‌ها برای جایابی بهینه DG به‌کار رفته‌اند. یک روش بهینه‌سازی که از الگوریتم ژنتیک برای حداقل کردن هزینه سرمایه‌گذاری و تلفات در یک دوره برنامه‌ریزی استفاده کرده در [۵] ارایه شده است. الگوریتم ژنتیک در [۵] بکار گرفته شده تا میزان نفوذ DG برای حداقل کردن هزینه کل بهره‌برداری شامل هزینه‌های ثابت و متغیر را تعیین کند. روشی برای جایابی بهینه DG به‌منظور حداقل کردن تلفات توان حقیقی در سیستم توزیع توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک در [۶] معرفی شده است. تعیین مکان بهینه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

DG برای حداقل کردن تلفات یا بارگذاری خطوط با استفاده از روش‌های مرتبه دوم و گرادیان در [۷] معرفی شده است. روشی مبتنی بر تکرار برای جایابی بهینه DG به منظور کاهش تلفات که تقریب مناسبی ارایه می‌کند در [۸] آمده است. روش‌های تحلیلی برای تعیین محل بهینه DG با هدف حداقل کردن تلفات توان در [۹] بررسی شده‌اند. جایابی بهینه و تعیین میزان نفوذ DG براساس طراحی استاندارد بازار برپایه LMP و با هدف حداقل کردن هزینه‌های تولید در [۱۰] پیشنهاد شده است. جایابی بهینه DG با روشی براساس روش لاگرانژین و استفاده از OPF سنتی و OPF با قید پایداری ولتاژ در [۱۱] معرفی شده است. روش‌های ذکر شده در مقالات بالا صرفا سیستم را از نظر فنی بررسی می‌کنند وشرایط حاکم بر بازار برق تجدید ساختار یافته از جمله مدیریت تراکم و قیمت‌گذاری محلی را در نظر نگرفته‌اند.

در این مقاله جایابی DG در یک بازار برق تجدید ساختار یافته برپایه سرمایه و دارای دیسپاچینگ متمرکز بررسی می‌شود که در آن DG به عنوان بار منفی لحاظ شده است. مساله جایابی DG با هدف حداقل کردن هزینه‌ی سیستم، مدیریت و کاهش تراکم خطوط سیستم صورت می‌گیرد. روش ارایه شده بر اساس قیمت محلی باس‌ها به جایابی DG بر اساس دو شاخص معرفی شده CP و LMP در سیستم می‌پردازد. برای به دست آوردن اندازه بهینه DG بر اساس شاخص هزینه سیستم از الگوریتم جستجوی گرانشی استفاده شده است.

مقاله دارای شش بخش است. در ادامه در بخش ۲ به مساله پخش بهینه توان در بازار برق می‌پردازد. بخش ۳ به معرفی الگوریتم جستجوی گرانشی می‌پردازد. بخش ۴ روش پیشنهادی برای جایابی DG را توضیح می‌دهد، در این بخش از دو روش رتبه‌بندی CP و LMP متمایز جهت تعیین نقاط مطلوب برای جایابی DG و از الگوریتم جستجوی گرانشی برای تعیین اندازه آن استفاده شده است. نتایج شبیه سازی در بخش ۵ بررسی شده است و نهایتا در بخش ۶ به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

فرمول بندی مساله

در این مقاله الگوریتم سنتی OPF برای حداقل کردن هزینه‌ها طوری تغییر یافته تا علاوه بر پیشنهادهای سمت تولید، پیشنهادهای سمت تقاضا را نیز شامل شود[۵]. LMP به عنوان ضریب لاگرانژ در معادله تعادل بار OPF تعریف شده است. پیشنهادهای تولیدکننده و مصرف‌کننده به عنوان ورودی OPF در نظر گرفته شده است. OPF پایه براساس حداقل کردن هزینه‌ی سیستم است و دیسپاچینگ تولید، تقاضا و قیمت را در هر شین از شبکه ارزیابی می‌کند. قیمت‌های گره‌ای که بدین ترتیب بدست آمدند شاخص‌های تعیین‌کننده‌ی شین‌های منتخب برای جایابی DG هستند. جایابی بر آن است تا با تغییر سناریوی دیسپاچینگ تولید باعث شود که تقاضا با کمترین قیمت تامین شود. به منظور اینکه مالکان DG بیشترین درآمد را از توانی که به شبکه داده‌اند بدست آورند لازم است تا اندازه و مکان DG طوری انتخاب شود تا مقدار LMP به حدی کاهش یابد که سود را حداکثر کند. هر چه مقدار LMP بزرگتر باشد درآمد بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و ممکن است سود منفی شود[۶].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

حداقل کردن هزینه سیستم

تابع هدف مساله بصورت تفاضل بین بردار سود که توسط خریدار (DISCO[1]) ارایه شده با بردار پیشنهاد که توسط فروشنده (GENCO[2]) ارایه شده و تابع هزینه که توسط مالک DG ارایه شده، تعریف می‌شود. شاخص SCI[3] تعریف شده در این مقاله به حداقل کردن تابع هدف به صورت زیر می‌پردازد[۸].

$$\mathrm{SCI} = \min \sum_{i=1}^{N} (C_i(P_{Gi}) - B_i(P_{Di})) + C(P_{DGi}) \quad (۱)$$

همانطور که مشاهده می شود حداقل کردن هزینه سیستم از دو بلوک تو در تو تشکیل شده است. بلوک داخلی به وسیله‌ی بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO[4]) استفاده می‌شود. به منظور رسیدن به شرایط اقتصادی کوتاه مدت بهینه، ISO پیشنهادها را از تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها و محل DG و اندازه آن را از مالک DG دریافت می‌کند. در این حالت مالک DG یکی از شرکای بازار است که در خارج از این بلوک قرار گرفته و اندازه DG مورد نظر خود را ارایه می‌کند. سپس بهره‌بردار مستقل سیستم با در نظر گرفتن قیود شبکه، OPF را اجرا می‌کند. هدف این OPF آن است که هزینه کلی سیستم را حداقل کند. این بلوک اجازه کنترل کلی و هماهنگی میان تولید و انتقال را فراهم می‌آورد. قیودی که برای تابع هدف فوق در نظر گرفته شده شامل قیود تساوی و قیود غیر تساوی می‌باشد که در ادامه بررسی می‌شود.

قیود تساوی

شبکه انتقال انرژی الکتریکی از طریق معادله تعادل توان در هر گره مدل شده است. مجموع توان‌های اکتیو و راکتیوی که به یک گره وارد می‌شوند باید با مجموع توان‌های اکتیو و راکتیوی که از آن گره خارج می‌شوند، برابر باشد.

$$P_i = P_{Gi} + P_{DGi} - P_{Di} = v_i \sum_{j=1}^{N} [v_j \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\}] \quad (۲)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = v_i \sum_{j=1}^{N} [v_j \{G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\}] \quad (۳)$$

قیود نامساوی

الف) محدودیت های تولید: حداکثر و حداقل ظرفیت تولید نیروگاهها دارای مقدار مشخصی است که به‌دلایل فنی و اقتصادی، نیروگاهها قادر به تولید توانی بیشتر از این میزان نمی‌باشند. محدودیت‌های تولید برای توان‌های اکتیو و راکتیو بصورت محدودیت‌های بالا و پایین تعریف می‌شوند:

[1] Distribution Company
[2] Generation Company
[3] System Cost Index
[4] Independent System Operator

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max} \quad (۴)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max} \quad (۵)$$

ب) محدودیت ظرفیت خطوط انتقال: این محدودیت، حداکثر توانی که یک خط انتقال در شرایط معین می‌تواند از خود عبور دهد را نشان می‌دهد. این محدودیت می‌تواند برپایه ملاحظات حرارتی یا پایداری باشد. محدودیت‌های حرارتی معمولا برای خطوط کوتاه لحاظ می شوند. قید زیر مقدار توان را در نقاط ابتدایی و انتهایی خط انتقال بررسی می‌کند تا از محدوده مجاز خارج نشود.

$$S_{ij} \le S_{ij}^{\max} \quad (۶)$$

$$S_{ji} \le S_{ji}^{\max} \quad (۷)$$

ج) محدودیت ولتاژ باس: این محدودیت تضمین می‌کند که ولتاژ باس در یک محدوده مجاز باقی بماند.

$$v_i^{\min} \le v_i \le v_i^{\max} \quad (۸)$$

که در آن:

N: تعداد شین‌های سیستم.

P_{Gi}: توان اکتیو تولیدی در باس i.

P_{Di}: تقاضای توان اکتیو در باس i.

P_{DGi}: توان اکتیو تولیدی توسط DG در باس i.

$B_i(P_{Di})$: تابع سود خریدار در باس i:

$$B_i(P_{Di}) = a_{Di} + b_{Di} P_{Di} + c_{Di} (P_{Di})^2 \quad (۹)$$

$C_i(P_{Gi})$: قیمت پیشنهاد تولیدکننده در باس i:

$$C_i(P_{Gi}) = a_{Gi} + b_{Gi} P_{Gi} + c_{Gi} (P_{Gi})^2 \quad (۱۰)$$

$C(P_{DGi})$: تابع هزینه DG در باس i:

$$C(P_{DGi}) = a_{DGi} + b_{DGi} P_{DGi} + c_{Gi} (P_{DGi})^2 \quad (۱۱)$$

V_i: ولتاژ در باس i.

δ_i: زاویه توان در باس i.

B_{ij}: سوسپتانس خط ij.

G_{ij}: کندوکتانس خط ij.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

Q_{Gi}: توان راکتیو تولیدی در باس i.

P_{Gi}^{max} و P_{Gi}^{min} : محدودیت‌های بالا و پایین تولید توان اکتیو ژنراتور در باس i.

Q_{Gi}^{max} و Q_{Gi}^{min} : محدودیت‌های بالا و پایین تولید توان راکتیو ژنراتور در باس i.

V_i^{max} و V_i^{max} : محدودیت‌های بالا و پایین ولتاژ در باس i.

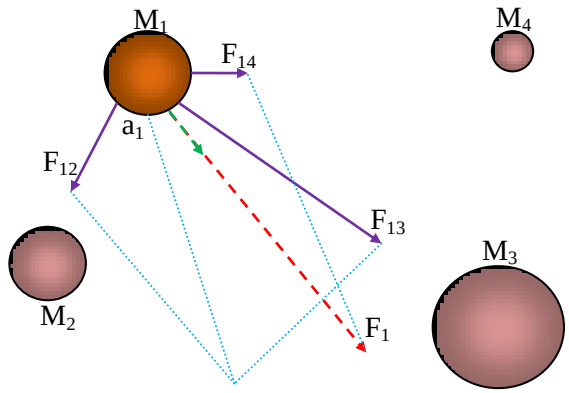
S_{ij} و S_{ji} : توان مختلط انتقالی از باس i به باس j و بالعکس.

S_{ij}^{max} و S_{ji}^{max} : محدودیت توان مختلط مربوط به خط ij و ji.

توجه شود که در OPF پایه $P_{DGi} = 0$، برای باس‌های دارای بار $P_{Gi} = 0$ و برای باس‌های ژنراتوری نیز $P_{Di} = P_{DGi} = 0$ در نظر گرفته شده است.

الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی یک الگوریتم وابسته به هوش جمعی و بدون حافظه می‌باشد. این الگوریتم بهینه‌سازی با الگو برداری از قوانین و حرکت عوامل در یک سیستم مصنوعی در زمان گسسته طراحی شده است که در آن، فضای سیستم همان محدوده تعریف مساله می‌باشد. بر طبق قانون گرانش هر جرم، محل و وضعیت اجرام دیگر را از طریق جاذبه گرانشی درک می‌کند که در شکل (۱) نمایش داده می شود؛ بنابراین از این نیرو می‌توان برای تبادل اطلاعات استفاده کرد. محیط سیستم همان محدوده تعریف مساله می‌باشد. طبق قانون گرانش هر جرم، محل و وضعیت سایر اجرام را از طریق نیروی جاذبه گرانشی درک می‌کند؛ بنابراین می‌توان از این نیرو به عنوان ابزاری برای تبادل اطلاعات استفاده کرد. از بهینه یاب طراحی شده، می‌توان برای حل هر مساله بهینه‌سازی که در آن هر جواب مساله به صورت یک موقعیت در فضا قابل تعریف است و میزان شباهت آن با سایر جواب‌های مساله به صورت یک فاصله قابل بیان باشد، استفاده نمود. میزان اجرام با توجه به تابع هدف تعیین می‌شوند[۱۲].



شکل ۱: نحوه وارد شده متقابل نیروها از سوی اجرام بر یکدیگر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

در قدم اول فضای سیستم مشخص می‌شود. محیط شامل یک دستگاه مختصات چند بعدی در فضای تعریف مساله است. هر نقطه از فضا، یک جواب مساله است. عامل‌های جستجو کننده، مجموعه ای از اجرام می‌باشند. هر جرم سه مشخصه دارد: الف) موقعیت جرم، ب) جرم گرانشی و ج) جرم اینرسی. اجرام فوق برگرفته از مفاهیم جرم گرانشی اکتیو و جرم اینرسی در فیزیک می‌باشند. در فیزیک جرم گرانشی اکتیو معیاری از میزان شدت نیروی گرانشی حول یک جسم و جرم اینرسی معیاری از مقاومت جسم در مقابل حرکت است. این دو مشخصه بر خلاف و اقعیت می‌توانند با یکدیگر برابر نباشند و مقدار آنها با توجه به برازندگی هر جرم تعیین می‌شود. موقعیت جرم، نقطه‌ای در فضا است که جوابی از مساله است. پس از تشکیل سیستم، قوانین حاکم بر آن مشخص می‌شوند. فرض می‌کنیم تنها قانون گرانش و قوانین حرکت حاکمند. صورت کلی این قوانین تقریبا شبیه قوانین طبیعت است و به صورت زیر تعریف شده اند.

در این الگوریتم، جرم عامل ها با توجه به تابع هدف تامین می‌شوند [۱۳]. در یک سیستم با n جرم، موقعیت هر جرم، نقطه ای از فضا است که جوابی از مساله می‌باشد که موقعیت جرم i ام با X_i نشان داده شده می‌شود.

$$X_i = (x_i^1, ..., x_i^d, ..., x_i^n) \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا n بعد مساله و همچنین x_i^d بعد d از جرم i ام می‌باشد. در این سیستم، به جرم i در زمان t و در جهت بعد d، نیرویی به مقدار $F_{ij}^d(t)$وارد می‌شود. اندازه این نیرو از رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$F_{ij}^d(t) = G(t)\frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon}(x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (۱۳)$$

در رابطه بالا، M_{aj} جرم گرانشی فعال جرم j، Mp_i جرم گرانشی غیر فعال جرم j می‌باشد که هر دوی آنها در الگوریتم ذکر شده یکسان و برابر Mدر نظر گرفته شده‌اند؛ و G(t)ثابت گرانش در زمان t، R_{ij} فاصله مابین دو جرم i ام و j ام ویک عدد خیلی کوچک است.

ثابت گرانش، یک پارامتر مناسب برای کنترل توانایی‌های جستجو و بهره‌وری بشمار می‌آید که با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$G(t) = G_0 e^{\frac{-\alpha t}{T}} \quad (۱۴)$$

که در رابطه بالاα و G_0 ضرایب کنترلی الگوریتم و T بیانگر طول عمر سیستم است نیروی وارد بر جرم i ام در جهت بعد t، در زمان t طبق رابطه زیر برابر است با مجموع تمام نیروهایی که سایر جرم‌های سیستم بر این جرم وارد می‌کنند در این رابطه $rand_j$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۱،۰) بوده که برای حفظ خصوصیت تصادفی بودن در نظر گرفته شده است[۱۴].

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1 j\neq i}^{N} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (۱۵)$$

همچنین، هر یک از جرم‌ها دارای یک سرعت و یک شتاب می‌باشد که هر کدام از آنها به ترتیب در معادله (۱۶) نشان داده می‌شوند. با توجه به قانون دوم نیوتن، هر جرم در جهت بعد d شتابی می‌گیرد که با نیروی وارد بر جرم در آن بعد، بخش بر جرم اینرسی آن که در رابطه (۱۵) بیان شده است، متناسب می‌باشد از طرف دیگر سرعت هر عامل در زمان برابر است با مجموع ضریبی از سرعت فعلی و شتاب عامل که طبق رابطه (۱۶) بیان می‌شود[۱۲].

$$v_i^d(t+1) = rand \times vi^d(t) + a_i^d(t) \quad (۱۶)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

$$(۱۷) a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)}$$

زمانی که شتاب و سرعت هر جرم محاسبه شد موقعیت جدید عامل i ام در بعد d محاسبه می‌گردد.

$$(۱۸) x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1)$$

موقعیت‌های جدید به عنوان مکان اجرام جدید در فضای جستجو در نظر گرفته می‌شوند، که وزن اجرام جدید بوسیله معادلات زیر نرمالیزه می‌شوند.

$$(۱۹) m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)}$$

$$(۲۰) M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} m_j(t)}$$

که در آن $fit_i(t)$ نمایانگر میزان برازندگی جرم عامل i ام در زمان t، worst(t) و best(t) به ترتیب بیانگر میزان شایستگی بدترین و بهترین عامل جمعیت در زمان، هستند که اندازه آنها در مسایل کمینه‌یابی با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$\text{Worst}(t) = \max\{fit_i(t)\} \quad (۲۱)$$

$$\text{Best}(t) = \min\{fit_i(t)\} \quad (۲۲)$$

روش کار

به منظور ادغام بردارهای پیشنهاد تولید و تقاضا، OPF پایه ابتدا قیمت‌های مختلف برق برای گره‌های مختلف شبکه را محاسبه می‌کند. قیمت‌های گره‌ای از ضرایب لاگرانژ قیود تساوی غیرخطی بدست می‌آیند. توابع افزایشی برای پیشنهادهای تولیدکننده و توابع کاهشی برای پیشنهادهای مصرف‌کننده به عنوان هزینه حاشیه‌ای یا سود پیشنهاد دهنده‌ها در نظر گرفته می‌شود. اختلاف موجود در قیمت‌ها ناشی از قیود موثر خطوط و نیز وجود تلفات در سیستم انتقال است. به منظور تعیین گره‌های منتخب برای جایابی DG، دو نوع رتبه‌بندی یعنی رتبه‌بندی براساس LMP و رتبه‌بندی براساس پرداخت مصرف‌کننده استفاده می‌شود.

رتبه‌بندی براساس LMP

LMP عبارت است از ضرایب لاگرانژ مربوط به معادلات پخش توان اکتیو در هر باس از سیستم [۱۱]. بطور کلی LMP دارای سه بخش است، یک بخش حاشیه‌ای انرژی (برای همه باس‌ها یکسان است)، یک بخش حاشیه‌ای تلفات و یک بخش مربوط به تراکم است. با در نظر گرفتن قیمت گره‌ای توان اکتیو در باس i، LMP از رابطه زیر بدست می‌آید:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

$$\mathrm{LMP}_i = \lambda + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_i} + \sum_{ij=1}^{N_L} \mu L_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P} \qquad (۲۳)$$

$$\mathrm{LMP}_i = \lambda + \lambda_{L,i} + \lambda_{C,i} \qquad (۲۴)$$

که در آن:

λ: قسمت حاشیه‌ای انرژی در باس مرجع که برای تمام باس‌ها یکسان است.

$\lambda_{L,i}$: قسمت مربوط به تلفات.

$\lambda_{C,i}$: قسمت مربوط به تراکم.

بنابراین قیمت گره‌ای در هر شین تابع مکان آن است و در اثر بخش حاشیه‌ای تلفات و بخش تراکم تغییر می‌کند. هرچقدر LMP یک شین بزرگتر باشد نشان می‌دهد که معادلات پخش توان اکتیو آن گره بر شاخص SCI سیستم تاثیر بیشتری دارد. به عبارت دیگر نشان‌دهنده آن است که در شین مربوطه تولید چقدر تحت تاثیر بار بوده است؛ بنابراین معلوم می‌شود که برای حداقل کردن شاخص SCIسیستم، تزریق توان اکتیو در شین مربوطه منجر به کاهش هزینه های کل سیستم خواهد شد. از آنجا که فرض می‌شود DG به شین مربوطه توان اکتیو تزریق می‌کند، در نتیجه شین با LMP بزرگتر اولین تقدم برای جایابی DG خواهد داشت؛ بنابراین شین‌های دارای بار از لحاظ LMP بصورت نزولی مرتب می‌شوند و در نتیجه اولین گره در این ترتیب بهترین انتخاب برای جایابی DG خواهد بود.

$$\mathrm{LMP} = \begin{bmatrix} LMP_1 \\ LMP_2 \\ LMP_3 \\ \vdots \\ LMP_n \end{bmatrix} \qquad (۲۵)$$

که در آن n عبارت است از تعداد شین‌هایی که دارای بار هستند.

رتبه‌بندی براساس CP

شاخص پرداخت مصرف کننده (CP^{5}) به صورت حاصلضرب LMP در مقدار بار تعریف می‌شود و به عنوان معیار دیگری در تعیین شین های منتخب برای جایابی DG بکار می‌رود.

[5] Consumer Payment

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

$$CP = LMP_i \times Load_i = \begin{bmatrix} CP_1 \\ CP_2 \\ CP_3 \\ \vdots \\ CP_n \end{bmatrix} \quad (۲۶)$$

که در این رابطه، CP_i مقداری را نشان می‌دهد که مصرف‌کننده شین i باید برای دریافت برق پرداخت کند. این رتبه‌بندی از این حقیقت ناشی می‌شود که می‌توان جایابی DG را از دو دیدگاه بررسی کرد. یکی حالتی است که قیمت بالا ولی بار نسبتا کم است و در حالت دیگر قیمت نسبتا کم ولی بار زیاد است. رتبه‌بندی براساس پرداخت مصرف‌کننده (CP) ناظر بر حالت دوم است که در آن پرداخت کل در شین مربوطه مقدم بر قیمت بالا است. با استفاده از این شاخص برای جایابی DG مقدار LMP کاهش می‌یابد و باعث افزایش قدرت مصرف‌کننده عمده می‌شود چراکه مقداری که در حضور DG پرداخت می‌کنند کمتر از حالتی است که DG وجود ندارد. جایابی با چندین تابع هزینه‌ای که برای DG در نظر گرفته شده انجام می‌گیرد. جایابی DG مقدار LMP را کاهش می‌دهد و DG های با هزینه بهره‌برداری بیشتر از آن LMP شانسی جهت حضور در سیستم ندارند. انتظار می‌رود که DG با هزینه بهره‌برداری کمتر از هزینه تولیدکننده، نفوذ بیشتر در بازار و DG با هزینه بهره‌برداری بیشتر از تولیدکننده دارای نفوذ کمتری در بازار باشد.

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش تاثیر حضور منابع تولید پراکنده بر روی سیستم بررسی می‌شود و در ادامه، با اعمال تابع هدف و حداقل سازی آن با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی به تشریح نتایج حاصل می‌پردازیم. باید توجه داشته باشید که جایابی منابع تولید پراکنده در بازار برق تجدید ساختار یافته جهت حصول نتیجه بهینه دارای روندی است که در سه گام صورت می‌گیرد: گام اول: انتخاب نوع منبع تولید پراکنده، گام دوم: مشخص نمودن شین مستعد جهت جایابی منابع تولید پراکنده که در این مقاله با دو معیار LMP و CP تعیین می‌شود. گام سوم: تعیین اندازه و توان بهینه منبع تولید پراکنده انتخاب شده جهت مدیریت تراکم خطوط و کاهش هزینه انرژی سیستم که در این مقاله با حداقل سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی محقق می‌گردد.

منابع تولید پراکنده به کار رفته در بازار برق

استفاده گسترده از منابع تولید پراکنده در بازار برق، افزایش سطح تکنولوژی منابع تولید پراکنده و تنوع آنها را به دنبال داشته است. منابع تولید پراکنده پر کاربرد در بازار برق عبارتند از: توربین‌های گازی با ظرفیت تولید ۱۰۰-۱۰ MW توربین‌های دیزلی با ظرفیت تولید زیر ۱۰MW، میکروتوربین‌ها با ظرفیت تولید ۲۰۰-۳۰ KW و توربین‌های بادی با ظرفیت تولید کمتر از ۳۰ KW که در این مقاله به دلیل رنج توان مورد نیاز بازار مورد مطالعه، توربین‌های گازی را بر می‌گزینیم [۱۵]. هریک از منابع تولید پراکنده با توجه به تابع هزینه مختص به خود دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است، بنابراین جهت بکارگیری هر منبع تولید پراکنده ابتدا باید به بررسی تابع هزینه آن پرداخت.

تابع هزینه هر منبع تولید پراکنده به صورت رابطه (۲۷) تعریف می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

$$C(P_{DG}) = a_{DG} + b_{DG} \times P_{DG} + c_{DG} \times (P_{DG})^2 \quad (۲۷)$$

منبع تولید پراکنده استفاده شده در این مقاله دارای تابع هزینه‌ای به صورت $C(P_{DG}) = 0.01 + 40 \times P_{DG}$ می‌باشد.

شبکه ۱۲ باسه اصلاح شده‌ی IEEE

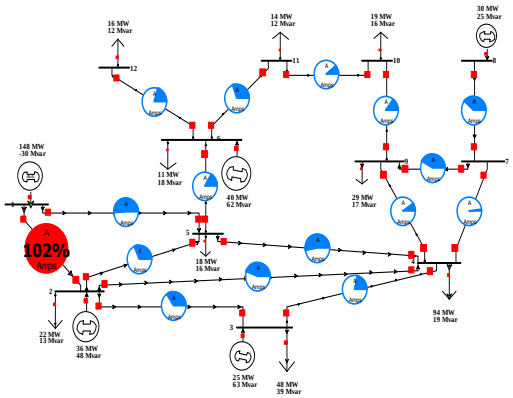
شبکه مورد بررسی دارای ۱۲ باس و ۵ ژنراتور اصلی است، ۹ باس سیستم دارای بار مصرفی است. مجموع توانی که سیستم باید تامین کند برابر ۲۷۸ MW است. شاخص هزینه سیستم در حالت پایه SCI=۸۷۱۱.۸۱ $/hr است و از آنجایی‌که باس‌های ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ فاقد ژنراتور هستند، همگی آنها قابلیت جایگزینی منابع تولید پراکنده را دارا می‌باشند. نتایج حاصل از حداقل کردن شاخص مورد بررسی بدون حضور منبع تولید پراکنده در سیستم و LMP هر یک از شین‌ها به صورت جدول (۱) است.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی سیستم پایه

Bus	P_D(MW)	Q_D(MVAR)	LMP($/MVA)
۱	۰	۰	۳۳.۰٤٦
۲	۲۱.۷۰	۱۲.۷۰	۳۵.٤۹۵
۳	٤۷.۸۰	۳۹.۰۰	۳٦.٤٦٤
٤	۹٤.۲۰	۱۹.۰۰	۳٦.۸۳۹
۵	۱۷.٦۰	۱٦.۰۰	۳٦.۱٦٤
٦	۱۱.۲۰	۱۷.۵۰	۳۵.۹٦۵
۷	۰	۰	۳٦.۹۵۸
۸	۰	۰	۳٦.۹٤۰
۹	۲۹.۵۰	۱٦.٦۰	۳۷.۰۵۵
۱۰	۱۹.۰۰	۱۵.۸۰	۳۷.٤٦٦
۱۱	۱۳.۵۰	۱۱.۸۰	۳۷.۲۰۵
۱۲	۱٦.۱۰	۱۱.٦۰	۳۷.٤٤٤

پخش بار اولیه در سیستم پایه مطابق شکل (۲) نشانگر حالت بحران در خط ۱-۲ است زیرا این خط دارای تراکمی ۱۰۲ درصدی است و در صورتیکه خطا و یا افزایش توانی در سیستم رخ دهد سیستم توانایی تحمل این تغییرات را نداشته و شبکه دچار خاموشی سراسری می شود. که جهت رفع این مشکل و مدیریت تراکم سیستم اندازه منابع تولید پراکنده باید بر اساس قید تراکم سیستم که به صورت $S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} = 80\%$ تعریف می‌شود تعیین گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]



شکل ۲: تراکم خطوط سیستم در حالت پایه

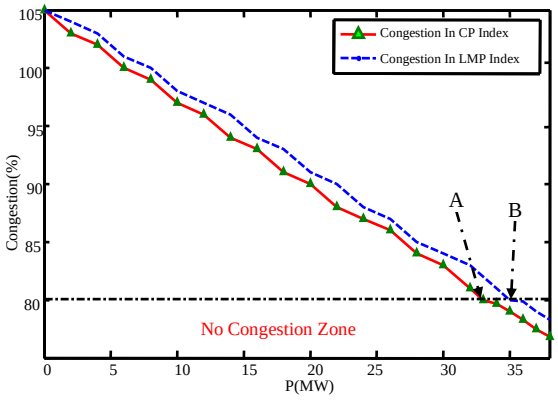
مطابق جدول (۲) ماکزیمم توان مصرفی سیستم در باس ۴ به میزان P_D=۹٤.۲MW می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌کنید بیشترین LMP سیستم مربوط به شین ۱۰ به میزان ۳۷.٤٦٦$/MVA می‌باشد. در حالیکه بیشترین مقدار معیار CP در شین ۴ است که برابر ۳٤۷۰.۲۳$/h می‌باشد؛ بنابراین شین ۱۰ شرایط معیار LMP و شین ۴ شرایط معیار CP تشریح شده در قبل را بر آورده می‌سازد، در نتیجه این دو شین در مقایسه با دیگر شین‌های فاقد ژنراتور سیستم از موقعیت مناسب‌تری جهت جایابی منابع تولید پراکنده برخوردار هستند. بنابران در ادامه منبع تولید پراکنده انتخاب شده در بخش قبل را بر اساس دو معیار یاد شده یکبار در شین ۱۰ جهت برآورده ساختن معیار LMP و بار دیگر در شین ۴ جهت برآورده ساختن معیار CP جایگذاری کرده و تاثیر آنها برروی سیستم بررسی می‌شود و اندازه بهینه منبع تولید پراکنده را با معیار کاهش تراکم خط ۱-۲ و حداقل کردن شاخص SCI با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی بدست آورده و در نهایت با مقایسه‌ی نتایج حاصل محل بهینه، اندازه منبع تولید پراکنده و معیار بهینه از میان LMP و CP انتخاب می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

جدول ۲: انتخاب باس مناسب براساس معیارهای LMP و CP

Bus	P_D(MW)	Q_D(MW)	LMP	CP
۱	-	-	۳۳.۰٤٦	۰
۲	۲۱.۷	۱۲.۷	۳۵.٤۹۵	۷۷۰.۲٤
۳	٤۷.۸	۳۹	۳٦.٤٦٤	۱۷٤۳
٤	۹٤.۲	۱۹	۳٦.۸۳۹	۳٤۷۰.۲۳
۵	۱۷.٦	۱٦	۳٦.۱٦٤	٦۳٦.٤۸
٦	۱۱.۲	۱۷.۵	۳۵.۹٦۵	٤۰۲.۸۱
۷	-	-	۳٦.۹۵۸	۰
۸	-	-	۳٦.۹٤	۰
۹	۲۹.۵	۱٦.٦	۳۷.۰۵۵	۱۰۹۳.۱۲
۱۰	۱۹	۱۵.۸	۳۷.٤٦٦	۷۱۱.۸۵
۱۱	۱۳.۵	۱۱.۸	۳۷.۲۰۵	۵۰۲.۲۷
۱۲	۱٦.۱	۱۱.٦	۳۷.٤٤٤	٦۰۲.۸۵

شکل (۳) نتیجه به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی برای یافتن اندازه بهینه منبع تولید پراکنده بر اساس تابع هدف معادله (۱) و قیود عملی مساله بر اساس دو معیار CP و LMP را در دو نقطه A=۳٤MW و B=۳٦MW نشان می‌دهد.



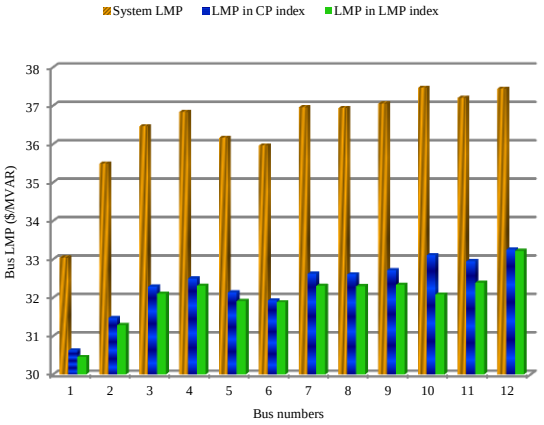
شکل ۳: بررسی تغییرات تراکم با دو معیار LMP و CP

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

جدول ۳: مقایسه نتایج حاصل از سیستم مورد مطالعه با دو معیار CP و LMP

	حالت پایه	معیار LMP	معیار CP
وضعیت تراکم(٪)	۱۰۲	۷۹.۹	۷۹.۷
توان نامی DG (MW)	۰	۳٦	۳٤
بیشترین LMP	۳۷.٤۷	۳۳.۲۲	۳۳.۲٥
کمترین LMP	۳۳.۰٥	۳۰.٤٦	۳۰.٦۳
هزینه سیستم ($/MVAR)	۸۷۱۱.۸۱	۸۲۲۱.٥۷	۸۲٥۰.۱٦

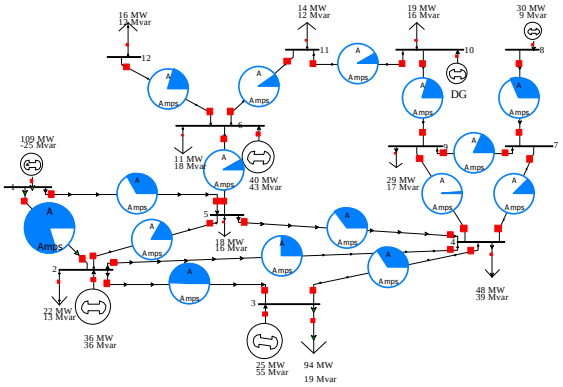
بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی که در جدول (۳) مشاهده می‌فرمایید. قرارگیری منبع تولید پراکنده در باس ۱۰ بر اساس معیار LMP نتنها باعث رفع تراکم خط ۲-۱ شده است بلکه طبق شکل (۴) قیمت انرژی باسها در معیار LMP در مقایسه با معیار CP کمتر بوده که این امر باعث کاهش ۹.۴ درصدی هزینه انرژی نسبت به حالت پایه شده است.



شکل ٤: مقایسه LMP سیستم بعد از جایابی بهینه DG

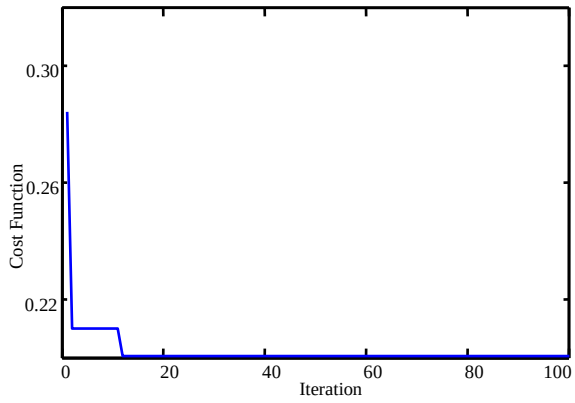
طبق نتایج حاصل معیار LMP در سیستم مورد مطالعه به عنوان معیار بهینه و باس ۱۰ به عنوان محل قرارگیری منبع تولید پراکنده انتخاب می‌شود. که اندازه این منبع با حداقل سازی تابع هدف مساله با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی 36MW به دست می‌آید. که شکل (۵) شرایط سیستم مورد مطالعه را پس از جایگذاری DG در باس ۱۰ نشان می‌دهد. که همانطور که مشاهده می‌فرمایید پس از قرار گیری DG در باس ۱۰ تراکم سیستم مدیریت شده و سیستم در شرایط عادی به سر می‌برد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]



شکل ٥: سیستم مورد مطالعه بعد از جایگذاری DG

شکل (۶) همگرایی تابع هدف مساله بروی سیستم مورد مطالعه را با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی در ۱۰۰ تکرار نشان می‌دهد. که همانطور که مشاهده می‌کنید تابع هدف در تکرار سیزدهم همگرا شده که این نشانگر سرعت بالای همگرایی الگوریتم پیشنهادی در حل مساله است.



شکل ٦: سیر همگرایی تابع هدف مساله

نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی بر پایه OPF، جهت جایابی بهینه DG در بازار برق تجدید ساختار یافته ارایه شد. در جایابی بهینه DG دو مقوله‌ی اندازه و تابع هزینه DG باید در نظر گرفته شود. تعیین نوع DG بر اساس تابع هزینه و هزینه‌ی افزایشی DG صورت می‌گیرد. در روش ارایه شده علاوه بر در نظر گرفتن دو مساله‌ی اساسی هزینه انرژی سیستم و تراکم خطوط در بازار برق جهت تعیین اندازه بهینه‌ی DG معیاری با عنوان شاخص هزینه سیستم (SCI) معرفی شده است که با حداقل کردن این شاخص با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی به عنوان تابع هدف مساله اندازه بهینه DG با کاهش هزینه سیستم و مدیریت تراکم خطوط به دست می‌آید. چرا که تراکم خارج از استاندارد خطوط سبب قرار گیری سیستم در حالت بحران، افزایش قیمت تمام شده انرژی و کاهش سود تولید کننده را به دنبال دارد که جایابی صحیح DG با بکارگیری قیود تراکم سیستم معیارهای بازار محور علاوه بر مدیریت تراکم سیستم، کاهش قیمت انرژی تولیدی و افزایش سود را برای مالک DG به دنبال خواهد داشت. بنابراین در انتخاب شین بهینه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]

سیستم جهت قرارگیری DG درآن، با در نظر گرفتن معیار SCI از دو روش رتبه بندی باس‌ها بر اساس LMP و CP استفاده گردید که در روش رتبه بندی بر اساس LMP، شین با بیشترین میزان LMP و در روش CP شینی که دارای بیشترین توان مصرفی است انتخاب می‌شود. که استفاده از دو روش LMP و CP سبب بررسی سیستم در دو نقطه کاری متفاوت می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بکارگیری شاخص LMP باعث کاهش قیمت در تمامی شین‌های دارای بار و افزایش سود مصرف‌کننده‌ها نسبت به شاخص CP می‌شود.

منابع

[1] P.P. Barker, (2000), Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1-Radial Distribution Systems, in: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, , pp. 1645–1656.

[2] W.E. Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, M.M.A. Salama (2004), Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a competitive electricity market, IEEE Trans, Power Syst. 19 (August (3)) 1674–1684.

[3] G. Celli, F. Pilo(2001), Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks, in: 22nd IEEE PES International Conference on Power Industry Computer Applications PICA 2001, Sydney, Australia, May, pp. 81–86.

[4] M. Pipattanasomporn, M. Willingham, S. Rahman(2005), Implications of onsite distributed Generation for Commercial/Industrial Facilities, IEEE Trans. Power Syst. 20 (February (1)) 206–212.

[5] G. Celli, F. Pilo,(2002), Penetration Level Assessment of Distributed Generation by Means of Genetic Algorithms, in: IEEE Proceedings of Power System Conference, Clemson, SC.

[6] N. Mithulananthan, L. Phu (2004), Distributed Generator Placement Technique in Power Distribution System Using Genetic Algorithm to Reduce Losses, Thammasat Int. J. Sci. Tech. 9 September , pp 56-62.

[7] N.S. Rau, Y.H. Wan(1994), "Optimum Location of Resources in Distributed Planning'', IEEE Trans. Power Syst. 9 june , pp 2014-2020.

[8] C.Wang, M. Hashem Nehrir(2004), "Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems'', IEEE Trans. Power Syst. 19 November , pp 2068-2076.

[9] M. Pipattanasomporn,M. Willingham, S. Rahman (2005), "Implications of Onsite Distributed Generation for Commercial/Industrial Facilities'', IEEE Trans. Power Syst. 20 February, pp. 206-212.

[10] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li (2002), Market Operations in Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc.

[11] D. Gautam, N. Mithulananthan, (2007) "Optimal DG Placement in Deregulated Electricity Market'', Electric Power Systems Research 77, pp 1627-1636.

[12] Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour, Saeid Saryazdi,(2009)," GSA: A Gravitational Search Algorithm", Information Sciences 179, 2232-2248.

[13] R. Mansouri, F. Nasseri, M. Khorrami(1999), Effective Time Variation of G in a Model Universe with Variable pace dimension, Physics Letters 259 194-200.

[14]Antoniou, A.,(1993). Digital Filters: Analysis, Design and Applications. McGraw-Hill, New York.

[15] B. Alderfer, M. Eldridge, T. Starrs.,(2002), Distributed generation in liberalized electric markets, IEA, Inc.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-13]