

## بهینه‌سازی تعداد، محل و اندازه منابع تولید پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی با روش الگوریتم ژنتیک

محمد خادم<sup>۱\*</sup>، مصطفی اسماعیل بیگ<sup>۲</sup>

\*: دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، ایران، Mohammad.Khadem8739@Yahoo.com

۲: استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، بوشهر، ایران، Me\_Beag@Yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۳۰

### چکیده

استفاده از ادوات فکتس و منابع تولید پراکنده به‌عنوان یک تکنولوژی در سیستم‌های قدرت و توزیع هر روز افزایش می‌یابد. این تجهیزات بر روی پارامترهای متعددی همچون پروفیل ولتاژ، تلفات خط، جریان اتصال کوتاه، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم تأثیرگذار می‌باشند و بنابراین تعیین محل بهینه نصب، تعداد و اندازه آن‌ها یکی از مسائل مهمی می‌باشد که مورد توجه می‌باشد زیرا نصب این ادوات و منابع در محل‌های غیر بهینه سبب افزایش تلفات سیستم و تأثیر منفی بر پروفیل ولتاژ و سایر پارامترهای سیستم می‌شود. در این مقاله به بهینه‌سازی هم‌زمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی پرداخته شده و به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. به همین منظور تابع چند هدفه شامل هزینه‌های بهره‌برداری و تولید منابع تولیدات پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی و قابلیت بارپذیری سیستم ارائه شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو شبکه نمونه ۳۳ و ۶۹ باس استاندارد IEEE مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش بارپذیری سیستم، هزینه افزایش می‌یابد زیرا تعداد تجهیزات مربوط به منابع تولید پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی بیشتر می‌شود. همچنین بهینه‌سازی و جایابی هم‌زمان این تجهیزات، سبب کاهش هزینه‌ها و افزایش بارپذیری سیستم توزیع می‌شود.

**واژه های کلیدی:** بهینه‌سازی، منابع تولیدات پراکنده، جبران ساز سنکرون استاتیکی، الگوریتم ژنتیک

### ۱- مقدمه

با افزایش تقاضای توان الکتریکی و محدودیت‌های پیش روی احداث و توسعه سیستم‌های قدرت جدید، معمولاً مجبور به بهره‌برداری از خطوط انتقال با ظرفیتی نزدیک حد حرارتی آن‌ها می‌باشد. در چنین شرایطی، قابلیت اطمینان سیستم کاهش می‌یابد، زیرا افزایش ناخواسته بار یا خروج بعضی خطوط منجر به افزایش بار در خطوط انتقال می‌گردد. در نتیجه با افزایش خطوط خارج شده، شرایط سیستم بحرانی‌تر شده و احتمال خاموشی سراسری افزایش می‌یابد. خط دارای تراکم، خطی است که توان عبوری از آن بیشتر از مقدار نامی مجاز باشد [۱]. به‌طور کلی روش‌های مدیریت تراکم به دو دسته فنی و غیر فنی تقسیم می‌شود. از روش‌های فنی می‌توان به قطع خطوط دارای تراکم، به‌کارگیری شیفت دهنده‌های فاز و بهره‌برداری از ادوات فکت و منابع تولید پراکنده اشاره کرد. از روش‌های غیر فنی می‌توان به زمان‌بندی تولید ژنراتورها، قطع بار و قیمت‌گذاری نقطه‌ای اشاره کرد. به‌طور کلی روش‌های فنی دارای مزیت‌هایی همچون عدم تأثیرگذاری بر مسائل اقتصادی هستند و به همین دلیل تولید کننده و توزیع کننده بیشتر میل به استفاده از این روش دارد [۲].

اخیراً ادوات فکتس و منابع تولید پراکنده به‌عنوان یک تکنولوژی به‌صرفه و مفید در سیستم‌های قدرت و توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند و بر روی پارامترهای متعددی همچون پروفیل ولتاژ، تلفات خط، جریان اتصال کوتاه، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم تأثیرگذار می‌باشند [۳]. بنابراین تعیین محل بهینه نصب، تعداد و اندازه آن‌ها یکی از مسائل مهمی می‌باشد که مورد توجه می‌باشد.

نصب این ادوات و منابع در محل‌های غیر بهینه سبب افزایش تلفات سیستم و تأثیر منفی بر پروفیل ولتاژ و سایر پارامترهای سیستم شود [۴]. در [۵] راهکاری برای شناسایی مکان بهینه نصب تجهیزات جبران ساز سنکرون استاتیکی (D-STATCOM) با هدف کمینه‌سازی تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم‌های توزیع شعاعی، ابقای دامنه ولتاژ بر روی ۱ پریونیت و تأمین توان راکتیو جبران‌ساز مورد نیاز در شینی که تجهیز D-STATCOM روی آن نصب شده است، پیشنهاد می‌دهد. در [۶] یک روش برای جایابی بهینه تجهیز جبران‌ساز استاتیکی توزیع D-STATCOM در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب برای بهبود کیفیت توان با توجه به متوسط مجموع اعوجاج هارمونیک ولتاژ، میانگین انحراف ولتاژ و هزینه کل سرمایه‌گذاری به عنوان تابع هدف پیشنهاد می‌دهد که محدودیت ولتاژ و قدرت برای هر یک از شینه‌ها انتخاب شده‌اند. در نهایت نتایج به دست آمده از الگوریتم کرم شب تاب با نتایج الگوریتم ژنتیک و اجتماع گروه ذرات مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. محققان در [۷-۸] مسئله قرار دهی بهینه منابع تولید پراکنده به صورت یک مسئله پخش بار بهینه (OPF) تعریف و با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی حل شده است.

در [۹] مسئله بهینه‌سازی جایابی منابع تولید پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی در یک شبکه ۶۹ باس استاندارد IEEE با استفاده از الگوریتم جست و جوی صاعقه حل شده است که نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب الگوریتم و روش ارائه شده را نشان می‌دهد. در [۱۰] اندازه و جایابی بهینه و همزمان منابع DG و ادوات فکت به منظور کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه توزیع شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف ارائه شده در این مرجع، دو هدفه بوده و بر روی یک شبکه ۳۳ باس پیاده‌سازی شده است. در [۱۱] مسئله جایابی بهینه جبران ساز سنکرون استاتیکی در یک شبکه توزیع به منظور بهبود کیفیت توان و کاهش هارمونیک شبکه و کاهش هزینه‌های تولید و بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک پرداخته است که نتایج به دست آمده نشان دهنده دستیابی به اهداف مذکور در این مرجع می‌باشد. در [۱۲] از بهینه‌سازی کلونی مورچه برای حل مسئله قراردعی بهینه منابع تولید پراکنده استفاده شده است که در آن بارهای سیستم به صورت توان متغیر مدل‌سازی شده‌اند و مسئله به صورت یک بهینه‌سازی چند هدفه تعریف شده است. در [۱۳] از الگوریتم ژنتیک مسئله قراردعی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف برای بارهای سیستم استفاده کرده است که در آن متغیرهای تصمیم‌گیری مکان و اندازه DG و هدف حداقل سازی تلفات کل شبکه است.

در این مقاله به بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی پرداخته می‌شود که به منظور حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده خواهد شد. در این مقاله به منظور بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی یک تابع چند هدفه و قیود بهینه‌سازی، مشخص می‌شود و در ادامه فرمول تشکیل شده برای دو شبکه نمونه استاندارد ۳۳ و ۶۹ باس IEEE با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده و نتایج حاصل از آن که شامل تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی است به دست می‌آید. لازم به ذکر می‌باشد که کلیه شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد. این مقاله شامل شش بخش می‌باشد؛ در بخش اول مقدمه و مرور بر پیشینه و ساختار مقاله ارائه شد. در بخش دوم فورمولاسیون مسئله بهینه‌سازی ارائه می‌گردد؛ در بخش سوم جزئیات روش پیشنهادی ارائه می‌شود و در ادامه در بخش چهارم نحوه حل مسئله پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود. در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش آخر، نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌گردد.

## ۲- مسئله بهینه‌سازی

ژنراتورهای سنکرون از پرکاربردترین انواع تولیدات پراکنده می‌باشند. این ژنراتورها در سیستم‌های توزیع فشار متوسط نصب می‌گردند و قابلیت اتصال مستقیم به شبکه را دارا می‌باشند. ژنراتورهای سنکرون بسته به سیستم تحریک قابلیت عملکرد در حالت‌های مختلف بهره‌برداری را دارا می‌باشند [۱۴]. در این پروژه از انواع منابع تولید پراکنده دیزل ژنراتورها را به عنوان تجهیز DGs که باید به‌طور هماهنگ با تجهیزات D-STATCOM به‌طور بهینه در شبکه توزیع جایابی شود، مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. محدودیت تولید توان اکتیو و راکتیو در دیزل ژنراتورهای سنکرون با توجه به منحنی عملکرد آن‌ها تعیین می‌گردد، این منحنی در واقع نقاط کار ژنراتور سنکرون را با توجه به محدودیت مکانیکی توربین، حد حرارتی سیم‌پیچی آمیچر و نیز محدودیت زیر تحریک ژنراتور نشان می‌دهد [۱۵]. مسئله بهینه‌سازی در این مقاله شامل تابع هدف و قیود مربوطه می‌باشد که در زیر بخش‌های بعدی آورده شده است.

## ۱-۲- تابع هدف

در این پروژه در واقع به دنبال تعیین همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در یک سیستم توزیع شعاعی برای حالت پایدار هستیم که البته هدف اصلی کمیته‌سازی مجموع هزینه‌های نصب و بهره‌برداری D-STATCOM و DGs و همچنین هزینه تلفات اهمی شبکه است. به علاوه قیود مسئله بهینه‌سازی برای محدودیت‌های ولتاژ و جریان و همچنین تولید اکتیو و راکتیو DGs و D-STATCOM به صورت مجزا فرمول‌بندی خواهند شد. بنابراین، تابع هدف پیشنهادی از نظر ریاضیاتی به صورت رابطه ۱ و ۲ بیان می‌شود [۱۶].

$$\text{Objective function} = \text{Minimize} (\text{total}_{\text{Cost}}) \quad (1)$$

$$\text{total}_{\text{Cost}} = \left( \left[ K_{\epsilon} \cdot \sum_{Li=1}^{nLi} (T_i \cdot P_{Lossi}^{WithDSTATCOM}) + \sum_{Li=1}^{nLi} (K_{ci} \cdot \text{Cost}_{DSTATCOM-yeari}) \right] \right) + \sum_{Li=1}^{nLi} DG_{\text{Cost}} \quad (2)$$

در رابطه فوق، اندیس  $Li$  تعداد سطوح مختلف بار شبکه توزیع را نشان می‌دهند.  $K_{\epsilon}$  هزینه تلفات انرژی،  $T_i$  دوره زمانی سطح بار  $Li$  ام و  $K_{ci}$  نسبت دوره زمانی سطح بار  $Li$  ام به دوره زمانی کل تعریف می‌شود. که اندیس  $K_{ci}$  به صورت رابطه ۳ تعیین می‌شود:

$$K_{ci} = \frac{T_i}{\sum_{Li=1}^{nLi} T_i} \quad (3)$$

تلفات توان در سطح بار  $Li$  ام ( $P_{Lossi}$ ) با رابطه ۴ قابل توصیف می‌باشد:

$$P_{Lossi} = \sum_{Li=1}^{nLi} R_i \cdot |I_{Li}|^2 \quad (4)$$

هزینه سرمایه‌گذاری قابل استخراج از هزینه D-STATCOM به صورت رابطه ۵ است.

$$\text{Cost}_{DSTATCOM-yeari} = \text{Cost}_{DSTATCOMi} \cdot \left( \frac{(1+B)^{nDSTATCOM \times B}}{(1+B)^{nDSTATCOM} - 1} \right) \quad (5)$$

که در رابطه فوق،  $\text{Cost}_{DSTATCOMi}$  هزینه سالانه D-STATCOM در سطح بار  $Li$  ام،  $\text{Cost}_{DSTATCOMi}$  هزینه سرمایه‌گذاری تخصیص یافته به سطح بار  $Li$  ام،  $nDSTATCOM$  عمر D-STATCOM، و  $B$  نرخ بازگشت سرمایه است. کل صرفه‌جویی در هزینه (TCS) اختلاف بین هزینه تلفات کل انرژی قبل نصب و هزینه تلفات کل انرژی و هزینه سالانه D-STATCOM بعد نصب در سه سطح بار است:

$$TCS = K_{\epsilon} \cdot \sum_{Li=1}^{nLi} T_i \cdot (P_{Lossi} - P_{Lossi}^{WithDSTATCOM}) - \sum_{Li=1}^{nLi} K_{ci} \cdot \text{Cost}_{DSTATCOM-yeari} \quad (6)$$

از آنجایی که به طور همزمان با تجهیزات جبران‌ساز استاتیک D-STATCOM، تعداد و مکان بهینه دیزل ژنراتورهای سنکرون DGs نیز تعیین و هزینه‌های نصب و بهره‌برداری در سطوح مختلف بار شبکه ارزیابی می‌شوند. بنابراین، تابع هزینه نصب و بهره‌برداری از دیزل ژنراتورهای سنکرون DGs بر اساس ثوابت  $a$ ،  $b$  و  $c$  تابع هزینه طبق رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$DG_{\text{Cost}} = a + b \cdot P_{DG} + c \cdot P_{DG}^2 \quad (7)$$

مطابق با آنچه بیان شد توابع هدف مورد استفاده در این مقاله به صورت زیر می‌باشد.

$$OF_{\text{Cost}} = OF_1 + OF_2 + OF_3 \quad (8)$$

که تابع فوق شامل تابع هزینه تلفات شبکه ( $OF_1$ )، تابع هزینه مربوط به منبع DG با ضریب توان ۰٫۸۵ ( $OF_2$ ) و تابع هزینه مربوط به DSTATCOM ( $OF_3$ ) می‌باشد که مطابق روابط زیر ارائه می‌گردند.

$$OF_1 = P_{\text{loss}} \times C_{\text{loss}} \times 8760 \times 30 \quad (9)$$

$$OF_2 = S_{DG} \times 0.85 \times C_{DG-inv} + S_{DG} \times 0.85 \times C_{DG-o\&m} \times 8760 \times 30 \quad (10)$$

$$OF_3 = Q_{DSTATCOM} \times C_{DSTATCOM-inv} \quad (11)$$

در رابطه فوق، تلفات با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n R_i |I_i|^2 \quad (12)$$

در کلیه روابط فوق،  $C$  ضریب هزینه می‌باشد که برای هر یک از تجهیزات متفاوت می‌باشد. تابع دیگری که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد، تابع بارپذیری سیستم می‌باشد که با توجه به منحنی ولتاژ بر حسب بار پذیری محاسبه می‌گردد. در سیستم توزیع

بارهای اکتیو و راکتیو در پخش بار به صورت زیر افزایش می‌یابند.

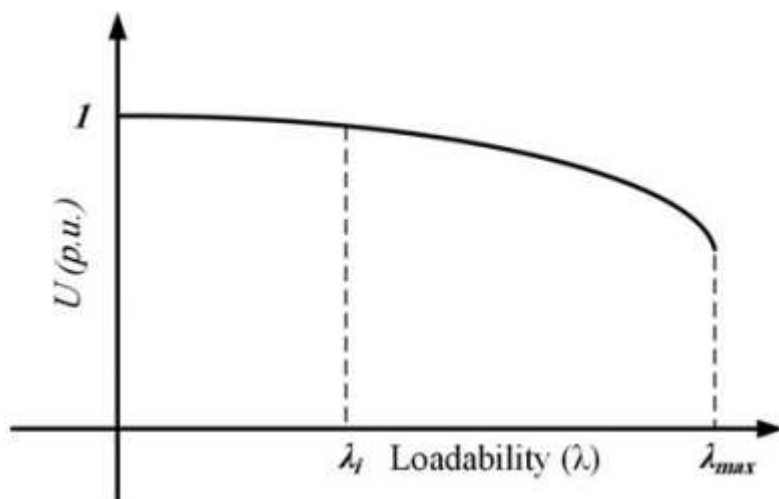
$$P_i = \lambda_i \times P_0 \quad (13)$$

$$Q_i = \lambda_i \times Q_0 \quad (14)$$

$$\lambda_i = 1 + (i \times 0.01) \quad (15)$$

حال با توجه به رابطه فوق تابع مربوط به بارپذیری شبکه با توجه به شکل ۱ به صورت رابطه ۱۶ ارائه می‌شود [۱۷].

$$OF_{Load\ ability} = \frac{1}{\lambda_{max}} \quad (16)$$



شکل ۱. منحنی ولتاژ بر حسب بار پذیری سیستم توزیع [۱۷]

## ۲-۲-۲- قیود

جهت بهره‌برداری ایمن و کارا از سیستم توزیع و برای تأمین تقاضای بار مشترکین به طور لحظه‌ای دامنه ولتاژ در تک تک شین‌های فیدرهای شبکه‌های توزیع بعد نصب و بهره‌برداری از تجهیزات جبران‌ساز استاتیک D-STATCOM و منابع تولید پراکنده DGs در مکان بهینه باید در محدوده مجاز باشد.  $V_{i-min}$  و  $V_{i-max}$  به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل ولتاژ شین نام سیستم می‌باشد. مدل‌سازی این محدودیت در مسئله بهینه‌سازی بر اساس رابطه ۱۷ انجام می‌شود [۱۸]:

$$|V_{i-min}| \leq |V_i| \leq |V_{i-max}| \quad (17)$$

مقدار توان راکتیو تزریقی به شین‌هایی که تجهیزات جبران‌ساز استاتیک D-STATCOM بر روی آن‌ها نصب شده‌اند باید در محدوده مجاز بهره‌برداری آن تجهیز باشد. اندیس  $Q^{k}_{D-STATCOM\ max}$  ماکزیمم ظرفیت راکتیو Kام تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM شبکه می‌باشد که مدل‌سازی این محدودیت در مسئله بهینه‌سازی مطابق رابطه ۱۸ انجام می‌شود:

$$0 \leq Q^{k}_{D-STATCOM} \leq Q^{k}_{D-STATCOM\ max} \quad (18)$$

مقدار توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شین‌هایی که منابع تولید پراکنده دیزل ژنراتور سنکرون بر روی آن‌ها نصب شده‌اند باید در محدوده مجاز بهره‌برداری آن تجهیز باشد. اندیس‌های  $P^{k}_{DG\ max}$  و  $P^{k}_{DG\ min}$  به ترتیب ماکزیمم و مینیمم ظرفیت Kام تجهیز دیزل ژنراتور سنکرون شبکه برای تولید توان اکتیو می‌باشند و به طور مشابه اندیس‌های  $Q^{k}_{DG\ max}$  و  $Q^{k}_{DG\ min}$  ماکزیمم و مینیمم ظرفیت Kام تجهیز دیزل ژنراتور سنکرون شبکه برای تولید توان راکتیو می‌باشند که مدل‌سازی این محدودیت در مسئله بهینه‌سازی مطابق روابط ۱۹ تا ۲۱ انجام می‌شود:

$$P^{k}_{DG\ min} \leq P^{k}_{DG} \leq P^{k}_{DG\ max} \quad (19)$$

$$Q^{k}_{DG\ min} \leq Q^{k}_{DG} \leq Q^{k}_{DG\ max} \quad (20)$$

$$P^2_{DG} + Q^2_{DG} \leq S^2_{DG\ max} \quad (21)$$

که اندیس  $S_{DGmax}^k$  توان ظاهری دیزل ژنراتور  $k$ ام می‌باشد. در این مقاله قیود زیر با مقادیر مربوط به حدود آن‌ها مطابق روابط زیر می‌باشد.

$$0.95 \text{ p.u} \leq |V_i| \leq 1.05 \text{ p.u} \quad (22)$$

$$20\text{kVA} \leq S_{DG} \leq 200\text{kVA} \quad (23)$$

$$20\text{kVar} \leq Q_{D-STATCOM} \leq 200\text{kVar} \quad (24)$$

### ۳- روش پیشنهادی

روش‌های معمول پخش بار مانند گوس-سایدل، نیوتن رافسون و غیره که برای حل شبکه‌های انتقال بکار می‌روند در مورد شبکه‌هایی که دارای شرایط خاصی هستند کارایی لازم را ندارد. شبکه‌های توزیع از جمله این شبکه‌ها می‌باشند. به دلیل اینکه گستره تغییرات  $r$  و  $x$  در آن‌ها زیاد بوده و نیز نسبت  $(r/x)$  در آن‌ها بالاست و روش‌های پخش بار مذکور به سختی همگرا می‌شوند. به دلایل گفته شده تحقیقات زیادی در زمینه پخش بار در شبکه‌های توزیع انجام گرفته است. در یک گروه از روش‌های پخش بار به تناسب ویژگی‌های شبکه توزیع راه‌حل‌ها و اصلاحاتی برای روش‌های کلاسیک قبلی ارائه شده است. اما، در الگوریتم‌های جدید پیشنهاد شده برای پخش بار در شبکه‌های توزیع از ویژگی‌ها و نوع ساختار ویژه شبکه‌های توزیع برای ارائه الگوریتم جدید استفاده شده است. در این مقاله از روش پخش بار جاروب رفت و برگشتی که برای شبکه‌های شعاعی مطرح شده است استفاده می‌شود. فرض بر این است که شین اولیه یک شین مرجع با اندازه و زاویه ولتاژ معلوم باشد و ولتاژ اولیه سایر شین‌ها برابر ولتاژ شین مرجع و تلفات اولیه تمام شاخه‌ها برابر صفر باشد. الگوریتم تکراری برای حل پخش بار سیستم شعاعی از چهار مرحله تشکیل می‌شود [۱۹]:

#### ۳-۱- محاسبه توان گره‌ها

از آنجا که توان جذب شده توسط بعضی از بارها (یعنی بارهای جریان ثابت و امپدانس ثابت) و توان راکتیو تزریق شده توسط خازن‌ها به علت تغییر ولتاژ گره‌ها در طول تکرار الگوریتم تغییر می‌کند، لذا باید در طی تمام تکرارها دوباره محاسبه شوند. توان جذب شده بارهای توان ثابت در طول تکراری متوالی تغییر نمی‌کند.

#### ۳-۲- جاروب پس رو برای جمع کردن توان شاخه

با شروع از باسهای انتهایی و حرکت به سمت باس slack، توان‌های شاخه‌ها مطابق رابطه ۲۵ محاسبه می‌شوند. که در رابطه فوق  $S_n$  توان شاخه  $n$ ام،  $Z_n$  گره انتهایی شاخه  $n$  توان تزریق شده به بار متصل به گره  $Z_n$ ام،  $M$  مجموعه شاخه‌هایی که در گره  $Z_n$  به شاخه  $n$  متصل هستند،  $S_m$  توان شاخه  $m$  و  $Loss_n$  تلفات شاخه  $n$  است که در تکرار اول صفر فرض می‌شود.

$$S_n = S_j + \sum_M S_m + loss_n \quad (25)$$

#### ۳-۳- جاروب پیش رو برای به روز کردن ولتاژ گره‌ها

با شروع از شاخه متصل به شین slack و حرکت به سمت شاخه‌های انتهایی، جریان‌ها در باس فرستنده شاخه  $n$  (یعنی  $i$ ) و ولتاژ در باس گیرنده شاخه  $n$  (یعنی  $j$ ) مطابق رابطه ۲۶ و ۲۷ محاسبه می‌شوند:

$$I_n = \frac{S_n}{V_i} \quad (26)$$

$$V_n = V_j - Z_n \cdot I_n \quad (27)$$

#### ۳-۴- محاسبه عدم تطابق ولتاژ

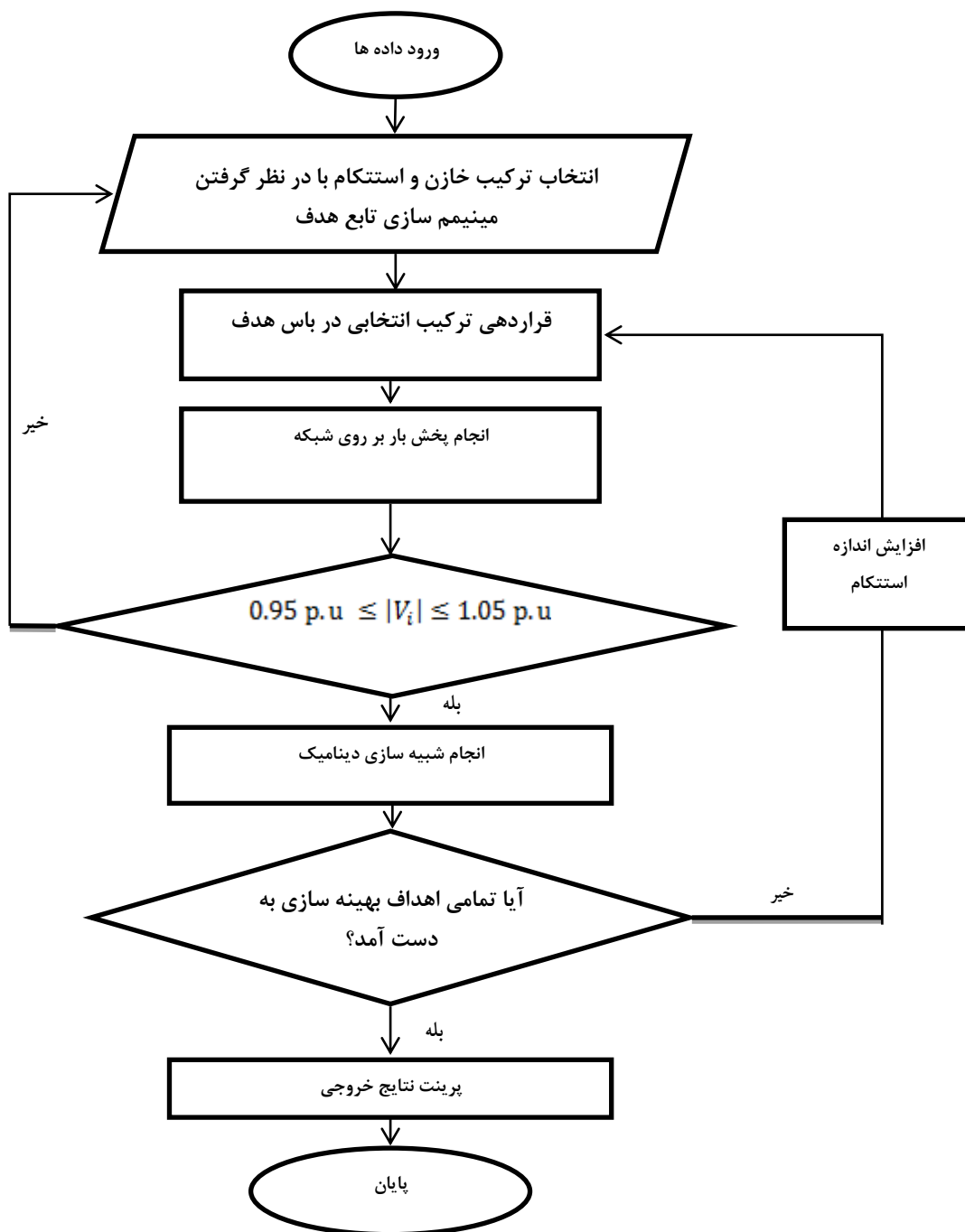
پس از اینکه مراحل فوق در هر تکرار انجام شد، عدم تطابق ولتاژ برای تمام باسها مطابق رابطه ۲۸ محاسبه می‌شود:

$$\Delta V_i(k) = |V_i(k)| - |V_i(k+1)| \quad (28)$$

که  $k$  شمارنده تکرارها در الگوریتم پخش بار جاروب رفت و برگشتی می‌باشد. اگر هر کدام از  $\Delta V_i$ ها بیشتر از معیار همگرایی باشد، مراحل فوق مجدداً تکرار می‌شود تا شرایط همگرایی برای تمام شینه‌ها حاصل شود [۲۰].

#### ۴- حل مسئله با به کارگیری الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از ابتدایی‌ترین تکنیک‌های جستجوی تصادفی پیشنهاد شده می‌باشد، که هنوز به طور گسترده برای مسائل چند بعدی، غیر خطی فیزیکی، مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱].



شکل ۲. فلوچارت روش پیشنهادی

هر طرح الگوریتم ژنتیک با ایجاد تصادفی یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود و سپس در هر نسل یک جستجوی دو مرحله‌ای تکرار

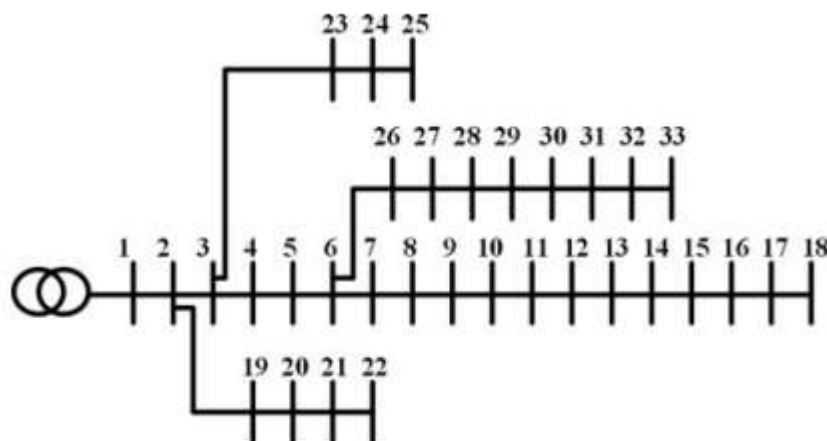
شونده انجام می‌شود که در آن در مرحله ی اول آنها یک تابع تناسب را ارزیابی می‌کنند و سپس در مرحله ی دوم یک جمعیت جدید از عوامل با استفاده از طرح های تقاطع و جهش از بخش ها مختلف به وجود می‌آید. فرآیند تکرار شونده ادامه می‌یابد تا تابع هدف به اندازه ی مطلوب حداقل شود. در پایان، کروموزومی که بهترین عملکرد تابع هدف را تولید نموده است به عنوان مناسب ترین فرد در نظر گرفته می‌شود و به عنوان یک راه حل در دسترس برای این مسئله می‌باشد [۲۲]. شکل ۲ فلوجارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در این مقاله، هر کروموزوم به عنوان یک بردار، کدگذاری شده است که در آن تعداد واحدهای تولید پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی به همراه محل خاص آنها و اندازه ی هر کدام کدگذاری شده است. راه حل ها بر مبنای الگوریتم ژنتیک تکرار شونده، تلاش می‌کنند بهترین کروموزوم را به دست دهند که در آن تابع هدف حداقل است. دلیل انتخاب الگوریتم ژنتیک در این پژوهش، ساده بودن فزاینده جستجو، موثر عمل کردن، منعطف بودن و دقیق بودن تمامی پاسخ ها در این روش می‌باشد.

### ۵- نتایج شبیه سازی

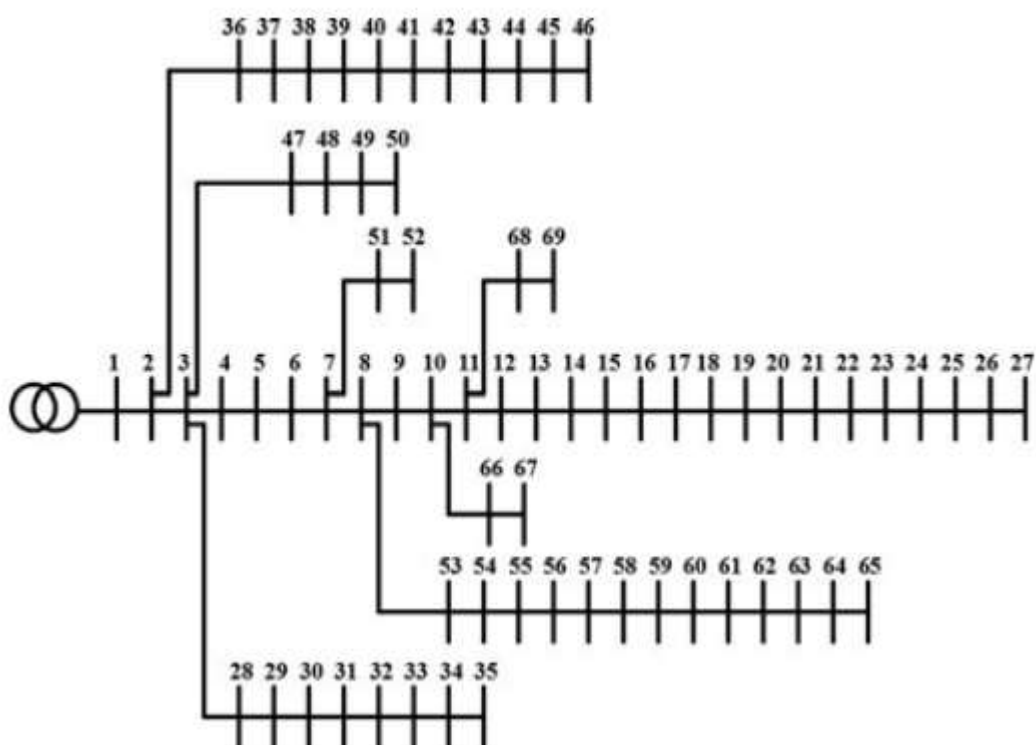
همان‌گونه که قبلاً بیان شد مسئله بهینه‌سازی در واقع یافتن جواب یا جواب‌هایی بر روی یک مجموعه از گزینه‌های امکان‌پذیر (رعایت قیود مسئله) با هدف بهینه کردن معیار یا معیارهای مسئله است. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه زیر شاخه‌ای از مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که در میان مجموعه نامحدودی از جواب‌های محتمل صورت می‌گیرد [۲۳]. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه بر خواسته از روش‌های تصمیم‌گیری در دنیای واقعی است که شخص تصمیم‌گیرنده با مجموعه‌ای از اهداف و معیارهای متضاد و متعارض روبروست. در این‌گونه از مسائل برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و به خاطر وجود چند هدف متعارض به جای تنها یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌ها حاصل می‌شود. هدف از حل یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، به دست آوردن مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پارتو (جواب‌های نامغلوب) است [۲۴].

هدف از بهینه‌سازی چندهدفه یافتن جواب‌های قابل قبول و ارائه آن به تصمیم‌گیرنده برای انتخاب یک گزینه از میان جواب‌های ارائه شده است. در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای دو شبکه نمونه ۳۳ و ۶۹ باس استاندارد IEEE [۲۵] مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳ دیاگرام تک خطی مربوط به شبکه ۳۳ باس مورد استفاده در مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۳. شبکه نمونه ۳۳ باس استاندارد IEEE [۲۵]

همان‌طور که مشاهده می‌شود فیدر شعاعی مورد مطالعه دارای ۳۳ شین است تمام شینه‌ها به بارهای متناظر اتصال یافته‌اند. ترانسفورماتور پست فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت می‌باشد و به باس ۱ متصل شده است و بنابراین سطح ولتاژ در طول فیدر توزیع KV ۲۰ می‌باشد. شکل ۴ دیاگرام تک خطی مربوط به شبکه ۶۹ باس مورد استفاده در مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۴. شبکه نمونه ۶۹ باس استاندارد IEEE [۲۵]

در این شبکه، ترانسفورماتور پست فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت می‌باشد و به باس ۱ متصل شده است بنابراین سطح ولتاژ در طول فیدر توزیع در این شبکه نیز ۲۰ KV می‌باشد.

#### ۵-۱- نتایج شبیه‌سازی برای شبکه نمونه ۳۳ باس

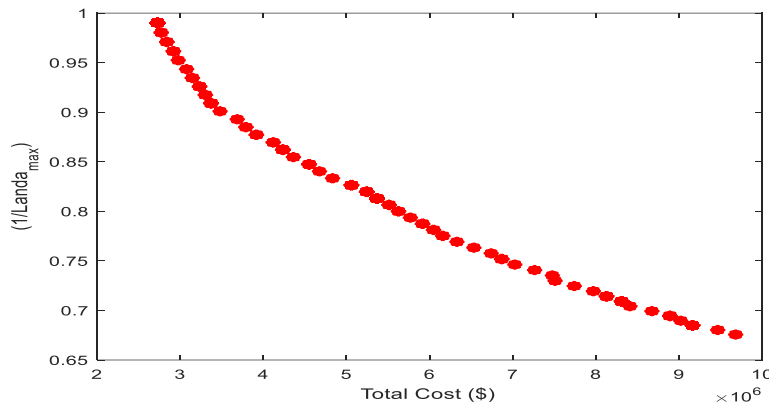
پارامترهای الگوریتم ژنتیک و منحنی پارتو برای شبکه ۳۳ باس IEEE مطابق جدول ۱ و شکل ۲ می‌باشد. جدول ۲ مقادیر به دست آمده در نقاط پارتو بهینه در این حالت را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشخص شده است، بسته به نقاط پارتو، تعداد منابع DG بین یک تا سه می‌باشد اما در همه حالات تعداد DSTATCOM، ۸ عدد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش بار پذیری، تعداد تجهیزات مربوط به DG و DSTATCOM بیشتر شده و به همین دلیل هزینه افزایش یافته است. در عین حال در این حالت تلفات کاهش یافته است. جدول ۳ نتایج حاصل از بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در این حالت را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک مربوط به شبکه ۳۳ باس

الگوریتم	شبکه ۳۳ باسه
GA	تعداد کروموزوم اولیه: ۳۰۰
	نرخ جهش: ۰,۳
	تعداد متغیرها: ۱۲۸
	تعداد تکرار: ۱۰۰





شکل ۵. منحنی پارتو برای سیستم ۳۳ باسه با الگوریتم GA

جدول ۲. مقادیر به دست آمده در نقاط پارتو بهینه (الگوریتم GA برای شبکه ۳۳ باس)

نقاط پرتو	$1/\lambda_{max}$ (p.u.)	Cost (\$)	Distance	Loss (kW)	Voltage profile index	تعداد DGs	تعداد DSTATCOM
1	0.97087	2.7759e+06	1.4389	117.15	0.0469	1	8
2	0.95238	3.0219e+06	1.3937	114.01	0.0456	2	8
3	0.83333	5.1584e+06	1.2979	90.398	0.0351	3	8

جدول ۳. نتایج حاصل از بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی (الگوریتم GA برای شبکه ۳۳ باس)

نقاط پرتو	DG buses	DG capacities (kVA)	DSTATCOM buses	DSTATCOM capacities (kVAR)			
				6	7	9	17 23
1	17	102.31	6 7 9 17 23 27 28 31	62.248	62.109	113.68	58.123
				115.31	90.943	74.627	81.189
2	17 31	117.85 20	6 7 9 17 23 27 28 31	65.174	81.387	20	35.619
				107.92	65.11	146.71	119.02
3	14 17 31	47.94 200 191.76	6 7 9 17 23 27 28 31	81.337	61.598	121.96	85.089
				132.05	137.05	137.46	96.701

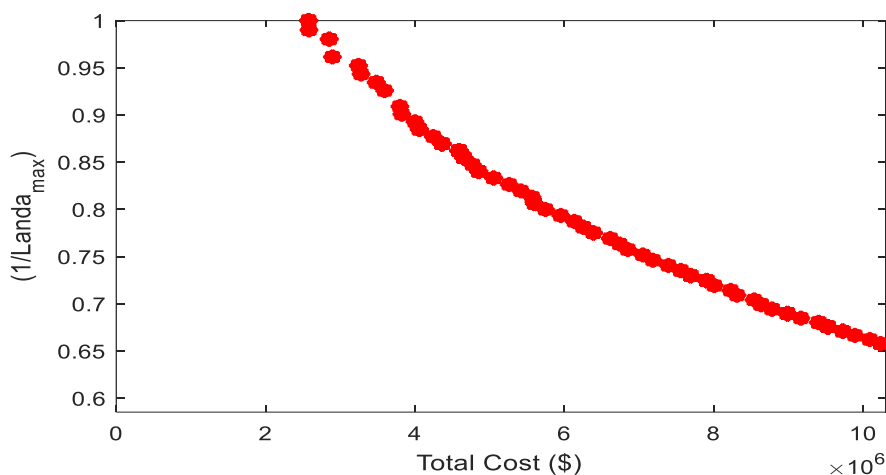
مطابق جدول فوق، مکان و مقادیر منابع تولید پراکنده و DSTATCOM مورد نیاز در شبکه توزیع ۳۳ باس در حالت استفاده از الگوریتم GA مشخص شده است.

#### ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی برای شبکه نمونه ۶۹ باس

در حالت شبکه ۶۹ باس IEEE، الگوریتم ژنتیک نیاز به یک سری پارامترها دارد که مطابق جدول ۴ می‌باشد. شکل ۶ منحنی پارتو بهینه برای سیستم ۶۹ باس با الگوریتم GA را نشان می‌دهد.

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک مربوط به شبکه ۶۹ باس

الگوریتم	شبکه ۳۳ باسه
GA	تعداد کروموزوم اولیه: ۳۰۰
	نرخ جهش: ۰,۳
	تعداد متغیرها: ۲۷۲
	تعداد تکرار: ۳۰۰



شکل ۶. منحنی پارتو برای سیستم ۶۹ باسه با الگوریتم GA

جدول ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر به دست آمده در نقاط پارتو و نتایج حاصل از بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی را نشان می‌دهند.

جدول ۵. مقادیر به دست آمده در نقاط پارتو بهینه (الگوریتم GA برای شبکه ۶۹ باس)

نقاط پرتو	$1/\lambda_{max}$ (p.u.)	Cost (\$)	Distance	Loss (kW)	Voltage profile index	Number of DGs	Number of DSTATCOM
1	0.92593	3.3457e+06	1.4637	121.18	0.0404	1	10
2	0.8547	4.4981e+06	1.4005	104.98	0.0356	2	10
3	0.8	5.8208e+06	1.387	88.745	0.030246	3	10

در این حالت نیز مشابه حالت قبل، بهینه‌سازی به خوبی صورت گرفته است و مکان و ظرفیت منابع DG و DSTATCOM به‌طور دقیق مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بارپذیری، نیاز به تعداد بیشتری از این نوع ادوات در شبکه توزیع است و به همین دلیل هزینه سیستم افزایش می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر کارایی روش ارائه شده در این مقاله، از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) نیز استفاده شد و نتایج با روش الگوریتم ژنتیک مقایسه شد که خلاصه مقایسه صورت گرفته در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج حاصل از بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی (الگوریتم GA برای شبکه ۶۹ باس)

نقاط پرتو	DG buses	DG capacities (kVA)	DSTATCOM buses	DSTATCOM capacities (kVAR)
1	64	160.93	25 54 55 56 57 60 62 63 64 68	186.2 182.82 181.45 182.16 187.18 182.86 172.69 167.41 183.97 182.72
2	63 64	173.28 157.02	25 54 55 56 57 60 62 63 64 68	174.85 176.31 174.48 169.38 169.84 170.54 173.05 173.27 173.81 178.96
3	62 63 64	181.73 171.81 166.69	25 54 55 56 57 60 62 63 64 68	170.3 181.26 180.14 167.94 172.22 170.73 167.88 167.02 177.34 173.81

جدول ۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی در دو حالت استفاده از الگوریتم GWO و GA

الگوریتم	بارپذیری سیستم	هزینه سیستم	تلفات سیستم	تعداد منابع DG و DSTATCOM	ظرفیت منابع DG و DSTATCOM
ژنتیک	بیشتر	کمتر	کمتر	کمتر	کمتر
گرگ خاکستری	کمتر	بیشتر	بیشتر	بیشتر	بیشتر

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک بسیار بهتر عمل کرده است و نقاط بهینه با این روش سبب عملکرد بهتر سیستم توزیع ۳۳ و ۶۹ باس IEEE شده‌اند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

استفاده از منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای انعطاف‌پذیر در شبکه انتقال و توزیع یکی از مهم‌ترین استراتژی‌هایی است که سیستم‌های الکتریکی برای بهره‌برداری در محیط مقررات زدایی شده امروزی در نظر می‌گیرند. حضور DG و ادوات FACTS در سطح توزیع منجر به مزایای مختلف می‌شود از جمله آزاد شدن ظرفیت خطوط، کاهش تلفات، پشتیبانی ولتاژ، پیک‌سایی سطح بار و بهبود کلی بارده انرژی، قابلیت اطمینان و کیفیت توان. بنابراین تعیین ظرفیت و محل نصب بهره‌برداری DG و ادوات جبران‌ساز FACTS فاکتورهای مهمی هستند که باید با دقت به منظور کمینه‌سازی تلفات یا بهبود پروفیل ولتاژ و جریان شبکه در نظر گرفته شوند. در این مقاله به بررسی بهینه‌سازی همزمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی پرداخته شد. توابع هدف در نظر گرفته شده شامل هزینه و بارپذیری سیستم می‌باشند و الگوریتم پیشنهادی الگوریتم ژنتیک است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش بارپذیری سیستم، هزینه افزایش می‌یابد زیرا تعداد تجهیزات مربوط به منابع تولید پراکنده و DSTATCOM بیشتر می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بهینه‌سازی و جایابی همزمان منابع DG و DSTATCOM سبب کاهش هزینه‌ها و افزایش بارپذیری سیستم توزیع می‌شود. مقایسه نتایج در دو حالت استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک که در این پژوهش از آن برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری بهتر عمل کرده است؛ زیرا در این حالت هزینه کاهش بیشتری داشته و هم زمان نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری بارپذیری سیستم بیشتر می‌باشد که این نشان‌دهنده بهینه‌سازی دقیق تر توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

## مراجع

- [1] Ali, Ziad M., et al. "A novel distributed generation planning algorithm via graphically-based network reconfiguration and soft open points placement using Archimedes optimization algorithm." *Ain Shams Engineering Journal* (2021).
- [2] Oda, Eyad S., et al. "Stochastic Optimal Planning of Distribution System Considering Integrated Photovoltaic-Based DG and DSTATCOM under Uncertainties of Loads and Solar Irradiance." *IEEE Access* 9 (2021): 26541-26555.
- [3] Bhadoriya, Jitendra Singh, and Atma Ram Gupta. "Optimal Share of DG and DSTATCOM in Distribution Network Using Firefly Algorithm." *Recent Advances in Power Systems*. Springer, Singapore, 2021. 497-508.
- [4] Saad, Ouali, and Cherkaoui Abdeljebbar. "Historical Literature Review of Optimal Placement of Electrical Devices in Power Systems: Critical Analysis of Renewable Distributed Generation Efforts." *IEEE Systems Journal* (2020).
- [5] Li, Yinghai, et al. "The chaos-based shuffled frog leaping algorithm and its application." 2008 fourth international conference on natural computation. Vol. 1. IEEE, 2008.
- [6] A. Khorsandi A. Alimardani B. Vahidi S.H. Hosseinian, "Hybrid shuffled frog leaping algorithm and Nelder–Mead simplex search for optimal reactive power dispatch," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 5, no. 2, pp. 249–256, 2011.
- [7] Ochoa, Luis F., Chris J. Dent, and Gareth P. Harrison. "Distribution network capacity assessment: Variable DG and active networks." *IEEE Transactions on Power Systems* 25.1 (2009): 87-95.
- [8] Ochoa, Luis F., and Gareth P. Harrison. "Minimizing energy losses: Optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation." *IEEE Transactions on Power Systems* 26.1 (2010): 198-205.
- [9] Thangaraj, Yuvaraj, and Ravi Kuppan. "Multi-objective simultaneous placement of DG and DSTATCOM using novel lightning search algorithm." *Journal of applied research and technology* 15.5 (2017): 477-491.
- [10] Weqar, Bushra, Mohd Tauseef Khan, and Anwar Shahzad Siddiqui. "Optimal Placement of Distributed Generation and D-STATCOM in Radial Distribution Network." *Smart Science* 6.2 (2018): 125-133.
- [11] Nazari, Mohammad Hassan, et al. "Optimal multi-objective D-STATCOM placement using MOGA for THD mitigation and cost minimization." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 35.2 (2018): 2339-2348.
- [12] Wang, Lingfeng, and Chanan Singh. "Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an ant colony system algorithm." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 38.6 (2008): 757-764.
- [13] Singh, R. K., and S. K. Goswami. "Optimal siting and sizing of distributed generations in radial and networked systems considering different voltage dependent static load models." 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference. IEEE, 2008.
- [14] Safari, Amin, et al. "multi-objective model for simultaneous distribution networks reconfiguration and allocation of D-STATCOM under uncertainties of RESs." *International Journal of Ambient Energy* (2020): 1-10.
- [15] Selim, Ali, Salah Kamel, and Francisco Jurado. "Hybrid optimization technique for optimal placement of DG and D-STATCOM in distribution networks." 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2018.
- [16] Devi, Sudha, and M. Geethanjali. "Optimal location and sizing determination of Distributed Generation and DSTATCOM using Particle Swarm Optimization algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 62 (2014): 562-570.
- [17] Prakash, Prem, and Dheeraj K. Khatod. "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review." *Renewable and sustainable energy reviews* 57 (2016): 111-130.
- [18] Das, Sangeeta, Debapriya Das, and Amit Patra. "Operation of distribution network with optimal placement and sizing of dispatchable DGs and shunt capacitors." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113 (2019): 109219.
- [19] Kawambwa, Shamte, et al. "An improved backward/forward sweep power flow method based on network tree depth for radial distribution systems." *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 8.1 (2021): 1-18.
- [20] Raj, Rahul, and P. Suresh Babu. "A backward/forward method for solving load flows in droop-controlled microgrids." *Control Applications in Modern Power System*. Springer, Singapore, 2021. 367-377.
- [21] Garud, Kunal Sandip, Simon Jayaraj, and Moo-Yeon Lee. "A review on modeling of solar photovoltaic systems using artificial neural networks, fuzzy logic, genetic algorithm and hybrid models." *International Journal of Energy Research* 45.1 (2021): 6-35.
- [22] Garud, Kunal Sandip, Simon Jayaraj, and Moo-Yeon Lee. "A review on modeling of solar photovoltaic systems using artificial neural networks, fuzzy logic, genetic algorithm and hybrid models." *International Journal of Energy Research* 45.1 (2021): 6-35.
- [23] Colla, Valentina, et al. "Ga-based solutions comparison for storage strategies optimization for an automated warehouse." 2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. IEEE, 2009.
- [24] Hosseini, Mehdi, and Heidar Ali Shayanfar. "Regular paper modeling of series and shunt distribution FACTS devices in distribution systems load flow." *J. Electrical Systems* 4.4 (2008): 1-12.
- [25] Blažič, Boštjan, and Igor Papič. "A new mathematical model and control of D-StatCom for operation under unbalanced conditions." *Electric Power Systems Research* 72.3 (2004): 279-287.

## Optimize the Number, Locating, and Sizing of D-STATCOM and DGs Using GA Algorithm

---

Mohammad Khadem<sup>1\*</sup>, Mostafa Esmail Beag<sup>2</sup>

---

1\*: PhD Student of Electrical Engineering, Islamic Azad University Bushehr Branch, Branch, Iran,  
Mohammad.Khadem8739@Yahoo.com

2: Assistant Professor, Islamic Azad University Bushehr Branch, Bushehr, Iran, Me\_Beag@Yahoo.com

### ABSTRACT:

Recently the use of Flexible alternating current transmission system (FACTS) devices and distributed generation resources as a technology in power and distribution systems is increasing. These equipments affect various parameters such as voltage profile, line losses, short circuit current, stability and reliability of the system, and therefore determining the optimal installation location, their number and size is one of the important issues that is considered because the installation of these devices and Resources in non-optimal locations increase system losses and negatively affect voltage profiles and other system parameters. In this paper, the simultaneous optimization of the number, location and size of distributed generation resources and static synchronous compensation is used and in order to solve the optimization problem, genetic algorithm (GA) is used. For this purpose, a multi-objective function including operating costs and generation of distributed generation resources and static synchronous compensation and system load capacity are presented and the simulation results were analyzed for two 33 and 69 IEEE standard networks. The results show that with increasing system load, the cost increases because the number of equipment related to distributed generation sources and static synchronous compensator increases. Also, the simultaneous optimization and placement of this equipment reduces costs and increases the load capacity of the distribution system.

---

**KEYWORDS:** Optimization, DG, Static Synchronous Compensator, Genetic Algorithm