

مکان‌یابی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در حضور عدم قطعیت‌ها

حمید فلقی، محمودرضا حقی‌فام و محسن پارسامقدم

تلفات، قابلیت اطمینان و هزینه احداث واحدهای تولیدی به‌عنوان هدف طراحی مورد نظر بوده است. در [۴] روشی برای شناسایی مکان و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع در قالب یک مدل برنامه‌ریزی فازی ارائه شده است. در [۵] ضمن بررسی تأثیر واحدهای DG روی تلفات اهمی و ظرفیت سیستم توزیع، الگوریتمی برای یافتن پاسخ تقریبی مکان واحدهای DG روی خطوط به‌منظور کاهش تلفات سیستم پیشنهاد شده است. مسأله جایابی واحدهای تولید پراکنده در فیدرهای شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توسط الگوریتم ژنتیک نیز حل شده است [۶]. در این مطالعه محدودیت‌های فنی همچون افت ولتاژ، بارگذاری خطوط و جریان اتصال کوتاه در شبکه مورد توجه قرار گرفته است. روشی تحلیلی نیز برای مکان‌یابی واحدهای DG با هدف کاهش تلفات در [۷] ارائه شده است. روش دیگری برای حل مسأله مبتنی بر قواعد ساده سرانگشتی در [۸] آمده است. اصول این روش مطابق "قانون دو سوم" است که اغلب برای خازن‌گذاری در شبکه توزیع با فرض بار توزیع‌شده یکسان در طول فیدر مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق این روش بهترین مکان احداث واحد DG با ظرفیت دو سوم بار کل فیدر روی خطوط در فاصله دو سوم از ابتدای آن است. در [۹] و [۱۰] با فرض امکان نصب DG در تمام باس‌های مصرف در سیستم، روشی مبتنی بر پخش بار برای یافتن ظرفیت واحدهای DG در هر باس پیشنهاد شده است. مسأله جایابی واحدهای DG روی فیدرها در قالب بهینه‌سازی چندمنظوره در [۱۱] مدل‌سازی و حل شده است. در این مطالعه کاهش هزینه‌های ثابت و متغیر سیستم در قالب اهداف مدل منظور شده است. در [۱۲] جایابی واحدهای تولید پراکنده در پست‌های سیستم انتقال در کنار دیگر گزینه‌های ممکن برای توسعه شبکه انتقال همچون احداث و یا تقویت خطوط و پست‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق مسأله مکان‌یابی واحدهای تولیدی از دیدگاه طراحی سیستم انتقال مورد توجه قرار گرفته و منافع اقتصادی شبکه‌های توزیع مورد نظر نبوده است. در [۱۳] مسأله تعیین مکان و ظرفیت واحدهای DG در شبکه فشار متوسط در محیط تجدید ساختار شده مطرح و با به‌کارگیری یک الگوریتم جستجوی ابتکاری حل شده است. در این تحقیق حداقل‌سازی سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری شامل تلفات و تأمین انرژی مورد نیاز شبکه، به‌عنوان هدف مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله یک فرموله‌بندی جدید برای مسأله مکان‌یابی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در مدل‌سازی مسأله علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌ها و بهبود کارایی اقتصادی، کاهش ریسک‌های فنی و اقتصادی ناشی از حضور عدم قطعیت‌ها در سیستم نیز مورد توجه قرار گرفته است. به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده شده است. مدل ریاضی مسأله مبتنی بر بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه فرموله‌بندی شده و برای جستجوی پاسخ‌های کارا در مدل طراحی‌شده از ویرایش خاصی از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شده

چکیده: در این مقاله مسأله تعیین تعداد، موقعیت و ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در حضور عدم قطعیت در اطلاعات بار و قیمت برق بازار انتقال، در قالب یک مدل ریاضی با معیارهای چندگانه فرموله‌بندی شده است. اهداف مکان‌یابی در مدل پیشنهادی عبارتند از: (۱) کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، (۲) کاهش ریسک‌های فنی سیستم و (۳) کاهش ریسک اقتصادی ناشی از عدم قطعیت‌ها. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده شده است. مدل ریاضی پیشنهادی توسط ویرایش خاصی از الگوریتم ژنتیک حل شده است. نتایج اجرای مدل و روش پیشنهادی روی یک شبکه توزیع نمونه ارائه گردیده است.

کلیدواژه: بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه، ریسک، عدم قطعیت، فازی، منابع تولید پراکنده.

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی، تغییر ساختار در صنعت برق و محدودیت‌های فنی و اقتصادی در احداث خطوط انتقال طولی موجب شده است تولید پراکنده (DG) جذابیت خاصی در سیستم‌های قدرت پیدا کند [۱]. منابع DG به واحدهای تولیدی کوچک با ظرفیت‌های کمتر از ۱۰ مگاوات‌آمپر گفته می‌شود که در سطوح توزیع به سیستم قدرت متصل می‌گردند [۲]. با پیشرفت تکنولوژی، افزایش راندمان و روند رو به کاهش قیمت فناوری‌های مرتبط با تولیدات پراکنده و نیز هماهنگی این تولیدات با معیارهای اقتصادی سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده مانند ریسک‌پذیری پایین، انتظار می‌رود DG نقش فزاینده‌ای را در آینده صنعت برق بازی کند [۳].

با توجه به ماهیت منابع تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع مناسب‌ترین بخش جهت اتصال آنها به سیستم قدرت محسوب می‌شوند [۲]. مهم‌ترین گام در به‌کارگیری منابع تولید پراکنده در این شبکه‌ها، مطالعه فنی و اقتصادی جهت تعیین مکان و ظرفیت مناسب آنهاست. بی‌شک بدون شناخت دقیق و انجام مطالعات بهینه‌سازی نمی‌توان به قابلیت‌های بالقوه این منابع در شبکه‌های توزیع و منافع فنی و اقتصادی حاصل از آن رسید. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مکان‌یابی واحدهای DG در شبکه‌های توزیع انجام شده است که در آنها کاهش هزینه‌های مرتبط با

این مقاله در تاریخ ۱۴ تیر ماه ۱۳۸۵ دریافت و در تاریخ ۵ خرداد ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

حمید فلقی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، (email: falaghi@iee.org)

محمودرضا حقی‌فام، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (email: haghifam@modares.ac.ir)

محسن پارسامقدم، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (email: parsa@modares.ac.ir)

1. Distributed Generation

با توجه به قابلیت بالای اعداد فازی مثلثی در توصیف بارهای غیر قطعی، این روش در بسیاری از مسایل مرتبط با شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵] تا [۱۸].

۲-۲ پخش بار فازی شبکه‌های توزیع

بخش مهمی از محاسبات جایابی واحدهای DG به پخش بار شبکه مربوط می‌شود. در شبکه‌های توزیع با توجه به ساختار شعاعی و مقادیر مقاومت و راکتانس خطوط، به‌کارگیری روش‌های مرسوم پخش بار همچون نیوتن-رافسن به راحتی امکان‌پذیر نیست [۱۹]. از این رو معمولاً از روش‌های حل مستقیم برای حل معادلات پخش بار این سیستم‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله از پخش بار مبتنی بر روش جاروب رفت و برگشت [۱۹] استفاده شده است. با توجه به این که در این مطالعه اطلاعات بار در نقاط مصرف به صورت اعداد فازی مثلثی می‌باشند، در طی انجام محاسبات، متغیرها در قالب اعداد فازی با پارامترهای حقیقی یا موهومی بوده و عملگرهای ریاضی به صورت فازی روی آنها اجرا می‌شوند [۲۰]. به‌طور کلی مراحل انجام محاسبات پخش بار فازی با حضور واحدهای DG به صورت زیر است. کلیه متغیرهای فازی در روابط ریاضی با علامت ~ مشخص شده‌اند.

گام اول: ولتاژ در تمامی گره‌های شبکه به صورت زیر مقداردهی اولیه می‌شود

$$\tilde{V}_i = (1 + j \cdot 0, 1 + j \cdot 0, 1 + j \cdot 0), \quad i = 1, 2, \dots, NN \quad (5)$$

در این رابطه، NN تعداد گره‌های شبکه می‌باشد.

گام دوم: جریان معادل بار در هر یک از گره‌های شبکه توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\tilde{I}_{Li} = \frac{(\tilde{P}_{Li} - P_{DGi}) - j(\tilde{Q}_{Li} - Q_{DGi})}{\tilde{V}_i^*} \quad (6)$$

که در آن \tilde{P}_{Li} و \tilde{Q}_{Li} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار فازی در گره i ام است. P_{DGi} و Q_{DGi} نیز به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی DG در گره i ام را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، تولید واحدهای DG به صورت توان ثابت قطعی در محاسبات مدل شده است.

گام سوم: جریان عبوری از هر خط به ترتیب از بخش‌های انتهایی به سمت پست فوق توزیع توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد (جاروب برگشت)

$$\text{for all line sections. } \tilde{I}_{i,j} = \tilde{I}_{Lj} + \sum_{(j,k) \in SL} \tilde{I}_{j,k} \quad (7)$$

در این رابطه $\tilde{I}_{j,k}$ جریان عبوری از بخش (j,k) و SL مجموعه بخش‌هایی را نشان می‌دهد که به گره j ام بخش (i,j) متصلند.

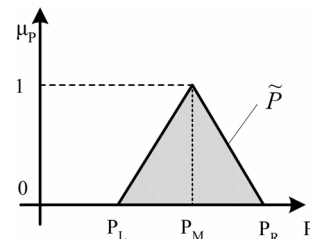
گام چهارم: ولتاژ هر یک از گره‌ها به ترتیب از پست فوق توزیع به سمت انتهایی شبکه توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود (جاروب رفت)

$$\text{for all nodes. } \tilde{V}_j = \tilde{V}_i - Z_{i,j} \tilde{I}_{i,j} \quad (8)$$

که در آن $Z_{i,j}$ امپدانس بخش (i,j) است که دو گره i و j را به هم متصل می‌کند.

گام پنجم: اگر اختلاف میان ولتاژهای محاسبه شده در مرحله چهارم با مقادیر قبلی آنها بیشتر از یک حد مشخص است، محاسبات از گام دوم تکرار می‌شود (همگرایی محاسبات).

گام ششم: نمایش نتایج شامل ولتاژ گره‌ها، جریان عبوری از خطوط و تلفات که همه به صورت اعداد فازی می‌باشند.



شکل ۱: نمایش گرافیکی بار به صورت یک عدد فازی مثلثی.

است. در این تحقیق واحدهای DG در اختیار و تحت مدیریت و مالکیت شرکت‌های توزیع فرض شده‌اند و به عبارتی مالک DG و مالک شبکه یک نهاد فرض شده و متناسب با آن مدل‌سازی ریاضی انجام گرفته است. در انتها روش و مدل پیشنهادی روی یک شبکه توزیع نمونه اجرا و نتایج حاصل از آن گزارش شده است.

۲- مدل‌سازی عدم قطعیت بار

۱-۲ مدل فازی نقاط بار

با توجه به تعداد زیاد نقاط بار در شبکه‌های توزیع، نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تمامی این نقاط از دیدگاه اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. از این رو معمولاً میزان بار در نقاط مصرف با به‌کارگیری روش‌های تخمین بار تعیین می‌شود که همواره با عدم قطعیت همراه است [۱۴]. از سوی دیگر با توجه به همین نقص اطلاعاتی، پیش‌بینی مصرف آبی سیستم نیز به‌طور دقیق میسر نبوده و با عدم قطعیت توأم است.

یکی از روش‌های سنتی در مدل‌سازی عدم قطعیت در مطالعات، استفاده از تئوری احتمالات است. هرچند به علت فقدان سابقه اطلاعاتی، بسیاری از عدم قطعیت‌ها را نمی‌توان با این تئوری به صورت کارآمد مدل نمود. در سال‌های اخیر تئوری مجموعه‌های فازی در مدل‌سازی ریاضی عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از خواص مهم تئوری فازی، سهولت در انجام محاسبات در مقایسه با روش‌های احتمالاتی است که کاربرد عملی این تئوری را جذاب و گسترده ساخته است.

در این تحقیق عدم قطعیت در بار شبکه توزیع با استفاده از اعداد فازی مدل‌سازی شده است. توان مصرفی در هر یک از نقاط بار به صورت یک عدد فازی مثلثی مانند شکل ۱ توصیف گردیده است. هر عدد فازی مثلثی دارای سه پارامتر (P_L, P_M, P_R) است و نشان می‌دهد که میزان بار مورد انتظار حوالی P_M بوده ولی از P_L کمتر و از P_R بیشتر نخواهد بود. اگر توان تخمین زده شده در یک نقطه بار برابر P با حداکثر خطای e باشد، پارامترهای عدد فازی متناظر با آن نقطه بار را می‌توان با استفاده از روابط زیر به دست آورد

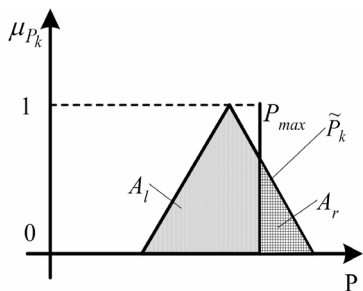
$$P_L = P \times (1 - e) \quad (1)$$

$$P_M = P \quad (2)$$

$$P_R = P \times (1 + e) \quad (3)$$

بنابراین تابع عضویت مثلثی میزان بار را می‌توان به صورت ریاضی مانند زیر تعریف نمود

$$\mu_p = \begin{cases} 0 & P \leq P_L \text{ or } P \geq P_R \\ \frac{P - P_L}{P_M - P_L} & P_L < P \leq P_M \\ \frac{P_R - P}{P_R - P_M} & P_M < P < P_R \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۳: نمایش گرافیکی بارگذاری خطوط و پست‌های فوق توزیع به صورت عدد فازی مثلی.

که در آن A_l و A_r به ترتیب مساحت‌های زیر تابع عضویت توان عبوری در سمت راست و چپ حد بارگذاری P_{max} هستند. به‌طور کلی هرچه قدر مقادیر S_{P_k} و S_{V_k} بیشتر باشد، ریسک عبور ولتاژ از حدود مجاز در گره k و وقوع اضافه بار در تجهیزات بیشتر خواهد بود. با احداث DG و بهره‌برداری از آن، میزان بارگذاری تجهیزات و ولتاژ گره‌های شبکه تغییر کرده و به‌دنبال آن ریسک فوق‌الذکر نیز تغییر خواهد کرد.

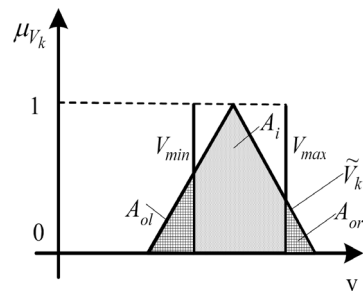
۳- فرموله‌بندی مسأله

در این قسمت فرموله‌بندی ریاضی مکان‌یابی منابع DG تحت مالکیت و مدیریت شرکت توزیع، در مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید شبکه فشارمتوسط توزیع ارائه می‌گردد. در این مدل‌سازی فرض بر این است که شرکت‌های توزیع وظیفه تأمین انرژی مشترکین، مدیریت، طراحی و بهره‌برداری از سیستم توزیع شامل شبکه فشارضعیف، فشارمتوسط و پست‌های فوق توزیع را با هدف کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و بهبود سرویس مشترکین به عهده دارند. در این تحقیق کمیته‌سازی اجزای هزینه زیر در مدل‌سازی مکان‌یابی منبع DG مد نظر قرار گرفته است:

- هزینه تلفات انرژی.
 - هزینه سرمایه‌گذاری احداث واحدهای DG.
 - هزینه بهره‌برداری واحدهای DG شامل هزینه منبع انرژی اولیه و تعمیرات و نگهداری.
 - علاوه بر کاهش هزینه‌های فوق که در اکثر مطالعات انجام شده نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند، با توجه به حضور عدم قطعیت‌ها در بار و برخی پارامترهای اقتصادی، کمیته‌سازی ریسک‌های زیر نیز در مسأله می‌تواند به‌عنوان اهداف طرح لحاظ گردد:
 - ریسک اضافه بار در پست‌های فوق توزیع.
 - ریسک عبور از حد حرارتی خطوط.
 - ریسک عبور از حدود مجاز ولتاژ در نقاط بار.
 - ریسک افزایش هزینه تأمین انرژی شبکه.
- در این مقاله، مکان‌یابی واحدهای DG در قالب یک مدل چندهدفه با اهداف زیر فرموله‌بندی ریاضی شده است.

۳-۱- تابع هدف اقتصادی

از آنجا که هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری واحدهای DG و نیز هزینه تلفات انرژی همه از جنس پول هستند، می‌توان آنها را در قالب یک تابع هدف واحد ترکیب کرد. تنها تفاوت موجود میان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و دیگر اجزای هزینه از نظر زمان هزینه‌کرد است. در این خصوص با بهره‌گیری از نرخ بهره سالانه می‌توان هزینه‌های جاری



شکل ۴: نمایش گرافیکی ولتاژ یک گره به صورت عدد فازی مثلی.

با توجه به این که بهره‌برداری از واحدهای DG در حالت تنظیم ولتاژ موجب ایجاد تداخل در عملکرد دیگر ادوات کنترل ولتاژ شبکه شده و افزایش جریان تحریک و ایجاد تنش‌های حرارتی در ژنراتورها را به دنبال دارد، اغلب واحدهای DG در حالت کنترل ضریب قدرت بهره‌برداری می‌شوند [۲۱]. از این رو در مطالعات این مقاله واحدهای تولید پراکنده به صورت باس PQ با ضریب قدرت ثابت در محاسبات پخش بار مدل شده‌اند.

۳-۲ مدل‌سازی قیود افت ولتاژ و بارگذاری تجهیزات

با مدل‌سازی بار به صورت اعداد فازی، کل مدل شبکه به حوزه فازی منتقل می‌گردد. از این رو بارگذاری تجهیزات و ولتاژ گره‌ها نیز اعداد فازی خواهند بود. در شکل ۲ ولتاژ در گره k به صورت یک عدد فازی مثلی \tilde{V}_k نمایش داده شده است. در این شکل حدود مجاز بالا و پایین ولتاژ نیز به ترتیب به صورت اعداد قطعی V_{min} و V_{max} نشان داده شده است.

قید ولتاژ در حوزه فازی به صورت زیر تعریف می‌شود

$$V_{min} \leq \tilde{V}_k \leq V_{max} \quad (9)$$

رابطه (۹) فازی است و یک پاسخ قطعی مشخص برای رعایت یا عدم رعایت آن وجود ندارد اما می‌توان عدم رعایت این محدودیت را با یک درجه امکان‌پذیری به صورت زیر تعیین نمود

$$S_{V_k} = \frac{A_{ol} + A_{or}}{A_i + A_{ol} + A_{or}} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

که در آن A_i مساحت زیر تابع عضویت ولتاژ در بازه بین حدود بالا و پایین ولتاژ است. A_{ol} و A_{or} نیز به ترتیب مساحت‌های زیر تابع عضویت ولتاژ کمتر از V_{min} و بیشتر از V_{max} هستند. اساساً قید فازی (۹) به این مفهوم است که با درجه امکان‌پذیری S_{V_k} قید ولتاژ در گره k نقض خواهد شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با تغییر در پارامترهای عدد فازی \tilde{V}_k ، نسبت میان مساحت‌های $(A_i + A_{ol} + A_{or})$ و $(A_{ol} + A_{or})$ تغییر کرده و در نتیجه درجه امکان‌پذیری مذکور نیز تغییر خواهد کرد.

پس از اجرای پخش بار فازی برای یک حالت خاص در سیستم، توان عبوری از خطوط و نیز پست فوق توزیع تغذیه‌کننده شبکه به صورت عدد فازی به‌دست می‌آیند. در شکل ۳ این توان عبوری به همراه حد مجاز بارگذاری (P_{max}) که یک عدد قطعی است، برای یک خط (یا پست) k نمایش داده شده است.

قید بارگذاری در حوزه فازی به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\tilde{P}_k \leq P_{max} \quad (11)$$

همانند آنچه برای قید ولتاژ مطرح شد، عدم رعایت محدودیت بارگذاری را نیز می‌توان با یک درجه امکان‌پذیری به صورت زیر تعیین نمود

$$S_{P_k} = \frac{A_r}{A_l + A_r} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

وقوع اضافه بار در خطوط و پست‌های فوق توزیع و نیز عبور از حدود مجاز ولتاژ در نقاط بار را کمینه می‌کند. مدل ریاضی این تابع هدف به صورت زیر است

$$\text{Min } f_T = \max \{S_{PS-MAX}, S_{PL-MAX}, S_{VD-MAX}\} \quad (16)$$

$$S_{PS-MAX} = \max \{S_{PSk} | k \in NS\} \quad (17)$$

$$S_{PL-MAX} = \max \{S_{PLk} | k \in \alpha_N\} \quad (18)$$

$$S_{VD-MAX} = \max \{S_{VDk} | k \in NL\} \quad (19)$$

که در آن

f_T : تابع هدف ریسک فنی

S_{PSk} : درجه امکان‌پذیری وقوع اضافه بار در پست فوق توزیع k

S_{PLk} : درجه امکان‌پذیری وقوع اضافه بار در خط k

S_{VDk} : درجه امکان‌پذیری تخطی از حدود ولتاژ در نقطه بار k

NS : تعداد پست‌های فوق توزیع سیستم

NL : تعداد نقاط بار سیستم

مابقی نشانه‌ها مانند آنچه که قبلاً تعریف شده می‌باشد.

۳-۳ تابع هدف ریسک اقتصادی

در سیستم قدرت تجدیدساختار شده، شرکت‌های توزیع می‌بایست انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه تحت پوشش خود را از طریق بازار برق سیستم انتقال خریداری نمایند. قیمت برق در این بازار ثابت نبوده و متناسب با شرایط بازار تغییر می‌کند و از دیدگاه شبکه توزیع با عدم قطعیت همراه است. در این مقاله این عدم قطعیت با استفاده از اعداد فازی مثلثی مدل‌سازی شده است. معمولاً شرکت‌های توزیع با توجه به قیمت فروش توان به مشترکین که معمولاً محدودیت‌های قانون‌گذار در آن دخیل است و دیگر معیارها در مدیریت اقتصاد شبکه توزیع، حدی را برای قیمت برق بازار انتقال قائل هستند و اگر قیمت خرید برق از این حد فراتر رود، عملاً یک خطر اقتصادی برایشان محسوب می‌گردد. در شکل 4 نمایش گرافیکی قیمت برق بازار انتقال (\tilde{C}_T) در قالب عدد فازی و حد فوق‌الذکر (که با C_{Tmax} نشان داده شده است) به صورت یک عدد قطعی ارائه شده است.

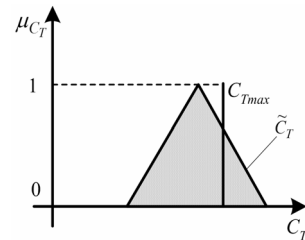
هزینه تأمین انرژی با حاصل ضرب توان در قیمت برق متناسب است. بنابراین به طور کلی می‌توان ریسک اقتصادی ناشی از افزایش قیمت برق بازار انتقال را که شرکت توزیع را تهدید می‌کند، به صورت درجه امکان‌پذیری نامساوی زیر تعریف نمود

$$\tilde{C}_E \geq \tilde{C}_E. \quad (20)$$

$$\tilde{C}_E = \sum_{i=1}^{N_S} \tilde{P}_{Si} \cdot \tilde{C}_T + \sum_{j=1}^{N_N} P_{DGj} \cdot OC_{DG} \quad (21)$$

$$\tilde{C}_E. = \sum_{i=1}^{N_S} \tilde{P}_{S,i} \cdot C_{Tmax} \quad (22)$$

که در آن \tilde{P}_{Si} توان عبوری از پست فوق توزیع i ام به صورت فازی است، P_{DGj} توان تولیدی واحد DG j ام و $\tilde{P}_{S,i}$ توان عبوری از پست فوق توزیع i ام در حالت اولیه‌ی سیستم بدون حضور DG می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در (20) در واقع هزینه‌ی تأمین برق مورد نیاز شبکه در دو حالت با و بدون DG با هم مقایسه شده است. با توجه به نمایش گرافیکی \tilde{C}_E و $\tilde{C}_E.$ که در شکل 5 ارائه شده است، درجه امکان‌پذیری (20) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد



شکل 4: نمایش گرافیکی قیمت برق بازار انتقال به صورت عدد فازی مثلثی.

(تلفات انرژی، بهره‌برداری واحدهای DG) را در بازه عمر مفید واحدهای تولیدی به ارزش کنونی تبدیل و به‌راحتی با هزینه‌های سرمایه‌گذاری جمع نمود. بنابراین تابع هدف اقتصادی طرح به صورت (13) می‌باشد

$$\text{Min } \tilde{f}_C = \sum_{i=1}^{NN} C_{DGi} IC_{DG} + \lambda \gamma \epsilon \cdot \sum_{t=1}^T \mu^t \sum_{i=1}^{NN} P_{DGi} OC_{DG} \quad (13)$$

$$+ \lambda \gamma \epsilon \cdot \sum_{t=1}^T \mu^t (\tilde{P}_{Loss.} - \tilde{P}_{Loss}) \tilde{C}_T \quad (14)$$

$$\mu = \frac{1}{(1+d)^t} \quad (15)$$

$$\tilde{P}_{Loss} = \sum_{(i,j) \in \alpha_N} \Delta \tilde{V}_{i,j}^v \frac{R_{i,j}}{Z_{i,j}^x} \tilde{C}_T \quad (15)$$

که در آن

\tilde{f}_C : مقدار تابع هدف اقتصادی [\\$]

NN : تعداد گره‌های سیستم

C_{DGi} : ظرفیت واحد DG نصب‌شده در مکان کاندید i ام [MVA]

IC_{DG} : هزینه سرمایه‌گذاری لازم برای احداث DG [\$/MVA]

T : عمر مفید تجهیزات [year]

P_{DGi} : توان تولیدی واحد DG نصب‌شده در مکان کاندید i ام [MW]

OC_{DG} : هزینه بهره‌برداری از واحدهای DG [\$/MWh]

α_N : مجموعه زوج مرتب‌هایی که اندیس گره‌های دوسوی هر بخش را در سیستم نشان می‌دهد.

$\Delta \tilde{V}_{i,j}$: افت ولتاژ در بخش (i, j) [V]

$R_{i,j}$: مقاومت اهمی بخش (i, j) [Ω]

$Z_{i,j}$: امپدانس بخش (i, j) [Ω]

\tilde{C}_T : قیمت برق بازار انتقال [\$/MWh]

d : نرخ بهره سالانه

\tilde{P}_{Loss} : تلفات اهمی شبکه پس از احداث DG [MW]

$\tilde{P}_{Loss.}$: تلفات اهمی شبکه قبل از احداث DG [MW]

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در تابع هدف اقتصادی هزینه‌های مرتبط با واحدهای تولید پراکنده در قالب ارزش کنونی مدل‌سازی شده است. البته باید توجه داشت این هزینه‌ها می‌توانند در قالب هزینه سالیانه نیز مدل شوند. در آن صورت هزینه سالیانه تلفات و بهره‌برداری و نگهداری واحدها بدون تغییر و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در قالب ارزش جاری سالیانه در تابع هدف اقتصادی ظاهر خواهند شد.

۲-۳ تابع هدف ریسک فنی

از میان اجزای ریسک که در ابتدای بخش 3 به آنها اشاره شد، سه مورد اول، ماهیت فنی داشته که می‌توان آنها را در قالب یک تابع هدف با عنوان کمینه‌سازی ریسک فنی مدل نمود. این تابع هدف در واقع امکان

برتری متفاوتی خواهند داشت. در بهینه‌سازی با اهداف چندگانه، پاسخ‌ها مبتنی بر مفهوم نامغلوبی که در بخش بعد آمده است، رتبه‌بندی می‌شوند.

۴-۱ مفهوم نامغلوبی

در یک مسأله بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه که دارای m تابع هدف است، یک پاسخ X را غالب بر پاسخ Y می‌گویند اگر X حداقل برای یکی از اهداف (f_i) برتر از Y باشد و به‌ازای هیچ یک از اهداف دیگر بدتر نباشد. به عبارت دیگر اگر مسأله کمینه‌سازی باشد، داریم

$$f_i(X) < f_i(Y) \quad \text{and} \quad (28)$$

$$f_j(X) \leq f_j(Y) \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m \quad (i \neq j)$$

در این حالت Y را مغلوب X می‌گویند. مجموعه پاسخ‌هایی را که توسط هیچ یک از دیگر پاسخ‌ها در فضای جواب مغلوب نشوند، «پاسخ‌های کارا» یا «نامغلوب» می‌نامند.

۴-۲ روش‌های حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه

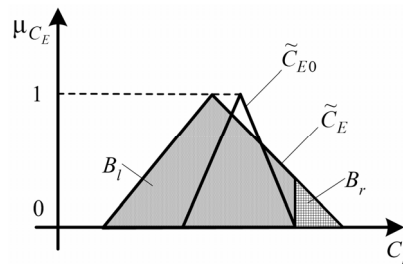
حل یک مسأله بهینه‌سازی با اهداف چندگانه در واقع به‌دست آوردن مجموعه پاسخ‌های کارا است. با توجه به تعداد زیاد پاسخ‌های کارا، معمولاً روش‌های حل مربوطه زیرمجموعه‌ای را از کل پاسخ‌های کارا به‌دست می‌آورند. روشی که برای حل این‌گونه مسایل به کار برده می‌شود باید علاوه بر توانایی یافتن پاسخ‌های کارای واقعی، این قابلیت را داشته باشد که از تمامی فضای پاسخ‌های کارا زیرمجموعه مذکور را انتخاب نماید که اصطلاحاً به آن گوناگونی گفته می‌شود.

به‌طور کلی روش‌های حل مسایل بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه را می‌توان به دو بخش تحلیلی و تکاملی تقسیم کرد. در روش‌های تحلیلی تنها یکی از پاسخ‌های کارا در هر بار اجرا به‌دست می‌آید و برای به‌دست آوردن تعداد بیشتری از آنها به نحو مطلوب، اجرای مکرر روش مربوطه مورد نیاز است. از سوی دیگر ایجاد گوناگونی در جواب‌ها به‌راحتی امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این در این روش‌ها اگر مدل ریاضی توابع هدف و قیود غیر خطی باشند، دست‌یابی به پاسخ‌های کارا به‌راحتی امکان‌پذیر نیست.

روش‌های بهینه‌سازی تکاملی اخیراً در حل مسایل چندهدفه کاربرد فراوانی یافته‌اند. در این روش‌ها سعی می‌شود با به‌کارگیری مکانیزم‌های محاسباتی، بتوان در یک بار اجرای روش مجموعه قابل قبولی از پاسخ‌های کارا را به‌دست آورد. در این روش‌ها معمولاً تنها به اطلاعاتی از توابع هدف و قیود مرتبط با آن نیاز است و نگرانی از گسسته و یا غیر خطی بودن مدل ریاضی مسأله وجود ندارد. در این مقاله نیز از روشی مبتنی بر بهینه‌سازی تکاملی جهت دست‌یابی به پاسخ‌های کارای مدل چندهدفه پیشنهادی استفاده شده است.

۵- بهینه‌سازی مسأله مکان‌یابی DG مبتنی بر NSGA

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از روش‌های توانمند بهینه‌سازی تکاملی است که در بسیاری از مسایل بهینه‌سازی تک‌هدفه مورد استفاده قرار گرفته است. روش GA توانایی حل مسایل خطی یا غیر خطی پیوسته، گسسته و یا ترکیبی از آنها را دارد [۲۳]. از آنجا که این الگوریتم از چند نقطه به‌طور موازی فضای پاسخ‌ها را جستجو می‌کند، می‌توان از آن برای یافتن زیرمجموعه‌ای از پاسخ‌های کارا به‌نحو مطلوب استفاده کرد.



شکل ۵: نمایش گرافیکی \tilde{C}_E و \tilde{C}_{E0} .

$$S_{C_E} = \frac{B_r}{B_r + B_l} \cdot 100 [\%] \quad (29)$$

بنابراین تابع هدف ریسک اقتصادی به‌صورت زیر خواهد بود

$$\text{Min } f_E = S_{C_E} \quad (30)$$

همان‌طور که از مفهوم این تابع هدف استنباط می‌شود، با احداث DG شبکه این امکان به‌وجود می‌آید که شرکت توزیع بخشی از توان مورد نیاز شبکه را از طریق بهره‌برداری از واحدهای تولیدی مزبور تأمین نمایند و توان کمتری از طریق سیستم انتقال خریداری و تأمین گردد. با توجه به قطعی‌بودن هزینه تولید واحدهای DG، در این وضعیت بخشی از توان مورد نیاز سیستم بدون حضور عدم قطعیت در قیمت برق تأمین می‌شود. اگر هزینه تولید واحدهای DG کمتر از C_{Tmax} باشد، بهره‌برداری از این واحدهای تولیدی ریسک اقتصادی تأمین توان شبکه را کاهش خواهد داد.

۴-۳ مدل چندهدفه جایابی DG

با توجه به توابع هدفی که در بخش‌های قبل ارائه شد، مدل چندهدفه جایابی واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع به‌صورت زیر است

$$\text{Min } \{f_C, f_T, f_E\} \quad (31)$$

$$\text{s.t. } \frac{P_{DG_i}}{PF_{DG}} \leq C_{DG_i} \quad (32)$$

$$C_{DG_i} \leq C_{DG_{max_i}} \quad (33)$$

در مدل فوق، (۳۲) قید میزان تولید هر واحد DG را نشان می‌دهد که با توجه به ضریب قدرت تولید (PF_{DG}) باید کمتر از ظرفیت آن باشد. رابطه (۳۳) نیز حداکثر ظرفیت قابل نصب در هر یک از مکان‌های کاندید را نشان می‌دهد. این قید در مواردی به کار می‌رود که به‌دلیل محدودیت‌های جغرافیایی یا فنی احداث DG بیشتر از یک ظرفیت خاص در برخی مکان‌های کاندید امکان‌پذیر نباشد.

با تغییر تعداد، مکان، ظرفیت و میزان تولید واحدهای DG در شبکه توزیع، مقادیر توابع هدف طرح تغییر خواهد کرد. این اهداف در مواردی با یکدیگر در تضادند و بهبود در یکی موجب تنزل دیگری می‌شود.

۴- بهینه‌سازی با اهداف چندگانه

در یک مسأله بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه می‌بایست اهداف طرح که هر یک دارای نقطه بهینه جداگانه‌ای هستند، به‌طور هم‌زمان بهینه شوند [۲۲]. در این‌گونه مسایل معمولاً اهداف به‌گونه‌ای هستند که نمی‌توان هیچ یک از آنها را بدون تنزل دیگری بهبود داد. بنابراین به‌جای یک پاسخ بهینه واحد، مجموعه‌ای از پاسخ‌ها وجود دارند که تعامل میان اهداف طرح را نشان می‌دهد. به این مجموعه، «پاسخ‌های کارا» گفته می‌شود. با توجه به اهمیت نسبی اهداف، پاسخ‌های کارا از دیدگاه طراح

(۱) جمعیت اولیه: الگوریتم با جمعیت اولیه‌ای که به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید شده‌اند، آغاز می‌شود.

(۲) تقاطع: عملگر تقاطع جهت تولید جمعیت جدید به کار برده می‌شود. در عملگر تقاطع پیشنهادی دو عضو از جمعیت موجود با احتمال pc به صورت تصادفی انتخاب شده و هر یک از ژن‌های فرزندان توسط انتخاب یک عدد تصادفی در بازه زیر تولید می‌شوند

$$x'_i \in [(x_i - \alpha(y_i - x_i), (y_i + \alpha(y_i - x_i))] \quad (30)$$

$$i = 1, 2, \dots, NN$$

که در آن x_i و y_i ژن‌های والدین هستند به نحوی که $x_i < y_i$ می‌باشد. برای اطمینان از کاوش کارآمد فضای جستجو، $\alpha = 0.5$ انتخاب شده است. در این عملگر ژن‌های تولیدشده خارج از محدوده مجاز با تغییر به مقادیر حدود متناظر با آن ژن‌ها، اصلاح می‌شوند.

(۳) جهش: در عملگر جهش یک عضو از جمعیت موجود با احتمال pm به صورت تصادفی انتخاب شده و ژن i ام آن که به طور تصادفی انتخاب شده، به صورت زیر تغییر و یک عضو جدید تولید می‌کند

$$x'_i = \begin{cases} x_i + \Delta(t, b_i - x_i) & \text{if } \tau = 0 \\ x_i - \Delta(t, x_i - a_i) & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (31)$$

$$\Delta(t, y) = y \left(1 - z \left(\frac{t}{g_{max}}\right)^\beta\right) \quad (32)$$

که در آن τ یک عدد باینری تصادفی، z یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ ، g_{max} حداکثر تعداد تکرار نسل و β یک ثابت مثبت است که در این مقاله برابر ۵ انتخاب شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این عملگر مقدار x'_i را در بازه $[a_i, b_i]$ به نحوی می‌دهد که در نسل‌های بالاتر احتمال نزدیکی آن به مقدار x_i بیشتر است. این امر موجب می‌گردد تا در نسل‌های نخستین که t کوچک است، کاوش فضای جستجو به صورت یک‌نواخت و در نسل‌های بالاتر به صورت محلی انجام شود.

(۴) ارزیابی توابع هدف: در این مرحله با توجه به میزان تولید منابع DG در هر مکان کاندید متناظر با هر یک از کروموزوم‌های موجود، با انجام پخش بار فازی که در بخش ۲-۲ ارائه شد میزان تلفات، افت ولتاژ و توان عبوری از خطوط و پست‌های فوق توزیع محاسبه می‌گردد. با استفاده از این پارامترها مقادیر توابع هدف مربوط به هر یک از کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود.

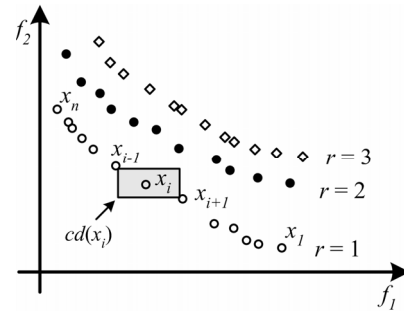
(۵) رتبه‌بندی جمعیت: تمامی اجزای جمعیت مبتنی بر مفهوم نامغلوبی (بخش ۱-۵) در سطوح مختلف رتبه‌بندی می‌شوند. بنابراین هر یک از اعضا در یکی از سطوح (r) جای می‌گیرند. با توجه به این که مقدار تابع هدف اقتصادی f_c به صورت عدد فازی است، برای مقایسه آن از مقدار تابع $R(\vec{a})$ که برای یک عدد فازی $\vec{a} = (a_L, a_M, a_R)$ به صورت زیر می‌باشد [۲۵]، استفاده شده است

$$R(\vec{a}) = \frac{(a_L + 2a_M + a_R)}{4} \quad (33)$$

(۶) ارزیابی تراکم: در این مرحله اعضایی که در یک سطح نامغلوبی جای گرفته‌اند، مبتنی بر تراکم با توجه به شاخص زیر رتبه‌بندی می‌شوند [۲۲]

$$cd(X_i) = \prod_{j=1}^k cd_j(X_i) \quad (34)$$

$$cd_j(X_i) = \left| \frac{f_j(X_{i+1}) - f_j(X_{i-1})}{f_j^{max} - f_j^{min}} \right|, \quad i \in S^r \quad (35)$$



شکل ۶: نمایش گرافیکی رتبه‌بندی و سطوح نامغلوبی در یک مسأله کمینه‌سازی با دو تابع هدف.

NSGA^۱ ویرایشی از GA است که برای حل مسایل بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه طراحی شده است [۲۲] و [۲۴]، در این مقاله از آن برای حل مسأله‌ی مکان‌یابی DG استفاده شده است.

۱-۵ رتبه‌بندی نامغلوبی اعضا

در NSGA^۱ اعضای جمعیت مبتنی بر مفهوم نامغلوبی رتبه‌بندی می‌شوند (شکل ۶). اعضای نامغلوب در جمعیت موجود، سطح اول ($r=1$) را تشکیل می‌دهند. سپس این اعضا موقتاً از جمعیت حذف شده و از میان جمعیت باقیمانده، اعضای نامغلوب جدید که سطح دوم ($r=2$) را تشکیل می‌دهند، شناسایی می‌شوند. این فرایند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که کلیه سطوح شناسایی شده و هر یک از اعضای جمعیت به یکی از این سطوح اختصاص داده شود.

۲-۵ کدگذاری متغیرهای تصمیم

در جایابی واحدهای DG، ظرفیت و توان تولیدی در هر یک از مکان‌های کاندید، متغیرهای تصمیم مسأله را تشکیل می‌دهند. ظرفیت واحدهای DG معمولاً از میان مجموعه‌ای از ظرفیت‌های معلوم و یا به صورت ضربی از یک ظرفیت خاص انتخاب می‌شوند. بنابراین با معلوم‌بودن تولید بهینه تولیدی واحد DG در یک مکان کاندید خاص می‌توان ظرفیت واحد تولیدی در آن مکان را با انتخاب کوچک‌ترین ظرفیتی که بتواند با توجه به محدودیت (۲۶) توان تولیدی مربوطه را تحمل نماید، به دست آورد. از این رو در جستجو تنها توان تولیدی واحدهای DG در مکان‌های کاندید (P_{DGi}) در کدگذاری وارد می‌شوند. با توجه به این که در این مقاله تولید منابع DG به صورت توان ثابت در یک ضریب قدرت معلوم فرض شده است، با داشتن توان اکتیو تولیدی می‌توان به راحتی توان راکتیو تولیدی واحد را نیز به دست آورد. با توجه به مشکلاتی که کدگذاری باینری متغیرهای پیوسته به همراه دارد، در روش پیشنهادی این مقاله متغیرهای تصمیم با استفاده از اعداد حقیقی به صورت زیر کدگذاری شده‌اند

$$X = [P_{DG1}, P_{DG2}, P_{DG3}, \dots, P_{DGN}] \quad (29)$$

هر ژن i این کروموزوم که میزان تولید منبع DG متناظر در مکان کاندید i ام را نشان می‌دهد، در بازه‌ی $[a_i, b_i]$ تغییر می‌کند که در آن $a_i = 0$ و $b_i = PF_{DG} \dots C_{DG \max i}$ می‌باشد.

۳-۵ مراحل محاسباتی الگوریتم

مراحل کلی NSGA برای حل مسأله جایابی چندهدفه منابع DG در شبکه توزیع به صورت زیر است:

1. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

جدول ۱: مشخصات هادی‌های خطوط توزیع در شبکه مورد مطالعه.

جریان مجاز (Amp.)	راکتانس (Ω)	مقاومت (Ω)	بخش	
			گره ابتدا	گره انتها
۲۱۰	۲,۲۵۵	۱,۳۹۰	۲	۱
۲۱۰	۴,۵۱۰	۲,۷۸۰	۳	۲
۲۱۰	۳,۳۸۳	۲,۰۸۵	۴	۱
۲۱۰	۴,۵۱۰	۲,۷۸۰	۵	۴
۲۱۰	۲,۸۱۹	۱,۷۳۸	۶	۱
۲۱۰	۳,۳۸۳	۲,۰۸۵	۷	۶
۲۱۰	۳,۶۶۴	۲,۲۵۹	۸	۱
۲۱۰	۳,۹۴۶	۲,۴۳۳	۹	۸

جدول ۲: اطلاعات بار آتی شبکه توزیع مورد مطالعه.

نقطه بار	توان مصرفی (MVA)	
	بیشترین مقدار ممکن	مقدار با بیشترین امکان
۲	۸,۴۰۴	۷,۶۴۰
۳	۹,۵۹۲	۸,۷۲۰
۴	۸,۴۰۴	۷,۶۴۰
۵	۴,۴۰۰	۴,۰۰۰
۶	۵,۰۳۸	۴,۵۸۰
۷	۷,۹۹۷	۷,۲۷۰
۸	۶,۷۲۱	۶,۱۱۰
۹	۴,۶۵۴	۵,۱۴۰

ضریب قدرت در تمام نقاط بار ۰.۸۵ پس فاز می‌باشد.

که در آن f_{Cmax} , f_{Tmax} و f_{Emax} به ترتیب بیشترین مقدار به دست آمده از میان پاسخ‌های کارا برای توابع هدف اقتصادی (مقدار فازی‌زدایی شده با استفاده از (۳۳))، ریسک فنی و ریسک اقتصادی است. پارامترهای f_{Cmin} و f_{Tmin} نیز به ترتیب کمترین مقدار به دست آمده این توابع هدف از میان پاسخ‌های کارا را نشان می‌دهند.

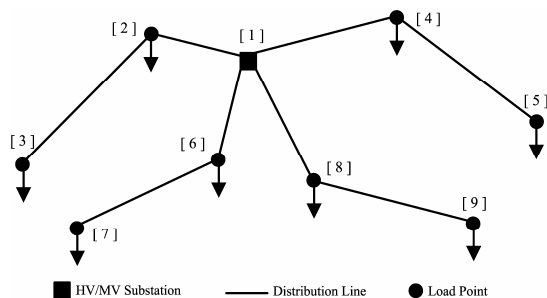
لازم به ذکر است که پاسخ ایده‌آل مسأله $(f_{Cmin}, f_{Tmin}, f_{Emin})$ است که مقدار نرمالیزه شده آن $(۱, ۱, ۱)$ می‌باشد. از سوی دیگر، بدترین پاسخ ممکن مسأله نیز $(f_{Cmax}, f_{Tmax}, f_{Emax})$ می‌باشد که مقدار نرمالیزه شده‌ی متناظر با آن $(۰, ۰, ۰)$ خواهد بود.

با به کارگیری روش max-min [۲۵] تا [۲۷] طبق (۳۸)، بهترین پاسخ مسأله که بیشترین رضایت‌مندی را داراست، انتخاب می‌شود

$$\max_k \left\{ \min \left[\left(\frac{f_{Cmax} - R(\tilde{f}_{Ck})}{f_{Cmax} - f_{Cmin}}, \frac{f_{Tmax} - f_{Tk}}{f_{Tmax} - f_{Tmin}}, \frac{f_{Emax} - f_{Ek}}{f_{Emax} - f_{Emin}} \right) \right] \right\} \quad (38)$$

۷- مطالعات عددی و نتایج

در این قسمت نتایج اجرای مدل و روش پیشنهادی روی یک شبکه توزیع نمونه که دیاگرام تک‌خطی آن در شکل ۷ نمایش داده شده، آمده است. این شبکه توزیع از [۲۸] استخراج و به منظور استفاده در این مقاله، برخی از اطلاعات آن تغییر داده شده است. این شبکه دارای چهار فیدر است که توسط یک پست فوق توزیع ۱۳۲/۲۳ کیلوولت با ظرفیت ۷۵ مگاوات‌آمپر تغذیه می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری از ترانسفورماتورهای پست، حداکثر بارگذاری مجاز پست مذکور ۵۲/۵ مگاوات‌آمپر منظور شده است. مشخصات هادی‌های خطوط و بخش‌های این شبکه در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۲ نیز اطلاعات بار آتی این



شکل ۷: دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع مورد مطالعه.

مقدار $cd_j(X_i)$ فاصله عضو i ام را تا نزدیک‌ترین اعضا به آن در سطح S^r با توجه به تابع هدف Z نشان می‌دهد. تفاضل مقادیر f_j^{max} و f_j^{min} در کسر (۳۵) بازه تغییرات تابع هدف f_j را نشان می‌دهد. مفهوم شاخص $cd(X_i)$ برای یک مسأله کمینه‌سازی با دو تابع هدف در شکل ۶ به صورت گرافیکی آمده است [۲۲].

انتخاب: عملگر انتخاب پیشنهادی مبتنی بر روش مسابقه‌ای است و در قالب مراحل زیر انجام می‌شود:
الف) انتخاب دو عضو از جمعیت موجود به صورت تصادفی.

ب) مقایسه دو عضو انتخابی با توجه به سطح نامغلوبی r و شاخص تراکم cd به نحوی که اگر سطح نامغلوبی دو عضو با هم متفاوت باشد، عضوی که دارای سطح نامغلوبی کمتری باشد، برتر خواهد بود و اگر هر دو عضو در یک سطح قرار داشتند، عضوی برتر است که شاخص تراکم آن کمتر باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت

$$X \succ Y \text{ if } \begin{cases} r_X < r_Y \\ r_X = r_Y \text{ and } cd(X) > cd(Y) \end{cases} \quad (36)$$

که در آن r_X و r_Y به ترتیب شماره سطح نامغلوبی متناظر با دو عضو انتخابی X و Y است. علامت \succ نیز برتری را نشان می‌دهد. ج) عضو برتر از میان دو عضو انتخابی در لیست اعضای نسل جدید ذخیره می‌شود.

د) مراحل فوق به تعداد اعضای مورد نیاز در نسل جدید تکرار می‌شود.

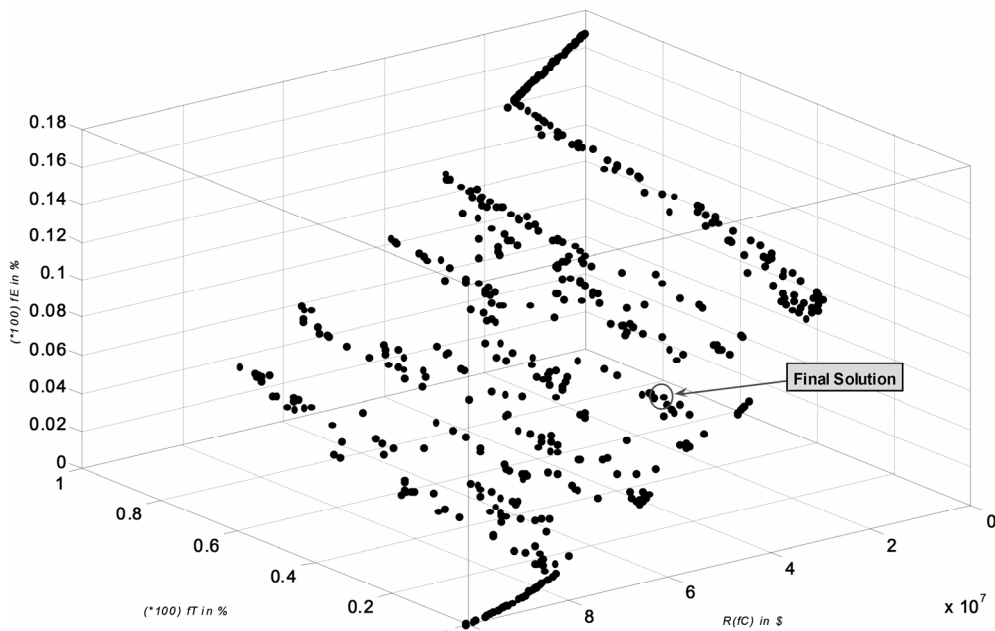
در این عملگر علاوه بر این که احتمال انتخاب اعضای نامغلوب بیشتر است، با توجه به ضریب تراکم، اعضا به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که کل فضای پاسخ‌های کارا را پوشش دهند.

۸) توقف: معیار توقف الگوریتم می‌تواند تکرار تا یک تعداد مشخص یا هر معیار دیگری باشد. در این مقاله معیار تکرار تا حداکثر ۳۰۰ نسل لحاظ شده است. پس از اتمام الگوریتم پاسخ‌های کارای سطح اول از جمعیت نهایی، به عنوان مجموعه جواب معرفی می‌گردند.

۶- تصمیم‌گیری در انتخاب نهایی

پس از این که مجموعه‌ای از پاسخ‌های کارا با استفاده از NSGA به دست آمد، طراح می‌بایست از میان اعضای این مجموعه، پاسخ نهایی مسأله را با توجه به اولویت‌بندی‌های تخصصی و نیز میزان رضایت‌مندی از توابع هدف انتخاب نماید. در این مقاله استفاده از روش max-min به منظور انتخاب بهترین پاسخ مسأله چندهدفه پیشنهاد شده است. در این روش مقادیر توابع هدف متناظر با هر پاسخ k در مجموعه پاسخ‌های کارا (f_{Ck}, f_{Tk}, f_{Ek}) ، با استفاده از رابطه زیر نرمالیزه می‌شوند

$$\left(\frac{f_{Cmax} - R(\tilde{f}_{Ck})}{f_{Cmax} - f_{Cmin}}, \frac{f_{Tmax} - f_{Tk}}{f_{Tmax} - f_{Tmin}}, \frac{f_{Emax} - f_{Ek}}{f_{Emax} - f_{Emin}} \right) \quad (37)$$



شکل ۸: فضای پاسخ‌های کارا در مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع مورد مطالعه.

جدول ۳: اطلاعات اقتصادی مورد استفاده در مطالعه عددی.

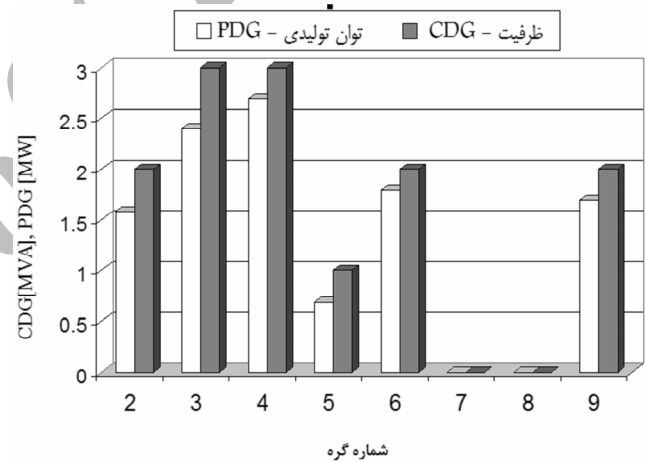
پارامتر	واحد	مقدار
قیمت برق بازار انتقال - (\tilde{C}_T)	[\$/MWh]	(۲۵، ۴۰، ۹۰)
حد قابل قبول قیمت برق بازار انتقال - (C_{Tmax})	[\$/MWh]	۶۵
هزینه احداث منابع DG - (IC_{DG})	[\$/MVA]	۳۰۰۰۰۰
هزینه بهره‌برداری از منابع DG - (OC_{DG})	[\$/MWh]	۴۲
نرخ بهره سالیانه - (d)	[%]	۹،۱۵
عمر مفید منابع DG - (T)	[year]	۳۰

چندهدفه پیشنهادی در قالب گرافیکی سه‌بعدی نمایش داده شده است. محورهای این شکل مقادیر سه تابع هدف اقتصادی، ریسک فنی و ریسک اقتصادی را نشان می‌دهند و هر نقطه از این شکل در واقع مکان هندسی پاسخ کارای مربوطه با توجه به مقادیر تابع هدف متناظر با آن است.

اطلاعات عددی تعدادی از این پاسخ‌های کارا در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول k نشان‌دهنده شماره پاسخ کارا می‌باشد. پارامترهای f_{Tk} و f_{Ck} نیز به ترتیب مقادیر توابع هدف اقتصادی، ریسک فنی و ریسک اقتصادی متناظر با پاسخ کارای k ام هستند که برای تابع هدف اقتصادی مقدار فازی زدایی شده ثبت شده است.

به منظور انتخاب بهترین مکان‌یابی منابع DG از میان پاسخ‌های کارا، مقادیر توابع هدف، با استفاده از (۳۷) نرمالیزه شده $(f_{Cnk}, f_{Tnk}, f_{Enk})$ و در این جدول درج شده‌اند. به منظور اعمال روش max-min روی پاسخ‌های کارا، ابتدا مقدار کمینه از میان سه تابع هدف مربوط به هر یک از پاسخ‌های کارا انتخاب و در ستون max-min جدول ۴ ثبت شده است. در این حالت طبق (۳۸) مقدار مربوط به پاسخ شماره ۱۴۶ در این ستون بیشترین است و پاسخ نهایی مسأله مکان‌یابی منابع DG در شبکه مورد مطالعه خواهد بود.

در شکل ۹ ظرفیت (C_{DG}) و توان خروجی (P_{DG}) منابع تولید پراکنده در هر یک از مکان‌های کاندید مربوط به پاسخ نهایی طرح در قالب نمودار میله‌ای نمایش داده شده است. همان‌گونه که این نمودار نشان می‌دهد، در شش عدد از مکان‌های کاندید احداث منابع DG پیشنهاد شده است.



شکل ۹: ظرفیت و توان خروجی منابع تولید پراکنده در هر یک از مکان‌های کاندید مربوط به پاسخ نهایی مسأله.

شبکه را به صورت اعداد فازی مثلثی نشان می‌دهد. تمامی گره‌های روی فیدرهای این شبکه به غیر از پست فوق توزیع، به‌عنوان مکان‌های کاندید جهت احداث منابع DG منظور شده‌اند. در این مطالعه فرض بر این است که ظرفیت منابع DG در هر یک از نقاط کاندید به صورت ضربی از یک مگاوات‌آمپر با ضریب قدرت تولید ۰/۹ پیش‌فاز بوده و حداکثر ظرفیت مجاز جهت احداث ۴ مگاوات‌آمپر باشد. اطلاعات اقتصادی مورد استفاده در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد قیمت برق بازار شبکه انتقال (\tilde{C}_T) ، به صورت یک عدد فازی مثلثی می‌باشد. با انجام آزمایش‌های متعدد پارامترهای NSGA در این مطالعه عددی به صورت زیر تنظیم شده‌اند:

تعداد جمعیت = ۵۰۰

تعداد نسل = ۳۰۰

احتمال عملگر تقاطع = ۰/۹

احتمال عملگر جهش = ۰/۱۲۵

با به‌کارگیری روش پیشنهادی مکان‌یابی منابع DG و روش جستجوی مبتنی بر NSGA، پاسخ‌های کارا در شبکه توزیع مورد مطالعه به دست آمدند. در شکل ۸ فضای پاسخ‌های کارای به دست آمده با استفاده از مدل

جدول ۴: نتایج عددی تعدادی از پاسخ‌های کارایی به‌دست آمده از حل مسأله.

max - min	f_{Enk}	f_{Tnk}	f_{Cnk}	$f_{Ek}(\%)$	$f_{Tk}(\%)$	$f_{Ck}(\$)$	k
۰,۰۰۴۷	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰	۰,۰۰	$۱۰۳,۵۰۹ \times ۱۰^۶$	۳
۰,۲۴۵۷	۰,۸۷۱۴	۰,۹۶۳۱	۰,۲۴۵۷	۲,۱۵	۳,۶۹	$۷۸,۴۵۱ \times ۱۰^۶$	۱۷
۰,۱۵۶۲	۰,۹۴۱۸	۱,۰۰۰۰	۰,۱۵۶۲	۰,۹۸	۰,۰۰	$۸۷,۷۵۲ \times ۱۰^۶$	۳۹
۰,۰۰۰۰	۰,۰۷۲۱	۰,۰۰۰۰	۰,۹۳۲۵	۱۵,۵۳	۱۰۰,۰۰	$۷,۰۱۸ \times ۱۰^۶$	۷۵
۰,۲۷۹۰	۰,۲۷۹۰	۰,۲۹۶۵	۰,۷۵۱۸	۱۲,۰۷	۷۰,۳۵	$۲۵,۸۰۸ \times ۱۰^۶$	۱۰۵
۰,۴۴۸۲	۰,۶۵۴۴	۰,۹۲۵۱	۰,۴۴۸۲	۵,۷۹	۷,۴۹	$۵۷,۳۸۳ \times ۱۰^۶$	۱۳۵
۰,۵۴۱۲	۰,۵۴۱۲	۰,۷۷۵۳	۰,۵۴۱۲	۷,۶۸	۲۲,۴۷	$۴۷,۶۶۱ \times ۱۰^۶$	۱۴۶
۰,۳۷۹۶	۰,۵۳۱۳	۰,۳۷۹۶	۰,۵۵۲۲	۷,۸۵	۶۲,۰۴	$۴۶,۵۷۰ \times ۱۰^۶$	۲۱۳
۰,۰۴۱۳	۰,۴۱۷۴	۰,۰۴۱۳	۰,۶۴۴۱	۹,۷۵	۹۵,۸۷	$۳۷,۰۱۱ \times ۱۰^۶$	۲۶۳
۰,۳۰۹۲	۰,۳۰۹۲	۰,۴۹۵۶	۰,۷۲۸۹	۱۱,۵۷	۵۰,۴۴	$۲۸,۱۹۰ \times ۱۰^۶$	۲۷۹
۰,۳۶۹۶	۰,۳۶۹۶	۰,۸۳۲۸	۰,۶۸۳۱	۱۰,۵۵	۱۶,۷۲	$۳۲,۹۵۸ \times ۱۰^۶$	۳۲۹
۰,۳۰۳۲	۰,۸۱۶۷	۱,۰۰۰۰	۰,۳۰۳۲	۳,۰۷	۰,۰۰	$۷۲,۴۶۲ \times ۱۰^۶$	۳۴۵
۰,۱۹۴۰	۰,۱۹۴۰	۰,۳۱۱۹	۰,۸۲۹۵	۱۳,۴۹	۶۸,۸۱	$۱۷,۷۳۲ \times ۱۰^۶$	۳۴۶
۰,۲۵۷۸	۰,۴۵۰۵	۰,۲۵۷۸	۰,۶۱۳۴	۹,۲۰	۷۴,۲۲	$۴۰,۲۰۸ \times ۱۰^۶$	۳۴۸
۰,۲۶۴۸	۰,۵۸۲۱	۰,۲۶۴۸	۰,۵۱۰۵	۷,۰۰	۷۳,۵۲	$۵۰,۹۰۶ \times ۱۰^۶$	۳۷۰
۰,۲۳۶۵	۰,۲۳۶۵	۰,۷۱۲۸	۰,۷۸۷۶	۱۲,۷۸	۴۸,۷۲	$۲۲,۰۹۴ \times ۱۰^۶$	۳۷۵
۰,۳۹۹۰	۰,۶۱۲۲	۰,۳۹۹۰	۰,۴۸۱۴	۶,۴۹	۶۰,۱۰	$۵۳,۹۳۹ \times ۱۰^۶$	۴۳۴
۰,۴۹۲۹	۰,۴۹۲۹	۰,۵۴۶۵	۰,۵۸۱۳	۸,۴۹	۴۵,۳۵	$۴۳,۵۴۱ \times ۱۰^۶$	۴۴۱
۰,۲۵۸۰	۰,۷۵۷۵	۰,۸۹۶۷	۰,۳۵۸۰	۴,۰۶	۱۰,۳۳	$۶۶,۷۶۴ \times ۱۰^۶$	۴۶۷
۰,۴۰۶۳	۰,۶۹۹۲	۰,۷۹۱۰	۰,۴۰۶۳	۵,۰۴	۲۰,۹۰	$۶۱,۷۴۴ \times ۱۰^۶$	۴۹۶

جدول ۵: مقایسه پارامترهای مربوط به پاسخ نهایی و وضعیت اولیه شبکه بدون منابع DG.

پس از احداث منابع DG	قبل از احداث منابع DG	واحد	پارامتر	تلفات اهمی شبکه
(۰,۷۲۲, ۰,۸۶۸, ۱,۰۳۰)	(۱,۳۱۴, ۱,۵۱۶, ۱,۷۳۵)	[MW]	\tilde{P}_{Loss}	بارگذاری پست فوق توزیع
(۳۴,۴۲۴, ۳۹,۶۰۵, ۴۴,۷۹۷)	(۴۶,۶۹۷, ۵۱,۹۲۰, ۵۷,۱۵۱)	[MVA]	\tilde{P}_S	ریسک اضافه بار در پست فوق توزیع
۰	۳۹,۵۷	[%]	S_{PS-MAX}	ریسک اضافه بار در خطوط
۲۲,۴۷	۱۰۰	[%]	S_{PL-MAX}	ریسک تخطی از حدود مجاز ولتاژ
۰	۱۰۰	[%]	S_{VD-MAX}	تابع هدف اقتصادی
$۴۷,۶۶۱ \times ۱۰^۶$	۰	[\$]	\tilde{f}_C	تابع هدف ریسک فنی
۲۲,۴۷	۱۰۰	[%]	f_T	تابع هدف ریسک اقتصادی
۷,۶۸	۱۶,۷۴	[%]	f_E	

پس از نصب و بهره‌برداری از واحدهای DG طبق پاسخ نهایی به ۷,۶۸ درصد تنزل پیدا کرده است. تلفات سیستم نیز پس از احداث DG به‌صورت قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

ذکر این نکته ضروری است که علاوه بر منافع ناشی از احداث واحدهای DG که در قالب کاهش ریسک‌های فنی و اقتصادی مطرح شد، ظرفیت آزادشده حاصل از کاهش بارگذاری پست فوق توزیع و خطوط شبکه می‌تواند برای تأمین رشد بار آتی سیستم به‌کار رود و نیاز شرکت‌های توزیع را برای توسعه خطوط و افزایش ظرفیت پست به تعویق اندازد.

باید توجه داشت که در مکان‌یابی منابع DG مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش پیشنهادی، پاسخ‌های کارا که با استفاده از NSGA به‌دست می‌آیند، در واقع تعامل میان اهداف اقتصادی، ریسک فنی و ریسک اقتصادی را نشان می‌دهد. هر کدام از این پاسخ‌ها گزینه‌ای را برای طراح فراهم می‌آورند تا وی بتواند با توجه به تجربیات و دیدگاه‌های تخصصی خود یکی از آنها را انتخاب نماید.

در جدول ۵ شاخص‌های مرتبط با ریسک‌های فنی و اقتصادی و برخی دیگر نتایج عددی مرتبط با پاسخ نهایی مکان‌یابی منابع DG در شبکه مورد مطالعه با وضعیت اولیه بدون حضور تولید پراکنده ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. همچنان‌که داده‌های این جدول نشان می‌دهد، مقادیر توابع هدف ریسک فنی و اقتصادی پس از احداث DG بهبود قابل توجهی یافته‌اند.

مطابق با پاسخ نهایی فوق‌الذکر، جریان فازی عبوری از خطوط و پروفیل ولتاژ فازی در گره‌های شبکه توزیع مورد مطالعه به‌گونه‌ای تغییر کرده‌اند که ریسک اضافه بار در پست فوق توزیع که قبلاً ۳۹,۵۷ درصد بوده، به‌طور کامل از بین رفته است. ریسک اضافه بار در خطوط و عبور از حدود ولتاژ مجاز که در وضعیت اولیه شبکه هر دو ۱۰۰ درصد بوده‌اند، پس از نصب و بهره‌برداری از منابع DG مطابق با پاسخ نهایی کم شده‌اند به‌طوری که ریسک اضافه بار خطوط به ۲۲,۴۷ درصد رسیده و ریسک عبور از حدود ولتاژ مجاز به‌طور کلی حذف شده است. ریسک اقتصادی شبکه نیز طبق تعریف (۲۰) الی (۲۳) در حالت اولیه ۱۶,۷۴ درصد بوده که

۸- نتیجه گیری

احداث و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع اگر مبتنی بر بهینه‌سازی انجام گیرد، می‌تواند منافع فنی و اقتصادی قابل توجهی را برای شرکت‌های توزیع به‌همراه داشته باشد. با توجه به وجود فاکتورهای فراوان در مکان‌یابی بهینه واحدهای DG، حل این مسأله با پیچیدگی‌های خاصی توأم گردیده است. از سوی دیگر وجود عدم قطعیت در اطلاعات بار و قیمت برق که در شبکه‌های واقعی امری اجتناب‌ناپذیر است، پیچیدگی و حل مسأله را دوچندان ساخته است. در این مقاله مسأله تعیین مکان و ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده تحت مدیریت و مالکیت شرکت توزیع در شبکه توزیع در قالب یک مدل چندهدفه ریاضی به‌صورت توابع هدف و قیود مرتبط با آن فرموله‌بندی شد. در مدل ارائه‌شده عدم قطعیت در اطلاعات بار و نیز قیمت برق بازار انتقال مبتنی بر تئوری فازی مدل‌سازی و ریسک‌های فنی و اقتصادی ناشی از این عدم قطعیت‌ها در قالب اندیس‌های مربوطه تعریف شد. برای حل مدل چندهدفه طراحی‌شده که دارای سه تابع هدف است از روش NSGA استفاده و مراحل اعمال آن تشریح شد. با به‌کارگیری این روش بهینه‌سازی، پاسخ‌های کارای مسأله در یک بار اجرا به‌دست می‌آیند. این پاسخ‌های کارا گزینه‌هایی هستند که تعامل میان اهداف طرح را در مکان‌یابی منابع DG نشان می‌دهند. برای انتخاب جواب نهایی از میان پاسخ‌های کارای به‌دست آمده از روش max-min استفاده شد. به‌منظور نمایش کارایی مدل و روش پیشنهادی، از یک شبکه نمونه استفاده و نتایج اجرای الگوریتم ارائه و بررسی شد. نتایج مطالعات عددی حاکی از بهبود در وضعیت شبکه نسبت به حالت اولیه آن است.

بی‌شک فناوری‌های مختلف مطرح برای DG دارای مشخصات فنی و بهره‌برداری متفاوتی هستند و این امر می‌تواند روی مدل پیشنهادی و توابع اقتصادی و ریسک تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر انواع مختلف DGها از نظر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری نیز با یکدیگر متفاوت هستند که این امر می‌تواند روی پاسخ مسأله مورد نظر تأثیرگذار باشند. مدل ریاضی ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند با تغییر اطلاعات ورودی محدودیت‌های بهره‌برداری و هزینه‌ها به‌زای انواع مختلف مورد نظر مازول‌های DG اجرا و پاسخ‌های نهایی با یکدیگر مقایسه شوند. همچنین مدل و روش بهینه‌سازی پیشنهادی در این مقاله می‌تواند با هدف دست‌یابی به بهترین ترکیب انواع مختلف DG توسعه یابد.

مراجع

- [6] A. Silvestri, S. Berizzi, and S. Buonanno, "Distributed generation planning using genetic algorithms," in *Proc. IEEE PowerTech Budapest 99*, p. 257, 29 Aug.-2 Sep. 1999.
- [7] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, Nov. 2004.
- [8] H. L. Willis, "Analytical methods and rules of thumb for modeling DG-distribution interaction," in *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1643-1644, Seattle, US, Jul. 2000.
- [9] N. S. Rau and Y. H. Wan, "Optimum location of resources in distributed planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 2014-2020, Nov. 1994.
- [10] J. O. Kim, S. W. Nam, S. K. Park, and C. Singh, "Dispersed generation planning using improved hereford ranch algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 47, no. 1, pp. 47-55, Oct. 1998.
- [11] G. Celli, E. Ghaiani, S. Mocci, and F. Pilo, "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 750-757, May 2005.
- [12] R. E. Brown, J. Pan, X. Feng, and K. Koutlev, "Siting distributed generation to defer T&D expansion," in *Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf. and Expo.*, vol. 2, pp. 622-627, 28 Oct.-2 Nov. 2001.
- [13] W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, and M. M. A. Salama, "Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, Aug. 2004.
- [14] D. Das, "A noniterative load flow algorithm for radial distribution networks using fuzzy set approach and interval arithmetic," *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 59-72, Jan. 2005.
- [15] D. S. Popovic and Z. N. Popovic, "A risk management procedure for supply restoration in distribution networks," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 221-228, Feb. 2004.
- [16] J. Ramirez-Rosado and J. A. Domiguez-Navarro, "Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1801-1810, Nov. 2004.
- [17] J. Ramirez-Rosado and J. A. Domiguez-Navarro, "Distribution planning of electrical energy using fuzzy models," *Int. J. of Power and Energy Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 49-55, 1996.
- [18] J. Nazarko and W. Zalewski, "The fuzzy regression approach to peak load estimation in power distribution systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 809-814, Aug. 1999.
- [19] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, May 1998.
- [20] K. Kauhaniemi, "Fuzzy models and techniques for the calculation of radial distribution networks," in *IEEE/NTUA Athens Power Tech. Conf.*, vol. 1, pp. 423-428, Athens, Greece, Sep. 1993.
- [21] P. N. Vovos, A. E. Kiprakis, A. R. Wallace, and G. P. Harrison, "Centralized and distributed voltage control: impact on distributed generation penetration," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 476-483, Feb. 2007.
- [22] K. Deb, S. Agrawal, and A. Pratap, *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*, Indian Inst. Technol., Kanpur, India, Tech. Rep. 200 001, 2000.
- [23] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [24] T. P. Bagchi, *Multiobjective Scheduling by Genetic Algorithms*, Boston, MA: Kluwer, 1999.
- [25] E. El-Hawary, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, New York: IEEE Press, 1998.
- [26] Y. J. Lai and C. L. Hwang, *Fuzzy Multiple Objective Decision Making, Methods and Applications*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1994.
- [27] Y. L. Lai and C. L. Hwang, *Fuzzy Mathematical Programming*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [28] H. Quintana, H. K. Temraz, and K. W. Hipel, "Two-stage powersystem-distribution-planning algorithm," *IEE Proc. C, Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 140, no. 1, pp. 17-29, Jan. 93.
- [1] P. A. Daly and J. Morrison, "Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery systems," in *Proc. Rural Electric Power Conf.*, pp. A2/1-A2/13, 2001.
- [2] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power System Research*, vol. 57, no. 3, pp. 195-204, Apr. 2001.
- [3] P. P. Barker, "Determining the impact of distributed generation on power systems: part 1 - radial distribution systems," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1645-1656, Seattle, WA, 2000.
- [4] K. -H. Kim, Y. -J. Lee, S. -B. Rhee, S. -K. Lee, and S. -K. You, "Dispersed generator placement using fuzzy - GA in distribution systems," in *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Soc. Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1148-1153, Chicago, US, Jul. 2002.
- [5] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, "Placement of dispersed generations systems for reduced losses," in *Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences*, vol. 4, pp. 9, Maui, US, 4-7 Jan. 2000.

حمید فلقی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق در سال ۱۳۷۹ در دانشگاه صنعت آب و برق و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به‌ترتیب در سالهای ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و

محسن پارسامقدم تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی برق در سال ۱۳۵۹ از دانشگاه شریف و در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق-قدرت به ترتیب در سالهای ۱۳۶۲ و ۱۳۶۵ از دانشگاه‌های تویوهاشی و توهوکو ژاپن به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس تهران می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی، کنترل و تجدیدساختار در سیستم‌های قدرت.

هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند می‌باشد. ایشان در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ به عنوان همکار تحقیقاتی در دانشگاه A&M تگزاس فعالیت داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی، تولید پراکنده، قابلیت اطمینان سیستم‌های و کاربرد روش‌های بهینه‌سازی چندمنظوره در مطالعات سیستم‌های قدرت.

محمودرضا حقی‌فام تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی برق در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه تبریز، در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۶۹ از دانشگاه تهران و در مقطع دکتری در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده، شبکه‌های توزیع، قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، محاسبات نرم و کاربردهای آن در سیستم‌های قدرت.

Archive of SID