افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع به‌کمک بهینه-سازی چندمنظوره سیستم حفاظتی و کلیدزنی

حامد هاشمی دزکی[۱] ، دانشجوی دکتری، حسین عسکریان ابیانه[۱]، استاد تمام، کاظم مظلومی[۲]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
- Hamed.hashemi@gmail.com, Askarian@aut.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه زنجان - زنجان- ایران
- Kmazlumi@znu.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر با توجه به افزایش اهمیت بهره وری در سیستم تامین انرژی، شرایط رقابتی در بازار برق و تامین انرژی مطمئن و با کیفیت مطلوب به مشترکین، قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع مورد توجه بیشتر قرار گرفته است. یکی از مهتمرین پارامترهای موثر بر قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی می‌باشند. در روش‌های موجود برای بهینه سازی سیستم حفاظتی و کلیدزنی از توابع هدف تک منظوره استفاده شده است. از آنجایی که با درنظرگیری توابع هدف تک‌منظوره تنها یک پارامتر بدون درنظرگیری سایر معیارها بهینه می‌گردد، در این مقاله تابع هدفی ترکیبی برای بهینه سازی سیستم حفاظتی و کلیدزنی ارائه گردیده است. تابع هدف معرفی شده در این مقاله دربرگیرنده شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم و هزینه کل سیستم می‌باشد. از مزایای روش ارائه شده در این مقاله امکان دسترسی به تمام مزایای استفاده از توابع تک‌منظوره مانند شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم و تابع هزینه کل می‌باشد. طرح بدست آمده از روش تابع هدف ترکیبی مصالحه‌ای میان چند معیار انجام داده و به‌صورت همزمان هر دو را ارضا می‌کند. نتایج بدست آمده از اعمال روش پیشنهادی به یک شبکه نمونه در مقایسه با شرایط نتایج توابع هدف تک منظوره و وضعیت موجود سیستم، دلالت بر کارآیی بیشتر روش پیشنهادی دارد.

واژه های کلیدی: تابع هدف چند منظوره، شبکه‌های توزیع، تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی، الگوریتم ژنتیک

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۰۷/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول : حسین عسکریان ابیانه

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی برق، دفتر ریاست دانشکده مهندسی برق

۱- فهرست علایم و اختصارات

r : درصد رشد بار سالیانه

p : نرخ بهره سالیانه

t : عمر مفید تجهیزات

α : مجموعه خطوط و بخش‌هایی که یک تجهیز حفاظتی در آن محل نصب شده است.

β : مجموعه خطوط و بخش‌هایی که هیچ تجهیز حفاظتی در آن محل نصب شده است.

λ_j : احتمال نرخ بروز خطا در بخش j ام

β : مجموعه خطوط و بخش‌هایی که هیچ تجهیز حفاظتی در آن محل نصب شده است.

q : درصد ترکیبی متاثر از نرخ بهره و تورم و ضریب اثردهی این دو پارامتر در جریان نقدینگی

ω_1 : ضریب وزنی پارامتر SAIFI نرمالیزه در تابع هدف

ω_2 : ضریب وزنی هزینه انرژی توزیع نشده در تابع هدف

ω_3 : ضریب وزنی هزینه های ثابت در تابع هدف

K : نسبت ضریب وزنی هزینه انرژی توزیع نشده و هزینه های ثابت

FCP_{jk} : هزینه نصب و... تجهیز حفاظتی نوع k در شاخه j ام

FCC_i : هزینه نصب و... تجهیز کلیدزنی (سکسیونر) در شاخه j ام

Q : محل‌های قرارگیری تجهیزات حفاظتی

ch : محل‌های قرارگیری تجهیزات کلیدزنی

Y_i : متغیر تصمیم‌گیری در مورد بودن یا نبودن تجهیز کلیدزنی

X_j : متغیر تصمیم‌گیری در مورد بودن یا نبودن تجهیز حفاظتی

TC : هزینه کل سیستم

FC : هزینه‌های ثابت

$CENS$: هزینه‌ای مرتبط با انرژی توزیع نشده

۲- مقدمه

بر اساس آمارهای ارائه شده مانند آنچه در [۱] آورده شده است در حدود ۷۰٪ قطعی‌های مشترکین بر اثر بروز خطا در سیستم توزیع بوده، در حالی که سهم سیستم‌های انتقال و تولید به ترتیب برابر ۲۰٪ و ۱۰٪ می‌باشد. با شرایط توضیح داده شده می‌توان به این مسئله پی برد که شبکه توزیع دارای اهمیت به‌سزا و روبه‌رشدی است که توجه بیشتر به آن را لازم می‌دارد.

یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی می‌باشند. از این‌رو یکی از کارآمدترین راه‌حل‌های پیشنهادی اتوماسیون شبکه است. یکی از مزایای عمده اتوماسیون شبکه‌های توزیع محدود کردن انرژی توزیع نشده در هنگام بروز خطا و امکان بازیابی هرچه سریع‌تر بخش‌های بدون خطاست. کاهش انرژی توزیع نشده و افزایش قابلیت بازیابی انرژی به‌وسیله قرارگیری تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی در موقعیت‌های مناسب امکان‌پذیر می‌باشد. تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی مورد اشاره در این مقاله شامل ریکلوزرها، سکشنالایزرها، تجهیزات کلیدزنی جداکننده و فیوزها می‌شوند.

در مصالحه میان هزینه مورد نیاز تجهیزات حفاظتی یا کلیدزنی با قابلیت اطمینان سیستم، معیارهای مختلف کیفیت توان و قابلیت اطمینان وجود دارد. مهمترین معیارهای قابل استفاده در مقایسه با هزینه مورد نیاز تجهیزات، انرژی توزیع نشده (ENS)، هزینه‌های مرتبط با انرژی توزیع نشده (CENS) ، شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم (SAIFI) و شاخص دوره متوسط قطع سیستم (SAIDI) می‌باشند.

از اولین تحقیقاتی که در زمینه بهینه‌سازی سیستم حفاظتی و کلیدزنی انجام شده، مرجع [۲] است. در این مرجع جایابی سکشنالایزرهای فیدر توزیع بر اساس حداقل‌سازی تابع هزینه مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳] چهار قاعده برای تعیین تجهیزات حفاظتی بیان گردیده و یا در مرجع [۴] تغییر آرایش شبکه برای کاهش انرژی توزیع نشده مورد بررسی قرار گرفته است.

مراجع موجود در سال‌های اخیر در این زمینه در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند. دسته‌ای از این مراجع به‌صورت مجزا محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی را مورد بررسی قرار داده و روش پیشنهادی آن‌ها محل بهینه قرارگیری تجهیزات کلیدزنی را مشخص می‌کنند. مراجع [۲و۵-۸] از این دسته‌اند. دسته دوم مراجعی هستند که به‌صورت مجزا به بررسی محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی شبکه‌های توزیع پرداخته‌اند[۹-۱۲]. مراجع دیگری نیز وجود دارند که به‌صورت همزمان این مسئله را مورد بررسی قرار داده‌اند[۱۳-۱۵]. مراجعی که به‌صورت همزمان به این موضوع پرداخته‌اند بسیار کم بوده و تمامی در سال‌های اخیر انجام گرفته‌اند.

در اکثر مقالاتی که مقوله جایابی تجهیزات حفاظتی یا کلیدزنی مورد بررسی قرار گرفته است تابع هدف دربرگیرنده یکی از معیارهای ارائه شده مانند شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم، انرژی توزیع نشده یا هزینه‌های مرتبط با انرژی توزیع‌نشده می‌باشد. با کمک برخی از شاخص‌های ارائه شده مانند شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم امکان بررسی محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی وجود ندارد. از سوی دیگر شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم یکی از پرکاربردترین شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع است. لذا با درنظر گرفتن شاخصی یک هدفه مانند شاخص

فرکانس متوسط قطع سیستم، قابلیت تعیین بهینه محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی را از دست داده و از سوی دیگر با درنظر گرفتن شاخص یک هدفه دیگری مانند شاخص انرژی توزیع‌نشده یا هزینه انرژی توزیع‌نشده در سیستم شاخص پرکاربردی مانند شاخص متوسط قطع سیستم را نادیده گرفته‌ایم. استفاده از یک تابع هدف چندمنظوره این قابلیت را ایجاد می‌کند که تعیین محل بهینه تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی را به‌صورت همه‌جانبه مورد تحلیل قرار داد.

در این مقاله تابع هدف ترکیبی شامل هزینه‌های ناشی از انرژی توزیع-نشده، هزینه‌های نصب، تعمیر و نگهداری تجهیزات و شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم معرفی می‌شود. تابع هدف معرفی شده بر روی یک شبکه نمونه توزیع اعمال می‌گردد. با مقایسه نتایج بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی به کمک الگوریتم ژنتیک، تابع هدف‌های یک-منظوره و شرایط فعلی سیستم، مزایای روش پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود نمایان می‌گردد.

۳- تابع هدف ترکیبی

با توجه به این نکته که در جایابی تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی استفاده از شاخص انرژی توزیع نشده و هزینه‌های مرتبط با انرژی توزیع نشده یا استفاده از شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم هر یک مزایایی را به دنبال خواهد داشت، در صورت استفاده از یک تابع هدف چندمنظوره امکان سودبردن از تمام مزایای چند معیار وجود داشته و از نقطه نظر هرکدام از دیدگاه‌های مختلف وضعیت رضایت-بخشی را تامین کرد. تابع هدف ترکیبی پیشنهادی در این مقاله شامل هزینه‌های انرژی توزیع‌نشده، هزینه‌های ثابت نصب، تعمیر و نگهداری تجهیزات و شاخص متوسط فرکانس قطع سیستم می‌باشد. بیان ریاضی تابع هدف ترکیبی پیشنهادی در رابطه (۱) آورده شده است.

$$O.F = \omega_1 \times \frac{SAIFI - SAIFI_{\min}}{SAIFI_{\min}} + \omega_2 \times \frac{CENS - CENS_{\min}}{CENS_{\min}} + \omega_3 \times \frac{FC - FC_{available}}{FC_{available}} \quad (۱)$$

در رابطه (۱) که بیان‌کننده تابع هدف ترکیبی پیشنهادی است سه بخش تشکیل‌دهنده وجود دارد. هر کدام از این عبارات با ضرایب وزنی متفاوتی می‌توانند در تابع هدف نقش بازی کنند. تعیین ضرایب وزنی ω_1، ω_2 و ω_3 بستگی به تصمیم طراح، شرایط فیدر توزیع و تصمیمات استراتژیک مدیران خواهد داشت. همچنین با توجه به بازه تغییرات متفاوت عبارات تشکیل دهنده، نرمالیزه کردن عبارات به کمک مقایسه با مقدار حداقل هر معیار انجام گرفته است.

برای ضرایب وزنی شرایط بیان شده در روابط (۲) و (۳) باید لحاظ گردد. برابر یک قرار دادن مجموع ضرایب وزنی از اینروست که اعداد انتخابی دلالت به میزان اهمیت شاخص مورد اشاره داشته باشد و همچنین امکان مقایسه بین تاثیرپذیری شاخص-های مختلف داشته باشد. رابطه میان ضرایب وزنی ω_2 و ω_3 نیز در رابطه (۲) ارائه گردیده است. دلیل برقراری نسبت مشخصی بین این دو شاخص به دلیل ماهیت مشخص هزینه آن دو است. ضریب ω_2 متناسب با هزینه‌های انرژی توزیع نشده بوده و ω_3 متناسب با هزینه‌های تجهیزات می‌باشد. در مورد نسبت $\frac{\omega_2}{\omega_3}$ نیز پارامترهایی از قبیل نرخ تورم، نرخ رشد و طول عمر مفید تجهیزات است. شرح چگونگی محاسبه نسبت میان دو ضریب وزنی ω_2 و ω_3 نیز در روابط (۴و۵) آمده است.

$$\frac{\omega_2}{\omega_3} = K \quad (۲)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (۳)$$

$$q = \frac{1 + r\%}{1 + p\%} \quad (۴)$$

$$K = \frac{q^t - 1}{q - 1} \quad (۵)$$

با اعمال ضریب K ارزش زمانی پول لحاظ خواهد شد. ارزش زمانی پول معادل‌سازی هزینه یا درآمدهای سال‌های بعد در زمان فعلی است. در مرجع [۱۶] اطلاعات تکمیلی در زمینه ارزش زمانی پول و ... داده شده است.

ضریب K یک ضریب تجمعی برای درنظر گیری سودهای سالیانه ناشی از کاهش هزینه انرژی توزیع نشده است. از آنجایی که جمع عددی هزینه‌های کاهش یافته سالیانه و درنظر گرفتن آن در سال اول از نظر اقتصاد مهندسی و ارزش زمانی پول کار درستی نیست، باید از این ضریب استفاده کرد. همانگونه که از رابطه‌های (۴) و (۵) مشخص است، هرچه نرخ بهره افزایش یابد ارزش زمانی فعلی هزینه‌های کاهش یافته کم می‌شود. در حالی که ضریب رشد بار اثر معکوس دارد، یعنی با افزایش ضریب رشد بار سود حاصله ناشی از کاهش هزینه‌های انرژی توزیع نشده افزایش می‌یابد. بر اساس ترکیب اثر دو ضریب رشد بار و نرخ بهره، در صورت افزایش q، سهم هزینه‌های انرژی توزیع نشده در تابع هدف افزایش می‌یابد و با کاهش آن ضریب، سهم هزینه‌های ثابت در تابع هدف مهم‌تر خواهد شد. در مورد نسبت ضریب وزنی شاخص فرکانس قطع و هزینه‌ها نیز می‌توان از نظر خبره و کارشناسان استفاده کرد. همچنین در صورتی که از طرف کارشناسان و طراح سیستم تاکید خاصی بر هزینه یا تعداد مشترکین دچار قطعی نباشد می‌توان از آنالیز حساسیت یا روش‌های بهینه‌سازی برای دست یافتن به بهترین پاسخ سود جست.

در صورتی که بجای تابع هدف ترکیبی نشان داده شده در رابطه (۱) استفاده از تابع هدف تک منظوره دربرگیرنده شاخص فرکانس متوسط

قطع سیستم مدنظر باشد باید از توابع هدفی همانند آنچه در روابط (۶) یا (۷) نشان داده شده است استفاده کرد.

$$O.F_1 = \frac{SAIFI\left(\lambda_j, X_j\right) - SAIFI_{\min}}{SAIFI_{\min}} + \frac{\sum_{j\in\beta} X_j - \sum_{j\in\alpha} X_j}{\sum_{j\in\alpha} X_j} \qquad (۶)$$

$$subject\ \ to\ \ : \sum_{j\in\beta} X_j \le \sum_{j\in\alpha} X_j$$

$$O.F_2 = \begin{cases} O.F_1 & \text{If } \sum_{j\in\beta} X_j \ge \sum_{j\in\alpha} X_j \\ \dfrac{SAIFI\left(\lambda_j, X_j\right) - SAIFI_{\min}}{SAIFI_{\min}} & \text{If } \sum_{j\in\beta} X_j \le \sum_{j\in\alpha} X_j \end{cases} \qquad (۷)$$

دلیل استفاده از روابط (۶) یا (۷) به‌عنوان تابع هدف دربرگیرنده شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم اعمال ملاحظات تعداد تجهیزات مورد نیاز طرح بهینه است. اگر تابع هدف دربرگیرنده شاخص متوسط فرکانس قطع سیستم بوده و هیچ ضریب جریمه‌ای برای تعداد تجهیزات لحاظ نگردد، روش بهینه‌سازی تابع هدف جواب بدیهی قراردهی تجهیز حفاظتی در تمام شاخه‌ها را پیشنهاد می‌دهد. تفاوت توابع هدف مبتنی بر شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم ارائه شده در روابط (۶) و (۷) در استفاده از تمامی تجهیزات موجود در یک فیدر یا سیستم تحت بهره‌برداری است. تابع هدف بیان شده در رابطه (۶) و بهینه‌سازی آن راه‌حلی را نشان می‌دهد که کمترین تجهیز حفاظتی را نیاز داشته باشد، بدون توجه به این موضوع که در سیستم در حال بهره‌برداری چه تعداد تجهیز موجود می‌باشد. در صورتی هم که سیستم در مرحله طراحی بوده آنگاه تفاوتی میان توابع هدف بیان شده در رابطه (۶) یا (۷) وجود نخواهد داشت.

در صورتی که تابع هدف هزینه تابع هدف انتخابی برای بهینه‌سازی سیستم حفاظتی انتخاب شود باید از رابطه (۸) استفاده نمود.

$$TC = FC + K \times CENS \qquad (۸)$$

برای بدست آوردن مقدار FC باید از رابطه بیان شده در رابطه (۹) استفاده کرد.

$$FC = \sum_{j\in Q}\left(FCP_{jk} \times X_j\right) + \sum_{i\in ch}\left(FCC_i \times Y_i\right) \qquad (۹)$$

در صورتی که استفاده از تابع هدف ترکیبی مدنظر نبوده و مقایسه‌ای بین تابع هدف دربرگیرنده شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم و تابع هزینه انجام گیرد، می‌توان بیان کرد که در صورت استفاده از تابع هدف شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم قابلیت تصمیم‌گیری در مورد قرارگیری تجهیزات کلیدزنی را نداشته و فقط در مورد تجهیزات حفاظتی کاربرد دارد. در حالی که با استفاده از تابع هزینه کل قابلیت بهینه‌سازی همزمان تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی وجود دارد. همچنین نگاه تابع هدف هزینه به سیستم نگاه مبتنی بر بار و ظرفیت مشترکین و نگاه تابع هدف دربرگیرنده شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم نگاهی مبتنی بر تعداد مشترکین می‌باشد.

شاخص‌های SAIFI و ENS در یک شبکه یک استراتژی را دنبال می‌کنند. تنها تفاوت دیدگاه این دو شاخص بر تعداد مشترکین و میزان ظرفیت نصب شده (دیدگاه مبتنی بر مشترکین و مبتنی بر بار) است. همچنین در ENS و CENS علاوه بر قطعی‌های مشترکین، فرآیند بازیابی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اما نکته مهمتری که در تابع هدف ترکیبی پیشنهادی وجود دارد ترکیب دو دیدگاه هزینه و تعداد قطعی مشترکین است. از آنجایی که هزینه دو بخش ثابت و متغیر (سرمایه‌گذاری، نصب و تعمیرات تجهیزات و هزینه انرژی توزیع نشده سالیانه) است، تابع هدف دارای سه بخش متفاوت گردیده است. اما از دیدگاه کلی تابع هدف دوگانه‌ای از هزینه و شاخص قابلیت اطمینان تعداد قطعی مشترکین است.

برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان که بخش مهمی از توابع هدف موجود و پیشنهادی بهینه‌سازی محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی را تشکیل می‌دهند در این مقاله از روش تحلیلی ارائه‌شده در مراجع [۱۷-۲۰] استفاده شده است. روش تحلیلی ارائه شده در در مراجع [۱۷-۲۰] مبتنی بر توپولوژی شبکه، تعداد شاخه-های اصلی و فرعی و چگونگی قرارگرفتن آنها نسبت به یکدیگر است. در مقاله [۱۸] نیز از همین روش برای محاسبه شاخص متوسط فرکانس قطع سیستم استفاده شده است. مزایای این روش امکان کاربرد به‌صورت‌های مختلف برای محاسبه شاخص‌های مختلف مبتنی بر مشترک و مبتنی بر بار است، همچنین به‌خاطر تحلیلی بودن روابط اعمال تغییرات در مواقع لزوم بسیار آسان است.

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است. هر کروموزوم مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک شامل تعداد ژنی برابر تعداد بخش‌های شاخه اصلی است. هر ژن ماهیت متغیر باینری (۰) یا (۱) را خواهد داشت. اگر مقدار ژن mام یک کروموزوم (۰) باشد به این معناست که تجهیز کلیدزنی در بخش mام شاخه اصلی وجود ندارد و ژن ۱ در شاخه mام معرف وجود تجهیز در این موقعیت است. شکل (۱) نمایش یک کروموزوم نمونه است.

0	1	0	1	.....	0	0	1	0

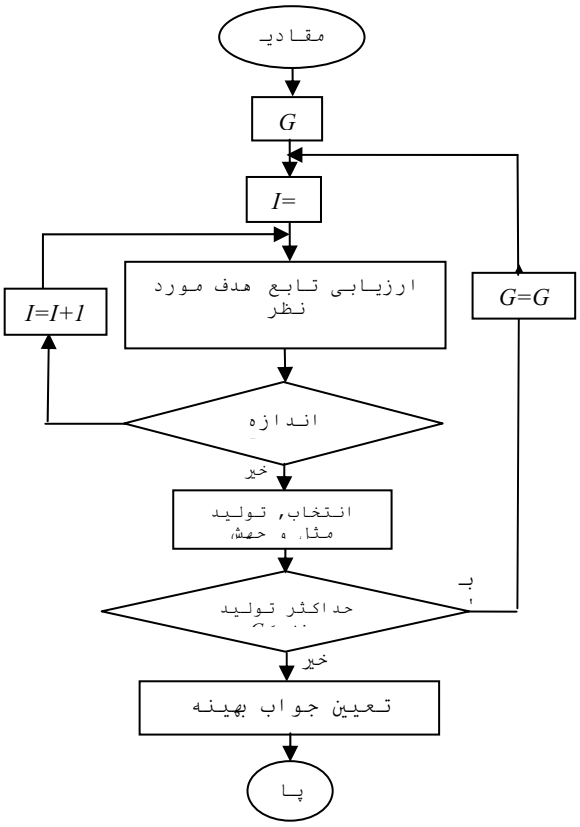
شکل(۱): کروموزوم نمونه در فرآیند بهینه‌سازی تابع هدف

در شکل (۲) روندنمای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تابع هدف نشان داده شده است. به‌منظور بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک در این مقاله از جعبه ابزار ژنتیک نرم افزار MATLAB استفاده خواهد شد.

۴- اعمال تابع هدف ترکیبی به شبکه نمونه توزیع

در این بخش روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه توزیع اعمال خواهد شد. اطلاعات طول خط‌ها، مقدار بار نصب‌شده، تعداد مشترکین و سایر اطلاعات مربوط به شبکه نمونه انتخابی در مرجع [۲۱] موجود است که در جدول (۱) نیز نمایش داده شده است. نمایش تک‌خطی شبکه توزیع نمونه انتخابی در شکل (۳) نشان داده شده است. نمایش

شبکه در شکل (۳) بر اساس شماره‌گذاری شاخه‌هاست که در مراجع [۲۲] به آن پرداخته شده است.



شکل (۲): روندنمای بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک

پارامترهایی مورد نیاز برای اعمال تابع هدف به شبکه موردنظر و بهینه‌سازی آن در جدول (۲) ذکر شده است. در مورد ثابت‌ها و مقادیر هزینه انرژی و ... از آمار تفصیلی صنعت برق در سال ۱۳۸۸ استفاده شده است [۲۳]. مدت زمان خاموشی مشترکین با بروز خطا و رفع کامل آن یک ساعت فرض شده است.

در شبکه مورد نظر میزان متوسط بارگیری ترانس‌ها به عنوان عدد بار هر بخش درنظر گرفته شده است. تغییر پذیری بارها بر اساس منحنی بار روزانه برای روزهای مختلف کاری و تعطیل در ماه‌های مختلف می‌توان با یکدیگر متفاوت باشد. در صورتی که از بارهایی با منحنی متغیر و حالت احتمالی در مطالعات استفاده شود از روش‌هایی مانند مونت کارلو یا روش‌ها دیگر می‌توان استفاده کرد. در صورت متغیر بودن بارها تغییر کلی در ماهیت مسئله ایجاد نمی‌شود. تنها دقت مسئله و حجم محاسبات مورد نیاز افزایش می‌یابد.

موضوع دیگری که به آن باید پرداخت نرخ بروز خطا در شبکه است. در این شبکه فرض شده است که تمام خطوط در یک سطح از بروز خطا قرار دارند. همچنین نرخ بروز خطا نیز به‌صورت میانگین در محاسبات وارد شده است. در شرایط واقعی‌تر به منظور دقیق‌تر کردن مطالعات و فرآیند بهینه‌سازی باید نرخ بروز خطا و توزیع احتمال آن بر اساس شرایط اقلیمی مانند منطقه عبور مخصوصاً برای خطوط هوایی، میزان بارگیری، عمر خطوط را لحاظ نمود. این موضوع نیز مشابه شرایط توضیح داده شده در مورد بارهای متغیر احتمالی است.

اگر از رابطه (۶) برای تعیین شرایط بهینه استفاده شود مقدار شاخص SAIFI برابر ۰/۶۳۷۵۳ به‌دست خواهد آمد. مقدار به‌دست آمده از این روش با مقدار این شاخص در شرایط موجود به‌هم نزدیک می‌باشند. اما نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد تعداد تجهیز مورد نیاز در طرح پیشنهادی رابطه (۶) است. در این طرح به چهار تجهیز حفاظتی (فیوز یا سکشنالایزر) نیاز است، در حالی که در شرایط موجود از شش تجهیز حفاظتی (فیوز یا سکشنالایزر) استفاده می‌شود. برای شبکه‌ای که در حال بهره‌برداری است و تجهیزات نصب شده‌اند تفاوت در تعداد تجهیزات چندان موثر نخواهد بود. در حالی که اگر سیستم در دست طراحی باشد تعداد تجهیز مورد نیاز بسیار اثرگذار است. در جدول (۳) نتایج بدست آمده از تابع هدف دربرگیرنده SAIFI با شرایط رابطه‌های (۶) و (۷) ذکر شده است.

نتایج ذکر شده در این جدول برای اهمیت یکسان بارهای شبکه ذکر شده است. در صورتی که اهیمت برخی از بارها بیشتر باشد، آنگاه راه‌حل‌های متفاوتی برای وارد کردن اهمیت آن بارها در محاسبات وجود دارد. در صورتی که تفاوت اهمیت خیلی اساسی نباشد با ضرایب پنالتی می‌توان میزان بار یا تعداد مشترکین حساس را به‌صورت مجازی در محاسبات بزرگتر نمود و در نتیجه نتایج بهینه‌سازی به سمتی سوق پیدا می‌کند که این بارها کمتر دچار قطعی شوند. در صورتی که اهمیت بسیار اساسی مد نظر باشد مانند بارهای استراتژیک نظامی یا پدافند غیر عامل بسیار حساس، آنگاه باید قیود اضافی برای تابع هدف مطرح شود که میزان قطعی بارهای مذکور از سطح قابل قبول بالاتر باشد اگر چه هزینه بسیار زیادی به شبکه تحمیل گردد.

تجهیزات حفاظتی مورد استفاده در این سیستم عبارتند از فیوز تیغه‌ای، فیوز کات اوت و سکشنالایزر و تجهیزات کلیدزنی شامل سکسیونر می‌باشد. با دیدگاهی که در این مقاله درنظر گرفته شده است، تجهیزات حفاظتی با یکدیگر تفاوتی در تابع هدف ایجاد نخواهد کرد. در واقع عملکرد تجهیز حفاظتی از هر نوعی تشخیص خطای پایین دست به‌صورت صحیح و بدون خطا در نظر گرفته شده است. از عملکرد ناخواسته، ناهماهنگی و عدم تشخیص و ناحیه کور صرف نظر شده است. البته در مطالعات دقیق‌تر به این پدیده‌ها می‌توان توجه ویژه داشت. به‌عنوان مثال استفاده از تجهیزاتی مانند سکشنالایزر و ریکلوزر با محدودیت‌هایی در شبکه رو به‌رو است. این تجهیزات در شرایط ویژه‌ای منجر به افزایش فرکانس قطع گذرای سیستم MAIFI خواهد شد. در مراجعی مانند [۲۴و ۲۵] بررسی‌هایی در مورد قطعی‌های گذرا انجام شده است. از آنجایی که قطعی‌های گذرا برای مشترکین هزینه‌های پنهان ایجاد می‌نماید. همچنین متاسفانه در داخل کشور ضرایب و شاخص‌های آن مانند آنچه در مورد هزینه انرژی توزیع نشده انجام گرفته است، وجود ندارد، در این مقاله بر این موضوع تمرکز نشده است. اما به عنوان موضوعات تحقیقاتی آینده می‌توان با درنظرگیری این موضوع، بهینه‌سازی سیستم حفاظتی را انجام داد.

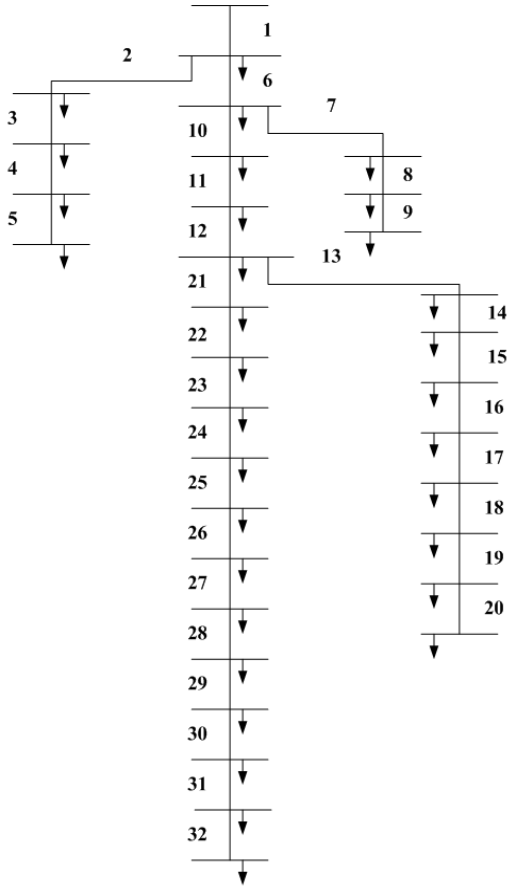
وضعیت دیگری که در جدول (۳) ذکر گردیده است، نتایج مربوط به بهینه‌سازی محل قرارگیری تجهیزات بر اساس رابطه (۷) است. با درنظرگیری رابطه (۷) به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی مقدار حداقل شاخص SAIFI برابر ۰/۵۲۵۹۴ خواهد بود. در طرح پیشنهادی به‌دست آمده از این رابطه نیاز به ۶ تجهیز می‌باشد و مقدار قابلیت اطمینان سیستم نیز به شکل نسبتاً موثری بهبود یافته است. نتایج به‌دست آمده از این رابطه نشان می‌دهد که با استفاده از چنین روشی جواب بهینه با استفاده از تمامی تجهیزات موجود در وضعیت فعلی دارد. برای سیستم در حال بهره‌برداری اعمال نتایج به‌دست آمده از این روش مناسب‌تر خواهد بود.

مزیت دیگر بهینه‌سازی محل قرارگیری تجهیزات در سیستم تحلیل وضعیت موجود است. به‌عنوان مثال نتایج به‌دست آمده از شرایط مختلف برای شبکه نمونه نشان می‌دهد که وضعیت فعلی سیستم نسبتاً مناسب است. تفاوت وضعیت موجود با وضعیت بهینه دلالت بر اهمیت تغییر در سیستم و اعمال نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی دارد.

در رابطه (۱) چگونگی محاسبه تابع هدف ترکیبی بیان گردید. در این رابطه برای محاسبه تابع هدف به مقادیر $SAIFI_{\min}$ ، $CENS_{\min}$ و $FC_{available}$ نیاز است. مقادیر این پارامترها با توجه به اطلاعات شبکه و بهینه‌سازی مقادیر انرژی توزیع نشده و SAIFI در جدول (۴) نشان داده شده است. مقدار $SAIFI_{\min}$ ، $CENS_{\min}$ بر اساس شرایطی که در تمام بخش‌ها یک تجهیز حفاظتی قرار گرفته باشد، محاسبه می‌گردد. در صورتی که در تمام بخش‌ها تجهیز حفاظتی بدون درنظرگیری مسائل اقتصادی و قیود مربوط هماهنگی تجهیزات حفاظتی باشد، با بروز هر خطا تجهیز حفاظتی آن بخش عمل نموده و کمترین بی‌برقی به شبکه تحمیل می‌شود. این حالت برای مقدار نمونه انتخاب گردیده است. در مورد هزینه ثابت نیز وضعیت موجود ملاک قرار گرفته است. این حالت برای مواردی که شبکه در حال بهره‌برداری باشد و قصد ارتقا داشته باشیم مفید است. در موارد طراحی میزان حداقل بودجه مورد نظر را می‌توان به عنوان حداقل هزینه ثابت درنظر گرفت.

ضرایب وزنی ω_1 ، ω_2 و ω_3 نیز در بهینه‌سازی به‌ترتیب ۴۰٪، ۴۸/۵٪ و ۱۱/۵٪ می‌باشند. این ضرایب وزنی بر اساس رایزنی و نظرات کارشناس‌های شرکت توزیع غرب استان تهران انتخاب شده است.

در حقیقت رابطه بین ضریب وزنی دوم و سوم که حاصل از آنالیز اقتصاد مهندسی و پارامترهایی مانند نرخ بهره و تورم و غیره تعیین می‌شود. تنها موردی که انتخابی است و در دست طراح یا بهره‌بردار می‌باشد نسبت ضریب فرکانس قطع و هزینه است. هرچه میزان اهمیت هزینه بیشتر باشد، نسبت ضریب وزنی دو و سه بیشتر خواهد بود. در این مورد خاص اهمیت ضرایب هزینه‌ای یک و نیم برابر تعداد مشترکین دچار قطعی انتخاب شده است. در شرکت‌هایی مانند آنچه در برخی از کشورها برقرار است، تعداد مشترکینی که دچار قطعی شده‌اند اهمیت بسیاری دارد و در چنین حالتی این نسبت قابل تغییر است. علاوه بر نظر کارشناسان و افراد خبره در سیستم، استفاده از آنالیز حساسیت نیز می‌تواند در تعیین ضرایب وزنی موثر باشد.



شکل(۳): نمایش تک‌خطی شبکه نمونه با شماره‌گذاری شاخه‌ای

در جدول (۵) نتایج به‌دست آمده از اعمال توابع هدف مختلف بر روی شبکه نمونه انتخابی بیان شده است. با بررسی نتایج به‌دست آمده از اعمال سه تابع هدف مختلف مشاهده می‌شود که با اعمال تابع هدف ترکیبی وضعیتی پیشنهاد می‌شود که هم از نظر میزان شاخص SAIFI و هم از لحاظ تابع هزینه کل قابل قبول باشد.

بر اساس تابع هدف تک‌منظوره SAIFI، فرکانس قطع مشترکین و تعداد مشترکینی که در هر سال دچار مشکل می‌شوند مطلوب بوده، اما هزینه‌های ناشی از انرژی توزیع نشده در وضعیت بهینه نمی‌باشد. در حالت استفاده از تابع هدف هزینه کل و تابع هدف ترکیبی موقعیت مناسب قرارگیری تجهیزات کلیدزنی ارائه گردیده است. در تابع هدف ترکیبی تعداد تجهیز حفاظتی پیشنهادی نسبت به تابع هدف هزینه کل سیستم بیشتر است. دلیل وجود تعداد تجهیز حفاظتی بیشتر در طرح به‌دست آمده از تابع هدف ترکیبی نسبت به تابع هدف هزینه کل وجود عبارت دربرگیرنده شاخص SAIFI در تابع هدف است.

جدول (۱): اطلاعات خطوط، بارگیری و نرخ بروز خطای خطوط شبکه نمونه

شماره شاخه	گره ابتدایی	گره انتهایی	راکتانس	بار نصب شده	نرخ خطای دائم در سال
1	1	2	0.0477	100	0.00954
2	2	19	0.1565	90	0.0313
3	19	20	1.3554	90	0.27108
4	20	21	0.4784	90	0.09568
5	21	22	0.9373	90	0.18746
6	2	3	0.2511	90	0.05022
7	3	23	0.3083	90	0.06166
8	23	24	0.7091	420	0.14182
9	24	25	0.7011	420	0.14022
10	3	4	0.1864	120	0.03728
11	4	5	0.1941	60	0.03882
12	5	6	0.707	60	0.1414
13	6	26	0.1034	60	0.02068
14	26	27	0.1447	60	0.02894
15	27	28	0.9337	60	0.18674
16	28	29	0.7006	120	0.14012
17	29	30	0.2585	200	0.0517
18	30	31	0.963	150	0.1926
19	31	32	0.3619	210	0.07238
20	32	33	0.5302	60	0.10604
21	6	7	0.6188	200	0.12376
22	7	8	1.2351	200	0.24702
23	8	9	0.74	60	0.148
24	9	10	0.74	60	0.148
25	10	11	0.065	45	0.013
26	11	12	0.1238	60	0.02476
27	12	13	1.155	60	0.231
28	13	14	0.7129	120	0.14258
29	14	15	0.526	60	0.1052
30	15	16	0.545	60	0.109
31	16	17	1.721	60	0.3442
32	17	18	0.574	90	0.1148

با کمک گرفتن از تابع هدف ترکیبی پیشنهادی وضعیتی را تعیین کرد که شاخص SAIFI و هزینه کل مقدار مطلوبی را اختیار کنند. برای روشن شدن بیشتر موضوع و شفاف‌سازی مزایای اعمال روش تابع هدف ترکیبی برای جایابی تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی در شکل‌های (۴) و (۵) نمودار میله‌ای مقادیر مختلف شاخص‌های فرکانس متوسط قطع سیستم و هزینه‌های مربوطه نمایش داده شده است.

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در تابع هدف

	نام پارامتر	مقدار
۱	نرخ خطای دائم سالیانه برای ۱۰۰ کیلومتر	۲۰ خطا
۲	نرخ ثابت تبدیل انرژی توزیع نشده (تومان بر کیلو وات‌ساعت)	۷۷
۳	ثابت تبدیل خطای سالانه به هزینه انرژی (تومان بر کیلو وات‌ساعت)	۳۰ در هر مورد
۴	هزینه نصب، تعمیر و نگهداری تجهیزات (تومان)	---------
	ریکلوزر	۱۴،۰۰۰،۰۰۰
	سکشنالایزر	۶،۵۰۰،۰۰۰
	سکسیونر	۱،۵۰۰،۰۰۰
	فیوز	۵۰۰،۰۰۰
۵	مدت زمان مطالعه (سال)	۵
۶	نرخ بهره	٪۱۵
۷	درصد رشد بار سالیانه	٪۵

با توجه به نمودار میله‌ای شکل (۴) و نتایج نشان داده شده در جدول (۶) می‌توان دریافت که در صورتی که از تابع هدف دربرگیرنده هزینه به‌منظور بهینه‌سازی محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی استفاده کرد مقدار شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم در طرح پیشنهادی بهینه‌سازی وضعیت ایده‌آلی نخواهد داشت. اما اگر تابع هدف ترکیبی به‌عنوان ملاک و معیار انتخاب جواب بهینه قرار گیرد طرح پیشنهادی در وضعیت مناسبی از نظر شاخص SAIFI قرار خواهد گرفت. در این مورد خاص مقدار شاخص SAIFI در دو حالت تابع هدف ترکیبی و دربرگیرنده شاخص SAIFI یکسان بدست آمده است.

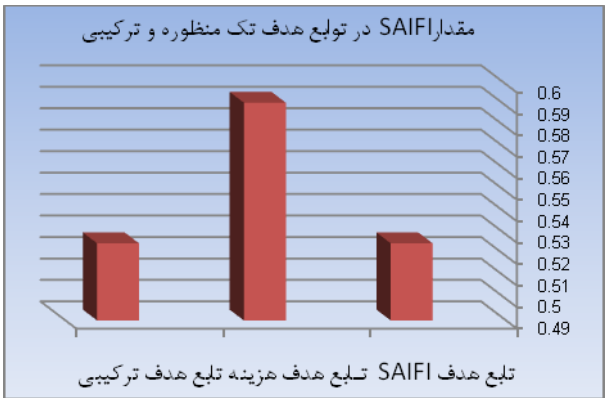
در شکل (۵) نیز نمودار میله‌ای مقدار هزینه در طرح پیشنهادی هر کدام از توابع هدف ترکیبی و چند منظوره رسم شده است. با مشاهده نمودار میله‌ای شکل (۵) نمایان است که در صورت استفاده از تابع هدف ترکیبی طرح بهینه انتخابی نسبت به حالتی که تابع هدف فقط شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم را درنظر گرفته است مقدار هزینه کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. از سوی دیگر تفاوت هزینه‌های تابع هدف ترکیبی و تابع هزینه در حد معقول و قابل قبولی قرار دارد. این مقایسه نیز کارآیی روش استفاده از تابع هدف ترکیبی را نشان می‌دهد.

جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی محل قرارگیری تجهیزات شبکه نمونه با روابط (۶) و (۷)

وضعیت مورد بررسی	مقدارSAIFI	محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی					
شرایط فعلی	۰/۶۴۵۷	۲	۷	۱۱	۱۳	۲۳	۲۷
حداقل SAIFI بدون محدودیت تعداد تجهیزات	۰/۴۶۹۹۷	تمام بخش‌ها به جز بخش اول					
حداقل SAIFI با استفاده از رابطه (۶)	۰/۶۳۷۵۳	۲	۷	۱۳	۲۱	--	--
حداقل SAIFI با استفاده از رابطه (۷)	۰/۵۲۵۹۴	۲	۷	۱۰	۱۳	۲۱	۲۷

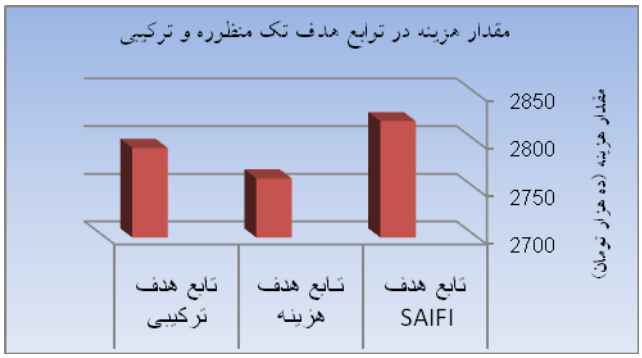
جدول (۴): پارامترهای تابع هدف ترکیبی برای اعمال به شبکه

نام پارامتر	$SAIFI_{min}$	$CENS_{min}$	$FC_{available}$
مقدار	۰/۴۶۹۹۷	۲۸۱۹۹۰	۲۳۰۰۰۰۰۰



شکل (۴): نمودار SAIFI در توابع هدف تک‌منظوره و ترکیبی

نتایج نشان داده شده در جدول (۵) دلالت بر اختلاف کم میان توابع هدف مختلف دارد. در حقیقت تابع هدف ترکیبی نگاه تابع هدف‌های تک منظوره را دنبال نموده و علاوه بر موارد جداگانه، به‌صورت همزمان نیز شرایط بهینه را فراهم آورده است. این موضوع بر اساس آنچه در مقدمه در مورد شباهت در هدف نهایی هر کدام از پارامترها دارد. در تابع هدف ترکیبی پیشنهادی جمیع جهات مبتنی بر بار و تعداد مشترکین به‌صورت همزمان بهبود یافته است که از آن به‌عنوان دستاورد روش پیشنهادی می‌توان نام برد.

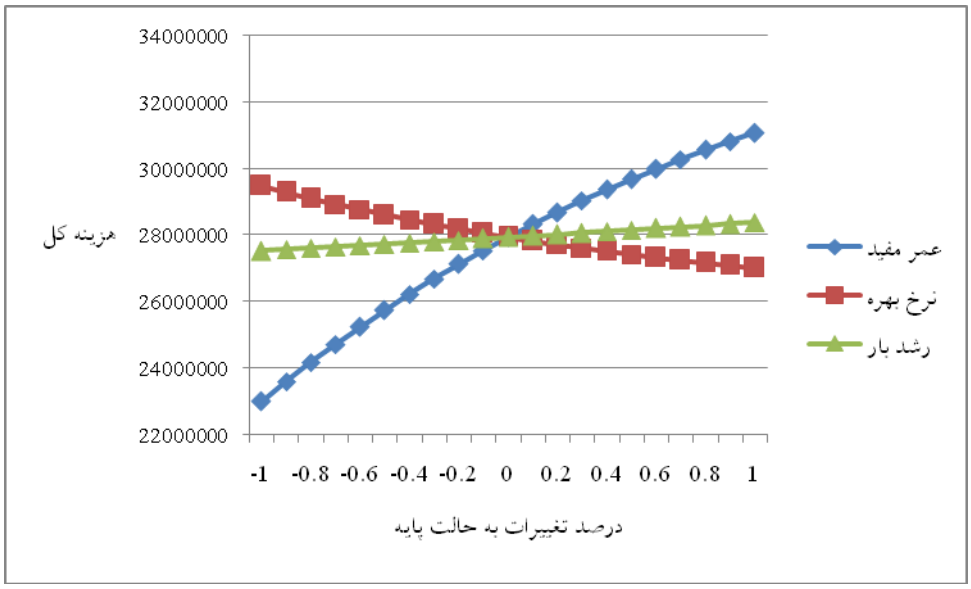


شکل (۵): نمودار هزینه در توابع هدف تک‌منظوره و ترکیبی

در شکل (۶) نیز به‌منظور درک بهتر تغییرات پارامترهای مختلف سیستم بر روی نتایج حاصله، آنالیز حساسیت هزینه کل سیستم به پارامترهایی مانند عمر مفید، رشد بار و نرخ بهره نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل بر می‌آید عمر مفید حساس ترین پارامتر است که با تغییرات کوچک آن افزایش یا کاهش هزینه‌های پروژه دیده می‌شود. همچنین اثرگذاری معکوس نرخ بهره و ضریب رشد بار در آنالیز حساسیت به‌وضوح دیده می‌شود. این دو پارامتر نسبت به طول عمر حساسیت کمتری بر میزان هزینه کل سیستم دارند. از شیب منحنی‌های رسم شده و مورد بررسی در آنالیز حساسیت می‌توان دریافت که عمر مفید، نرخ بهره و رشد بار به این ترتیب در درجه حساسیت بر هزینه کل سیستم می‌باشند.

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی بر اساس شاخص‌های موجود درتابع هدف ترکیبی

نتایج بهینه در روش‌های مختلف	نام معیارهای بهینه	مقدار معیارهای بهینه					
تابع دربرگیرنده SAIFI	محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی	۲	۷	۱۰	۱۳	۲۱	۲۷
	محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی	روش طرحی برای محل تجهیزات کلیدزنی ارائه نمی‌دهد.					
	SAIFI	۰/۵۲۵۹۴					
	هزینه کل	۲۸۲۲۰۰۰۰					
تابع هزینه	محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی	۲	۷	۱۳	۲۱	۲۷	
	محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی	۱۰	۱۲	۲۱	۲۷	۳۰	
	SAIFI	۰/۵۹۱۴۳					
	هزینه کل (تومان)	۲۷۶۲۰۰۰۰					
تابع هدف ترکیبی	محل قرارگیری تجهیزات حفاظتی	۲	۷	۱۰	۱۳	۲۱	۲۷
	محل قرارگیری تجهیزات کلیدزنی	۱۰	۱۲	۲۱	۲۷	۳۰	
	SAIFI	۰/۵۲۵۹۴					
	هزینه کل (تومان)	۲۷۹۴۰۰۰۰					



شکل (۶): نمودار آنالیز حساسیت هزینه کل سیستم به عمر مفید پروژه، رشد بار و نرخ بهره

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تابع هدف ترکیبی دربرگیرنده شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم و هزینه کل سیستم به‌منظور بهینه‌سازی سیستم حفاظتی و کلیدزنی ارائه گردید. از مزایای روش ارائه شده در این مقاله امکان دسترسی به تمام مزایای استفاده از توابع تک‌منظوره شاخص فرکانس متوسط قطع سیستم و تابع هزینه کل می‌باشد. جواب بهینه بدست آمده از روش پیشنهادی طرحی را پیشنهاد می‌دهد که از دیدگاه هر دو شاخص در وضعیت مناسبی خواهد بود. این جواب مقدار شاخص فرکانس متوسط قطع سیستمی خواهد داشت که نسبت به حالتی که تابع هدف تک‌منظوره SAIFI انتخاب شده باشد بیشتر است، در حالی که مقدار هزینه آن نسبت به هزینه طرح بدست آمده از انتخاب شاخص SAIFI به‌عنوان تابع هدف کمتر است. در مقایسه تابع هدف ترکیبی و تابع هزینه نیز شرایط مشابه برقرار خواهد بود. با این توصیف طرح بدست آمده از روش تابع هدف ترکیبی مصالحه‌ای میان دو معیار انجام داده است و به‌صورت همزمان هر دو معیار را ارضا کرده است.

روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه توزیع اعمال گردید و نتایج بدست آمده با روش‌های تک‌منظوره SAIFI و هزینه کل سیستم و همچنین وضعیت موجود بهره‌برداری سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده کارآیی بیشتر روش پیشنهادی را نسبت به توابع تک منظوره نشان می‌دهد.

۶- مراجع

[1] P. M. Vanoirsove, F. Provoost, "Fault localization in an MV distribution network," in CIRED, 17 Internatoional Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15 May 2003, p. Session3.

[2] R. Billinton, S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution system," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1646-1651, Jul. 1996.

[3] J. Luth, "Four rules to help locate protective devices," *Electrical World*, vol. 1, no. 1, pp. 36-37, Aug. 1991.

[4] H. D. Chiang, R. M. J. Jumea, "Optimal network reconfiguration in distribution systems," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1902-1908, Nov. 1996.

[5] G. Celli and F. Pilo, "Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1167-1172, Jul. 1999.

[6] G. Levitin, S. Mazal-Tov, D. Elmakis, "Optimal sectionalizer allocation in electric distribution systems by genetic algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 31, no. 1, pp. 97-102, Apr. 1994.

[7] J. Teng, Y. Liu, "A novel ACS-based optimum switch relocation method," *IEEE Trans.on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 113-120, Feb. 2003.

[8] J. Teng, C. N. Lu, "Feeder- switch relocation for customer interruption cost minimization," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, pp. 254-259, Jan. 2002.

[۹] آرش احساني، علي عباسپورتهراني فرد، محمودفتوحي فيروزآباد، علي محمدرنجبر، "تأثير توليدات پراكنده بر قابليت اطمينان سيستم هاي قدرت الكتريكي"، نوزدهمين كنفرانس بين‌المللی مهندسی برق ايران، تهران، ۱۳۸۳.

[10] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Allocation of protective devices in distribution

circuits using nonlinear programming models and genetic algorithms," *Electric Power System Research*, vol. 69, no. 1, pp. 77-84, Jul. 2004.

[11] F. Soudi, K. Tomasovic, "Optimal trade-off in distribution protection design," *IEEE Trans.on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 292-296, Apr. 2001.

[12] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. Abbad, J. R. S. Mantovani, "Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 78, no. 1, pp. 372-381, Apr. 2008.

[13] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Optimised allocation of sectionalizing switches and protection devices in distribution networks by using reactive tabu search algorithm," in *CIRED 18th International Conference of Electric Distribution*, Turin, 5-6 June 2005, p. session3.

[14] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Otimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems," in *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference*, Latin America; Sao Paulo, Brazil, October, 2004, pp. 51-56.

[15] W. Tippachon, D. Rerkpreedapong, "Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization," *Electric Power System Research*, vol. 79, no. 1, pp. 1171-1178, Mar. 2009.

[۱۶] محمد مهدی اسکونژاد , *اقتصاد مهندسی*، یازدهمین ویرایش، انتشارات امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳۷۸.

[۱۷] حامد هاشمی دزکی، سید حسن حسینیان، حسین عسکریان ابیانه، کاظم مظلومی، احمد خانبیگی، " سرمایه‌گذاری بهینه در راستای کاهش نرخ بروز خطا به منظور افزایش قابلیت اطمینان در سیستم های توزیع"، پانزدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، تهران، ایران، ۲۰۱۰.

[18] H. Hashemi Dezaki, A. Agheli, H. Askarian Abyaneh, S. H. Hosseinian, K. Mazlumi, K. Mazlumi, "Optimized investment to decrease the failure rate of distribution lines in order to improve SAIFI" Accepted for 4th International Power Engineering and Optimization Conference 2010, Shah Alam, Malysia, 2010.

[19] H. Hashemi Dezaki, H. Askarian Abyaneh, Y. Kabiri. Renani, H. Akbar. Fakhrabadi, K. Mazlumi "Optimized Protective Devices Allocation in Electric Power Distribution Systems Based on the Current Conditions of the Devices" , IEEE International Conference on Power and Energy 2010, Selangor, Malysia, 2010.

[۲۰] حامد هاشمی دزکی، سید حسین حسینیان، حسین عسکریان ابیانه، کاظم مظلومی، " تعیین بهینه تعداد، نوع و محل تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی شبکه های توزیع بر اساس شاخص انرژی توزیع نشده"، بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ایران، ۲۰۰۹.

[۲۱] حامد هاشمی دزکی، حسین عسکریان ابیانه، یحیی کبیری رنانی، حمیدرضا اکبرفخرآبادی، کاظم مظلومی، " تعیین طرح انعطا ف پذیر از میان چندین طرح جایابی تجهیزات حفاظتی در شبکه های توزیع بدست آمده از الگوریتم ژنتیک"، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ایران، ۲۰۱۰.

[۲۲] حامد هاشمی دزکی، حسین عسکریان ابیانه، علی عاقلی، کاظم مظلومی، " بهینه سازی انرژی بازیابی به کمک تجهیزات کلیدزنی در شبکه های توزیع"، چهارمین کنفرانس حفاظت و کنترل سیستم های قدرت، تهران، ایران، ۲۰۰۹.

[۲۳] دفتر فن آوری و اطلاعات-آمار، " آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی درسال ۱۳۸۸ "، شرکت مادر تخصصی توانیر، ۱۳۸۸.

[24] K. H. LaCommare, J. H. Eto, "Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States (US)," *Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1845-1855, September 2006.

[25] D. H. Popović, J. A. Greatbanks, M. Begović, A. Pregelj, "Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and reliability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 5–6, pp. 398-408, June–July 2005.