

مکان‌یابی دوهدفه بانک‌های خازنی فشار متوسط در محیط تجدید ساختار شده با

مدل‌سازی احتمالاتی ریسک ناشی از قابلیت اطمینان مطلوب مشترکین

سید مهدی مظهري^۱، حمید لسانی^۲ و احسان کریمی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

mazhari@aut.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

lesani@ut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

ehsankarami@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مساله مکان‌یابی بانک‌های خازنی فشار متوسط با استفاده از یک رویکرد دو هدفه جدید ارزیابی می‌شود. برای این منظور، قیمت‌گذاری مبتنی بر قابلیت اطمینان مطلوب مشترکین در محیط یک شرکت توزیع تجدید ساختار شده، مدل‌سازی شده و ریسک حاصل از اجرای آن بر سودآوری شرکت توزیع از محل خازن‌گذاری شبکه محاسبه شده است. سپس، مکان‌یابی خازن‌های فشار متوسط با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه به منظور دستیابی به طرح متناظر با کم‌ترین هزینه و کم‌ترین ریسک سودآوری، بررسی شده است. با اجرای برنامه‌های توسعه داده شده در شبکه آزمون ۳۴ شینه IEEE، کارایی رویکرد پیشنهادی در قالب چندین سناریو ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: تجدید ساختار در سیستم قدرت؛ خازن‌گذاری شبکه توزیع؛ قابلیت اطمینان سیستم قدرت

علائم و نشانه‌ها $\Omega_{i,i}^b$ مجموعه فیدرهایی که وقوع خطا در آن‌ها سبب
مجموعه‌ها: خاموشی بار i می‌شود؛

Ω_l مجموعه بارهای شبکه؛

Ω_b مجموعه شاخه‌های شبکه؛

Ω^{pop} مجموعه جمعیت الگوریتم بهینه‌سازی؛

$\Omega_{b,i}^l$ مجموعه بارهای شبکه که در اثر خروج فیدر i

خاموش می‌شوند؛

ثابت‌ها:

C_h^l هزینه تلفات انرژی الکتریکی در سال h ؛

C_{ih}^{sell} هزینه فروش انرژی الکتریکی به گره i در سال h ؛

C_i^{SI} جریمه ناشی از قطع سرویس به مشترک i ؛

C_i^Q هزینه نصب یک کیلووار بانک خازنی در گره i ؛

n_y تعداد سال‌های دوره مطالعه؛

PW ضریب تبدیل هزینه جاری به ارزش کنونی؛

$Infr$ نرخ تورم سالیانه؛

$Intr$ نرخ بهره سالیانه؛

V_n ولتاژ خطی نامی مدار ثانویه؛

* تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۸

نام نویسنده مسئول: سید مهدی مظهري

نشانی نویسنده مسئول: ایران- تهران- دانشگاه صنعتی امیرکبیر-

دانشکده مهندسی برق- آزمایشگاه آنالیز سیستم‌های قدرت

افزایش تلفات، افت ولتاژ و کاهش ظرفیت مفید خطوط و ترانسفورماتورها می‌شود، بلکه نیاز به توسعه شبکه را نیز سرعت می‌بخشد.

هدف از مکان‌یابی بانک‌های خازنی، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان، تعداد و ظرفیت خازن‌های فشار متوسط به نحوی است که کم‌ترین هزینه به سیستم تحمیل شده و قیود شبکه نیز رعایت شوند [۱]. محدودیت افت ولتاژ، قید بیشینه جریان گذرنده از هر فیدر و محدودیت سرمایه‌گذاری، قیود موجود در مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی را تشکیل می‌دهند.

با توجه به اهمیت موضوع تا کنون روش‌های مختلفی برای حل مسأله پیشنهاد شده‌اند [۱۵-۲]. در یک نگاه کلی، الگوهای پیشنهادی برای حل مسأله حاضر به چهار گروه روش‌های تحلیلی، برنامه‌ریزی عددی، ابتکاری و بهینه‌سازی تکاملی تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیلی به اطلاعات اندکی از سیستم توزیع نیاز داشته و به کارگیری آن‌ها در عمل بسیار آسان است. با این حال فرض‌های ساده‌کننده این روش‌ها، همچون در نظر گرفتن متغیرهای پیوسته برای مکان و ظرفیت خازن‌ها، احتمال دست‌یابی به پاسخ بهینه را کاهش داده و در برخی مواقع تلفات سیستم را نیز افزایش می‌دهد [۲]. در مقابل، روش‌های برنامه‌ریزی عددی کلیه قیود شبکه را در نظر گرفته و در یک فرایند تکراری تابع هدف مسأله را بیشینه (یا کمینه) می‌کنند [۳]. روش‌های ابتکاری با تعریف تابع حساسیت، گره‌هایی از شبکه را که قرارگیری خازن در آن‌ها بیش‌ترین کاهش تلفات را ایجاد می‌کند، تعیین می‌کنند. این روش‌ها سریع بوده و به سادگی به مسأله اعمال می‌شوند، ولی در رسیدن به پاسخ بهینه دچار ضعف هستند [۴]. روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، روش‌های مبتنی بر جمعیت بوده که در آن‌ها به نحو شایسته‌ای از عملگرهای انتخاب و تغییر تصادفی استفاده می‌شود. استفاده از الگوریتم ژنتیک [۵]، مهاجرت پرندگان [۶]، تبرید تدریجی فلزات [۷] و جستجوی ممنوع [۸] نمونه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه هستند.

در مطالعات جدید انجام شده در زمینه مکان‌یابی بانک‌های خازنی، مرجع [۹] اندازه و مکان بهینه بانک‌های خازنی را در یک شبکه نامتقارن با در نظر گرفتن

α تعداد ساعات در دوره یکساله (۸۷۶۰)؛

γ ضریب تلفات؛

κ ضریب بار؛

d_i طول فیدر فشار متوسط i ؛

r_i مقاومت فیدر فشار متوسط i ؛

x_i راکتانس فیدر فشار متوسط i ؛

λ_i نرخ خطا در فیدر فشار متوسط i ؛

τ_i میانگین مدت زمان تعمیر در فیدر i ؛

S_i^P کل توان مورد تقاضای پیش‌بینی شده در گره i ؛

P_i^D, Q_i^D کل بار اکتیو/راکتیو مورد تقاضای در گره i ؛

Q_{max}^C بیشینه توان راکتیو قابل نصب در شبکه؛

ΔV_{max} بیشینه افت ولتاژ مجاز؛

$I_{\rho_k}^{max}$ بیشینه جریان مجاز هادی ρ_k ؛

تابع‌ها:

P_i^{loss} تلفات در فیدر i ؛

$prof$ سود شرکت توزیع در طول دوره مطالعه؛

$CROS_i$ قابلیت اطمینان تغذیه نقطه بار i ؛

$CUOS_i$ نایقینی در تغذیه نقطه بار i ؛

$Risk$ تابع ریسک شرکت توزیع در محیط تجدید

ساختار شده عمده فروشی؛

متغیرها:

Q_i^C مقدار خازن انتخابی در گره i ؛

V_i ولتاژ در گره i ؛

θ_i کروموم i در الگوریتم تکاملی؛

P_i, Q_i توان اکتیو/راکتیو مورد تقاضای در گره i ؛

۱- مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، طراحی مناسب شبکه آینده و اصلاح ساختار شبکه فعلی به منظور سرویس‌رسانی مطلوب به مشترکین از اهمیت در خور توجهی برخوردار شده است. در این میان، استفاده از بانک‌های خازنی به منظور جبران بخشی از توان راکتیو مورد نیاز بارها، از جمله فعالیت‌های مرسوم در شرکت‌های توزیع است. جاری شدن توان راکتیو در شبکه توزیع نه تنها سبب

تابع هزینه فرمول‌بندی کرد:

$$Fit_1 = \sum_{i \in \Omega_i} Q_i^C \cdot C_i^Q + \sum_{h=1}^{n_y} PW^h \cdot \sum_{i \in \Omega_b} \alpha \cdot \gamma \cdot C_h^l \cdot P_i^{loss} + \sum_{h=1}^{n_y} PW^h \cdot \sum_{i \in \Omega_b} \kappa \cdot \lambda_i \cdot \tau_i \cdot d_i \cdot \sum_{k \in \Omega_{bij}} C_k^{SI} \cdot S_k^D \quad (1)$$

$$\lambda_i = g(Q_i^C) \quad (2)$$

$$PW = \frac{1 + Infr}{1 + Intr} \quad (3)$$

$$P_{i+1} = P_i - P_{i+1}^D - \frac{r_{i+1} \cdot (P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} \quad (4)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{i+1}^D - \frac{x_{i+1} \cdot (P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} + Q_{i+1}^C \quad (5)$$

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 - 2(r_{i+1} \cdot P_i + x_{i+1} \cdot Q_{i+1}) + \frac{(r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2)(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} \quad (6)$$

رابطه (۱)، تابع هدف اقتصادی مرسوم در مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی را نشان می‌دهد که در آن، جمله اول معرف هزینه‌های نصب بانک‌های خازنی انتخاب‌شده در سطح شبکه است. جمله دوم مجموع هزینه‌های تلفات در سطح شبکه بوده و جمله آخر جریمه خاموشی ناشی از بارهای شبکه در طول دوره مطالعه است [۱۲].

نرخ خطا در فیدرهای شبکه با توجه به کیفیت جبران‌سازی فیدرها در اثر خازن‌گذاری متغیر بوده و مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۲-۱۳]. تلفات مقاومتی در یک فیدر هوایی (یا کابل زمینی)، سبب افزایش دمای هادی می‌شود. کابل‌های زمینی معمولاً دارای یک حد حرارتی هستند که دمای بالاتر از آن سبب تخریب هادی می‌شود. از طرفی، عمر مفید هادی با حرارت ایجاد شده در سطح هادی متناسب است. در یک فیدر هوایی، عبور جریان زیاد (و گرم شدن هادی) سبب ایجاد شکم در خط، افزایش احتمال وقوع شکست الکتریکی و نیز مشکلاتی در سیستم زمین می‌شود [۱۲]. علاوه بر این موارد، عبور جریان بالا از فیدرها احتمال خرابی مقره‌ها را در شرایط جوی نامساعد بیشتر می‌کند. با توجه به اینکه جریان گذرنده از هر فیدر از دو جزو اکتیو و راکتیو تشکیل شده است، خازن‌گذاری شبکه توزیع با کاهش جزو راکتیو سهم قابل توجهی در جریان گذرنده از فیدر و کاهش حرارت فیدرها دارد. علاوه

هارمونیک‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات بررسی کرده است. توسعه بانک‌های خازنی با توجه به احتمال وقوع تشدید در [۱۰] مطالعه شده است. در مرجع [۱۱]، مسأله جایابی خازن‌ها هم‌زمان با تعویض هادی‌های شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات بررسی شده است. برخی دیگر از مطالعات انجام شده، مکان‌یابی خازن‌ها را با اهداف جانبی همچون بهبود قابلیت اطمینان [۱۲-۱۳]، بهبود کیفیت توان [۱۴] و نیز در حضور مولدهای مقیاس کوچک [۱۵]، نایقینی در بارها و بارهای متغیر با زمان [۱۶] و یا هم‌زمان با بازآرایی شبکه توزیع [۱۷]، بررسی کرده‌اند. در این مقاله، مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی با استفاده از یک رویکرد دو هدفه مبتنی بر قابلیت اطمینان مطلوب مشترکین بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا ریسک احتمالاتی سودآوری شرکت توزیع از محل استراتژی خرید-فروش مبتنی بر قابلیت اطمینان مطلوب مشترکین مدل‌سازی شده و در قالب یک تابع هدف جدید به مسأله اعمال شده است. سپس، مکان‌یابی خازن‌های فشارمتوسط با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه به منظور دستیابی به طرح متناظر با کم‌ترین هزینه و کم‌ترین ریسک سودآوری، بررسی شده است. با اجرای برنامه‌های توسعه داده شده در شبکه آزمون ۳۴ شینه IEEE، کارایی رویکرد پیشنهادی در قالب چندین سناریو ارزیابی شده است.

۲- فرمول‌بندی مسأله

۲-۱- تابع هزینه

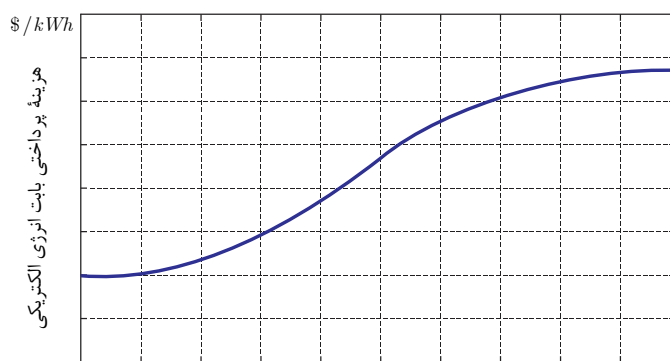
همان‌طور که بیان شد، هدف از مکان‌یابی بهینه بانک‌های خازنی، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان، تعداد و ظرفیت خازن‌ها به نحوی است که کم‌ترین هزینه به سیستم تحمیل شده و قیود شبکه نیز رعایت شوند. هزینه سیستم از مجموع هزینه‌های زیر تشکیل می‌شود:

- هزینه نصب و بهره‌برداری از بانک‌های خازنی،
- هزینه تلفات فیدرهای فشارمتوسط،
- هزینه خاموشی‌های احتمالی در شبکه.

این هزینه‌ها را می‌توان مطابق رابطه (۱) در قالب یک

دارای یک حداقل نرخ خطا است [۱۳-۱۲]. بر این اساس، در این مقاله فرض می‌شود که اگر خازن‌گذاری سبب جبران کل مولفه جریان راکتیو یک فیدر شود، نرخ خطا به ۰/۸۵ مقدار اولیه، کاهش یابد. روابط (۴) تا (۶)، توازن توان در گره‌ها و چگونگی محاسبه ولتاژ را نشان می‌دهند [۵].

بر این، خازن‌های شبکه توزیع با آزادسازی ظرفیت خطوط، نقشی مشابه یک خط یدکی را بازی کرده و از این طریق نیز قابلیت اطمینان را بهبود می‌بخشند [۱۳]. با توجه به این موارد، نرخ خطا در فیدر با توجه به میزان جبران‌سازی خازن‌ها متفاوت بوده، با این حال حتی در صورت جبران کامل مولفه جریان راکتیو فیدر، باز هم



قابلیت اطمینان تغذیه مشترک

شکل (۱): منحنی تغییرات هزینه انرژی الکتریکی بر مبنای قابلیت اطمینان مطلوب مشترک

یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر برخوردار است؛ بنابراین، نه تنها هزینه انرژی الکتریکی دارای یکبازه از پیش تعیین شده است، بلکه سطح قابلیت اطمینان نیز محدود است. با توجه به ساده بودن مطالعات در سطح فشار متوسط، استراتژی خرید و فروش پیشنهادی می‌تواند کارایی مناسبی در این سطح از ولتاژ داشته باشد. سودآوری شرکت توزیع از طریق بهبود قابلیت اطمینان مبتنی بر خازن‌گذاری شبکه به شکل زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$prof = \sum_{h=1}^{n_y} PW^h \cdot \sum_{i \in \Omega_l} \alpha \cdot \kappa \cdot [C_{ih}^{sell} - C_h^l], S_l^p - Fit_1 \quad (6)$$

$$C_{ih}^{sell} = f(CROS_i) \quad (7)$$

$$CROS_i = 1 - CUOS_i \quad (8)$$

$$CUOS_i = \bigcup_{j \in \Omega_{li}^p} \left(\frac{\lambda_j \cdot \tau_j \cdot d_j}{\alpha} \right) \quad (9)$$

رابطه (۶) تابع سودآوری شرکت توزیع در محیط تجدیدساختار شده با توجه به قابلیت اطمینان مطلوب

۲-۲- تابع سودآوری

در یک محیط تجدیدساختار شده، شرکت توزیع علاقه‌مند است تا با ایجاد خدمات جانبی جدید، ضمن احترام به حقوق مشترکین، درآمد خود را نیز افزایش دهد. استراتژی خرید-فروش بر مبنای قابلیت اطمینان مطلوب مشترک می‌تواند یکی از خدمات جانبی مفید در محیط‌های پیشرو باشد [۱۳]. تحت چنین شرایطی مشترک قادر است تا هزینه انرژی الکتریکی مصرفی خود را متناسب با سطح قابلیت اطمینان فراهم شده برای او پرداخت نماید.

شکل (۱) منحنی نمونه یک شرکت توزیع برای ارائه خدمات متناظر با قابلیت اطمینان مطلوب مشترک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بهبود سطح قابلیت اطمینان، هزینه دریافتی از مشترک نیز بیشتر می‌شود. در یک محیط تجدید ساختار شده، چنانچه مشترکی تمایل به دریافت انرژی الکتریکی با سطح قابلیت اطمینان بالاتری است، می‌تواند با پرداخت بهای بیشتر بابت انرژی الکتریکی خدمت مورد نظر را دریافت کند. طبیعی است که در یک محیط واقعی، سطح قابلیت اطمینان شبکه در هر منطقه از

می‌شوند. چنانچه یک آرایش مشخص برای شبکه پیشنهاد شده باشد، وضعیت سودآوری شبکه حاصل در حضور عدم اطمینان، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطابق گام‌ها زیر تعیین می‌شود:

گام ۱) با توجه به کمینه و بیشینه احتمال استفاده از خدمت جانبی پیشنهادی، یک تابع احتمال نرمال برای هر مشترک تعریف می‌شود؛

گام ۲) با توجه به تابع احتمال قسمت قبل، متغیر تصمیرگیری z_i نشان‌دهنده تمایل مشترک i برای استفاده از خدمت جانبی پیشنهادی در سال h مقداردهی می‌شود؛

گام ۳) تابع سودآوری رابطه (۶) برای شبکه و با توجه به مقادیر به دست آمده در گام ۲ حل می‌شود؛

گام ۴) چنانچه همگرایی در مقدار مورد انتظار سودآوری ($prof$) حاصل شده است شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد، در غیر این صورت گام‌های ۲ تا ۳ تکرار می‌شود.

با استفاده از داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار متوسط نهایی و واریانس سودآوری یک آرایش پیشنهادی با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{Fit} = \frac{1}{NS} \cdot \sum_{i=1}^{NS} prof(i) \quad (10)$$

$$Var(Fit) = \frac{1}{NS} \cdot \sum_{i=1}^{NS} (prof(i) - \overline{Fit})^2 \quad (11)$$

که در آن:

NS تعداد تکرارهای انجام‌شده؛

$prof(i)$ مقدار سودآوری در هر تکرار.

معیار همگرایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطابق رابطه زیر است [۱۸]:

$$\frac{\sqrt{Var(Fit)}}{\sqrt{NS \cdot \overline{Fit}}} \leq \sigma \quad (12)$$

توزیع احتمالی سودآوری برای هر آرایش با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو قابل محاسبه است؛ برای این منظور کافی است بازه تغییرات سودآوری به چند زیربازه مساوی تقسیم‌شده و احتمال مربوط به هر زیربازه مطابق رابطه زیر محاسبه شود [۱۸]:

$$Prob(i) = \frac{N_i}{NS} \quad (13)$$

مشترک را نشان می‌دهد که در آن، جمله اول معرف هزینه دریافتی شرکت توزیع از محل فروش انرژی الکتریکی به مشترکین و خرید آن از بازار عمده‌فروشی است. در این جمله، C_{ih}^{sell} هزینه فروش هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی به مشترک i در سال h را نشان می‌دهد. این مقدار با توجه به سطح قابلیت اطمینان مطلوب مشترک و از یک بازه تنظیم‌شده (توسط مرجع شبه‌دولتی همچون هیأت تنظیم بازار برق) تعیین می‌شود. علاوه بر این، C_h^l نشان‌دهنده هزینه خرید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در سال h بوده و مطابق یک تخمین اولیه از وضعیت بازار در هر سال تعیین می‌شود. رابطه (۷) منحنی تغییر هزینه انرژی الکتریکی با سطح قابلیت اطمینان را مدل‌سازی کرده است. قابلیت اطمینان تغذیه هر مشترک^۱ مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود؛ در این رابطه، $CUOS_i$ احتمال نایقینی در سرویس‌رسانی به مشترک i بوده و مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود. این رابطه اجتماع احتمالات خاموشی هر مشترک را در اثر خروج خطوط محاسبه می‌کند. به بیان دیگر، $CUOS_i$ نمایانگر نسبت تعداد کل ساعت‌های قطع سرویس‌رسانی به مشترک i به کل دوره مطالعه (۸۷۶۰ ساعت) است.

۲-۳- تابع ریسک سودآوری

با توجه به این‌که توسعه سیستم توزیع برای یک افق زمانی کمابیش بلند انجام می‌گیرد، پیش‌بینی این موضوع که چه مشترکینی تمایل به استفاده از استراتژی خرید-فروش پیشنهادی را دارند، با اطمینان بسیار کمی همراه است؛ بنابراین عدم اطلاع از این دسته از مشترکین، برنامه‌ریزی توسعه و سودآوری شرکت توزیع را تحت تاثیر قرار داده و با ریسک همراه می‌کند. بر این اساس، مدل‌سازی احتمالاتی ریسک تحمیلی به شرکت توزیع می‌تواند به عنوان یک تابع هدف جانبی در مسأله مکان‌یابی بانک‌های مدنظر قرارگیرد. برای این منظور به هر یک از مشترکین یک مقدار کمینه و یک مقدار بیشینه به عنوان احتمال تمایل آن‌ها به استفاده از استراتژی خرید-فروش پیشنهادی در طی دوره مطالعه نسبت داده می‌شود. این احتمال‌ها با توجه به مطالعات میدانی و سایر ملاحظیات اقتصادی و اجتماعی تعیین

پیروی کند:

$$\frac{S_i^D}{V_n} \leq \rho_k^{max}, \forall i \in \Omega^l \quad (16)$$

پ) محدودیت سرمایه‌گذاری:

با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی، مجموع ظرفیت خازن‌های نصب‌شده در شبکه باید از حد معینی کمتر باشد:

$$\sum_{i \in \Omega_l} Q_i^C \leq Q_{max}^C \quad (17)$$

۳- روش حل

۳-۱- الگوریتم چندهدفه توسعه داده‌شده

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت همچون الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مسائل چندهدفه کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند. این الگوریتم‌ها قادرند تا مجموعه جواب‌های کارا را فقط با یک بار اجرای الگوریتم به دست آورند؛ این درحالی است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی یک‌هدفه به چند بار اجرای متوالی و جداگانه برای دستیابی به این مجموعه نیازمندند [۱۹].

به منظور بهینه‌سازی دوهدفه مسئله مکان‌یابی بانک‌های خازنی از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. توضیحات جامعی در زمینه الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه در مراجع [۱۹-۲۲] ارایه شده است. کدگذاری پیشنهادی برای مسئله مطابق رابطه زیر است:

$$\theta_i = [Q_1^C, \dots, Q_i^C, \dots, Q_{|\Omega^l|}^C], \forall i \in \Omega^{pop} \quad (18)$$

اهداف مورد نظر مسئله عبارتند از:

$$\text{Min } f_1 = \text{Fit}_1 \quad (19)$$

$$\text{Min } f_2 = \text{Fit}_2 \quad (20)$$

مراحل کلی اجرای الگوریتم به شکل زیر است:

- گام (۱) مجموعه اطلاعات فنی و اقتصادی ارایه می‌شود؛
 - گام (۲) مجموعه جمعیت اولیه، شامل جمعیت هوشمند و جمعیت تصادفی تولید می‌شوند؛
 - گام (۳) مقدار تابع برازندگی اشتراکی محاسبه می‌شود؛
- برای محاسبه ریسک لازم است تا شبیه‌سازی مونت‌کارلو

که در این رابطه، N_i معرف تعداد تکرارهایی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو است که سودآوری محاسبه‌شده در آن‌ها در زیربازه i ام واقع شده است.

با توجه به اینکه به علت استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای هر آرایش شبکه، مقادیر متفاوت سودآوری نتیجه شده است، هر یک از آرایش‌ها از نظرگاه میزان ریسک سودآوری مطابق رابطه زیر ارزش‌گذاری می‌شود [۱۸]:

$$\text{Fit}_2 = \text{Risk}(\text{Fit}_T) = \frac{1}{NS} \cdot \sum_{\text{prof} < \text{Fit}_T} \left(\frac{\text{Fit}_T - \text{prof}}{\text{Fit}_T} \right) \quad (14)$$

در این رابطه، Fit_T مقدار سودآوری انتخاب‌شده توسط شرکت توزیع است. مطابق این رابطه، نسبت مجموع فاصله همه حالاتی که سودآوری کمتر از مقدار مورد انتظار بوده بر مقدار سودآوری انتخاب‌شده به عنوان میزان ریسک طرح پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، چنانچه کاهش هزینه‌های خازن‌گذاری سبب کاهش سطح قابلیت اطمینان در شبکه شود، سودآوری شرکت توزیع کاهش یافته و سطح ریسک افزایش می‌یابد. طبیعی است شرکت توزیع تمایل دارد تا ضمن انجام کم‌ترین هزینه برای خازن‌گذاری شبکه، کم‌ترین سطح ریسک را در اختیار داشته باشد. با وجود این، از آنجایی که میزان ریسک و هزینه انجام‌شده برای خازن‌گذاری شبکه (Fit_1) دو کمیت هم‌جنس نیستند، بهینه‌سازی هم‌زمان این دو هدف نیازمند استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است.

۲-۴- قیود شبکه

محدودیت‌های حاکم بر مسئله عبارتند از [۱۳]:

الف- محدودیت افت ولتاژ:

تغذیه مناسب مشترکین مستلزم رعایت محدودیت افت ولتاژ در نقاط بار است. بنابراین می‌توان گفت:

$$|V_i - V_n| \leq \Delta V_{max}, \forall i \in \Omega^l \quad (15)$$

ب) محدودیت جریان مجاز گذرنده از فیدرها:

حداکثر جریان مجاز گذرنده از هر فیدر متناسب با مقطع هادی انتخاب‌شده برای آن بوده و باید از رابطه زیر

چنانچه طرح شبکه به شکل کامل از متغیر فازی f_i راضی باشد، در این صورت $\overline{\mu_{f_i}} = 1$ شده و در نقطه مقابل، اگر $\overline{\mu_{f_i}} = 0$ باشد طرح کمترین میزان رضایت را از این متغیر فازی خواهد داشت. بر این اساس، تابع عضویت $\overline{\mu_{f_i}}$ که برای هر یک از پاسخهای موجود در جبهه کارا مطابق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود، بیانگر میزان وقف‌پذیری شاخص f_i با دیدگاه طراح شبکه است.

$$\overline{\mu_{f_i}} = \begin{cases} 0 & , \mu_{f_i} \leq 0 \\ \mu_{f_i} & , 0 < \mu_{f_i} < 1, \forall i \in \{1,2\} \\ 1 & , \mu_{f_i} \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$\mu_{f_i} = \frac{f_i - f_i^{min}}{f_i^{max} - f_i^{min}} \quad (22)$$

در این روابط مقادیر f_i^{min} و f_i^{max} به ترتیب معرف مقدار واقعی و حداکثر تابع هدف i است.

تابع عضویت نرمال‌شده هر یک از پاسخهای ارایه شده در جبهه کارا مطابق رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^2 \overline{\mu_{f_{ik}}}}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^2 \overline{\mu_{f_{ik}}}} \quad (23)$$

μ_k تابع عضویت نرمال‌شده پاسخ k ام جبهه کارا؛ $\overline{\mu_{f_{ik}}}$ تابع عضویت متناظر با متغیر فازی f_i در پاسخ k ام جبهه کارا؛ M تعداد پاسخهای موجود در جبهه کارا.

به منظور محاسبه پاسخ نهایی، ابتدا بیشینه مقدار μ_k را در نظر گرفته و سپس همه پاسخهای جبهه کارا به ترتیب مقدار به شکل نزولی مرتب می‌شوند. تصمیم‌گیرنده با توجه به مقدار تابع عضویت تحت شرایط عملیاتی واقعی بهترین راه‌حل را با توجه به فهرست حق تقدم انتخاب می‌کند. در این پژوهش، جواب نهایی با استفاده از روش max-min و مطابق رابطه (۲۴) انتخاب می‌شود:

$$\max\{\min(\mu_{f_1}, \mu_{f_2})\} \quad (24)$$

مطابق توضیحات بخش (۲-۳) اجرا شود؛

گام (۴) با استفاده از روش چرخ رولت جمعیت باقیمانده انتخاب می‌شود؛

گام (۵) عملگرهای ادغام و جهش به جمعیت باقیمانده اعمال شده و جمعیت جدید تولید می‌شود؛

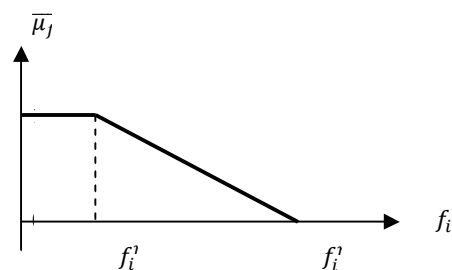
گام (۶) با استفاده از روش چرخ رولت از میان جمعیت باقیمانده و تولید شده جمعیت جدید انتخاب می‌شود؛

گام (۷) گام‌های ۳-۶ تا دستیابی به شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد.

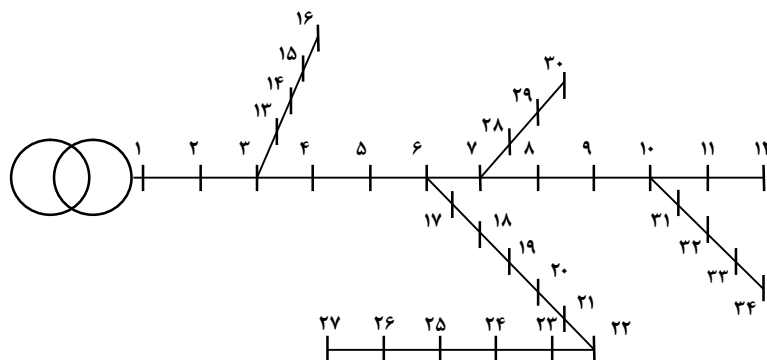
۳-۲- انتخاب پاسخ نهایی

با توجه به این‌که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه دسته‌ای از جوابهای کارا را پیدا می‌کنند، طراح شبکه موظف است تا یکی از پاسخها را به عنوان آرایش نهایی سیستم توزیع پیشنهاد کند. هر یک از پاسخهای موجود در جبهه کارا پاسخ بهینه مسأله بوده و انتخاب پاسخ نهایی به مجموعه‌ای از ملاحظات فنی و اقتصادی وابسته است.

در این مقاله پاسخ نهایی با استفاده از روش max-min فازی تعیین می‌شود [۲۰]. برای این منظور، تابع تصمیم‌گیری فازی در قالب تابع عضویتی که بتوان مقدار دقیق متغیرها را در آن جایگزین کرد، معرفی می‌شود. شکل (۲) تابع عضویت $\overline{\mu_{f_i}}$ را برای متغیر فازی f_i نشان می‌دهد:



شکل (۲): نمونه تابع عضویت برای تابع f_i



شکل (۳): شبکه ۳۴ باس مورد مطالعه

جدول (۱): نتایج حاصل از سناریوی اول بر روی شبکه ۳۴ باس

شاخص	قبل از خازن‌گذاری	بعد از خازن‌گذاری
تلفات (\$)	۱۰۷۱۲۹/۹۹	۷۶۴۱۲
هزینه نصب بانک خازنی (\$)	۰	۸۵۲۵
جریمه خاموشی (\$)	۲۰۱۴۸/۶۲	۲۱۲۸۲
هزینه کل (\$)	۱۲۷۲۸۸/۶۱	۱۰۶۲۱۹
حداقل، حداکثر و میانگین ولتاژ (pu)	(/۹۷۷, /۹۹۶, /۹۶۳)	(/۹۸۱, /۹۹۷, /۹۶۹)

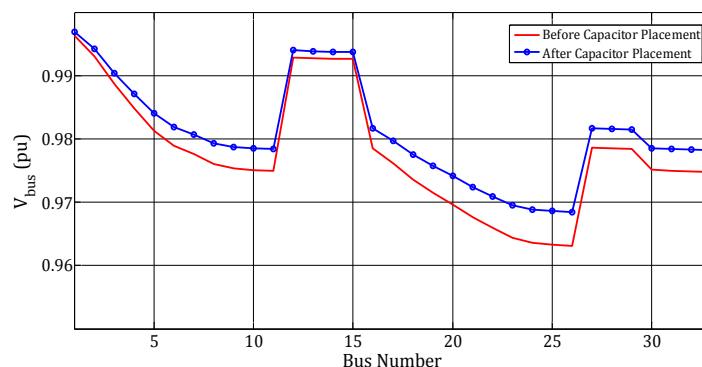
۴- مطالعات عددی و نتایج

کمینه‌سازی هزینه‌ها (Fit_1) انجام گرفته است. طول دوره مطالعه ۳ سال و هزینه تلفات انرژی الکتریکی و نصب بانک‌های خازنی به ترتیب برابر ۷ (سنت بر کیلووات ساعت) و ۵/۵ (دلار بر کیلووات) فرض شده‌اند. بیشینه و کمینه ولتاژ قابل قبول، نرخ بهره و تورم به ترتیب برابر ۱/۰۵، ۰/۹۵، ۱۰ و ۸ درصد منظور شده‌اند. نرخ سالیانه خطا در خطوط، میانگین زمان تعمیر و جریمه خاموشی به ترتیب برابر ۰/۲ (f/km)، ۲/۵ (hr) و ۳/۵ ($\$/kWh$) فرض می‌شود. ضریب تلفات خطوط در هر یک از بازه‌های زمانی منحنی بار برابر یک فرض شده و پله‌های قابل انتخاب برای خازن‌ها ۵۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.

به منظور استفاده از روش پیشنهادی برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار Matlab نوشته شد. نتایج حاصل از اعمال مدل پیشنهادی بر روی شبکه ۳۴ باس IEEE، در قالب چندین سناریو ارائه شده است. بارهای شبکه مورد مطالعه از نوع مسکونی، تجاری و اداری بوده و امکان نصب خازن‌ها در تمام باس‌ها موجود است. کامپیوتر استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها دارای اطلاعات فنی شامل، سی‌پی‌یو $Centrino 1.8^{GH}$ و حافظه RAM 1^{GB} است.

۴-۱- سناریوی اول

در این سناریو مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی با هدف



شکل (۴): ولتاژ گره‌های شبکه ۳۴ باس قبل و بعد از خازن گذاری

جدول (۲): محل و ظرفیت بانک‌های خازنی سناریوی ۱

محل قرارگیری (ظرفیت بر حسب کیلووار)
۶ (۵۰)، ۷ (۵۰)، ۸ (۱۰۰)، ۱۰ (۱۰۰)، ۱۱ (۵۰)، ۱۶ (۵۰)، ۱۷ (۱۵۰)، ۱۸ (۵۰)، ۱۹
۲۰ (۵۰)، ۲۱ (۲۰۰)، ۲۲ (۵۰)، ۲۳ (۱۰۰)، ۲۴ (۲۰۰)، ۲۵ (۵۰)، ۲۶ (۵۰)،
۲۹ (۵۰)، ۳۱ (۵۰)، ۳۲ (۵۰)

جدول (۳): مقایسه نتایج روش‌های مختلف در سناریوی ۱

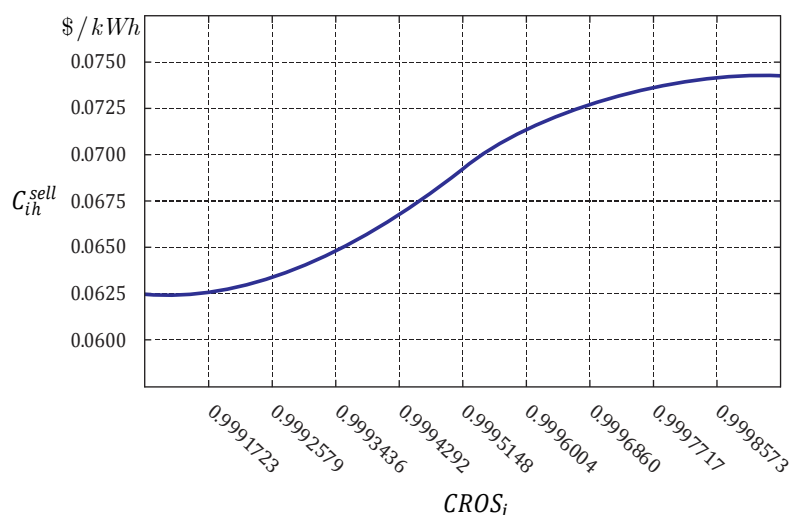
روش حل	بهترین پاسخ	میانگین پاسخ‌ها	انحراف معیار
الگوریتم ازدحام ذرات	۱۰۶۳۱۹	۱۰۷۴۸۳	۴/۳۱
الگوریتم پیشنهادی	۱۰۶۳۱۹	۱۰۷۲۵۱	۲/۴۷

جدول (۴): نتایج حاصل از سناریوی ۲ بر روی شبکه ۳۴ باس

شاخص	قبل از خازن گذاری	بعد از خازن گذاری
تلفات (\$))	۱۰۷۱۳۹/۹۹	۸۳۵۸۲/۸۶
هزینه نصب بانک خازنی (\$))	۰	۸۵۲۵
جریمه خاموشی (\$))	۲۷۴۳۵/۲۴	۲۳۴۷۵/۱
درآمد شرکت توزیع (\$))	۵۵۸۵۷۷۷/۵۴	۶۵۳۵۹۰/۸۷
حداقل، حداکثر و میانگین ولتاژ (pu))	(/۹۷۷، /۹۹۶، /۹۶۳)	(/۹۸۱، /۹۹۷، /۹۶۹)

نیز حل شده و هر دو برنامه برای ۲۰ مرتبه، به شکل مستقل، اجرا شده‌اند. نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۲) نشان داده شده است. مطابق نتایج این جدول، اگرچه بهترین پاسخ روش پیشنهادی دقیقاً برابر بهترین جواب الگوریتم ازدحام ذرات است، اما پاسخ‌های الگوریتم پیشنهادی میانگین کم‌تری داشته و پاسخ‌های با کیفیت‌تری را در هر بار اجرای الگوریتم به‌دست داده است.

نتایج حاصل از این آزمون در جدول‌های (۱) و (۲) و شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اثر قرارگیری بانک‌های خازنی، مجموع تلفات شبکه به اندازه ۴۰ درصد کاهش یافته و میانگین سطح ولتاژ گره‌های شبکه حدود ۱ درصد افزایش یافته است. شکل (۴) ولتاژ گره‌های مختلف شبکه را قبل و بعد از خازن گذاری نشان می‌دهد. به منظور بررسی کیفیت الگوریتم پیشنهادی، مسأله با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پیشنهاد شده در مرجع [۷]



شکل (۵): منحنی تغییرات هزینه انرژی الکتریکی بر مبنای قابلیت اطمینان مطلوب مشترک

جدول (۵): محل و ظرفیت بانک‌های خازنی سناریوی ۲

محل قرارگیری (ظرفیت بر حسب کیلووات)
۲۱، (۱۵۰) ۱۹، (۱۰۰) ۱۸، (۱۰۰) ۱۷، (۱۵۰) ۱۰، (۱۵۰) ۸، (۱۰۰) ۷
۳۳، (۵۰) ۲۹، (۵۰) ۲۸، (۵۰) ۲۶، (۱۵۰) ۲۵، (۱۵۰) ۲۳، (۱۵۰) ۲۲، (۱۵۰)
(۵۰)

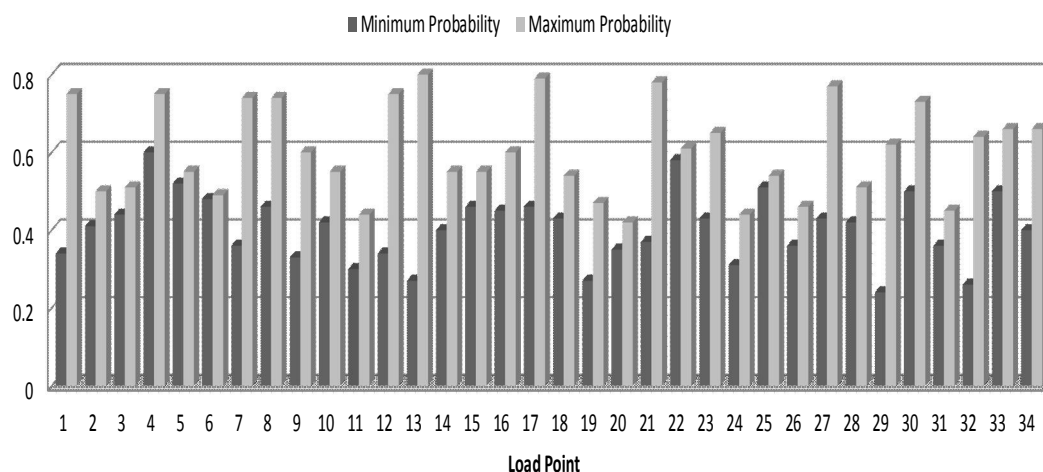
در یک محیط تجدید ساختار شده نصب خازن‌ها در شبکه توزیع علاوه بر کاهش تلفات و کاهش جریمه خاموشی، میزان درآمد شرکت توزیع از محل فروش انرژی الکتریکی به مشترکین را افزایش داده و نقش مؤثری را در افزایش درآمد شرکت توزیع ایفا می‌کند.

۴-۳- سناریوی سوم

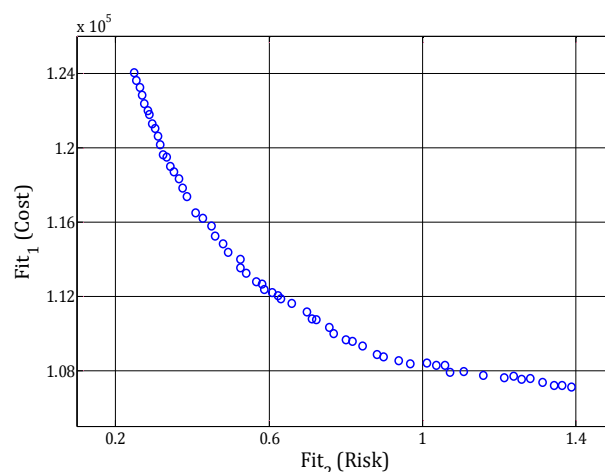
در این سناریو مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی با یک رویکرد دوهدفه به منظور کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های توسعه و ریسک سودآوری شرکت توزیع در محیط تجدیدساختار شده عمده‌فروشی بررسی شده است.

۴-۲- سناریوی دوم

در این سناریو مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی در محیط یک شرکت توزیع تجدیدساختار شده و با توجه به قابلیت اطمینان مطلوب مشترکین حل شده است. برای این منظور فرض شده که هزینه انرژی الکتریکی تحویل شده به هر مشترک، مطابق شکل (۵)، با توجه به سطح قابلیت اطمینان در برق‌رسانی به مشترک تغییر کند. هزینه هر کیلووات خرید انرژی از بازار عمده‌فروشی برابر ۵ سنت و سایر شاخص‌ها مطابق سناریوی اول فرض شده‌اند. از طرفی، فرض شده تا جریمه خاموشی با توجه به نرخ انرژی فرخته شده تغییر کند. نتایج حاصل شده در جدول‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،



شکل (۶): پیشینه و کمینه احتمال استفاده هر مشترک از استراتژی خرید-فروش پیشنهادی



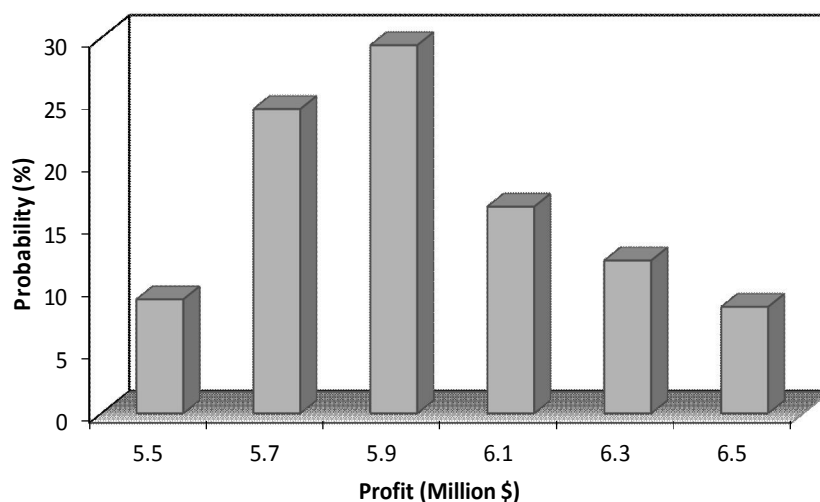
شکل (۷): جبهه کارای به دست آمده

جدول (۶): نتایج حاصل از سناریوی ۳ بر روی شبکه ۳۴ باس

شاخص	خازن‌گذاری تک هدفه	خازن‌گذاری دو هدفه
تلفات (\$))	۷۶۴۱۲	۸۴۷۲/۲۶
هزینه نصب بانک خازنی (\$))	۸۵۲۵	۱۷۲۵
جریمه خاموشی (\$))	۲۱۱۲۸۲	۲۴۴۶
هزینه کل (\$))	۱۶۲۱۹	۱۱۹۸۸۷/۲۶
درآمد شرکت توزیع (\$))	۵۷۱۱۶۲/۸۱	۶۲۹۲۴۶۱/۲
حداقل، حداکثر و میانگین ولتاژ (pu)	(/۹۸۱ /۹۹۷ /۹۶۹)	(/۹۸ /۹۹۷ /۹۶۹)

جدول (۷): محل و ظرفیت بانک‌های خازنی سناریوی سوم

محل قرارگیری (ظرفیت بر حسب کیلووار)
۱۷، (۱۰۰) ۱۱، (۵۰) ۱۰، (۱۵۰) ۸، (۵۰) ۷، (۵۰) ۶، (۵۰) ۴، (۵۰) ۳
۲۶، (۵۰) ۲۵، (۲۰۰) ۲۴، (۱۵۰) ۲۳، (۲۰۰) ۲۱، (۲۰۰) ۲۰، (۵۰) ۱۸، (۱۵۰)
(۱۰۰) ۳۳، (۱۵۰) ۳۱، (۵۰) ۲۹، (۱۰۰)



شکل (۸): منحنی توزیع احتمالی سودآوری برای پاسخ انتخابی

جدول (۸): اندیس‌های آماری مربوط به سودآوری پاسخ انتخابی

مقدار متوسط (M\$)	بازه تغییرات (M\$)	ورایانس (M\$ ²)	انحراف معیار (M\$)
۵/۹۱۰	۱/۱۲۰۳	۰/۱۴۳۹	۰/۲۰۷۰

است.

مطابق این نتایج، شرکت توزیع با سطح ریسک قابل قبولی می‌تواند ضمن هزینه مقدار بیشتری برای خازن‌گذاری شبکه، سودآوری خود را از طرح مبتنی بر قابلیت اطمینان مطلوب مشترک افزایش دهد. بر این اساس، اجرای استراتژی خرید-فروش بر مبنای قابلیت اطمینان مطلوب مشترکین، نه تنها سبب افزایش احترام به حقوق مصرف‌کنندگان در محیط تجدید ساختار شده می‌شود، بلکه با اجرای برنامه‌ریزی چندهدفه ریسک‌محور، می‌توان از مشکلات احتمالی ناشی از عدم اطمینان تحمیلی به شرکت توزیع جلوگیری کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله مکان‌یابی بانک‌های خازنی فشار متوسط با استفاده از یک رویکرد دوهدفه به منظور کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و ریسک سودآوری شرکت توزیع بررسی شد. برای این منظور استراتژی خرید-فروش بر مبنای قابلیت اطمینان مطلوب مشترک در یک قالب احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مدل‌سازی شد. در ادامه، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه به

برای این منظور، بیشینه و کمینه احتمال استفاده هر مشترک از استراتژی خرید-فروش پیشنهادی مطابق شکل (۶) مد نظر قرار گرفته است. سطح سودآوری مورد انتظار شرکت توزیع برای محاسبات ریسک معادل میزان سودآوری آن پیش از اجرای خازن‌گذاری در شبکه فرض شده است. با اجرای الگوریتم توسعه داده شده مبتنی بر بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه، جبهه کارای به‌دست آمده در شکل (۷) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از انتخاب پاسخ نهایی و جزئیات فنی/اقتصادی متناظر با آن در جدول‌های (۶) و (۷) گزارش شده است. همانطور که در جدول (۶) نمایش داده شده است، هزینه کل اعمالی به شبکه نسبت به حالت تک‌هدفه ۱۲/۵ درصد افزایش یافته است، با وجود این، میزان سودآوری شرکت توزیع در طول دوره مطالعه در حدود ۱۰ درصد بهبود داشته است.

شکل (۸) منحنی توزیع احتمالی سودآوری برای پاسخ پیشنهادی را نشان می‌دهد؛ اطلاعات آماری استخراج شده از این شکل در جدول (۸) گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیش‌ترین فراوانی سودآوری به ترتیب در ۵/۹، ۶/۱ و ۵/۷ میلیون دلار اتفاق می‌افتند. مطابق رابطه (۱۴) ریسک متناظر با این پاسخ برابر ۰/۳۱

- Trans. on Power Del. , Vol. 5, No. 2, pp. 634–642, 1990.
- [9] A. A. Eajal, M. E. El-Hawary, "Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distribution Systems With Harmonics Consideration Using Particle Swarm Optimization," IEEE Trans. on Power Del. , Vol. 25, No. 3, pp. 1734-1741, 2010.
- [10] S. Segura, L. C. P. da Silva, R. Romero, D. Salles, "Strategic capacitor placement in distribution systems by minimisation of harmonics amplification because of resonance," IET, Gen. , Trans. & Dist. , Vol. 6, No. 7, pp. 646-656, 2012.
- [11] V. Farahani, S. H. H. Sadeghi, H. AskarianAbyaneh, S. M. M. Agah, "Energy Loss Reduction by Conductor Replacement and Capacitor Placement in Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Syst. , Vol. pp, No. 99, pp. 1-9, 2013.
- [12] A. H. Etemadi, M. Fotuhi-Firuzabad, "Distribution system reliability enhancement using optimal capacitor placement," IET Gen. , Trans. Dist. , Vol. 2, No. 5, pp. 621-631, 2008.
- [13] S.M. Mazhari, S. Afsharnia, "A new approach for multi-objective capacitor placement within a deregulated dis-tribution network considering customer choices on reliability," 17th Electric Power Distribution Conference (EPDC), Tehran, April 2012
- [14] M. A. S. Masoum, M. Ladjevardi, A. Jafarian, E. F. Fuchs, W. M. Grady, "Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics," IEEE Trans. Power Del. , Vol. 19, No. 2, pp. 822–829, April 2004.
- [15] M. E. Hamedani, S. A. Arefifar, "Distributed generation, reactive sources and network configuration planning for power and energy loss reduction," IEE Proc. Genre. Trans. Dist. , Vol. 153, No. 2, March 2006.
- [16] M. -R. Haghifam, O. P. Malik, "Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitors placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads," IET Generation, Trans. Dist. , Vol. 1, No. 2, pp. 244-252, 2007.
- [17] C. Chung, "Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm," IEEE Trans. Power Syst. , Vol. 23, No. 4, pp. 1747-1755, 2008.
- [18] H. Falaghi, M. Ramezani, C. Singh, M-R. Haghifam, "Probabilistic assessment of TTC in power systems including wind power generation," IEEE Systems Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 181–190, 2012.
- منظور یافتن جبهه کارا به مسأله تلفیق و چگونگی پیاده‌سازی آن تشریح شد. با اعمال مدل پیشنهادی به شبکه آزمون ۳۴ شینه IEEE، کارایی رویکرد پیشنهادی در قالب چندین سناریو بررسی شد. مطابق نتایج ارایه شده، راهکار پیشنهادی ملزومات فنی مکان‌یابی خازن‌های فشار متوسط را رعایت کرده و قابل پیاده‌سازی در محیط‌های تجدید ساختار شده آینده است.

مراجع

- [1] R. A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero, "Optimal capacitor placement in radial distribution networks," IEEE Trans. Power Syst. , vol. 16, no. 4, pp. 630–637, 2001.
- [2] Capacitor subcommittee of the IEEE transmission and distribution committee, "Bibliography on power capacitors 1975–1980," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No. 7, pp. 2331-2334, July 1983.
- [3] S. H. Lee, J. J. Grainger, "Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders," IEEE Trans. Power Syst. , Vol. 100, No. 1, pp. 345–352, Jan. 1981.
- [4] H. Duran, "Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders, a dynamic programming approach," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 87, No. 9, pp. 1769-1774, 1968.
- [5] I. C. Da Silva, S. Carneiro, E. J. De Oliveira, J. De Souza Costa, J. L. Rezende Pereira, P. A. N. Garcia, "A heuristic constructive algorithm for capacitor placement on distribution systems," IEEE Trans. Power Syst. , Vol. 23, No. 4, pp. 1619–1626, Nov. 2008.
- [6] M. A. S. Masoum, M. Ladjevardi, A. Jafarian, E. F. Fuchs, "Optimal placement, replacement and sizing of capacitor Banks in distorted distribution networks by genetic algorithms," IEEE Trans. Power Del. , Vol. 19, No. 4, pp. 1794–1801, Oct. 2004.
- [7] A. A. Eajal , M. E. El-Hawary, "Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization," IEEE Trans. Power Del. , Vol. 25, No. 3, pp. 1734–1741, July 2010.
- [8] H. D. Chiang, J. C. Wang, O. Cockings, H. D. Shin, "Optimal capacitor placements in distribution systems, Part I: A new formulation and the overall problem," IEEE

- [20] M-R. Haghifam, H. Falaghi, O. P. Malik, "Risk-based distributed generation placement," IET Gener. Transm. Distrib. , Vol. 2, No. 2, pp. 252–260, 2008.
- [19] A. Konak, D. W. Coit, A. E. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91, pp. 992–1007, 2006.

¹Customer Reliability of Service (CROS)

²Customer Unreliability of Service (CUOS)