

بکارگیری روش چند منظوره جستجوی گرانشی مبتنی بر منطق فازی در برنامه ریزی و توزیع توان راکتیو

علی قاسمی^{۱*} و خلیل ولیپور^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: الگوریتم جستجوی گرانشی، روش بهینه سازی چندهدفه، مرتب سازی غیرخطی، معیار پارتو، برنامه ریزی توان راکتیو، تئوری فازی.</p>	<p>برنامه ریزی توان راکتیو در شبکه قدرت به منظور تنظیم پروفیل ولتاژ شبکه، کم کردن نوسانات ولتاژ و کمینه سازی تلفات به عنوان یک مساله غیرخطی بهینه سازی مورد توجه محققین بوده است. در این مقاله برای دسترسی به این مهم از الگوریتم چند منظوره جستجوی گرانشی با در نظر گرفتن سه تابع هدف مختلف بهره گرفته شده است. مساله برنامه ریزی توان راکتیو یک مساله پیچیده در مهندسی می باشد. علت این امر به خاطر داشتن توابع متضاد و قیود غیرخطی می باشد. علت تضاد به دلیل ماهیت متفاوت بین تابع هزینه، تلفات و ولتاژ می باشد که نمی توان همه این پارامترها را در یک تابع هدف خلاصه نمود. به منظور مدل سازی جامعتر برای مساله برنامه ریزی توان راکتیو در این مطالعه از سه تابع هدف با عناوین هزینه اختصاصی برای منابع تولید توان راکتیو، بهبود سازی پروفیل ولتاژ و کمینه سازی تلفات شبکه مبتنی بر مدل نیوتن-رافسون استفاده شده است. برای مرتب سازی داده ها از سازوکار مرتب سازی معیار پارتو بهره گرفته شده است. به منظور استخراج بهترین جواب از میان مجموعه جواب های حاصل از سیستم پارتو، تئوری فازی بکار گرفته شده است. روش پیشنهادی روی سیستم های قدرت مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با سایر روش های انجام گرفته در این زمینه مقایسه شده است. جستجوی مناسب، انتخاب بهترین جواب در هر مرحله و ارتقا مجموعه جواب ها و تقاطع نسل ها به منظور دستیابی به جواب های بهتر از ویژگی های بارز روش پیشنهادی می باشد.</p>

۱- مقدمه

مباحث سرمایه گذاری برای شرکت های مختلف، مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه این تغییرات، ایجاد مدلی کارآمد به گونه ای که بخش های بیشتری از جنبه های مساله برنامه ریزی توان راکتیو را پوشش دهد، از مهمترین اصول برنامه ریزی توان راکتیو شده است. به عبارتی دیگر، در دهه های اخیر با روند حرکت سیستم های قدرت به سمت ایجاد رقابت و شکستن انحصار، اهمیت سرویس های جانبی همچون سرویس توان راکتیو و کنترل ولتاژ، ذخیره چرخان، تنظیم کننده و ... بیشتر نمایان شده است [۱].

در دهه های اخیر با سمتگیری شبکه قدرت به سمت تغییر و تجدید ساختار شدن در سازوکار بازار و صنعت، خدمات توان راکتیو مستقل از سایر خدمات به عنوان یکی از

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghasemi.agm@gmail.com

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اردبیل، ایران.

^۲ استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی مهندسی، برق کامپیوتر، اردبیل، ایران.

طراحی در این مدل مقاوم نبوده و ممکن است سیستم در شرایط کاری نامتعارف دچار اختلال شود چرا که سیستم به صورت غیر خطی مدل نشده است. از طرفی دیگر، الگوریتم‌های پیشنهادی دارای کارایی مناسب نبوده چرا که با مدلسازی سیستم در حالت غیرخطی با وجود قیدهای مختلف مطابق با روابط گفته شده (۱) الی (۱۵) سبب قرار گرفتن جواب نهایی در نقطه محلی بهینه می‌شود. به همین دلیل نیاز به ارتقا الگوریتم‌های هوشمند جهت دستیابی به جواب‌های بهتر همواره مورد نیاز می‌باشد.

در بهینه‌سازی تک‌هدفه، راه حل بهینه معمولاً به خوبی و وضوح، قابل تعریف است، اما در بهینه‌سازی چندهدفه نمی‌توان تنها یک راه حل را به عنوان بهترین جواب مساله معرفی کرد. در این گونه مسائل باید مجموعه‌ای از راه حل‌ها را که هر یک از اهداف را در سطح قابل قبولی برآورده می‌سازند، به عنوان مجموعه جواب بهینه معرفی کرد. به طور کلی، در بهینه‌سازی چندمنظوره باید به نکات زیر توجه داشت:

• فاصله جبهه مغلوب نشده تا جبهه بهینه پرتو، باید به حداقل برسد.

• راه حل‌های پیدا شده باید دارای توزیع مناسبی باشند.

• گستردگی جبهه مغلوب نشده نهایی، باید به حداکثر برسد؛ یعنی برای هر هدف، دامنه گسترده‌ای از مقادیر، باید تحت پوشش راه حل‌های مغلوب نشده قرار بگیرد.

الگوریتم جستجوی گرانشی یکی از روش‌های است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم جستجوی گرانشی بر مبنای قانون گرانش عمل می‌نماید و بر خلاف سایر الگوریتم‌های مبتنی بر گروه ذرات دارای هویت است [۱۰]. به عبارتی دیگر، در این الگوریتم هر یک از اجرام توسط روابط ارتقا نسل مورد بررسی قرار گرفته در حالی که در سایر روش‌ها توده ذرات به صورت همزمان ارتقا می‌یابند. در این مقاله به منظور فایق آمدن بر عیب‌های گفته شده به مدلسازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی توان راکتیو و بهینه‌سازی آن با الگوریتم چند منظوره

از میان این سرویس‌های جانبی، سرویس تامین توان راکتیو و کنترل ولتاژ دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. علی‌رغم آن که پخش بار توان راکتیو علاوه بر تاثیر بر روی تلفات خطوط و اندازه ولتاژ شین‌ها، بر روی پخش بار توان اکتیو و هزینه آن نیز تاثیر گذار می‌باشد، اما متأسفانه به هزینه‌های تولید و انتقال توان راکتیو توجه اندکی شده است. یکی از دلایل این عدم توجه به مشکل بودن ذاتی فهم این موضوع به ویژه توسط اقتصاددانان برمی‌گردد از دیگر دلایلی که می‌توان برای این عدم توجه کافی به توان راکتیو نام برد کم بودن هزینه تولید توان راکتیو در مقابل توان اکتیو می‌باشد. با این وجود از لحاظ اقتصادی و در محاسبات بازار، توان راکتیو ارزش کمتری نسبت به توان اکتیو ندارد. مدیریت و کنترل توان راکتیو هم در سیستم‌های سنتی و هم در سیستم‌های رقابتی یکی از دغدغه‌های اصلی بهره‌برداران بوده است. این موضوع در محیط‌های تجدید ساختار یافته با چالش‌های بیشتری روبرو شده است، زیرا نیاز به یک روش قیمت‌گذاری منصفانه و دقیق و طراحی یک بازار برای توان راکتیو می‌باشد. به منظور حل این مساله در حالت تک تابع هدف، روش‌های مختلفی ارایه شده است که می‌توان آنها را در دو دسته تقسیم‌بندی نمود [۲].

در دسته اول که براساس مدل‌های ریاضی بوده که از آن جمله می‌توان به روش غیرخطی، برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی درجه دو و غیره اشاره نمود [۳-۶]. متأسفانه روش‌های گفته شده با وجود موفقیت‌های بدست آورده هنگامی که سیستم دارای متغیرهای زیادی در ساختار غیرخطی می‌باشد کارایی خود را از دست می‌دهند. در دسته دوم که براساس الگوریتم‌های هوشمند انجام گرفته شده است می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۷]، الگوریتم تکاملی [۸] و اجتماع ذرات [۹] اشاره نمود. در این مقالات تنها به یک بعد از مساله که تغییرات ولتاژ بوده است توجه نموده‌اند که این مدلسازی برای مساله برنامه‌ریزی توان راکتیو که از معیارها و فاکتورهای مختلفی تشکیل شده است، مناسب نیست. همچنین

ثابت اولیه به بهینه کردن تعداد و اندازه وسایل مورد نیاز می‌باشد. این تابع به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$J_1 = \min \omega = \sum_{i \in I} [CFX_i . r_i + C_{C_i} qc_i + C_{r_i} qr_i] \quad (1)$$

که قیود سیستم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_k(\theta, V, t) - \hat{I}_G PG_g + \hat{I}_L PG_l = 0 \quad (2)$$

$$k \in NB, g \in G, l \in L$$

$$Q_k(\theta, V, t) - \hat{I}_G QG_g + \hat{I}_L QG_l + \hat{I}_q(qc_i - qr_i) + \hat{I}_u(qc_i^0 - qr_i^0) = 0 \quad (3)$$

$$k \in NB, g \in G, l \in L, i \in I, u \in U, j \in J$$

$$QG_g^{lower} \leq QG_g \leq QG_g^{upper}, g \in G \quad (4)$$

$$V_k^{lower} \leq V_k \leq V_k^{upper}, k \in NB \quad (5)$$

$$y 1_j \geq 0, j \in J \quad (6)$$

$$y 2_j \geq 0, j \in J \quad (7)$$

$$t_1 \in T, l \in NT \quad (8)$$

$$0 \leq qc_m \leq qc_m^{upper}, r_m, m \in M \quad (9)$$

$$0 \leq qr_m \leq qr_m^{upper}, r_m, m \in M \quad (10)$$

$$qc_n \in S_d r_n, n \in N \quad (11)$$

$$qr_n \in S_d r_n, n \in N \quad (12)$$

$$qc_u^0 \in S_d, u \in U \quad (13)$$

$$qr_u^0 \in S_d, u \in U \quad (14)$$

$$r_i \in \{0, 1\}, i \in I \quad (15)$$

که در رابطه‌های بالا هدف مینیمم‌سازی تابع (۱) به منظور کاهش هزینه‌ها و برنامه‌ریزی مجدد برای توان راکتیو می‌باشد. روابط (۲) و (۳) محدودیت‌های استاتیک برای تولید و توازن توان اکتیو راکتیو می‌باشند. معادله (۴) محدودیت تولید برای توان راکتیو در محدوده مجاز را نشان می‌دهد. معادله (۵) محدوده مجاز و قابل قبول برای توان راکتیو در سیستم مورد مطالعه را مورد پوشش قرار می‌دهد. معادلات (۶) و (۷) نشان از مثبت بودن مقدار تزریقی از توان راکتیو را برای مساله مورد نظر نشان می‌دهد. معادله (۸) مقدار گسسته بودن در تب‌چنجر برای ترانسفورمر مورد مطالعه در سیستم‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. و معادلات (۹) الی (۱۵) مقدار محدودیت‌ها

جستجوی گرانشی پرداخته شده است. برای حل همزمان این توابع از سیستم مرتب‌سازی غیر خطی و آنتروپی استفاده شده است. نهایتاً برای تعیین یک جواب مناسب بین مجموعه جواب‌های تولید شده از سازوکار فازی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی گویای همگرایی بهتر الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های موجود در این زمینه است. مهمترین ویژگی این مقاله را می‌توان در بخش‌های زیر جستجو نمود:

الف) ارایه الگوریتم چند منظوره جستجوی گرانشی به کمک سیستم مرتب‌سازی غیرخطی و سازوکار فازی.

ب) مدل‌سازی چند جانبه برنامه‌ریزی توان راکتیو با در نظر گرفتن قیود مختلف.

در ادامه مقاله در بخش‌های زیر پیگیری می‌شود: در بخش دوم مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه، در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی براساس معیار جبهه پارتو، در بخش چهارم نتایج و تحلیل‌های مورد مطالعه مورد بحث قرار گرفته است و نهایتاً در بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- مدل‌سازی برنامه‌ریزی چندهدفه توان راکتیو

با افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی از چندین دهه گذشته، سیستم‌های مرتبط با تامین آن نیز بسیار گسترش یافته‌اند به گونه‌ای که امروزه توزیع بهینه توان راکتیو برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه سیستم‌های قدرت بین واحدهای تولید انرژی با کمترین هزینه، به یکی از گسترده‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تبدیل شده است [۱۱]. فرمول‌بندی مساله برای برنامه‌ریزی توان راکتیو با در نظر گرفتن قیود خطی و غیر خطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

تابع هزینه نصب: تابع در نظر گرفته شده در این مرحله بر اساس کمینه‌کردن میزان هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه

در این بخش الگوریتم سنتی جستجوی گرانشی به طور مختصر توضیح داده شده است. الگوریتم جستجوی گرانشی یک الگوریتم وابسته به هوش جمعی و بدون حافظه می‌باشد. این الگوریتم بهینه‌سازی با الگو برداری از قوانین و حرکت عوامل در یک سیستم مصنوعی در زمان گسسته طراحی شده است که در آن، فضای سیستم همان محدوده تعریف مساله می‌باشد. بر طبق قانون گرانش هر جرم، محل و وضعیت اجرام دیگر را از طریق جاذبه گرانشی درک می‌کند. بنابراین از این نیرو می‌توان برای تبادل اطلاعات استفاده کرد. در این الگوریتم، جرم عامل‌ها با توجه به تابع هدف تامین می‌شوند [۱۲]. در یک سیستم با n جرم، موقعیت هر جرم، نقطه‌ای از فضا است که جوابی از مساله می‌باشد که موقعیت جرم i ام با X_i نشان داده شده می‌شود.

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \quad (18)$$

در رابطه بالا n بعد مساله و همچنین x_i^d بعد d از جرم i ام می‌باشد. در این سیستم، به جرم i در زمان t و در جهت بعد d ، نیرویی به مقدار $F_{ij}^d(t)$ وارد می‌شود. اندازه این نیرو از رابطه (۱۹) بدست می‌آید.

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} \times (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (19)$$

در رابطه بالا، M_{aj} جرم گرانشی فعال جرم j ، M_{pi} جرم گرانشی غیر فعال جرم i می‌باشد که هر دوی آنها در الگوریتم ذکر شده یکسان و برابر M در نظر گرفته شده‌اند. و $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t ، R_{ij} فاصله مابین دو جرم i ام و j ام و یک عدد خیلی کوچک است. ثابت گرانش، یک پارامتر مناسب برای کنترل توانایی‌های جستجو و بهره‌وری بشمار می‌آید که با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$G(t) = G_0 e^{\frac{-at}{T}} \quad (20)$$

که در رابطه بالا α و G_0 ضرایب کنترلی الگوریتم و T بیانگر طول عمر سیستم است نیروی وارد بر جرم i ام در

در حالت پیوسته و گسسته بودن محدودیت‌ها را نشان می‌دهد. کلیه معادلات فوق از (۱) الی (۱۵) برای تعیین مقدار امکان پذیر توان راکتیو در سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد که نهایتاً جواب نهایی از حل این فرمول‌ها به تعیین برنامه‌ریزی درست برای توان راکتیو و توزیع بهینه آن در سیستم‌های مورد مطالعه را نتیجه خواهد داد.

تابع تلفات: یکی دیگر از توابع مهم در برنامه‌ریزی توان راکتیو کاهش تلفات ناشی از شبکه می‌باشد که افزایش بازدهی شبکه را به همراه خواهد داشت. برای محاسبه تلفات شبکه از رابطه نیوتن رافسون به صورت زیر استفاده شده است.

$$J_2 = P_L(P_G) = \sum_{k=1}^{N_k} g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (16)$$

که در رابطه فوق P_G میزان توان تولیدی، V_i و V_j ولتاژ در ابتدا و انتهای خط i و j می‌باشد. θ_i و θ_j به ترتیب زاویه در ابتدا و انتهای خط می‌باشند.

یکسان سازی ولتاژ: همان طور که گفته شده است یکی از مهمترین مباحث در برنامه‌ریزی توان راکتیو اصلاح پروفیل ولتاژ شبکه می‌باشد از آنجایی که ماهیت ولتاژ شبکه با توابع هزینه سرمایه‌گذاری (J_1) و توابع تلفات (J_2) متفاوت بوده، تابع جدیدی تحت عنوان یکسان سازی ولتاژ شبکه که بیانگر اختلاف بین مقدار مورد نظر در هر باس و مقدار بدست آمده بعد از هر اجرای برنامه پخش بار به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

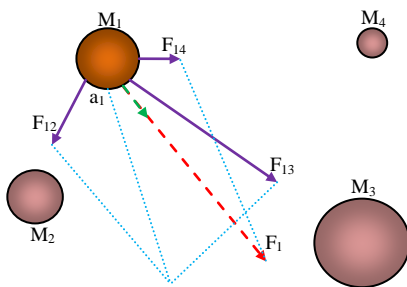
$$J_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{act} - V_{des}| \quad (17)$$

در رابطه فوق، N تعداد باس‌های کاندید برای نصب منابع توان راکتیو، V_{act} مقدار بدست آمده از مساله پخش بار با حضور منابع توان راکتیو و V_{des} مقدار مورد انتظار با توجه به فیوید بر شبکه سیستم قدرت می‌باشد.

۳- الگوریتم چندهدفه پیشنهادی

۳-۱- الگوریتم GSA

شکل ۱ عمکرد این الگوریتم را نشان می دهد.



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

۳-۲- الگوریتم چند منظوره پیشنهادی

همانطور که اشاره شد، برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به مفهوم بهینگی ویژه‌ای نیاز است. بر اساس مفهوم غلبه یا چیرگی پارتو بصورت زیر می‌توان معیار بهینگی در یک مسئله چندهدفه را تعریف نمود:

برای دو بردار تصمیم X_1 و X_2 ، بردار X_1 بردار X_2 را مغلوب می‌کند^۱، اگر و فقط اگر دو شرط برقرار باشد. اول اینکه X_1 در همه اهداف، بدتر از X_2 نباشد^۲ و دوم اینکه X_1 در حداقل یک هدف، مطلقاً بهتر از X_2 باشد. عبارت فوق به زبان ریاضی چنین بیان می‌شود

$$X_1 < X_2 \Leftrightarrow (\forall_i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i(X_1) \leq f_i(X_2)) \wedge (\exists_i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i(X_1) < f_i(X_2)) \quad (27)$$

همچنین بردار تصمیم $X \in X_F$ نسبت به مجموعه نامغلوب $A \subseteq X_F$ نامغلوب خوانده می‌شود، اگر و تنها اگر

$$\exists_a \in A : X < a \quad (28)$$

X بهینه‌ی پارتو است اگر و تنها اگر نسبت به X_F نامغلوب باشد [۱۳]. بنابراین می‌توان بردار تصمیم X را بهینه دانست از این نظر که نمی‌توان هیچ یک از اهداف آن را بهبود داد، بدون آنکه مقدار هدف دیگر آن را بدتر نمود. به چنین جوابی بهینه پارتو یا ناپست^۳ نیز گفته می‌شود. نقاط تیره رنگ روی خط چین در شکل (۲) جوابهای بهینه پارتو هستند. این نقاط نسبت به یکدیگر بی تفاوت هستند. فرق اساسی میان مسئله تک‌هدفه و چندهدفه در

جهت بعد t ، در زمان t طبق رابطه زیر برابر است با مجموع تمام نیروهایی که سایر جرم‌های سیستم بر این جرم وارد می‌کنند در این رابطه $rand_j$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰، ۱) بوده که برای حفظ خصوصیت تصادفی بودن در نظر گرفته شده است.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (21)$$

همچنین، هر یک از جرم‌ها دارای یک سرعت و یک شتاب می‌باشد که هر کدام از آنها به ترتیب در معادله (۲۲) نشان داده می‌شوند. با توجه به قانون دوم نیوتن، هر جرم در جهت بعد d شتابی می‌گیرد که با نیروی وارد بر جرم در آن بعد، بخش بر جرم اینرسی آن که در رابطه (۲۳) بیان شده است، متناسب می‌باشد از طرف دیگر سرعت هر عامل در زمان برابر است با مجموع ضربی از سرعت فعلی و شتاب عامل که طبق رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$v_i^d(t+1) = rand \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (22)$$

$$a_i^d(t) = F_i^d(t) / M_i(t) \quad (23)$$

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

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (24)$$

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

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (25)$$

$$M_i(t) = m_i(t) / \sum_{j=1}^N m_j(t) \quad (26)$$

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

$$Worst(t) = \max \{fit_i(t)\} \quad (27)$$

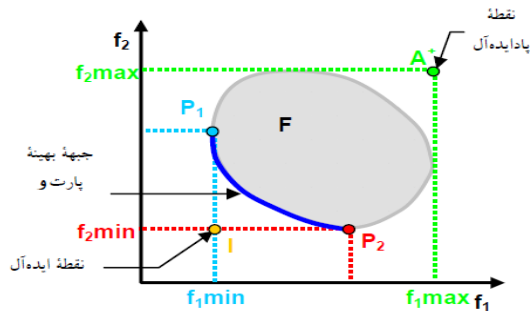
$$Best(t) = \min \{fit_i(t)\} \quad (28)$$

¹ X_1 dominates X_2

² X_1 is no worse than X_2 (in all objectives)

³ Non-Inferior

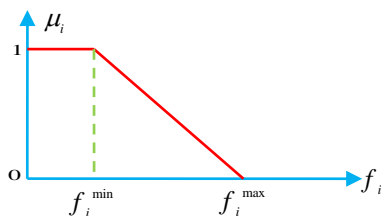
جبهه پارتو اطلاعاتی درباره تعادل بین اهداف به دست می‌دهد. این تعادل بیانگر میزان حساسیت اهداف نسبت به یکدیگر بوده و توسط شکل جبهه پارتو قابل تشریح است.



شکل ۳. جبهه پارتو، نقطه ایده‌آل و نقطه پاد ایده‌آل در فضای هدف

۳-۳- ترکیب منطق فازی با الگوریتم پیشنهادی

منطق فازی یک روش برای تعیین مناسب دسته‌بندی غیرخطی آنها به کار می‌رود. تابع تصمیم‌گیری فازی با تابع عضویتی که بتوان مقدار دقیق متغیرها در آن جایگذاری شود معرفی شده است. شکل ۴ تابع عضویت μ_c را برای یک متغیر فازی نشان می‌دهد. که این متغیر فازی بیان کننده مفهوم هزینه سوخت می‌باشد.



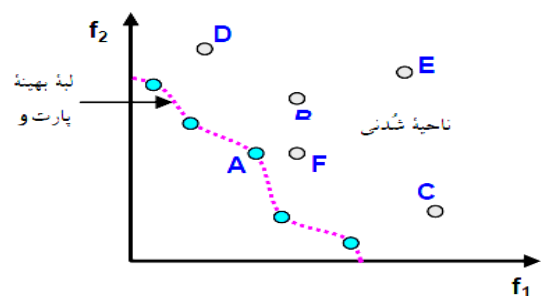
شکل ۴. نحوه تابع عضویت برای تابع هزینه و تلفات و همسان سازی ولتاژ

اگر تصمیم‌گیرنده بطور کامل از فی هزینه کل سوخت راضی باشد در این صورت $\mu_c = 1$ می‌شود و در نقطه مقابل اگر $\mu_c = 0$ باشد نشان دهنده این نکته است که تصمیم‌گیرنده بطور کامل ناراضی است. بنابراین مقدار تابع عضویت نشان دهنده میزان وقف‌پذیری شاخص اقتصادی است. بخاطر ماهیت غیردقیق و نامشخص تصمیم و قضاوت برای تصمیم‌گیرنده‌ها، تابع هدف مربوطه، راه حلی non-dominated دارد. مجموعه

اینجا مشخص می‌شود. مسائل چندهدفی محدود به یک جواب بهینه واحد نیستند، بلکه در آنها مجموعه‌ای از جوابهای بهینه وجود دارد. هیچکدام از جوابها را نمی‌توان بر جواب دیگر برتر دانست، مگر آنکه ترجیحات تصمیم‌گیر تعریف شده باشد. مجموعه تمام جوابهای بهینه‌ی پارتو در یک مسئله چندهدفه مجموعه بهینه پارتو و بردارهای هدف متناظر با آن لبه یا جبهه بهینه پارتو نامیده می‌شوند. مجموعه همه بردارهای تصمیم نامغلوب در مجموعه A بصورت زیر فرض می‌شود:

$$P(A) = \{a \in A \mid a \text{ is Non-dominated } A\} \quad (29)$$

مجموعه $P(A)$ با توجه به A مجموعه نامغلوب^۲ است و مجموعه بردارهای متناظر $F(P(A))$ نیز لبه نامغلوب^۳ آن می‌باشد. به علاوه مجموعه $XP=P(Xf)$ مجموعه بهینه پارتو و $YP=F(Xp)$ جبهه بهینه پارتو تعریف می‌گردد. به عبارت دیگر وقتی مجموعه A برابر با مجموعه جوابهای شدنی X_f باشد، آنگاه مجموعه $P(A)$ جبهه بهینه پارتو را تولید می‌کند. نقطه ایده‌آل^۴ نقطه‌ای است که در آن مقادیر همه توابع هدف کمینه باشد. بدیهی است که معمولاً نقطه ایده‌آل در ناحیه شدنی از فضای هدف وجود ندارد. نقطه‌ی پاد ایده‌آل^۵ نیز نقطه‌ای است که در آن مقادیر همه توابع هدف بیشینه باشد [۱۳]. در شکل (۳) نمایی از یک جبهه پارتو، نقطه ایده‌آل و پادایده‌آل ترسیم شده است.



شکل ۲. بیان تصویری بهینگی پارتو در فضای هدف

¹ Pareto-Optimal Front (Surface)
² Non-dominated Set
³ Non-dominated Fronts
⁴ Ideal Point (Utopian Solution)
⁵ Anti Ideal Point (Nadir Point)

همچنین برای معادلات تابع هدف (۱) باید مجموعه قیود زیر را مطابق با جدول ۱ در نظر گرفت.

جدول ۱. پارامترهای اولیه

	Variables Operation	Investment
Continuous	$v_k, \forall k \in NB$	$qc_m, m \in M$
	$\theta_k, \forall k \in NB$	$qr_m, m \in M$
	$QG_g, \forall g \in G$	
Discrete	$t_l, \forall l \in NT$	$r_m, m \in M$
	$qc_u^0, \forall u \in U$	$qc_n, n \in N$
	$qr_u^0, \forall u \in U$	$qr_n, n \in N$

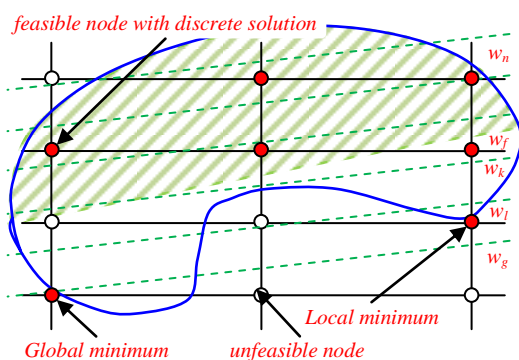
گام دوم: ارتقا ذرات براساس روابط مربوط به شتاب و سرعت ذرات.

گام سوم: در این بخش برای هر جمعیت تولید شده یک برآزندگی محاسبه می‌شود که این برآزندگی بر اساس توابع گفته شده در روابط (۱) و (۱۶) الی (۱۷) می‌باشد.

گام چهارم: ایجاد کردن متغیرهای تعریف شده براساس توابع تصمیم‌گیری در تابع جستجوی گرانشی.

گام پنجم: بررسی شرط خاتمه یافت برنامه. اگر برنامه پایان پذیرفته جواب های نشان داده شده را چاپ نمایید در غیر اینصورت اگر جواب بدست آمده در این مرحله از جواب قبلی بهتر بوده است جایگزین آن شود و اگر بدتر از آن بوده همان جواب قبلی نگه داشته شود و به مرحله ارتقا نسل ها منتقل یابد. شکل ۵ نحوه جستجو با وجود قیود مختلف را نشان می دهد.

شکل ۶ فلوجارت الگوریتم پیشنهادی را برای حل مساله پیش بینی نشان می دهد.



شکل ۵. نحوه جستجو در فضای مورد مطالعه

$f_i(P_{gi})$ به وسیله تابع عضویت $\mu_i(P_{gi})$ بیان شده است که فرمول آن بصورت زیر می‌باشد:

$$\mu_i = (f_i^{\max} - f_i) / (f_i^{\max} - f_i^{\min}) \quad (30)$$

که f_i^{\min} و f_i^{\max} به ترتیب حدبالایی و حدپایینی تابع هدف نام هستند

$$FDM_i = \begin{cases} 0 & \mu_i \leq 0 \\ \mu_i & 0 < \mu_i < 1 \\ 1 & \mu_i \geq 1 \end{cases} \quad (31)$$

به ترتیب برای هر k راه حل Non-Dominated، تابع عضویت نرمالیزه FDM^k به صورت زیر است

$$FDM^k = \left[\frac{\sum_{i=1}^2 FDM_i^k}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^2 FDM_i^j} \right] \quad (32)$$

بهترین حالت برای راه حل مسئله پخش بار اقتصادی این است که در ابتدا ماکزیمم مقدار FDM^k را برای تابع تصمیم‌گیری فازی در نظر بگیریم (که M تعداد کل راه حل‌های Non-Dominated می‌باشد) سپس همه‌ی راه حل‌ها به ترتیب مقدار به‌صورت نزولی مرتب می‌شود و تصمیم‌گیرنده با توجه به مقدار تابع عضویت تحت شرایط عملیاتی واقعی بهترین راه حل را در بین راه حل‌های Non-Dominated، بر طبق لیست حق تقدم انتخاب می‌کند.

۴- نحوه اعمال الگوریتم بر مساله مورد

مطالعه

در این بخش به بیان الگوی بکار گرفته برای حل مساله بر نامه ریزی توان راکتیو با کمک الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم. مدل ایجاد شده در گام های زیر قابل پیگیری می‌باشد.

گام اول: در این مرحله با توجه به محدودیت های اعمالی از سوی مساله مجموعه جواب‌های اولیه در فضای جستجو در نظر می‌گیریم.

$$X_{cls}^0 = [X_{cls,0}^1, X_{cls,0}^2, \dots, X_{cls,0}^{N_g}]_{1 \times N_g} \quad (33)$$

که برای این معادله خواهیم داشت:

$$X_{cls}^i = [X_{cls,i}^1, X_{cls,i}^2, \dots, X_{cls,i}^{N_g}]_{1 \times N_g}, i = 1, 2, \dots, N_s \quad (34)$$

$$x_{cls,i}^j = cx_{i-1}^j \times (P_{j,max} - P_{j,min}) + P_{j,min}, j = 1, 2, \dots, N_g$$

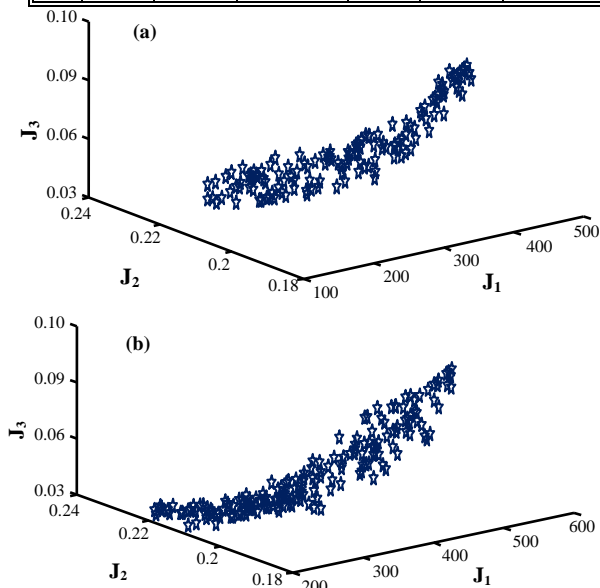
و ۱/۰۵ پرینیت در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۳ آورده شده است. نحوه همگرایی و توزیع جبهه پارتو در شکل ۷ برای بار سنگین و نرمال نشان داده شده است.

جدول ۲. اطلاعات برای سیستم ۳۰ باسه IEEE

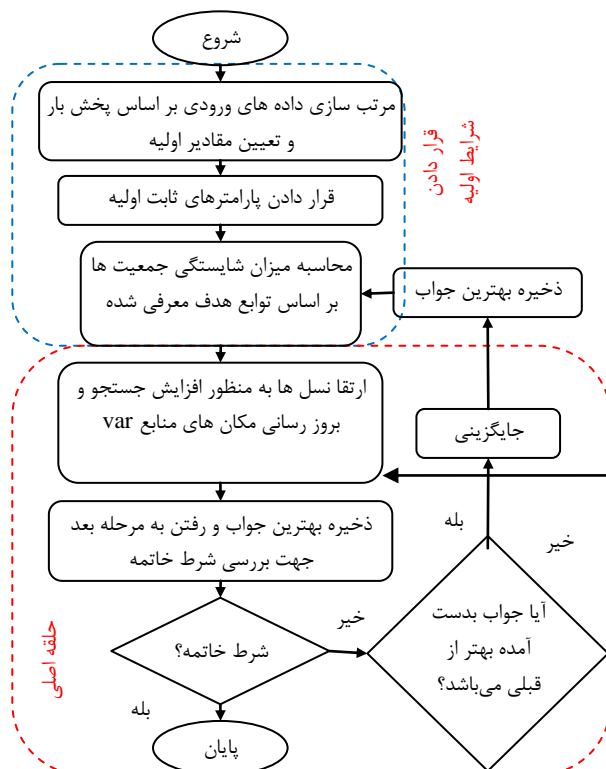
Buses	CFXi, US\$	Cci and Cri, US\$/Mvar	q_c^{upper} and q_r^{upper} , Mvar
2	30	1	30
5	30	1	45
8	15	1	40
11	30	1	40
13	35	1	30
30	30	1	30

جدول ۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سیستم ۳۰ باسه

Method	B&B Algorithm [9]			Proposed Algorithm			
	Load level	Buses	Base case	Contingency	Buses	Base case	Contingency
			#1: 1-2	#1: 1-2		#1: 1-2	
Nominal			qci, MVar	qci, MVar			qci, MVar
	2	-	30	5	-	26	
	5	-	18	8	-	39	
	8	-	40	11	-	11	
	w	-	US\$ 163	w	-	US\$ 146	
	CPU time	1 s	34 s	CPU time	0.98 s	23 s	
Heavy			qci, MVar	qci, MVar			qci, MVar
	2	-	30	2	-	30	
	5	-	28	5	-	23	
	8	-	40	8	-	40	
	w	-	US\$ 222	w	-	US\$ 208	
	CPU time	1 s	30	CPU time	0.97 s	23 s	



شکل ۷. نحوه توزیع معیار پارتو برای بار سنگین (a) و بار سبک (b)



شکل ۶. سیستم پیش بینی برای الگوریتم پیشنهادی

۵- سیستم‌های مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی از نرم افزار مطلب با نسخه ۲۰۱۱ با کامپیوتر با پردازنده ۲/۵۳ گیگا هرتز استفاده شده است. شبیه‌سازی در چند سناریو مختلف با سیستم‌های مورد مطالعه پیگیری شده است. که در ادامه به تحلیل نتایج و داده‌ها پرداخته شده است.

۵-۱- سیستم ۳۰ باسه استاندارد

اولین سیستم مورد مطالعه سیستم استاندارد IEEE با ۳۰ باس، ۵ ژنراتور و ۴۱ شاخه می‌باشد. که باس های ۲، ۵، ۸، ۱۱، ۱۳ و ۳۰ به عنوان باس های کاندید شده برای توسعه گسسته توان راکتیو انتخاب شده‌اند. مقدار محدودیت و میزان تقاضا برای این باس بارها در جدول ۲ نشان داده شده است. مقدار گام برای منابع توان راکتیو ($A_n=2Mvar$) و مقدار ضریب امنیت ($\epsilon=3\%$) می‌باشد. همچنین مقدار بار نرمال و بار سنگین (۱۰۳٪) و یک خط برای احتمال پیشامد (۲٪) در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار بالایی و پایینی برای ولتاژها برابر با ۰/۹۵

جواب‌های مناسبتر در مقایسه با روش پیشنهادی در مرجع [۹] می‌باشد چرا که در این روش قید ولتاژ هم به عنوان یک تابع هدف جهت مینیمم‌سازی نوسانات در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار تلفات بدست آمده بر واحد پریونیت به اندازه $1/21\%$ در حالت نامی $2/36\%$ در حالت سنگین بهبود یافته است.

۵-۲- سیستم ۱۱۸ باسه IEEE

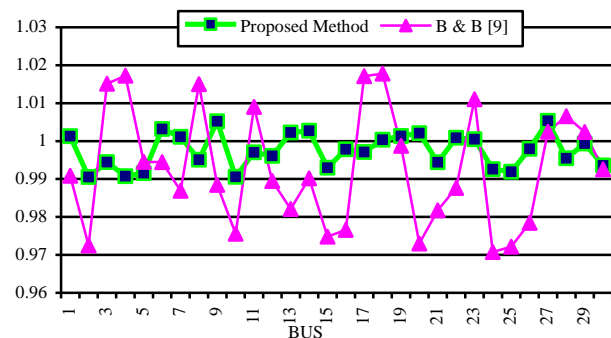
به منظور نشان دادن روش پیشنهادی و بکارگیری مدل غیرخطی از سیستم ۱۱۸ باسه IEEE با ۵۴ واحد نیروگاهی به عنوان یک سیستم با ابعاد بزرگ و عملیاتی که نحوه اتصالات شبکه آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این سیستم ۱۳ باس برای تزریق توان راکتیو در نظر گرفته شده است که در جدول ۴ نشان داده شده است. در این سیستم خطوط (5-8, 26-30, 65-68, 89-92) برای عملیات پیشامد در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۵ آورده شده است. همچنین برای شبیه‌سازی در این سیستم از سه بار نامی، سبک (0.8) و بار سنگین (1.2) استفاده شده است.

همان گونه که از جدول نشان داده شده است نحوه تولیدات و باس‌های مورد نظر برای برنامه‌ریزی توان راکتیو به ازای شرایط کاری مختلف هزینه کمتری در مقایسه با روش انجام گرفته در مرجع [۹] می‌باشد که این نتیجه مقایسه‌ای در جدول ۶ نشان داده شده است.

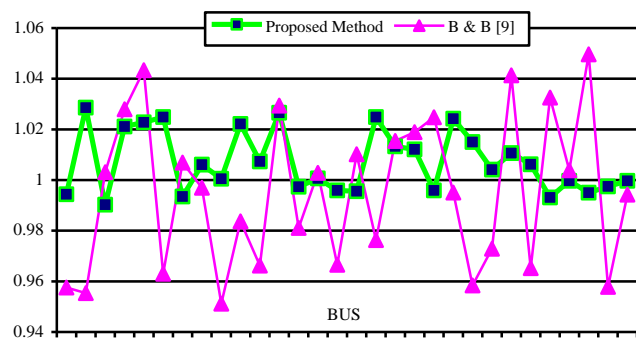
جدول ۴. اطلاعات برای سیستم ۱۱۸ باسه IEEE

Buses	CFXi, US\$	Cci and Cri, US\$/Mvar	q_c^m and q_r^m , Mvar
10	12	1	100
12	10	1	100
21	10	1	100
31	10	1	100
35	5	1	100
49	5	1	100
56	10	1	100
60	5	1	100
71	10	1	100
76	5	1	100
83	10	1	100
85	5	1	100
94	10	1	100

نتایج بدست آمده از جدول ۳ نشان دهنده عدم استفاده از منابع توان راکتیو در جبران‌سازی و بهبود پروفیل ولتاژ می‌باشد. که این نتیجه توسط دو الگوریتم انجام گرفته مورد تایید قرار گرفته است. همچنین نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که باس‌های یافته شده به کمک روش پیشنهادی در حالت نرمال ۲، ۸ و ۱۱ و در حالت بار سنگین ۲، ۵، ۸ و ۱۱ می‌باشد که مجموع توان تزریقی در شرایط کاری نرمال و سنگین به ترتیب برابر با ۷۹ و ۱۱۱ مگاوار بوده که در مقایسه با روش بکارگرفته شده در [۹] به میزان ۸ و ۴ مگاوار بهبود یافته است. از طرفی هزینه کلی برای روش پیشنهادی به اندازه ۹ واحد در بار نامی و ۷ واحد در بار سنگین نسبت به روش انجام گرفته در مرجع گفته شده بهتر شده است. همچنین مقایسه‌ای برای زمان اجرای برنامه‌ها نشان از سرعت بهتر روش پیشنهادی می‌باشد.

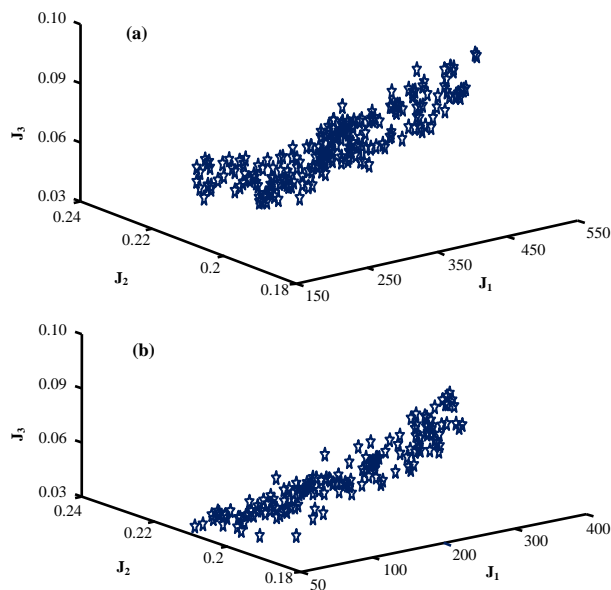


شکل ۸. نحوه توزیع ولتاژ در سیستم مورد مطالعه ۳۰ باسه برای بار نامی



شکل ۹. نحوه توزیع ولتاژ در سیستم مورد مطالعه ۳۰ باسه برای بار سنگین

شکل ۸ و ۹ نحوه توزیع ولتاژ برای سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. توزیع بهتر و متعادلتر برای ولتاژ نشان از یافتن

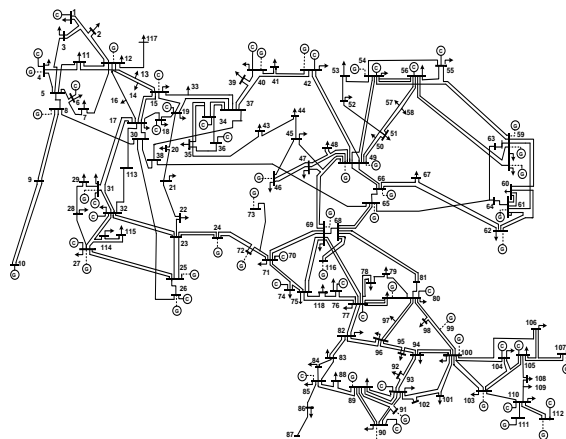


شکل ۱۱. نحوه توزیع معیار پارتو برای بار سنگین (a) و بار

نامی (b)

به‌منظور نشان دادن روش پیشنهادی در حل مساله برنامه‌ریزی توان راکتیو برای سیستم ۳۰ باسه استاندارد روش چند منظوره اجتماع ذرات، NSGA-II، روش چند منظوره کلونی مصنوعی زنبور عسل و روش پیشنهادی به تعداد ۲۰ بار اجرا شده است. به منظور نمایش دادن جبهه پارتو تنها دو تابع اولی به عنوان توابع بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

الگوریتم پیشنهادی با ترکیب بهتر برای توان منابع راکتیو کارایی بهتری داشته است. همان گونه که از جدول ۶ بر می‌آید الگوریتم پیشنهادی همچنین دارای سرعت بالاتری در مقایسه با روش پیشنهاد شده در مقاله [۹] می‌باشد. شکل ۱۱ نحوه توزیع جواب‌ها براساس معیار پارتو را نشان می‌دهد. پیوستگی منظم بین مجموعه جواب‌ها نشان از طراحی مناسب برای مساله برنامه‌ریزی توان راکتیو می‌باشد. همچنین نحوه توزیع ولتاژ برای دو حالت سبک و سنگین در شکل‌های ۱۲ الی ۱۳ نشان داده شده است. تلفات بدست آمده برای دو حالت نرمال و سنگین به ترتیب به اندازه ۰/۳۹٪ و ۱/۳۲٪ کاهش یافته است.



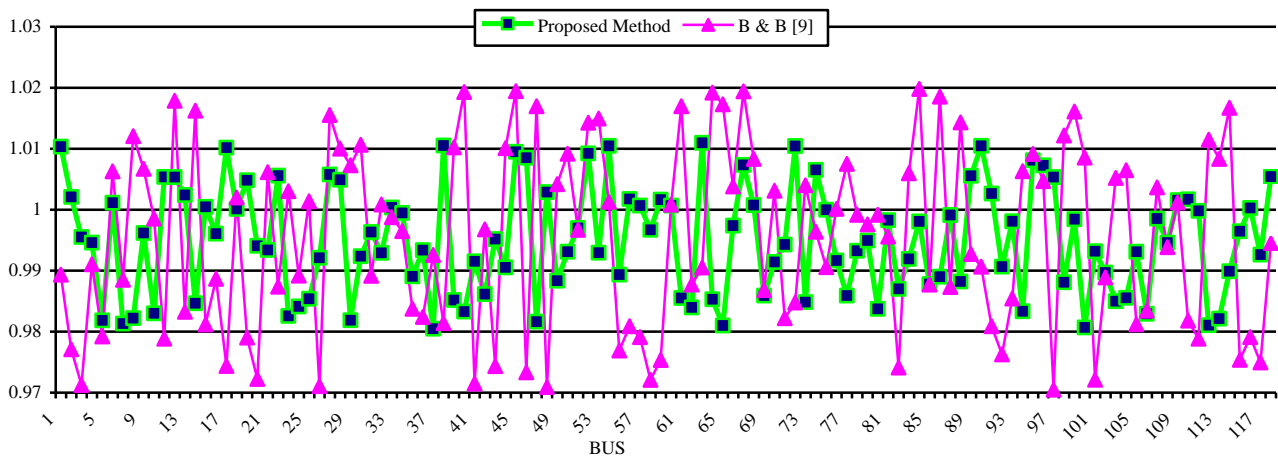
شکل ۱۰. نحوه اتصالات سیستم ۱۱۸ باسه استاندارد IEEE

جدول ۵. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سیستم ۱۱۸ باسه با الگوریتم پیشنهادی

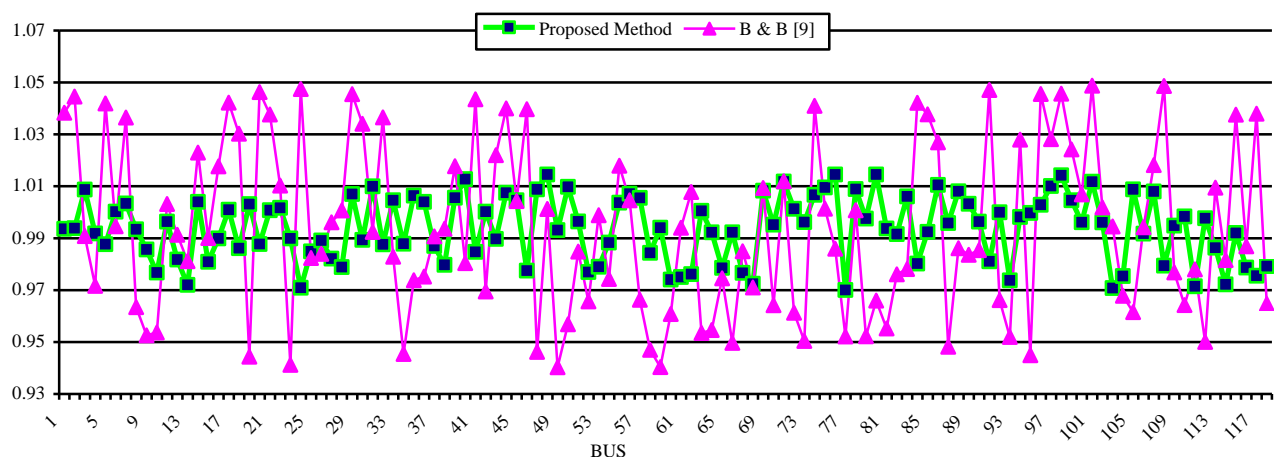
Load level	Buses	Contingency										
		Base case		#1: 5-8		#2: 26-30		#3: 65-68		#4: 89-92		
		qc _i MVar	qr _i MVar	qc _i MVar	qr _i MVar	qc _i MVar	qr _i MVar	qc _i MVar	qr _i MVar	qc _i MVar	qr _i MVar	
Nominal	10	-	-	-	12.00	12.00	-	-	-	-	5.309	-
	12	-	-	-	-	-	-	7.8	-	-	-	
	60	-	-	-	-	-	-	23.09	-	23.21	-	
	94	23.42	-	23.41	-	23.41	-	-	-	52.201	-	
	w	US\$ 24		US\$ 52.23		US\$ 52.09		US\$ 27.54		US\$ 97.56		
	CPU time	1.96 s		2.83s		1.81s		2.87s		9.17s		
Low	12	-	-	-	12.01	-	-	-	-	-	-	
	w	-		-		-		-		-		
	CPU time	1 s		1 s		1 s		1 s		1 s		
Heavy	10	-	-	-	12.00	-	-	-	-	-	-	
	12	-	-	75.00	-	-	-	-	-	-	-	
	35	-	-	12.00	-	35.02	-	-	-	-	-	
	60	58.01	-	60.53	-	60.00	-	50.02	-	50.02	-	
	71	36.45	-	-	-	-	-	-	-	60.67	-	
	85	-	-	35.46	-	34.63	-	33.44	-	63.67	-	
	94	36.52	-	35.45	-	35.47	-	33.46	-	50.45	-	
	w	US\$ 154.32		US\$ 247.52		US\$ 200.17		US\$ 153.47		US\$ 283.67		
CPU time	35 s		37 s		26 s		25 s		17 s			

جدول ۶. نتایج بدست آمده برای روش های انجام گرفته در سیستم ۱۱۸ باسه.

Level Load	Index	Base case	#1: 5 – 8	#2: 26 –30	#3: 65 –68	#4: 89 –92
	Nominal	w	24	52.23	52.09	27.54
Low	CPU time	1.96	2.83	1.81	2.87	9.17
	w	0	0	0	0	0
Heavy	CPU time	1	1	1	1	1
	w	154.32	247.52	200.17	153.47	283.67
B&B Algorithm [9]	CPU time	35	37	26	25	17
	w	30	54.5	52.5	30	102.5
Low	CPU time	2	3	3	2	12
	w	24.5	0	0	0	0
Heavy	CPU time	1	1	1	1	1
	w	162.5	294.5	210	162.5	292.5
	CPU time	40	45	30	28	19



شکل ۱۲. نحوه توزیع ولتاژ در سیستم مورد مطالعه ۱۱۸ باسه برای بار نامی



شکل ۱۲. نحوه توزیع ولتاژ در سیستم مورد مطالعه ۱۱۸ باسه برای بار سنگین

بهتری داشته و امکانات بهتری برای طراحی بدست می‌آورد.
شکل ۱۴ نحوه توزیع بهترین جواب بدست آمده برای هر

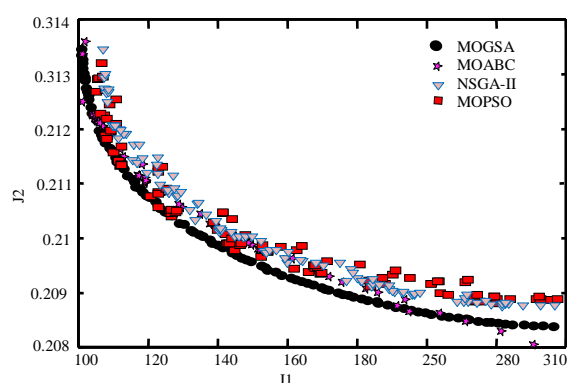
شکل ۱۳ نحوه توزیع معیار پارتو را نشان می‌دهد. همان
گونه که از شکل برمیآید روش پیشنهادی دارای توزیع

Method	0-10	10-50	50-100	100-200	200-500	500-1000	1000-2000
MOGSA	11	6	3	0	0	0	0
MOABC	0	4	12	3	1	0	0
NSGA-II	0	2	4	8	4	2	0
MOPSO	0	2	4	6	6	2	0

۶- نتیجه‌گیری

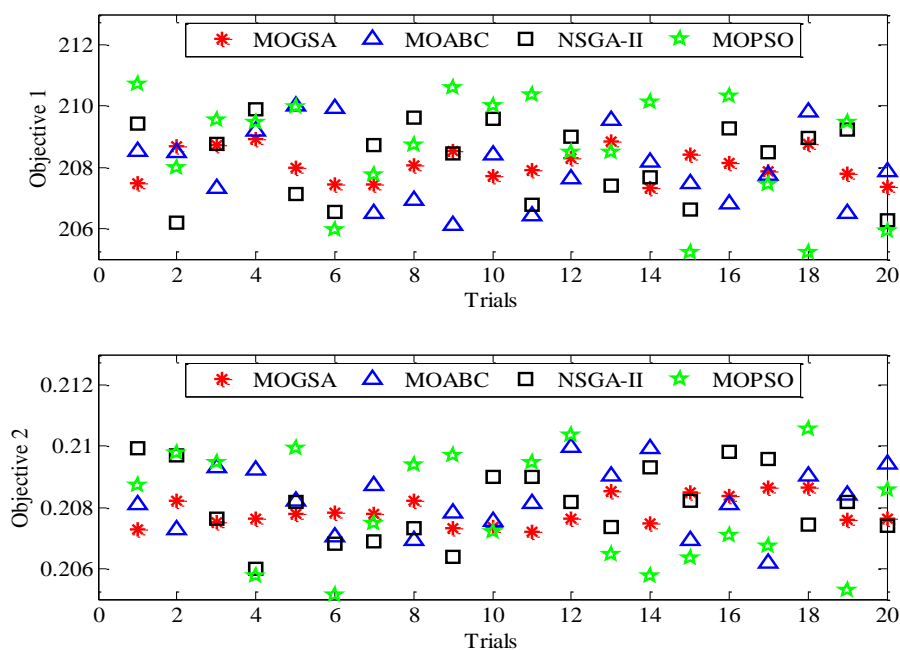
در این مقاله به بررسی منابع توان راکتیو برای کنترل بازار برق تجدیدساختار یافته و مدلسازی آن در یک سیستم غیرخطی با قیود اعمال شده بر شبکه پرداخته شده است. مساله غیرخطی مورد مطالعه به صورت یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل گشته است و از الگوریتم پیشنهادی چندهدفه جستجوی گرانشی با معیار پارتو سعی در حل آن شده است. الگوریتم پیشنهادی روی سیستم استاندارد ۳۰ و ۱۱۸ باسه IEEE بررسی شده است. برای مقایسه بهتر الگوریتم به دفعات مختلف اجرا شده است انحراف معیار آن مورد بررسی قرار گرفته است. به گزینی، ارتقا نسل، سرعت بالاتر و استفاده از معیار پارتو از ویژگی‌های بارز آن می‌باشد.

دو تابع بهینه‌سازی به کمک روش‌های گفته شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است پیوستگی مناسب بین جواب‌ها نشان از مقاوم بودن روش پیشنهادی و انحراف معیار کم آن می‌باشد. جدول ۷ تعداد تکرارهای انجام گرفته برای رسیدن به جبهه پارتو در شکل ۱۳ را نشان می‌دهد. سرعت مناسب و دست یافتن به جواب نهایی در تکرارهای کمتر از ویژگی‌های بارز روش پیشنهادی می‌باشد. نتایج نشان از کارایی روش پیشنهادی در قرار نگرفتن در نقاط محلی در یک مساله پیچیده با قیود عملی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. نحوه توزیع پارتو برای روش‌های پیشنهادی روی سیستم ۳۰ باسه

جدول ۷. تعداد اجراهای مختلف برای روش‌های پیشنهادی



شکل ۱۴. تغییرات جواب نهایی برای ۲۰ تکرار

۷- مراجع

- [1] Ajarapu V., Lau P. L., Battula S. (1994). "An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse". IEEE Trans. Power Syst, vol. 9, no. 2, pp. 906-917.
- [2] Liu H., Jin L., McCalley J. D., Kumar R., Ajarapu V., Elia N. (2009). "Planning reconfigurable reactive control for voltage stability limited power systems". IEEE Trans. Power Syst, vol. 24, no. 2, pp. 1029-1038.
- [3] Dommel H.W., Tinny W.F. (1968). "Optimal power flow solutions". IEEE Trans. Power App. Syst, vol. 87, pp. 1866-1876.
- [4] Lee K.Y., Park Y.M., Ortiz J.L. (1985). "A united approach to optimal real and reactive power dispatch". IEEE Trans. Power App. Syst, vol. 104, pp. 1147-1153.
- [5] Granville S. (1994). "Optimal reactive power dispatch through interior point methods". IEEE Trans. Power Syst, vol. 9, no. 1, pp. 136-146.
- [6] Lai L.L., Ma J.T. (1997). "Application of evolutionary programming to reactive power planning – comparison with nonlinear programming approach". IEEE Trans. Power Syst, vol. 12, no. 1, pp. 198-206.
- [7] Iba K. (1994). "Reactive power optimization by genetic algorithms". IEEE Trans. on Power Syst, vol. 9, no. 2, pp. 685-692.
- [8] Wu Q.H., Ma J.T. (1995). "Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming". IEEE Trans. Power Syst, vol. 10, no. 3, pp. 1243-1248.
- [9] Lai L.L., Nieh T.Y., Vujatovic D., Ma Y.N., Lu Y.P., Yang Y.W., Braun H. (2005). "Swarm intelligence for optimal reactive power dispatch". Proceeding in IEEE/PES Trans. Distrib. Conf. Exhibition, Asia and Pacific, Dalian, China, pp. 1-5.
- [10] Ghasemi A., Shayeghi H., Alkhatib H. (2013). "Robust Design of Multimachine Power System Stabilizers using Fuzzy Gravitational Search Algorithm". Electrical Power and Energy Systems, vol. 51, pp. 190-200.
- [11] Estevam C.R.N. Rider M.J. Amorim E. Mantovani J.R.S. (2010). "Reactive power dispatch and planning using a non-linear branch-and-bound algorithm". IET Gener. Transm. Distrib, vol. 4, Iss. 8, pp. 963-973.
- [12] Shayeghi H. Ghasemi A. (2012). "Optimal tuning of PID type stabilizer and AVR gain using GSA technique". International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE), vol. 4, no. 2, pp. 98-106.
- [13] Shayeghi H., Ghasemi A. (2012). "Application of MOPSO for economic load dispatch solution with transmission losses". International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE), vol. 4, no. 1, pp. 27-34.