

جزیره سازی کنترل شده سیستم قدرت با قید امنیت تأمین انرژی

محمدحسن مصدقی^۱، پوریا معقولی^۲، فرهاد فلاحی^۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۰۴/۰۶

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۱۱/۲۸

چکیده:

تجزیه سیستم قدرت به صورت کنترل شده به جزایر پایدار، به عنوان آخرین اقدام کنترلی برای جلوگیری از خاموشی‌های گسترده در مواقع اضطراری است. توابع هدف متداول در حل این مساله شامل کمینه کردن عدم تعادل بار و تولید و کمینه کردن اختلال شارش توان است که با توجه به تأکید این مقاله بر پایداری دینامیکی، تابع هدف کمینه کردن اختلال شارش توان استفاده شده است. در این مقاله، با فرض اینکه تصمیم برای جزیره سازی گرفته شده است، ابتدا ژنراتورهای هم‌نوا شناسایی شده و سپس گروه‌های هم‌نوا ی ژنراتوری به عنوان ورودی به الگوریتم جستجوی ژنتیک داده می‌شود. برای تشخیص قید یکپارچگی، سناریوهای جزیره سازی تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک از الگوریتم BFS استفاده شده است که از تشکیل شین‌های ایزوله جلوگیری می‌کند. الگوریتم در برنامه MATLAB شبیه‌سازی شده و در شبکه ۳۹ شینه IEEE در نرم‌افزار صنعتی Digsilent صحت سنجی شده است. همچنین نتایج با الگوریتم خوشه‌بندی طیفی از روش‌های بهینه ارائه شده تاکنون است، مقایسه شده و نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی کارایی بهتری نسبت به روش‌های موجود به‌ویژه در خصوص بهبود پایداری ولتاژ دارد.

کلمات کلیدی:

جزیره سازی کنترل شده، امنیت تأمین انرژی، الگوریتم ژنتیک، پایداری ولتاژ، پایداری گذرا

Mosaddeqi@gmail.com
P.maghoul@shahed.ac.ir
Ffallahi@nri.ac.ir

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد
(۲) عضو هیئت‌علمی دانشگاه شاهد، استادیار گروه قدرت و کنترل (نویسنده مسئول)
(۳) دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد

مقدمه

تقسیم و تجزیه شبکه قدرت و یا همان جزیره سازی کنترل شده عبارت از تجزیه سیستم قدرت به ریز شبکه‌های پایدار دینامیکی و استاتیکی به صورت ارادی با تعیین خط‌های انتقال مناسب و در نهایت بازنمودن آن خطوط است. پس از تجزیه سیستم قدرت، چند جزیره کل سیستم را تشکیل می‌دهند و هر یک از جزیره‌ها در یک حالت پایدار بهره‌برداری می‌شوند. در مجموع می‌توان ادعا کرد که برای جلوگیری از تجزیه سیستم قدرت به صورت کنترل نشده و کاهش خطر خاموشی، جزیره سازی کنترل شده به عنوان یک عمل پیشگیرانه در نظر گرفته می‌شود. [۱]

راهبرد جزیره سازی کنترل شده سیستم قدرت، شامل سه مساله اصلی است [۱۳]:

مساله زمانی که شامل تعیین زمان مناسب اعمال راهبرد تجزیه سیستم است، مساله مکانی که شامل شناسایی جزایر ممکن و مناسب است و مساله چگونگی که شامل پیاده‌سازی سناریوی جزایر شناسایی شده به صورتی است مناسب که هیچ‌گونه پیامد استاتیکی و دینامیکی در هیچ‌کدام از جزایر به وجود نیاید.

در این مقاله، با فرض اینکه قدم اول یعنی شناسایی و تشخیص زمان مناسب جهت جزیره سازی شبکه انجام و تصمیم برای جزیره سازی گرفته شده است، الگوریتمی برای حل مساله دوم یعنی تشخیص جزایر مناسب و پایدار ارائه گردیده است.

به طور کلی، قیود حاکم بر راهبرد شناسایی جزایر قابل تشکیل را می‌توان به صورت معیار ساختار (CSC)^۱، معیار تساوی (PBC)^۲، معیار هم‌نوایی ژنراتورها (SSC)^۳، معیار نامساوی (RLC)^۴، معیار توان انتقالی خطوط (قید TVC)^۵، معیار دینامیکی ناپایداری فرکانسی، معیار دینامیکی فروپاشی ولتاژ و معیار دینامیکی ناپایداری گذرا دسته‌بندی نمود.

در سیستم‌های قدرت، برخی از اختلالات ممکن است موجب بروز نوسانات بین ژنراتورها شوند. این موضوع منجر به از دست رفتن سنکرونیسم بین ژنراتورها شده و گروه‌های هم‌نوای ژنراتوری تشکیل می‌شود. از دیگر عواملی که می‌تواند موجب خاموشی و یا به عبارت دقیق‌تر، فروپاشی سیستم قدرت شود، نوسانات ژنراتوری است. با جزیره‌ای کردن شبکه قدرت به صورت صحیح می‌توان ژنراتورهای غیر هم‌نوای شبکه را از همدیگر جدا نموده و از خروج از سنکرون ژنراتورها جلوگیری نمود. بنابراین، مهم‌ترین و یا حداقل اولین مساله در جزیره‌سازی سیستم قدرت، شناسایی هم‌نوایی ژنراتورهاست.

- 1) Cut-Set Constraint
- 2) Power Balance Constraint
- 3) Separation and Synchronous Constraint
- 4) Rated value & Limit Constraints
- 5) Threshold value constraint

در سیستم‌های قدرت واقعی می‌توان ادعا کرد که تعداد گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری که تابعی از ساختار شبکه است، تعیین‌کننده تعداد جزایر در فرایند جزیره سازی است.

در حالت کلی، دو ماشین را همسو یا هم‌نوا گوئیم که پس از وقوع یک اغتشاش دارای رفتار دینامیکی مشابهی باشند. برای تعیین ماشین‌های همسو روش‌های زیادی وجود دارد که به‌طور کلی مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه را می‌توان به دو قسمت عمده شامل مطالعات انجام‌گرفته در حوزه زمان [۱۴] و مطالعات انجام‌گرفته در حوزه فرکانس [۱۲] تقسیم کرد.

در این مقاله، برای گروه‌بندی ژنراتورها از نظریه هم‌نوایی آرام^۱ استفاده شده است که در حوزه روش‌های مبتنی بر فرکانس قرار می‌گیرد. طبق این روش، گروه‌های ژنراتوری همسو تقریباً مستقل از اندازه اغتشاش رخ داده در شبکه هستند و گروه‌های ژنراتورهای همسو از دقت و درجه مدل‌سازی ماشین‌ها مستقل هستند.

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای جزیره سازی شبکه‌های قدرت ارائه شده‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مرجع [۱۰] جهت شناسایی گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری، از اطلاعات بهنگام PMU استفاده شده و از زاویه و شتاب زاویه‌ای ژنراتورها نمونه‌برداری شده و شاخص‌هایی برای شناسایی گروه‌های هم‌نوا از روی شباهت رفتار زاویه و شتاب ژنراتورها پیشنهاد شده‌است. سپس جهت تعیین مرز دقیق جزیره‌ها، از روش مینیمم کاتست با تابع هدف کمینه کردن اغتشاش توان خطوط استفاده شده‌است. در [۶] مساله جزیره‌سازی با هدف یافتن تمام سناریوهایی که تنها با بارزدایی شبکه را حفظ کند به شکل یک مساله برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل شده و با الگوریتم تجزیه بندرز، پاسخ نهایی به دست آمده است. مشکل عمده این مقاله در نظر نگرفتن هم‌نوایی ژنراتورها در جزیره‌هاست. در [۲۰] با در نظر گرفتن گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری یک روش دومرحله‌ای برای جستجوی راهبردهای جداسازی ممکن بر اساس روش OBDD^۲ ارائه شده است، بدین معنی که با استفاده از توابع بولی از میان تمام راهبردهای موجود، راهبردی که دو شرط تعادل توان و هم‌نوایی ژنراتورها را رعایت می‌نمایند، تعیین و به‌عنوان راهبردهای ممکن نام‌گذاری می‌شوند. سپس با استفاده از محاسبات پخش بار، توان خطوط در هریک از راهبردهای ممکن بررسی و راهبرد مناسب از میان راهبردهای ممکن انتخاب می‌شود. در مرجع [۱۶] روش ارائه شده در [۲۰] با استفاده از ساده‌سازی شبکه قدرت برای سیستم‌های بزرگ ارتقا داده شده است. در ادامه، این الگوریتم‌های مبتنی بر OBDD ارتقا یافته برای مثال در [۱۴] قیود بیشتری برای یافتن یک راهبرد مناسب جزیره سازی در نظر گرفته می‌شود، یعنی علاوه بر RLC، PBC و SSC که در مراجع قبلی استفاده می‌شد، قیدهای دیگری مانند TVC نیز بررسی شده است که سعی در برقراری پایداری گذرا جزایر پس از تشکیل دارد. در [۱۹] با استفاده از تکنیک کاتست مینیمم^۳ در نظریه گراف‌ها و در نظر گرفتن گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری، روشی برای شناسایی

1) Slow Coherency

2) Ordered binary decision diagram

1) Minimum cut set

راهبردهای جداسازی مناسب ارائه شده است. این روش مبتنی بر دو الگوریتم جستجوی اولیه گسترده (BFS)^۱ و جستجوی اولیه دقیق (DFS)^۲ در نظریه گرافهاست. در مرجع [۱۵] یک روش دومرحله‌ای با استفاده از دسته‌بندی طیفی^۳ (SCCI) نظریه گرافها و با در نظر گرفتن گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری برای یافتن راهبرد جداسازی مناسب ارائه شده است. در [۳] روشی برای یافتن یک راهبرد مناسب جزیره سازی ارائه شده است که همانند روش‌های شرح داده شده دربرگیرنده قیود مربوط به پایداری استاتیکی جزایر تشکیل شده است. در [۱۱] برای یافتن تعدادی از جواب‌های مساله جداسازی شبکه قدرت یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) ارائه شده است. از آنجا که بارهای شبکه دارای درجه اهمیت متفاوتی هستند و برخی از آنها حیاتی می‌باشند (مانند بار مربوط به یک بیمارستان و یا یک ارگان نهاد)، برای هر یک از بارهای شبکه یک ضریب اهمیت تعریف می‌شود. در مقالات ارائه شده، تمرکز اصلی بر روی قید تعادل تولید و بار در جزیره، هم‌نوایی ژنراتورها، کمینه کردن توان خطوط قطع شده و همچنین سرعت الگوریتم‌های پیشنهادی بوده موضوعات مهمی چون پایداری ولتاژ و پایداری گذرا کمتر دیده شده است. بنابراین، روش‌های ارائه شده، کارآمد نیست، زیرا نمی‌تواند پایداری جزایر را پس از جزیره سازی تضمین نماید.

نظریه هم‌نوایی

تعیین ژنراتورهای هم‌نوا

بر اساس معادله خطی شده کلاسیک ژنراتور، ضمن صرف نظر از میرایی، مدل دینامیکی خطی مرتبه دوم یک سیستم قدرت با m ژنراتور را می‌توان به فرم ماتریسی رابطه (۱) نوشت: [۹]

$$\ddot{X} = Ax \quad (1)$$

که در آن، $x = [\Delta\delta_1, \dots, \Delta\delta_n]^T$ و $\Delta\delta$ انحراف زاویه ژنراتور از نقطه کار حالت ماندگار $\Delta\delta_0$ است و A ماتریس حالت سیستم است. بر اساس نظریه هم‌نوایی آرام، جدا کردن ژنراتور به دو گروه، معادل است با تقسیم قراردادی ماتریس A به دو زیر ماتریس A_{11} و A_{22} که زیر سیستم‌های G_1 و G_2 را نشان می‌دهند. این روند در رابطه (۲) آورده شده است:

- 2) Breadth First Search
- 3) Depth First Search
- 4) Spectral Clustering

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

مجموع نرْم‌های فروبنیوس^۱ قطره‌های فرعی زیر ماتریس‌های A_{11} و A_{22} ، می‌تواند برای تعریف اتصال دینامیکی S بین زیر سیستم‌های G_1 و G_2 استفاده شود: [۸]

$$S = \|A_{12}\| + \|A_{21}\| \quad (3)$$

در این مطالعه، تنها از سناریوهای که دارای نوسانات میرا شده الکترومکانیکی با ولتاژ ثابت بحث خواهد شد. در این سناریو، اگر فرض شود که تعادل توان راکتیو با جبران سازه‌های محلی قابل کنترل است، می‌توان اثرات توان راکتیو و دامنه ولتاژ شین را نادیده گرفت. بنابراین، می‌توان رابطه (۳) را به صورت رابطه (۴) بازنویسی کرد:

$$S = \sum_{j \in V_{G_2}} \sum_{i \in V_{G_1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \quad (4)$$

که در آن، $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}}$ ضرایب سنکرون‌سازی و H_i ثابت اینرسی i امین ژنراتور است. نوسانات الکترومکانیکی ژنراتورهای

دارای اتصال دینامیکی قوی، به طور هم‌زمان باهم صورت می‌گیرد درحالی‌که ژنراتورهای با اتصال دینامیکی ضعیف در برابر یکدیگر نوسان خواهند کرد [۵]. بنابراین، مساله یافتن گروه‌های ژنراتورهای هم‌نوا، همان‌طور که در رابطه (۵) نشان داده شده است، معادل است با مساله بهینه‌سازی پیدا کردن ضعیف‌ترین اتصالات دینامیکی بین گروه‌های مختلف ژنراتورها:

$$\min S = \min_{V_{G_1}, V_{G_2} \subset V_G} \left(\sum_{j \in V_{G_2}} \sum_{i \in V_{G_1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right) \quad (5)$$

شناسایی ژنراتورهای هم‌نوا مبتنی بر گراف دینامیک

گروه ژنراتورهای هم‌نوا در سیستم قدرت در نظر گرفته شده را می‌توان با تشکیل گراف که نشان‌دهنده اتصال دینامیکی بین گروه‌های ژنراتوری است (گراف دینامیک) به دست آورد. سپس خوشه‌بندی طیفی نرمال به این گراف اعمال می‌شود تا برای گروه‌بندی گروه‌های ژنراتوری بر اساس دینامیک اتصالاتشان مورد استفاده قرار گیرد. گراف دینامیکی

1) Frobenius

را می‌توان برای m گره ژنراتوری با تعریف ماتریس لاپلاسیان L_D به صورت رابطه (۶) تشکیل داد:

$$[L_D]_{ij} = \begin{cases} -\sum_{l=1, l \neq i}^m [L_D]_{il} & \text{if } i = j \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} = -|V_i||V_j|B'_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن، B'_{ij} بخش موهومی ماتریس ادمیتانس شبکه است که به گره‌های ژنراتوری کاهش می‌یابد [۵]. گراف دینامیک G_D که اتصال دینامیکی بین گره‌های ژنراتوری را توصیف می‌کند، وزن یال‌های آن به عنوان ضریب سنکرون سازی $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}}$ تعریف می‌شوند. با استفاده از ماتریس لاپلاسیان L_D ، مدل دینامیکی درجه دوم خطی سیستم قدرت با m ژنراتور به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود [۵]:

$$M\ddot{X} = L_D X \quad (۷)$$

که در آن، $M = \text{diag}(2H_1 / \omega_0, \dots, 2H_m / \omega_0)$ و ماتریس اینرسی است.

با استفاده از رابطه (۵) و رابطه (۶) مشخص می‌شود که رابطه (۷) برای گراف G_D یک مینیمم کاتست است که به جای استفاده از وزن گره‌ها، با استفاده از اینرسی گره‌ها گراف را نرمالیزه می‌کند. با اعمال خوشه‌بندی طیفی نرمال در گراف G_D ، مینیمم کاتست مربوطه آن به عنوان راه‌حل رابطه (۵) پیدا می‌شود [۱۷].

بنابراین، اولین مرحله از الگوریتم به صورت زیر اجرا می‌شود:

۱. تشکیل گراف G_D که فقط شامل گره‌های ژنراتوری است. وزن یال‌های این گراف نیز برابر $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}}$ است.

۲. محاسبه دو بردار ویژه اول v_2, v_1 برای مساله کلی $Lv = \lambda Dv$.

۳. تشکیل ماتریس J که $J \in R^{n \times 2}$ ماتریسی است که بردارهای v_2, v_1 را به صورت ستونی ذخیره می‌کند. $y_i \in R^2$ بردار متناظر با i امین سطر J است.

۴. تقسیم گره‌های $y_i \in R^2$ به خوشه‌های c_1, c_2 با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند k-medoids.

۵. انتخاب V_{G1} و V_{G2} به عنوان گره‌های گراف دینامیک جدید و بازگشت به مرحله اول.

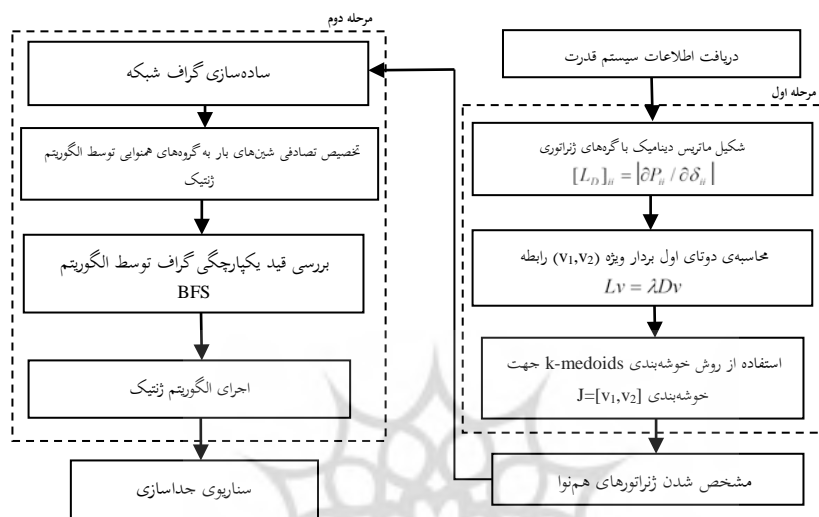
اولین مرحله از الگوریتم پیشنهادی، معادل کاربرد روش‌های مبتنی بر نظریه هم‌نوایی آرام است که حاصل آن گروه‌بندی ژنراتورها به گروه‌های هم‌نواست. پس از این مرحله بهینه‌سازی جدیدی تعریف می‌شود که هدف آن حداقل سازی قطع توان بین جزیره‌هاست که این بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شده است.

الگوریتم پیشنهادی

این الگوریتم بر دو مفهوم گروه‌های هم‌نوای ژنراتوری و قطع خطوط بین جزایر با کمترین شارش توان اکتیو و راکتیو استوار است. با استفاده از مفهوم هم‌نوایی ژنراتورهای شبکه، شبکه قدرت جهت تسریع فرایند جست‌وجو تا حد ممکن ساده می‌شود. سپس توسط الگوریتم ژنتیک شین‌های بار به صورت تصادفی به گروه‌های هم‌نوای ژنراتوری تخصیص می‌یابد. در این مرحله برای هر جزیره گراف مربوط به آن تشکیل می‌شود و با بکارگیری الگوریتم BFS جست‌وجوی سطح به سطح گراف انجام می‌گیرد و تمامی نقاط متصل به هم پیمایش می‌شود. اگر کل گراف هر جزیره را در برگرفت، این سناریو به‌عنوان یکی از سناریوهای جزیره سازی انتخاب می‌شود. از آنجا که تأکید این مطالعه بر ارضای قید پایداری دینامیکی پس از تشکیل جزایر است، سعی می‌شود سناریوهای جزیره سازی کمترین اغتشاش را نسبت به حالت نرمال پخش شارش توان در سیستم را به آن وارد کنند. این ویژگی پایداری گذرای جزیره‌های تشکیل شده را بهبود می‌بخشد، امکان اضافه‌بار شدن خطوط انتقال را در داخل جزیره‌های ایجاد شده کاهش می‌دهد و بازگردانی جزیره‌ها را تسهیل می‌کند. همچنین استفاده از کمترین اغتشاش توان به‌عنوان تابع هدف، جزیره‌هایی با تعادل بار-تولید مناسب ایجاد می‌کند.

به طور کلی، روند اجرای جزیره سازی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به ترتیب زیر (شکل ۱) معرفی نمود:

۱. تعیین گروه‌های ژنراتورهای هم‌نوا با استفاده از نظریه هم‌نوایی آرام.
۲. تشکیل گراف سیستم قدرت و تا حد امکان ساده‌سازی آن.
۳. انتخاب تصادفی از مجموعه شین‌های بار از شین‌های گراف ساده‌شده و تخصیص آن به گروه‌های ژنراتورهای هم‌نوا.
۴. تشکیل ماتریس مجاورت گراف در هر جزیره.
۵. بررسی قید یکپارچگی گراف با استفاده از الگوریتم BFS.
۶. محاسبه مجموع توان اکتیو و راکتیو خطوط قطع شده در صورت تشکیل جزیره مرحله قبل، اجرای الگوریتم ژنتیک و یافتن سناریوی کمینه‌ترین قطع توان به‌عنوان سناریوی بهینه جزیره سازی.



شکل (۱) روند نمای الگوریتم ارائه شده در این مقاله

استفاده از الگوریتم ژنتیک در تخصیص شین‌های بار به گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری

در این مساله پس از ساده‌سازی شبکه و تعیین هسته‌های جزیره‌ها، شین‌های بار کاندید جهت تخصیص به گروه‌های هم‌نوا تعیین می‌شوند. سپس الگوریتم ژنتیک کروموزومی که دارای ژن به‌اندازه تعداد شین‌های کاندید است، تولید می‌کند. الگوریتم ژنتیک یکی از کارآمدترین الگوریتم‌های هوشمند است که به دلیل کاربرد فراوان در پروژه‌های عملی در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است [۲]. عدد هر ژن بیان‌کننده تخصیص هر شین بار به شماره گروه هم‌نوی است. برای مثال، اگر شین‌های کاندید را شین‌های شماره ۱ تا ۱۴ در نظر بگیریم و دو گروه ژنراتور هم‌نوا داشته باشیم، کروموزومی مطابق شکل (۲) به‌اندازه ۱۴ ژن در جمعیت اولیه تولید می‌شود که مثلاً عدد صفر نشان‌دهنده عضویت آن شین در گروه هم‌نوی یک و عدد یک به معنای عضویت آن شین در گروه هم‌نوی دو است. اگر تعداد گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری بیشتر شود، تعداد حالتی که هر ژن نیز می‌گیرد به همان تعداد افزایش می‌یابد.

0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

شکل (۲) یک کروموزوم نمونه در الگوریتم پیشنهادی

سپس این کروموزوم‌ها وارد تابع ارزیابی می‌شوند. در تابع ارزیابی ماتریس مجاورت هر جزیره تشکیل و وارد الگوریتم جستجوی سطح به سطح می‌شود و از یک رأس گراف به‌عنوان رأس ریشه شروع می‌کند. الگوریتم در سطح بعدی تمامی رئوسی که به آن متصل هستند، قرار می‌دهد و این کار در مرحله بعد برای سطح ایجاد شده ادامه می‌یابد تا آنجا که رأس متصلی وجود نداشته باشد. حال اگر تمامی رئوس آن گراف دیده شده باشد، آن گراف یکپارچه است و در غیر این صورت،

آن کروموزوم یا جمعیت در این مرحله رد می‌شود. جمعیتی که قید مرحله قبل را برآورده کرده باشند بر اساس مجموع توان اکتیو و راکتیو خطوط بین جزیره‌ها مرتب می‌شوند و آن جمعیتی بهینه است که کمینه‌ترین توان خطوط قطع شده را داشته باشد (رابطه (۱۳)).

ساده‌سازی گراف شبکه قدرت

باهدف افزایش سرعت الگوریتم هوشمند، روشی برای کاهش فضای جستجو به شرح زیر پیشنهاد شده است. برای مثال، در یک سیستم ۳۹ شینه IEEE (که دارای ۱۰ ژنراتور است)، در حالتی که دو گروه هم‌نوی ژنراتوری داریم تعداد حالت‌های ممکن که شین‌های بار به یک گروه ژنراتوری تخصیص می‌یابد و بقیه شین‌ها به گروه دیگری تعلق می‌گیرد، به شرح زیر است:

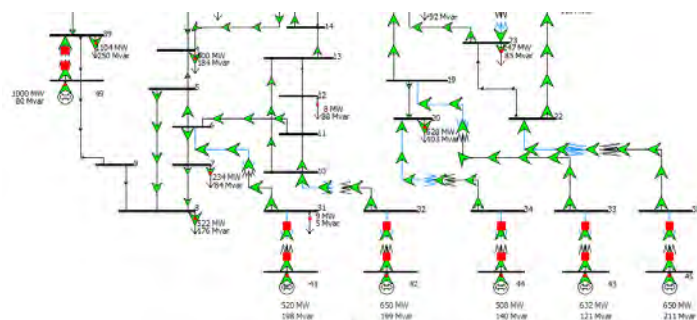
تعداد حالاتی که یک شین بار به گروه اول و ۲۸ شین بار باقیمانده به گروه دوم تخصیص یابد و یا بر عکس، یک شین به گروه دوم و ۲۸ شین باقیمانده به گروه اول تخصیص یابد، برابر است با:

$$\binom{29}{1} \times 2 = 58 \quad (۸)$$

درنهایت، تعداد انتخاب‌های ممکن تخصیص یک گروه m_1 تایی به گروه هم‌نوی اول و تخصیص یک گروه m_2 تایی به گروه هم‌نوی دوم مطابق است: $(m_1 + m_2 = 29)$.

$$2 \times \left(\binom{29}{1} + \binom{29}{2} + \dots + \binom{29}{28} \right) = 1,073,741,820 \quad (۹)$$

واضح است که با توجه به تعداد پاسخ‌های ممکن مطابق رابطه فوق، زمان حل الگوریتم ژنتیک بسیار طولانی خواهد بود. اما در سیستم‌های قدرت، شین‌هایی وجود دارند که وظیفه تغییر سطح ولتاژ ژنراتورها را به عهده‌دارند و یا اینکه شین‌های کلید خانه هستند. در بحث جزیره سازی تعدادی از این باس‌بارها با توجه به کلید خانه یا انتقال بودن ماهیت شین، می‌توان به قطع در مورد تخصیصشان به گروه‌های هم‌نوا نظر داد، بدین معنی که شین‌های کلید خانه متصل به هر ژنراتور قطعاً به همان گروه ژنراتور متصلشان تعلق دارند. در نتیجه می‌توان با حذف این شین‌ها از فضای جست‌وجو تا حد زیادی سرعت الگوریتم را بالا برد. نمونه‌ای از این ساده‌سازی مطابق (۳) آورده شده است.



شکل ۳) بخشی از شبکه ۳۹ شینه IEEE

در تعیین جزیره‌ها تمامی شین‌ها باید حتماً به یک گروه تعلق داشته باشند و هیچ شینی نباید به هیچ گروهی متعلق باشد. مثلاً در شکل (۳) چون شین‌های ژنراتور ۴۳ و ۴۴ در یک گروه هم‌نوی ژنراتوری قرار دارند، باید در یک جزیره قرار گیرند. پس تمامی شین‌هایی که این دو ژنراتور را به شین ۱۹ که شین ارتباط آنها با سایر ژنراتورهای هم‌گروهشان است نیز در همان گروه قرار می‌گیرند. پس این شین‌ها جهت کاهش فضای جستجو از انتخاب‌ها خارج می‌شوند. با همین استدلال، گروه شین‌های {۴۴ و ۳۴ و ۲۰}، {۴۳ و ۳۳ و ۱۹}، {۴۵ و ۳۵ و ۲۲}، {۴۲ و ۳۲ و ۱۰}، {۴۱ و ۳۱ و ۶} قطعا در یک گروه قرار می‌گیرند. این شین‌ها به گروه‌های ژنراتوری قبل از جزیره سازی تخصیص می‌یابند و در نتیجه، فضای جستجو کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، شبکه موردنظر ساده‌شده و کاندیدهای جستجو کاهش می‌یابد.

تخصیص شین‌های بار باقیمانده به گروه‌های ژنراتوری

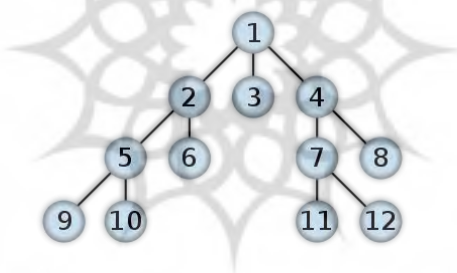
در این مرحله الگوریتم ژنتیک، با تولید جمعیت اولیه از شین‌های کاندید، انتخاب تصادفی شین‌های بار شبکه را به عهده دارد و حالت‌های مختلف تخصیص آنها به گروه‌های هم‌نوا را تولید می‌کند. سپس این انتخاب‌ها در مراحل بعد ارزیابی می‌شوند و بر اساس تابع هدف در نظر گرفته‌شده مرتب می‌شوند.

بررسی جزایر با قید یکپارچگی گراف

در این مرحله مطابق سناریوی مرحله قبل، ماتریس مجاورت گراف تشکیل می‌شود. این مفهوم در رابطه (۱۰) آورده شده است.

$$A = \begin{cases} 0 & \text{if } i, j \text{ is not connected} \\ 1 & \text{if } i, j \text{ is connected} \\ \sum_{j=1}^{j=end} -(A_{ij}) & i = j \end{cases} \quad (10)$$

با استفاده از الگوریتم پیمایش سطح^۱، [۱۸] تمام گراف پیمایش می‌شود. الگوریتم از ریشه شروع می‌کند (در گراف‌ها و یا درخت‌های بدون ریشه رأس دلخواهی به‌عنوان ریشه انتخاب می‌شود) و آن را در سطح یک قرار می‌دهد. سپس در هر مرحله همه همسایه‌های رئوس آخرین سطح دیده‌شده را که تا به حال دیده نشده‌اند، بازدید می‌کند (مطابق شکل ۴) و آنها را در سطح بعدی می‌گذارد. این فرایند زمانی متوقف می‌شود که همه همسایه‌های رئوس آخرین سطح قبلاً دیده‌شده باشند. همچنین در مسائلی که حالات مختلف متناظر با رئوس یک گراف‌اند و حل مساله مستلزم یافتن رأس هدف با خصوصیات مشخصی است که در عین حال در بین همه رئوس هدف با آن خصوصیات به ریشه نزدیک‌ترین باشد، جستجوی سطح اول به‌صورت غیر خلاق عمل می‌کند. بدین ترتیب که الگوریتم هر دفعه همه همسایه‌های یک رأس را بازدید کرده و سپس به سراغ رأس بعدی می‌رود و بنابراین، گراف سطح به سطح پیمایش خواهد شد. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که احتمالاً همه گراف پیمایش شود.



شکل ۴) ترتیب پیمایش رئوس در جستجوی سطح اول

حال اگر در پایان پیمایش رئوس، رأسی از گراف باقی نمانده بود، پس آن گراف یکپارچه بوده و پتانسیل تشکیل جزیره را دارد.

کمینه کردن اختلال شارش توان خطوط

هر دو تابع حداقل توان نامتعادل و حداقل اختلال جریان توان که به ترتیب با رابطه (۱۱) و رابطه (۱۲) تعریف می‌شوند، می‌توانند به‌عنوان توابع هدف جزیره سازی کنترل شده مورد استفاده قرار گیرند. هر تابع هدف راه‌حل و مزایای متفاوتی دارد [۱۶]، [۱۷]:

$$\min_{V_{G_1}, V_{G_2} \subseteq V_G} \left(\sum_{i \in V_{G_1}, j \in V_{G_2}} P_{ij} \right) \quad (11)$$

1) Breadth-first Search

$$\min_{V_{G_1}, V_{G_2} \subseteq V_G} \left(\sum_{i \in V_{G_1}, j \in V_{G_2}} |P_{ij}| \right) \quad (12)$$

که در آن، مقدار توان اکتیو در خط انتقال بین گره‌های i و j را نشان می‌دهد.

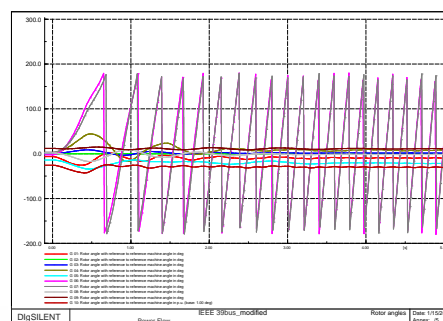
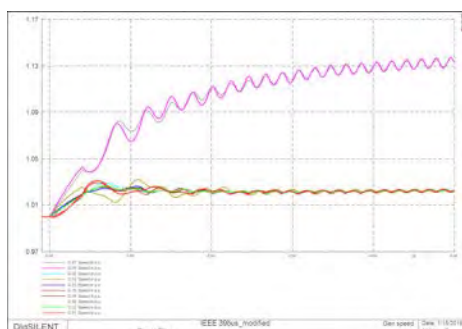
به عنوان مثال، استفاده از حداقل اختلال شارش توان به عنوان تابع هدف رابطه (۱۲)، جزایری را ایجاد می‌کند که با الگوی شارش توان حالت قبل از جزیره سازی کمترین تفاوت را دارد. این ویژگی تابع هدف، پایداری حالت گذرای جزایر را بهبود می‌بخشد، امکان اضافه بار خطوط انتقال درون جزیره را کاهش می‌دهد و ادغام مجدد احتمالی جزیره‌ها را تسهیل می‌نماید [۷].

در این مطالعه، کمینه کردن شارش توان راکتیو نیز وارد تابع هدف می‌شود تا سناریوهای حاصل از نظر پایداری ولتاژ نیز بهینه باشند. چون اگر انتقال توان راکتیو بین جزایر کمینه شود، می‌توان نتیجه گرفت که کمبود توان راکتیو در جزیره‌ها نیز کمینه می‌شود و پایداری ولتاژ بهینه‌ترین حالت خود را دارد. جهت در نظر گرفتن تلفات خط از میانگین تلفات دو طرف خط استفاده می‌شود. در نهایت، تابع هدف نهایی استفاده شده در این مطالعه به صورت رابطه (۱۳) زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min} (|P_{ij}| + |Q_{ij}|) = \left(\frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} + \frac{|Q_{ij}| + |Q_{ji}|}{2} \right) \quad (13)$$

شبیه‌سازی الگوریتم

الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB تهیه و نتایج نهایی آن نیز در نرم‌افزار صنعتی DigSilent بررسی شده است. از شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE به عنوان شبکه آزمون استفاده شده که اطلاعات آن را می‌توان در مرجع [۴] یافت. در شبکه ۳۹ شینه به عنوان اغتشاش اولیه، یک خطای سه فاز در شین ۱۶ در ثانیه صفر به مدت ۰,۴ ثانیه اعمال شده است که همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، این اغتشاش باعث از دست رفتن سنکرونیزم شبکه می‌شود.



ب) سرعت روتور (ω) ژنراتورها

الف) زاویه روتور (δ) ژنراتورها

شکل ۵) زاویه و سرعت روتور ژنراتورها بعد از اعمال خطای سه فاز به شین ۱۶ شبکه ۳۹ شینه (خروجی نرم افزار DigSilent)

با پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی برای جزیره سازی شبکه ۳۹ شینه IEEE در حالت دو جزیره ای درمی یابیم که ژنراتورهای {۳۶ و ۳۵ و ۳۴ و ۳۳} و {۳۹ و ۳۸ و ۳۷ و ۳۲ و ۳۱ و ۳۰} باهم هم نوا بوده و نتیجه تخصیص شین های بار به این دو گروه توسط الگوریتم ژنتیک مطابق جدول (۱) است.

جدول ۱) گروه بندی شین های شبکه ۳۹ شینه IEEE با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

گروه بندی شین های شبکه ۳۹ شینه	
گروه ۱	۳۶ و ۳۵ و ۳۴ و ۳۳ و ۳۲ و ۳۱ و ۳۰ و ۲۹ و ۲۸ و ۲۶ و ۲۵ و ۲۲ و ۲۱ و ۲۰ و ۱۹ و ۱۶ و ۱۵
گروه ۲	۳۹ و ۳۸ و ۳۷ و ۳۲ و ۳۱ و ۳۰ و ۲۹ و ۲۸ و ۲۶ و ۲۵ و ۱۱ و ۱۰ و ۹ و ۸ و ۷ و ۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱

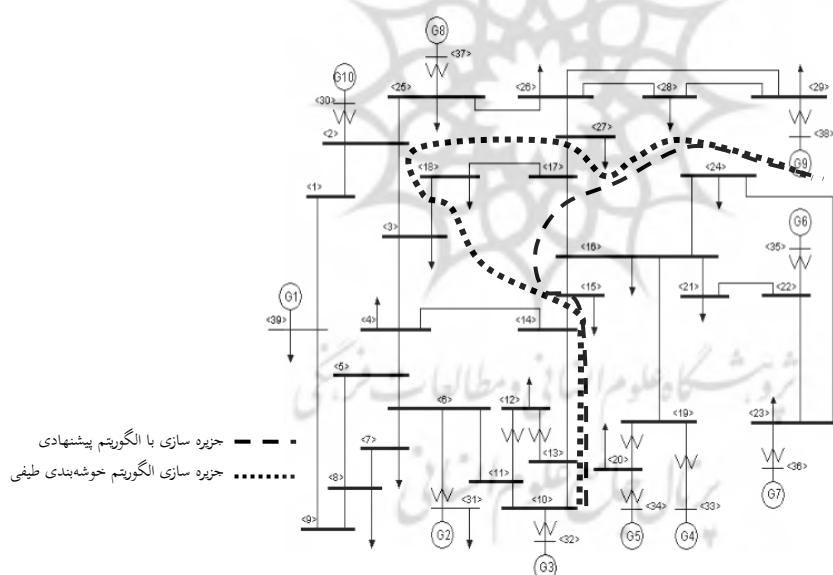
طبق نتیجه الگوریتم جستجوی ژنتیک خطوط ۱۴-۱۵ و ۱۶-۱۷ باید قطع شوند.

باهدف مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج آن با الگوریتم خوشه بندی طیفی که از بهینه ترین مطالعات انجام شده تاکنون است، مقایسه شده است. نتایج جزیره بندی در حالت دو جزیره ای مطابق الگوریتم خوشه بندی طیفی مطابق جدول (۲) خواهد بود.

جدول ۲) گروه‌بندی شین‌های شبکه ۳۹ شینه IEEE با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی طیفی

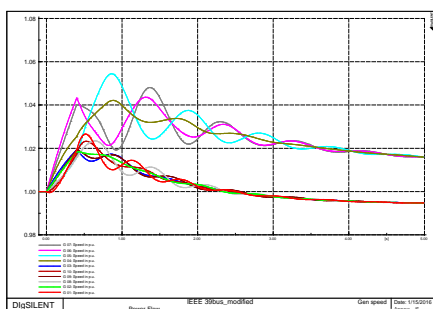
گروه‌بندی شین‌های شبکه ۳۹ شینه	
گروه ۱	۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۳ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶
گروه ۲	۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹

مطابق نتایج این الگوریتم خطوط ۱۸-۳، ۱۵-۱۴ و ۱۷-۱۶ باید قطع شوند که مقایسه نتایج دو روش در شکل (۵) ارائه شده است.

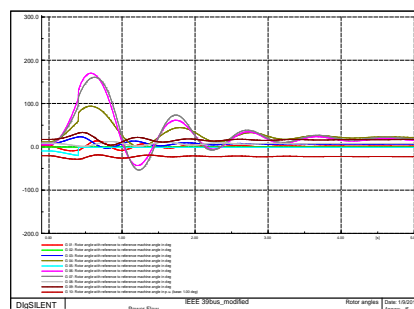


شکل ۶) نتایج جزیره سازی با الگوریتم پیشنهادی و خوشه‌بندی طیفی در شبکه ۳۹ شینه IEEE

در هیچ‌یک از مقالات ارائه شده تحلیل جامعی از رفتار جزیره‌ها پس از جداسازی ارائه نشده است. از آنجاکه عملاً اجرای جزیره سازی نیازمند قطع خطوط خواهد بود، خود این امر اغتشاش بزرگی به شبکه اعمال خواهد کرد. برای این منظور مدل دینامیکی و استاتیکی شبکه در نرم‌افزارهای DigSilent و MATPOWER ساخته شده و تحلیل جامعی از نظر پایداری دینامیکی و ولتاژی انجام شده است. نتایج تحلیل دینامیکی روش پیشنهادی و روش خوشه‌بندی طیفی در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

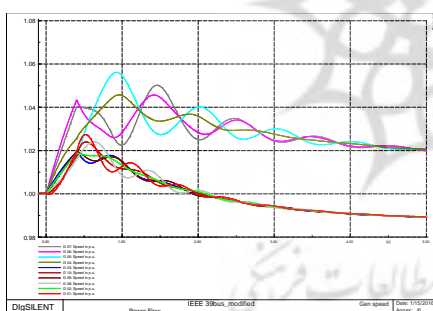


(ب) سرعت روتور (ω) ژنراتورها

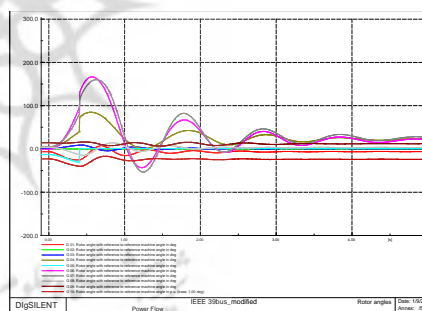


(الف) زاویه روتور (δ) ژنراتورها

شکل ۷) زاویه و سرعت روتور ژنراتورها بعد از اعمال سناریوی جزیره سازی حاصل از الگوریتم پیشنهادی در شبکه ۳۹ شینه



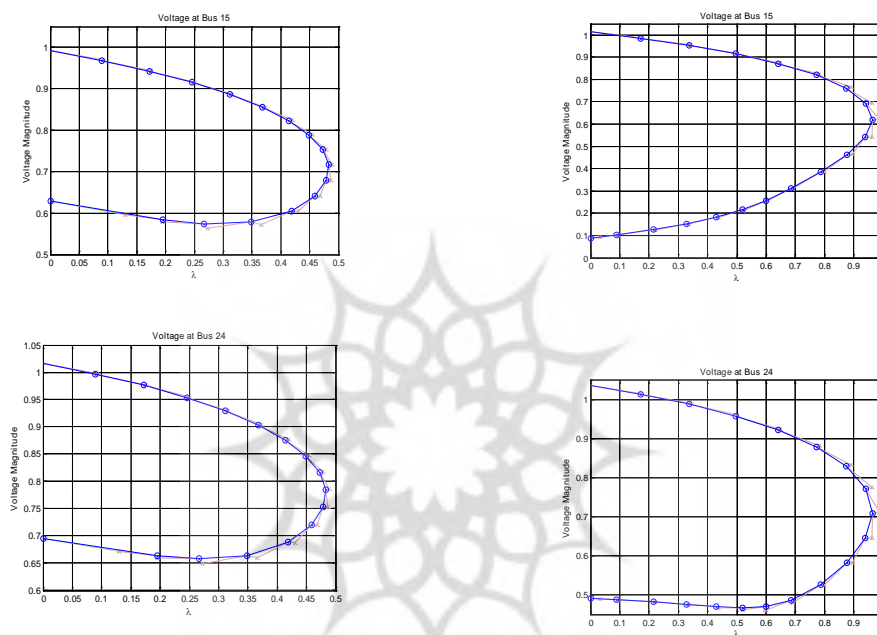
(ب) سرعت روتور (ω) ژنراتورها



(الف) زاویه روتور (δ) ژنراتورها

شکل ۸) زاویه و سرعت روتور ژنراتورها بعد از اعمال سناریوی جزیره سازی حاصل از الگوریتم خوشه بندی طیفی در شبکه ۳۹ شینه

همان طور که در شکل های (۷) و (۸) مشاهده می شود، هر دو سناریو جزایری پایدار تشکیل داده اند و نوسانات ژنراتورها در دو جزیره میرا می شوند. اما از نظر پایداری ولتاژ، نتایج حاصل از دو الگوریتم کاملاً متفاوت است. برای ارزیابی حد پایداری ولتاژ از روش پخش بار متوالی استفاده شده است و منحنی های پایداری ولتاژ در دو شینه ۱۵ و ۲۴ در دو الگوریتم استخراج شده است که نتایج آن در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، واضح است که جزایر حاصل از الگوریتم پیشنهادی از نظر پایداری ولتاژ به مراتب در شرایط بسیار بهتری نسبت به جزایر پیشنهادی روش خوشه بندی طیفی قرار دارند که این امر حاصل تعریف تابع هدف جدید (رابطه ۱۳) و استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی هوشمند است که قابلیت انعطاف بالایی دارد.



ب) ارزیابی پایداری ولتاژ در الگوریتم خوشه‌بندی طیفی

الف) ارزیابی پایداری ولتاژ در الگوریتم پیشنهادی

شکل ۹) منحنی پایداری ولتاژ در سناریوهای حاصل از الگوریتم ژنتیک و خوشه‌بندی طیفی

نتیجه‌گیری

مطابق نتایج بدست‌آمده، پایداری ولتاژ در روش جستجوی ژنتیک نسبت به الگوریتم خوشه‌بندی طیفی پیشرفت عمده‌ای داشته است، به طوری که نقطه کار سیستم در جزایر تشکیل‌شده به وسیله الگوریتم ژنتیک از نقطه شکست ولتاژ فاصله بسیار بیشتری نسبت به الگوریتم خوشه‌بندی طیفی دارند که این مساله موجب افزایش حاشیه امنیت بهره‌برداری سیستم می‌شود و با افزایش بار در جزایر، آنها را دچار فروپاشی ولتاژ نمی‌کند. به دلیل ماهیت روش خوشه‌بندی طیفی، در این روش امکان تعریف توابع هدف مختلف وجود ندارد درحالی‌که قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک این امکان را فراهم می‌کند که هر نوع تابع هدفی را به‌عنوان تابع برازندگی تعریف کرد.

یکی از مهم‌ترین معایب الگوریتم جستجوی ژنتیک، مدت‌زمان جستجوی آن است که کاربرد آن را برای جزیره‌سازی آنالین شبکه قدرت با محدودیت مواجه می‌سازد. در این مقاله، روشی برای کاهش فضای جستجو ارائه شده که البته

می‌توان آن را توسعه داد. برای مثال، با معادل‌سازی ژنراتورهای هم‌نوی نزدیک به هم به یک ژنراتور، می‌توان تا حدود زیادی از شین‌ها و خطوطی که در محاسبات تشکیل جزیره بی‌تأثیر هستند، صرف‌نظر کرد و سرعت الگوریتم را افزایش داد و یا می‌توان بخش‌هایی از الگوریتم را به صورت آفلاین پیاده‌سازی کرد (به عنوان مثال، تشخیص گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری) اما با توجه به آنکه با توسعه فناوری سیستم‌های محاسباتی، این مشکل براحتی مرتفع خواهد شد، مزایای این الگوریتم در لحاظ کردن توابع هدف و قیود متنوع بر معایب آن برتری دارد.

منابع

- [۱] کرباسی، علیرضا. ترکمان، نیوشا. صابر فتاحی، لیدا. (۱۳۹۴) امنیت انرژی: مشکلات جدید سیستم‌های بزرگ، نشریه انرژی ایران ۵۱-۹۶، شماره ۲۴، ۹: ۵۰-۳۶.
- [۲] نظری، حسام. کاظمی، عالییه. سعدآبادی، علی اصغر. (۱۳۹۴) کاربرد الگوریتم ژنتیک در انتخاب بهترین سناریو برای پیش بینی تقاضای انرژی مصرف خانگی تجاری در ایران، نشریه انرژی ایران، شماره ۱۸:۹۲، ۲-۷۵.
- [3] Aghamohammadi M. R. and A. Shahmohammadi, "Intentional islanding using a new algorithm based on ant search mechanism," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 35, pp. 138-147, 2012.
- [4] Athay T., R. Podmore, and S. Virmani, "A practical method for the direct analysis of transient stability," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 573-584, 1979.
- [5] Chow J. H., "Time-Scale Modeling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems," vol. 46, 1982.
- [6] Golari M., N. Fan, and J. Wang, "Large-scale stochastic power grid islanding operations by line switching and controlled load shedding," *Energy Systems*, pp. 1-21, 2016.
- [7] Henner V. E., "A network separation scheme for emergency control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 2, pp. 109-114, 4// 1980.
- [8] Lamba S. and R. Nath, "Coherency identification by the method of weak coupling," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 7, pp. 233-242, 1985.
- [9] Lei D., F. M. Gonzalez-Longatt, P. Wall, and V. Terzija, "Two-Step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 75-84, 2013.

- [10] LIN Z., F. WEN, J. ZHAO, and Y. XUE, "Controlled islanding schemes for interconnected power systems based on coherent generator group identification and wide-area measurements," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, pp. 440-453, 2016.
- [11] Liu W., L. Liu, and D. Cartes, "Angle modulated particle swarm optimization based defensive islanding of large scale power systems," in *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica'07. IEEE, 2007*, pp. 1-8.
- [12] Qiao Y., C. Shen, J. Wu, and Q. Lu, "The Integrated simulation platform for islanding control of large-scale power systems: theory, implementation and test results," in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006*, p. 8 pp.
- [13] Sun K., K. Hur, and P. Zhang, "A new unified scheme for controlled power system separation using synchronized phasor measurements," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1544-1554, 2011.
- [14] Sun K., D.-Z. Zheng, and Q. Lu, "Searching for feasible splitting strategies of controlled system islanding," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 153, pp. 89-98, 2006.
- [15] Sun K., D.-Z. Zheng, and Q. Lu, "A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 389-399, 2005.
- [16] Sun K., D.-Z. Zheng, and Q. Lu, "Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 912-923, 2003.
- [17] Sung-Kwan J., L. Chen-Ching, L. E. Jones, and C. Jong-Woong, "Coherency and aggregation techniques incorporating rotor and voltage dynamics," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1068-1075, 2004.
- [18] Wang X., "Slow coherency grouping based islanding using minimal cutsets and generator coherency index tracing using the continuation method," Ph.D. dissertation, Iowa State Univ, Ames, 2005.
- [19] Wang X. and V. Vittal, "System islanding using minimal cutsets with minimum net flow," in *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, 2004*, pp. 379-384.
- [20] Zhao Q., K. Sun, D.-Z. Zheng, J. Ma, and Q. Lu, "A study of system splitting strategies for island operation of power system: a two-phase method based on OBDDs," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 1556-1565, 2003.