

الگوریتمی جدید برای جزیره‌بندی کنترل شده سیستم‌های قدرت مبتنی بر خوشبندی طیفی مقید

کاووه نادری^۱ علی حسامی نقشبندی^۲

۱-دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی- دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

ka.naderi@eng.uok.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی- دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

hesami@uok.ac.ir

چکیده: در این مقاله الگوریتمی جدید مبتنی بر خوشبندی طیفی مقید به منظور جزیره‌بندی کنترل شده سیستم‌های قدرت ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی توابع هدف اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار- تولید در جزیره‌ها را کمینه می- کند و به ترتیب منجر به تضمین پایداری گذرا در جزیره‌ها و انجام حداقل اقدامات لازم در رابطه با بازپیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف بار می‌گردد. این الگوریتم کلیه فضای حل را جستجو کرده و ضمن امکان سنجی تمامی کاندیداهای طرح جزیره‌بندی، طرح‌های عملی را شناسایی و سپس مورد بهینه را گزینش و اجرا می‌نماید، به علاوه به منظور اجتناب از وقوع جزیره‌بندی غیر عمدى، قابلیت تشخیص و تفکیک اغتشاشات مهم و غیرمهم را داشته و ضمن ایجاد حداقل تعداد جزیره‌ها، زمان و هزینه اجرای طرح جزیره‌بندی را کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی‌های زمانی انجام شده بر روی سیستم IEEE ۳۹ شینه در محیط نرم- افزاری MATLAB و به وسیله جعبه‌بازار PST نشان‌دهنده کارآیی روش پیشنهادی می‌باشد.

کلیدی: جزیره‌بندی کنترل شده، خوشبندی طیفی مقید، همنوایی ژنراتورها، اختلال در شارش توان، عدم تعادل بار- تولید، کات ست‌های گراف شبکه.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی حسامی نقشبندی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- سنندج- بلوار پاسداران- دانشگاه کردستان- دانشکده مهندسی- گروه مهندسی برق



۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی نزدیک به حاشیه امنیتی و حد پایداری شان بهره‌برداری می‌شوند. در مواجه با چنین شبکه‌ای رخداد یک پیشامد نسبتاً شدید، سیستم را از حالت پایدار خارج می‌نماید و در صورت فقدان اقدامات کنترلی مناسب، کل یا بخش عمده‌ای از سیستم دچار خاموشی شود. هنگامی که از دست رفتن یکپارچگی سیستم قدرت درپی وقوع اغتشاشات بزرگ غیرقابل اجتناب باشد، جزیره‌بندی عمدی می‌تواند تبعات رخدادها و هزینه خاموشی‌ها را محدود نماید.

جزیره‌بندی کنترل شده، آخرین راه حل بعد از رخداد اغتشاشات بزرگ در سیستم قدرت ناحیه وسیع می‌باشد. بهمنظور پیشگیری از فروپاشی غیرعمد شبکه انتقال، مرکز کنترل آن را طی فرآیندی کنترل شده تفکیک می‌نماید، بهطوری که بارهای حائز اهمیت حفظ و ضمن قابلیت اطمینان لازم، توسط ژنراتورهای محلی پایدار تغذیه می‌شوند.

اخیراً یک استراتژی جزیره‌بندی جدید با استفاده از داده‌های به-هنگام واحدهای اندازه‌گیری فازوری بر روی شبکه قدرت مرکزی چین اعمال شده است [۱]، که بهوسیله معیار انرژی پتانسیل شاخه، شرایط خارج از گام را تشخیص می‌دهد. الگوریتم‌های جستجوی اول عمق و اول پهنا بهمنظور یافتن حل جزیره‌بندی با گروههای ژنراتوری هم‌نوا با حداقل عدم تعادل توان در [۲] استفاده شده است. روش خوشه‌بندی طیفی و روش‌های K -means در [۳] و [۴] برای یافتن حل جزیره‌بندی جهت حداقل کردن اختلال در شارش توان پیشنهاد شده است که هر دوی این روش‌ها راندمان محاسباتی بالایی دارند اما مسئله هم‌نوا ای ژنراتورها را درنظر نمی‌گیرند [۵]، سادگی پیاده‌سازی و سرعت از مزایای این الگوریتم است، حال آنکه اهمیت انتخاب نقاط اولیه و حساسیت به نویز از معاوی این روش‌ها می‌باشد. نادیده گرفتن هم نوا ای ژنراتورها به معنای این است که پایداری جزیره‌ها تضمین نخواهد شد. در [۸]-[۶] یک الگوریتم خوشه‌بندی طیفی دومرحله‌ای جدید ارائه شده است که گروههای ژنراتوری در آن بهوسیله خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه تعیین می‌شوند. این الگوریتم در واقع یک مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن اختلال در شارش توان بوده که باستی حداقل گردد و قید مهم لحاظ شده در مسئله، موضوع هم‌نوا ای ژنراتورهای موجود در یک جزیره است، عیب این روش عدم توجه به تعادل توان در جزیره‌ها و اقدامات لازم در رابطه با

بازپیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف بار می-باشد. تاکنون مطالعاتی در رابطه با کاربرد سیستم‌های اندازه‌گیری فازوری بهمنظور کشف و تعیین جزیره‌بندی سیستم‌های قدرت بهم پیوسته و بزرگ انجام شده است [۸]، [۹]. علاوه بر مکان، زمان مناسب اجرای طرح جزیره بندی موضوع مهم دیگری است که می‌تواند به-صورت خارج از خط، برخط و به هنگام مطالعه شود؛ این موضوع در

مرجع [۱۱] با استفاده از روش فازی-عصبی و ضمن توجه به قيد هم-نوای آرام و نیز در [۱۲] با رویکرد روش‌شناسی بر اساس ریسک بررسی شده است. استفاده از پیش‌بینی شرایط خارج از گام در مورد نوسانات بین ناحیه‌ای راه‌حلی دیگر است که تاکنون در ارتباط با زمان مناسب طرح جزیره‌بندی مطالعه شده است [۱۳]. از طرف دیگر در رابطه با تشخیص خطوط انتقالی که در هنگام اجرای طرح جزیره‌بندی باستی قطع گردند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله نگاشت خود-سازمان، ازدحام ذرات و ... راهکارهایی موثر به‌نظر می‌رسند [۱۴]. جزیره‌بندی کنترل شده بر اساس ملاحظات مربوط به تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در مرجع [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته است و همچنین در [۱۶] یک الگوریتم جزیره‌بندی بر اساس گراف کاوهش یافته چند-سطحی بهمنظور جزیره‌بندی کنترل شده پیشنهاد شده است. اخیراً مطالعاتی در ارتباط با ترکیب مفاهیم نظریه گراف و هم‌نوای آرام، صورت گرفته است [۱۷]. با مروری بر روش‌های مختلف جزیره‌بندی، مبتنی بر درخت‌های تصمیم، خوشه‌بندی طیفی و اتصالات ضعیف مزايا و معایب هر کدام از روش‌ها مشخص می‌شود [۱۸] و با توجه به شرایط شبکه قدرت می‌توان طرح مناسب را انتخاب کرد.

در این مقاله یک الگوریتم جدید بر اساس مفهوم هم‌نوايی آرام ژنراتورها مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید پیشنهاد شده است که در آن قید اصلی مسئله، هم‌نوايی مجموعه ژنراتورهای واقع در یک جزیره بوده و توابع هدфи که در فرآيند اين الگوریتم كمینه می‌شوند، اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها می‌باشند. اين تحقیق ضمن حل يك مسئله بهینه‌سازی دو تابع هدفه، تمامی فضای حل را جهت یافتن کاندیداهای ممکن و بهینه طرح جزیره‌بندی جستجو می‌کند. تمامی ترکیبات ممکن بردارهای ویژه را در نظر گرفته و با توجه به توابع هدف و قید هم‌نوايی ژنراتور و دو قید دیگر (هم‌سايگي و مجاورت) ترکیبات بهينه را می‌يابد. علاوه بر موارد فوق الذكر، دو قيد همسايگي و مجاورت علاوه بر قيد هم‌نوايي آرام که از مفاهيم مربوط به نظریه گراف و خوشه‌بندی استخراج شده و در اينجا در بحث جزيره بندی کنترل شده استفاده شده‌اند. در ادامه سناريوهای مختلفی نيز بررسی خواهند شد.

ساير بخش‌های اين مقاله بدين شرح سازماندهی شده‌اند: در بخش دوم مقدماتی از نظریه گراف‌ها، مفهوم هم‌نوايی ژنراتورها و خوشه‌بندی طیفی مقید آورده شده است. سپس الگوریتم پیشنهادی در بخش سوم به تفصیل معرفی و تشریح شده و اجزاء سیستم قدرت شامل ژنراتورها و خطوط انتقال بهمنظور مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی مدل‌سازی می‌شوند. كارآمدی الگوریتم پیشنهادی با انجام شبیه سازی های زمانی تحت شرایط عادی و خطدار بر روی شبکه ۳۹ شیوه IEEE در محیط نرم‌افزاری متلب و همچنین جعبه ابزار PST در بخش چهارم بررسی شده است. بخش پنجم نيز به جمع‌بندی و نتیجه‌گيری اختصاص یافته است.

۲- مفاهیم اساسی

۲-۱- ژنراتورهای همنوا

بر اساس معادله نوسان خطی شده کلاسیک ژنراتور، ضمن روند نظر از میرایی، مدل دینامیکی خطی مرتبه دوم یک سیستم قدرت با m ژنراتور را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت [۲۱]:

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

که در آن $X = [\Delta\delta_1, \dots, \Delta\delta_m]^T$ و $\Delta\delta$ انحراف زاویه ی ژنراتور از نقطه‌ی کار حالت ماندگار δ می‌باشد 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 زیرماتریس A_{11} و A_{22} که زیرسیستم‌های G_1 و G_2 را نشان می‌دهند. این روند در رابطه آورده شده است [۲۲]:

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

مجموع نُرم‌های فربنیوس قطرهای فرعی زیر ماتریس‌های A_{11} و A_{22} ، می‌تواند برای تعریف اتصال دینامیکی S بین زیرسیستم‌های G_1 و G_2 استفاده شود [۲۲]:

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

در این سناریو اگر فرض شود که تعادل توان را کتیو با جبران سازه‌ای محلیقابل کنترل است، می‌توان اثرات توان را کتیو و دامنه‌ی ولتاژ شینه را نادیده گرفت. بنابراین می‌توان معادله (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

که در آن $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}}$ ضرایب سنکرون‌سازی هستند و H_i ثابت اینرسی i این ژنراتور می‌باشد. بنابراین، مسئله‌ی افتتگردهای ژنراتوری همنوا معادل است با مسئله‌ی بهینه‌سازی یافتن ضعیفترین اتصال دینامیکی بین گروههای مختلف ژنراتورها:

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

۲-۲- توابع هدف اختلال در شارش توان و عدم تعادل بار-تولید

هر دو تابع هدف اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها، می‌توانند به عنوان توابع هدف جزیره‌بندی کنترل شده مورد استفاده قرار بگیرند که هر کدام مزايا و معایب خاص خود را دارند [۱۹، ۲۰]، که به ترتیب با معادلات (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\sum_{i \in V_1, j \in V_2} P_{ij} \right) \quad (6)$$

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \right) \quad (7)$$

که در آن P_{ij} مقدار شارش توان اکتیو در خط انتقال بین گره i و j را نشان می‌دهد. در نظر گرفتن اختلال در شارش توان خطوط انتقال به عنوان تابع هدف، جزایری را ایجاد می‌کند که با الگوی توان-جریان-حالات بدون اغتشاش کمترین تفاوت را دارند. این ویژگی تابع هدف در مورد هریک از جزیره‌ها پایداری حالت گذرا را بهبود بخشیده، امکان اضافه‌بار خطوط انتقال را کاهش داده و امر بازگردانی سیستم را به حالت تعادل بار-تولید در جزیره‌ها به عنوان تابع هدف، باعث ایجاد جزایری با تعادل بار-تولید متوازن شده که این ویژگی، هزینه کنترل تولید و سطح بار-تولید را کاهش می‌دهد. این روند در رابطه با حذف بار در هر یک از جزیره‌ها را به حداقل می‌رساند. از آنجایی که پایداری سیستم در پی جزیره‌بندی بسیار حائز اهمیت است و جزیره‌ای با حاشیه پایداری منفی و توازن بار-تولید مناسب، متلاشی خواهد شد اما یک جزیره با حاشیه پایداری مثبت و تعادل بار-تولید ضعیف را می‌توان از طریق تزریق توان پایدار نمود، لذا بایستی از نقطه نظر طراح، پایداری گذرا بیشتر از تعادل بار-تولید مورد توجه قرار گیرد.

۳- نظریه گراف

هر گراف G زوج مرتبی مانند (V, E) است که در آن V مجموعه‌ای متناهی و ناتنهی است و E زیرمجموعه‌ای از تمام زیرمجموعه‌های دو عضوی V می‌باشد. اعضای V را رأس‌های G و اعضای E را یال‌های G می‌نامیم [۲۵]. گراف دوبخشی گرافی است که بتوان مجموعه رئوس آن را به دو مجموعه‌ی X و Y چنان افزار نمود که هر یال آن دارای یک انتهای در X و یک انتهای در Y باشد، به گونه‌ای که هیچ دور ایسی در X یا در Y با هم مجاور نباشد. یال‌ها بر دو نوع ساده و جهت دار هستند، که هر کدام در جای خود کاربردهای بسیاری دارد. جهت دار کردن یک گراف یعنی نسبت دادن جهت به هر یال این گراف است. هرگاه بین دو رأس متمایز از یک گراف بیش از یک یال وجود داشته باشد، آن را یک گراف چندگانه می‌گوییم. منظور از افزار یک مجموعه چون A به چند مجموعه، تقسیم مجموعه‌ی A به چند مجموعه ناتنهی دیگر است که باهم اشتراکی نداشته باشند و اجتماع همه آن‌ها برابر مجموعه A باشد. در اینجا اگر V به عنوان مجموعه رئوس باشد افزار V به دو مجموعه ناتنهی X و Y به این صورت است که:

$$X \cup Y = V, \quad X \cap Y = \emptyset \quad (8)$$

۴- قواعد الگوریتم خوشبندی طیفی

تجزیه و تحلیل خوشبندی، روشی برای گروه‌بندی داده‌ها یا مشاهدات با توجه به شباهت یا درجه نزدیکی آن‌ها است. نخست معیار شباهت یا



خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه شود. این مسئله سبب تعریف برش نرمال ($Ncut$) [۳۰] می‌گردد-

$$Ncut(V_1, V_2) = \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_1)} + \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_2)} \quad (10)$$

که در آن $D_i = \sum_{v \in V_i} D_i$, مجموع همه وزن‌های گره‌های V_i می‌باشد. $weig(V_1)$ مشابه همین تعریف در مورد G_2 وجود دارد. استفاده از وزن گره‌ها به عنوان شرط تعادل، احتمال ایجاد یک زیرگراف با وزن‌های خیلی کوچک را ضعیف می‌کند. روش خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه می‌تواند برای تقسیم گراف با $Ncut$ کمینه استفاده شود. برای موارد دو بخشی، این امر را می‌توان با مراحل زیر به دست آورد [۳۰] و [۳۱]:

(۱) محاسبه‌ی دو بردار ویژه اول v_1, v_2 برای مسئله کلی $.Lv = \lambda Dv$

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

(۳) تقسیم گره‌های R^2 به خوشه‌های c_1, c_2 با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند $k-means$.

۳- مدلسازی و معرفی الگوریتم پیشنهادی

در مرحله اول الگوریتم، به کمک روش پیشنهادی ژنراتورهای همنوا گروه‌بندی می‌شوند. سپس این گروه از گره‌های ژنراتوری به عنوان قید برای مرحله دوم الگوریتم جزیره‌بندی کنترل شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس در مرحله دوم از الگوریتم، گراف استاتیکی G_s با استفاده از داده‌های توان-جزیان ساخته می‌شود. این گراف شامل همه گره‌ها و وزن کمان‌هایی است که به عنوان مقدار مطلق توان اکتیو مبادله شده بین گره‌های i و j تعریف شده‌اند. سپس گره‌های با استفاده از خوشه‌بندی طیفی مقید گروه‌بندی خواهند شد تا مسئله بهینه‌سازی مطرح شده را حل کنند. روند نمای الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳-۱- گراف دینامیکی

گروه‌های ژنراتوری همنوا در سیستم قدرت در نظر گرفته شده را می‌توان با تشکیل یک گراف که نشان‌دهنده اتصال دینامیکی بین گره‌های ژنراتوری است (گراف دینامیکی)، به دست آورد. سپس خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه جهت گروه‌بندی گره‌های ژنراتوری براساس دینامیک اتصالات شان به این گراف اعمال می‌شود. در اینجا قید اصلی مسئله شناسایی ژنراتورهای هم نوا است.

گراف دینامیکی $G_D(V_D, E_D, W_D)$ را می‌توان برای m گره ژنراتوری با تعریف ماتریس لابلسین L_D زیر تشکیل داد [۸]:

نزدیکی داده‌ها تعیین می‌گردد، در ادامه روش تجزیه و تحلیل خوشه‌ای انتخاب شده و در مورد تعداد خوشه‌ها تصمیم‌گیری می‌شود، در نهایت نتایج گروه‌بندی تفسیر می‌شود. از جمله روش‌های خوشه‌بندی ناحیه‌ای می‌توان به $K-medoids$ و $K-means$ اشاره کرد.

الگوریتم $K-means$ فضای مسئله را به K زیر مجموعه غیرتھی تقسیم کرده و سپس نقطه میانگین خوشه‌ها را محاسبه می‌کند، هر نقطه به خوشه‌ای که نزدیکترین نقطه میانگین را به آن دارد اختصاص داده می‌شود. سادگی پیاده‌سازی و سرعت از مزیت‌های این الگوریتم است [۲۶، ۲۷]. الگوریتم $K-medoids$ نقاطی را که در وسط هر خوشه هستند را به عنوان مرکز خوشه در نظر می‌گیرد. این الگوریتم پیچیدگی محاسباتی بالاتری دارد اما نسبت به نویز مقاوم‌تر بوده و در مورد پایگاه‌های داده‌ای بزرگ عملکرد مناسب‌تر دارد [۲۷، ۲۸].

در این بخش، دو نوع خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه و غیرنرمالیزه معرفی می‌شوند:

۴-۱- خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه

خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، بر اساس ماتریس لابلسین L ، گره‌ها را بهدو زیرمجموعه تقسیم می‌کند. این ماتریس برای گراف G به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L = D - W \quad (9)$$

که در آن D یک ماتریس قطری است که عناصر روی قطر اصلی آن d_{ii} مجموع وزن همه کمان‌های متصل به گره i می‌باشند. با این تعریف، ماتریس وزن کمان‌ها (W) و ماتریس لابلسین (L) هر دو برای هر گراف غیرجهت دار، متقابل هستند.

الگوریتم خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، برای موارد دو بخشی، می‌تواند با استفاده از مراحل زیر اجرا شود:

محاسبه دو بردار ویژه اول v_1, v_2 برای ماتریس L .

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

(۳) تقسیم گره‌های R^2 به خوشه‌های c_1, c_2 با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند $k-means$.

[۲۹]

متاسفانه، برای دو بخشی‌کردن گراف‌ها استفاده از خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، اغلب از روش ساده‌ی جدا کردن یک گره از بقیه گراف استفاده می‌شود، واضح است که این راه حل برای مسائل جزیره‌سازی قابل قبول نمی‌باشد.

۴-۲- خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه

این روش از مجموع وزن گره‌های موجود در هر زیرگراف، به عنوان شرط تعادل استفاده می‌کند تا مانع از وقوع مشکل مطرح شده در

$$M = \text{diag}(2H_1 / \omega_0, 2H_2 / \omega_0, \dots, 2H_m / \omega_0) \quad (13)$$

که در آن M ماتریس اینرسی است.

بنابراین اولین مرحله از الگوریتم به صورت زیر اجرا می‌شود:

(۱) تشکیل گراف دینامیکی G_D که فقط شامل گره‌های ژنراتوری می‌باشد. وزن کمان‌های این گراف نیز با $\partial P_{ij} / \partial \delta_{ij}$ برابر است.

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

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

(۴) تقسیم گره‌های R^2 به زیرگروههای V_{G1} و V_{G2} با استفاده از k -medoids

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

۳-۲- گراف استاتیکی

در این مرحله الگوریتم ضمن در نظر گرفتن قید گروههای همنوای ژنراتوری و گراف دینامیکی به دست آمده از مرحله قبل، با هدف کمینه کردن اختلال شارش توان خطوط انتقال، با استفاده از خوشبندی طیفی مقید گره‌های غیرتولیدی سیستم را خوشبندی نموده و هریک را براساس دستور K -medoids به گره‌های ژنراتوری اختصاص می‌دهد و در نتیجه گراف استاتیکی سیستم قدرت را به دست می‌آورد. حداقل کردن تابع هدف اول یعنی اختلال در شارش توان خطوط انتقال ضمن حفظ گروههای همنوای ژنراتوری مسئله اصلی در این مرحله است.

گراف استاتیکی (V_s, E_s, W_s) را می‌توان برای سیستم قدرتیبا n گره با استفاده از داده جریان- توان تشکیل داد تا به کمک آن تبادل

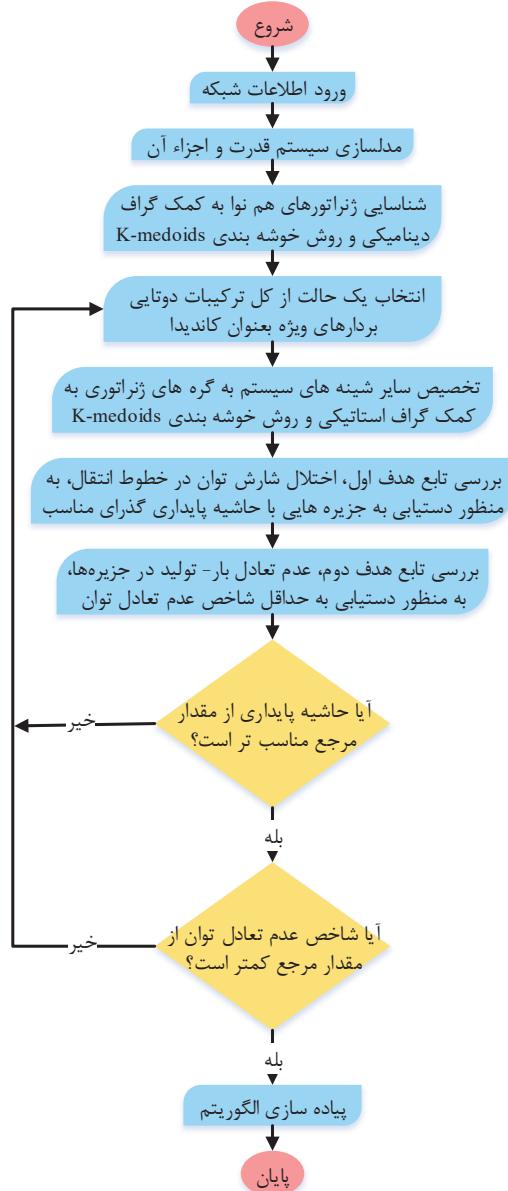
توان اکتیو بین گره‌ها را بتوان توصیف نمود.

برای تولید گراف بدون جهت متقارن که برای کاربردهای خوشبندی طیفی نیاز است، باید موضوع تلفات درونسیستم را نیز در نظر گرفت. برای تضمین متقارن بودن ماتریس W_s ، المان‌های آن به صورت $|P_{ij}| + |P_{ji}| / 2$ تعریف می‌شوند.

ماتریس لایاسین L_s برای گراف استاتیکی G_s را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$[L_s]_{ij} = \begin{cases} - \sum_{l=1, l \neq i}^n [L_s]_{lj} & \text{if } i = j \\ \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} - |V_i| |V_j| B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (14)$$

که در آن B_{ij} ماتریس حاصل از درایه‌های موهومی ماتریس ادمیتانس شبکه است. شایان ذکر است که گروههای ژنراتوری به دست آمده در مرحله اول، به عنوان قیدهایی در مرحله دوم الگوریتم لحاظ می‌شوند [۷].



شکل(۱): روندnamای الگوریتم پیشنهادی

$$[L_D]_{ij} = \begin{cases} - \sum_{l=1, l \neq i}^m [L_D]_{lj} & \text{if } i = j \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} = -|V_i| |V_j| B'_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

که در آن B'_{ij} بخش موهومی ماتریس ادمیتانس شبکه است که به گره‌های ژنراتوری کاهش می‌یابد [۲۱]. وزن کمان‌های گراف دینامیکی G_D که اتصال دینامیکی بین گره‌های ژنراتور را توصیف می‌کند، به عنوان ضریب سنکرون‌سازی $\partial P_{ij} / \partial \delta_{ij}$ تعریف می‌شوند. با استفاده از ماتریس لایاسین L_D ، مدل دینامیک خطی درجه دوم سیستم قدرت با m ژنراتور به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۱]:

$$\ddot{MX} = L_D X \quad (12)$$



۳-۳- یافتن کاندیداهای عملی طرح جزیره بندی

در تخصیص شینه‌های سیستم به مجموعه ژنراتورهای همنوا، پس از تشکیل گراف استاتیکی و محاسبه مقادیر ویژه ماتریس L همواره در مقالات و مطالعات قبلی اشاره شده است که دو مقدار ویژه نخست انتخاب شده و براساس آن‌ها بردارهای ویژه متناظر بدست آمده و در فرآیند خوشبندی شینه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه تمامی ترکیب‌های دوتایی ممکن از بردارهای ویژه در نظر گرفته شده و براساس هر کدام از ترکیب‌ها، خوشبندی طیفی پیاده‌سازی شده و در نهایت جزیره‌های مطلوب بدست آمده‌اند. تمامی نتایج حاصل از فرآیند خوشبندی، ترکیب‌های ممکن نمی‌باشند، چرا که در جزیره‌بندی باید تمامی شینه‌ها در زیرگراف‌های نهایی به دست آمده حضور داشته باشند. بنابراین، مشاهده می‌شود روش‌های پیشنهادی در این زمینه مشکل دیگری نیز دارند که الگوریتم همواره منجر به پاسخ صحیح نمی‌گردد. پس به منظور اصلاح روند و برای شناسایی و حذف ترکیب‌های غیرممکن دو قانون زیر معرفی شده است:

- (۱) اصل هم‌جواری برای شینه‌های در حال تخصیص باید رعایت گردد. در واقع در صورتی می‌توان یک شینه را به یک گروه از ژنراتورهای همنوا تخصیص داد که آن شینه با یک گروه از همان گروه و یا یک شینه دیگر در شبکه مورد نظر ارتباط داشته باشد.
- (۲) در صورت یکسان بودن فاصله از دو ژنراتور در حالت تخصیص شینه‌ها، ژنراتوری انتخاب می‌گردد که حداقل یک شینه مشترک در همسایگی شینه مورد نظر داشته باشد.

براساس دو قاعده معروف شده فوق، حالت‌های غیرممکن شناسایی و ترکیب‌های ممکن نهایی برای جزیره‌بندی بدست آورده می‌شوند.

۳-۴- تابع هدف دوم (عدم تعادل بار- تولید)

پس از دست‌یابی به ترکیب‌های ممکن برای جزیره‌بندی سیستم، باید حالت بهینه را از بین ترکیب‌های موجود تعیین گردد. بدین منظور در این مطالعه روشی مبتنی بر میزان تعادل توان تولیدی و مصرفی در جزیره‌ها ایجاد شده مطرح شده است. در این روش، شاخصی تحت عنوان شاخص عدم تامین بار مطابق رابطه (۱۶) تعریف شده است.

$$a_{ij} = \frac{P_{i,served}^j}{P_{i,total}^j} \quad (16)$$

در این رابطه $P_{i,served}$ میزان توان تامین شده در جزیره A_m در ترکیب ممکن Z_A ، $P_{i,total}^j$ میزان کل بار در جزیره A_m در ترکیب ممکن Z_A و a_{ij} شاخص عدم تامین بار در جزیره A_m در ترکیب ممکن Z_A می‌باشند. بنابراین، هر ترکیبی که کوچک‌ترین شاخص خاموشی بار را داشته باشد، به عنوان ترکیب بهینه در نظر گرفته می‌شود.

قید هم نوایی ژنراتوری به صورت جفت-هوشمند، شامل اتصالات ضروری و اتصالات غیرمجاز بوده که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

(۱) قید اتصالات ضروری: تمام گره‌های ژنراتوری که در مرحله اولدر یک گروه قرار داشتند، باید در مرحله دوم بهم متصل شوند.

(۲) قید اتصالات غیرمجاز: گره‌های ژنراتوری که در مرحله اول در دو گروه متفاوت قرار داشتند، نمی‌توانند در مرحله دوم بهم متصل شوند. خوشبندی طیفی مقید یک روش کارآمد برای حل مسائل خوشبندی با قیدهای جفت-هوشمند می‌باشد. می‌توان با تصحیح زیرفضای راه حل با استفاده از ماتریس تصویر، قیدهای جفت-هوشمند را لاحظ کرد [۷]. بدون از دست دادن کلیت مسئله، می‌توان فرض کرد که اوین گروه m_1 تایی از گره‌ها، متعلق به خوش C_1 و m_2 گره بعدی متعلق به خوش C_2 می‌باشند، سپس ماتریس تصویر U به صورت زیر تعریف می‌شود

:[۷]

$$U = \begin{pmatrix} 1_{m_1} & 1_{m_1} & 0_{m_1 \times (n-m)} \\ 1_{m_2} & -1_{m_2} & 0_{m_2 \times (n-m)} \\ 1_{(n-m)} & 0_{(n-m)} & I_{(m-n) \times (n-m)} \end{pmatrix} \quad (15)$$

که در آن I ماتریس واحد است و 1 بردار ستونی با درایه‌های 1 است و 0 ماتریس یا بردار صفر می‌باشد. به این ترتیب، زیرفضای راه حل از یک فضای n بعدی به یک فضای $(n-m+2)$ بعدی تصویر می‌شود که $(m=m_1+m_2)$ می‌باشد. همه گره‌های موجود در یک خوشی یکسان در فضای n بعدی، دارای یک گره معادل در فضای $(n-m+2)$ بعدی می‌باشند تا قیود جفت-هوشمند تحقق یابند. حال می‌توان خوشبندی طیفی مقید را به گراف استاتیکی G اعمال کرد تا کاتست‌هاییبا کمترین اختلال در شارش توان یافت شوند که بتوانند قیدهای گروه‌بندی ژنراتورهای تولیدشده در مرحله اول الگوریتم را تحقق بخشنند. بنابراین مرحله دوم الگوریتم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

(۱) تشکیل گراف استاتیکی G از همه گره‌ها، وزن کمان‌ها به صورت $|P_{ij}| + |P_{ji}| / 2$ تعریف می‌شوند.

(۲) تشکیل ماتریس تصویر U بر اساس نتایج گروه‌بندی ژنراتورها.

(۳) محاسبه یدو بردار ویژه اول v_1, v_2 برای مسئله کلی $. U^T L_s U v = \lambda U^T U v$

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

(۵) تقسیم گره‌های $y_i \in R^2$ به خوش‌های V_1 و V_2 با استفاده از الگوریتم خوشبندی $k-medoids$.

(۶) انتخاب V_1 یا V_2 به عنوان مجموعه گره‌های گراف استاتیکی جدید و بازگشت به مرحله اول.

۰/۰۴۸۸	۰/۰۰۲۳	فاصله گره ژنراتور ۹ تا
۰/۰۴۶۵	۱	فاصله گره ژنراتور ۱۰ تا

حال باید زیرگراف دوم را نیز با رویکردی مشابه خوشبندی نمود. برای این منظور، بایستی ماتریس لایلسان L_D را که برای آن، گره نخست حذف شده است را تعیین نمود:

$$\begin{aligned} y_1 &= [-0.0013 \quad 0.0291], y_2 = [0.0007 \quad 0.0183], y_3 = [-0.0566 \quad 0.0024], \\ y_4 &= [0.0550 \quad 0.0063], y_5 = [-0.0040 \quad 0.0062], y_6 = [0.0051 \quad 0.0223], \quad (19) \\ y_7 &= [0.0047 \quad -0.0325], y_8 = [0.0028 \quad -0.0310], y_9 = [0 \quad -0.0170], \end{aligned}$$

با توجه به ساختار شبکه و بررسی *medoid* های مختلف، *medoid* های نهایی را می‌توان گره ژنراتور ۲ و گره ژنراتور ۱۰ در نظر گرفت. بر اساس الگوریتم مذکور، فاصله سایر گرهها تا *medoid* های مذکور در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): نتایج الگوریتم k -medoids با درنظر گرفتن گرههای ۲ و ۱۰ به عنوان *medoid*

$c_2 = 10$	$c_1 = 2$	مراکز خوشه ها
۰/۰۳۶۰	۰/۰۲۱۶	فاصله گره ژنراتور ۳ تا
۰/۰۷۵۸	۰/۰۵۸۹	فاصله گره ژنراتور ۴ تا
۰/۰۷۸۳	۰/۰۶۳۹	فاصله گره ژنراتور ۵ تا
۰/۰۲۷۱	۰/۰۱۰۲	فاصله گره ژنراتور ۶ تا
۰/۰۴۴۳	۰/۰۲۹۹	فاصله گره ژنراتور ۷ تا
۰/۰۲۰۲	۰/۰۳۷۲	فاصله گره ژنراتور ۸ تا
۰/۰۱۶۹	۰/۰۳۳۸	فاصله گره ژنراتور ۹ تا

براساس جدول ۲، گرههای ژنراتوری ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ متعلق به خوشه با *medoid* شماره ۲ و گرههای ژنراتوری ۸ و ۹ متعلق به شماره ۱۰ هستند. بنابراین، زیرگرافهای نهایی گراف دینامیکی که منجر به تشکیل گروههای ژنراتوری هم‌نوا می‌شود، در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول (۳): گروههای ژنراتوری تشکیل شده در مرحله نخست برای سیستم قدرت ۳۹ شینه

گروه سوم	گروه دوم	گروه اول
{1}	{۸,۹,۱۰}	{۲,۳,۴,۵,۶,۷}

در ادامه گراف استاتیکی شبکه به دست می‌آید، براساس جدول ۳ به هریک از خوشه‌های مورد نظر، تعدادی از شینه‌ها تعلق پیدا می‌کنند که در جدول ۴ ارائه شده است.

۴- شبیه سازی و مطالعات عددی

در ادامه نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم ۳۹ شینه با ۱۰ ژنراتور ارائه می‌گردد. اطلاعات مربوط به این سیستم در مراجع [۳۶]-[۳۳] ارائه شده است. نخست به منظور دست‌یابی به گراف دینامیکی این سیستم، پس از محاسبه ماتریس لایلسان خواهیم داشت:

$$(L_D - \lambda M)v = 0 \rightarrow |L_D - \lambda M| = 0 \rightarrow \lambda = 98.686, -3.3979e-16, -76.786, -23.983, -7.6823, 3.0688, 35.187, 8.3574, 24.928, -115.4 \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} 0.000042233723645 \\ -0.000953605665423 \\ 0.000652745616318 \\ -0.046460496898016 \\ 0.045490643914213 \\ -0.03440638503733 \\ 0.03996181212920 \\ 0.02549847132071 \\ 0.02370894352212 \\ 0.000021439527304 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} L_D - \lambda_i M \\ v_i \end{bmatrix} = 0 \rightarrow v_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

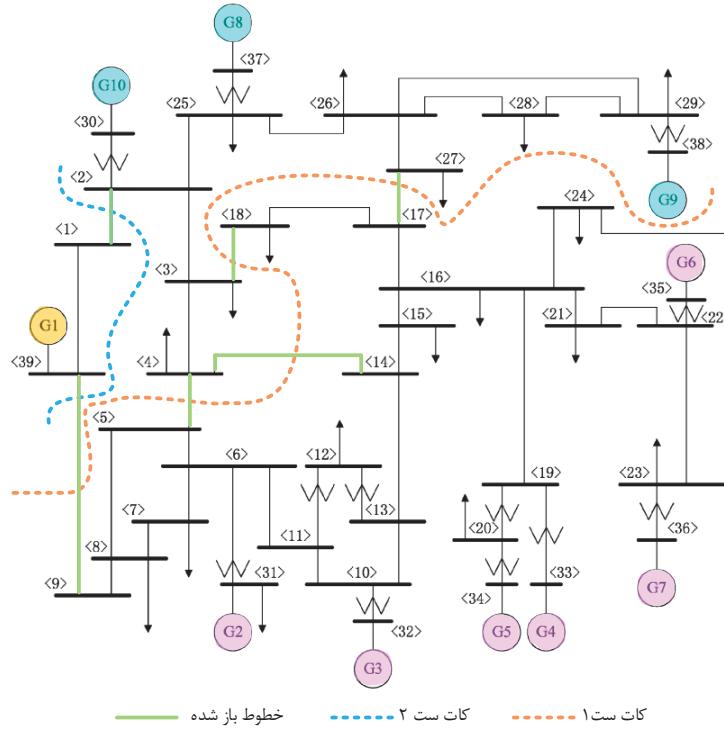
$y_1 = [0.000042233723645 \quad 1]; y_2 = [-0.000953605665423 \quad 1];$
 $y_3 = [0.000652745616318 \quad 1]; y_4 = [-0.046460496898016 \quad 1];$
 $y_5 = [0.045490643914213 \quad 1]; y_6 = [-0.03440638503733 \quad 1];$
 $y_7 = [0.03996181212920 \quad 1]; y_8 = [0.02549847132071 \quad 1];$
 $y_9 = [0.02370894352212 \quad 1]; y_{10} = [0.000021439527304 \quad 1];$
ابتدا فرض می‌شود که بردارهای y_1 و y_4 به عنوان مراکز خوشه‌ها انتخاب شوند. بنابراین کافی است فاصله بردارهای دیگر نسبت به آنها تعیین شود که در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که زیرگرافهای دینامیکی سیستم برابرند با {1} و {2,3,4,5,6,7,8,9,10} معیار فاصله بر اساس روش k -medoids بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$d_{ij} = |y_i(1) - y_j(1)| + |y_i(2) - y_j(2)|, i \neq j, i, j = 1, 2, 3 \quad (18)$$

جدول (۱): نتایج الگوریتم k -medoids با درنظر گرفتن گرههای ۱ و ۱۰ به عنوان *medoid*

$c_2 = 4$	$c_1 = 1$	مراکز خوشه ها
۰/۰۴۵۵	۱/۰۰۱	فاصله گره ژنراتور ۲ تا
۰/۰۴۷۱	۰/۰۰۰۶	فاصله گره ژنراتور ۳ تا
۰/۰۹۲۰	۰/۰۴۵۴	فاصله گره ژنراتور ۵ تا
۰/۰۴۳	۰/۰۰۳۵	فاصله گره ژنراتور ۶ تا
۰/۰۵۰۵	۱/۰۰۴	فاصله گره ژنراتور ۷ تا
۰/۰۴۹۰	۰/۰۰۲۵	فاصله گره ژنراتور ۸ تا

{1}	$c_2 = \{39\}$	جدول (۴): زیرگرافهای استاتیکی نهایی	
{۵,۶,۷,۸,۹,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹,۲۰,۲۱,۲۲,۲۳,۲۴}	$c_3 = \{31, 32, 33, 34, 35, 36\}$	شینه های تعلق یافته به هر خوشه	خوشه



شکل (۲): نمایی از کاتستهای ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه

ممکن که میزان خاموشی بارها در آن‌ها حداقل می‌باشد را برای سیستم ۳۹ شینه نشان می‌دهد. در این حالت نیز چون شرایط اولیه دامنه و فاز ولتاژ در طی فرآیند بهینه‌سازی تغییر نمی‌کند، بنابراین ترکیب‌های همنوای ژنراتورها مانند حالت قبل و در سه گروه شامل گروه اول متشکل از ژنراتورهای موجود در شینه‌های ۳۰، ۳۷ و ۳۸، گروه دوم شامل ژنراتور موجود در شینه ۳۹ و گروه سوم متشکل ژنراتورهای موجود در شینه‌های ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۳۶ خواهد بود. در جدول ۵ ترکیب‌های اختصاص یافته برای سایر شینه‌ها ارائه شده است.

جدول (۵): جزیره‌بندی سیستم ۳۹ شینه به‌ازای بردارهای ویژه مختلف

ساختار جزیره‌بندی			
*	{۱,۹,۲۲,۲۳,۲۴,۲۷}	*	۳۰ و ۲۸
*	{۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۳,۲۵}	۱	
۱	{۱۱,۱۴,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹,۲۰,۲۱,۲۶,۲۸,۲۹}	۳۱ و ۱۲	۲
	{۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۴,۱۵,۱۶,۱۷,۱۹,۲۰,۲۵}		
	{۱,۹,۱۰,۱۲,۲۲,۲۳,۲۷}		
	{۱۱,۱۳,۱۸,۲۱,۲۴,۲۸,۲۹}		

همان‌طور فصل سوم اشاره شد، انتخاب هر ترکیب خاص از بردارهای ویژه منجر به جزیره‌بندی متفاوت خواهد شد. از این رو، مطابق مطالب ذکر شده در فصل قبل، پس از دستیابی به بردارهای ویژه به‌ازای تمامی ترکیب‌های دوتایی ممکن از بردارهای ویژه به‌دست آمده، جزیره‌بندی صورت گرفته و نتایج به‌دست می‌آیند. سپس، ضریب تعادل توان تولیدی و توان مصرفی برای هر حالت محاسبه می‌گردد و درنهایت براساس نتایج حاصل، آن طرح جزیره‌بندی که کمترین میزان ضریب عدم تأمین توان را داشته باشد، به عنوان ژنراتورها بررسی شده و متناسب با گراف دینامیکی به‌دست آمده ترکیب‌های مختلف برای تخصیص بقیه شینه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

رونده فوق بر روی سیستم ۳۹ شینه پیاده‌سازی می‌شود. در این حالت ۳۸ بردار ویژه در سیستم وجود خواهد داشت که به ۷۰۳ مجموعه مختلف می‌توان یک ترکیب دوتایی از این مجموعه انتخاب کرد. بنابراین، باید ۷۰۳ ترکیب مختلف از جزیره‌بندی به‌دست آمده و به‌ازای تمامی حالات پخش‌بار صورت گرفته و درصد عدم تأمین بار به‌ازای هر حالت به‌دست می‌آید. جدول ۵ نتایج به‌دست آمده برای ۵ ترکیب مختلف

جدول (۶): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو اول

شینه‌های تعلق یافته به هر خوش	خوش
$\{2.3, 4.5, 7.8, 14, 15, 16\}$ $17.20, 25.26, 27.28, 29\}$	$\{37.38, 30\}$ $c_1 =$
$\{1.9\}$	$c_2 = \{39\}$
$\{6.10, 11.12, 13, 18\}$ $19.21, 22.23, 24\}$	$c_2 = \{31.32, 33\}$ $34.35, 36\}$

۲/۵	$\{1.9, 10, 11.22, 22, 24, 27\}$ $\{2.3, 4.5, 6, 7.8, 25\}$ $\{11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 28, 29\}$	۲۶ و ۲۵	۳
۳	$\{1.22, 23, 24, 27\}$ $\{2.3, 4.5, 6, 7.8, 9, 10, 11, 13, 14, 15\}$ $\{12, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 28, 29\}$	۲۷ و ۲۵	۴
۴/۳	$\{1.9, 22, 23, 24, 27, 28, 29\}$ $\{2.3, 4.5, 6, 7.8, 10, 11, 13, 25, 26\}$ $\{12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21\}$	۱۱ و ۲	۵

۲-۴- سناریو دوم: افزایش دامنه ولتاژ

در این سناریو افزایش دامنه ولتاژ از حد مجاز که در این مطالعه برابر با $1/105$ پریوئیت می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته است. اغلب افزایش دامنه ولتاژ در سیستم در شرایط کمباری و طی بازه شب رخ می‌دهد. در چنین شرایطی در صورتی که مشکل به موقع شناسایی و برطرف نگردد، رله‌های اضافه ولتاژ تریپ داده و در این حالت جزیره‌بندی کنترل شده راهکاری موثر برای لوگیری از فروپاشی سیستم خواهد بود. در سناریو اول فرض شده است که ولتاژ تمام شینه‌های غیرزناتوری 10 درصد افزایش یافته است. در این سناریو جزیره‌بندی کنترل شده مطابق جدول 7 و شکل 4 به دست خواهد آمد.

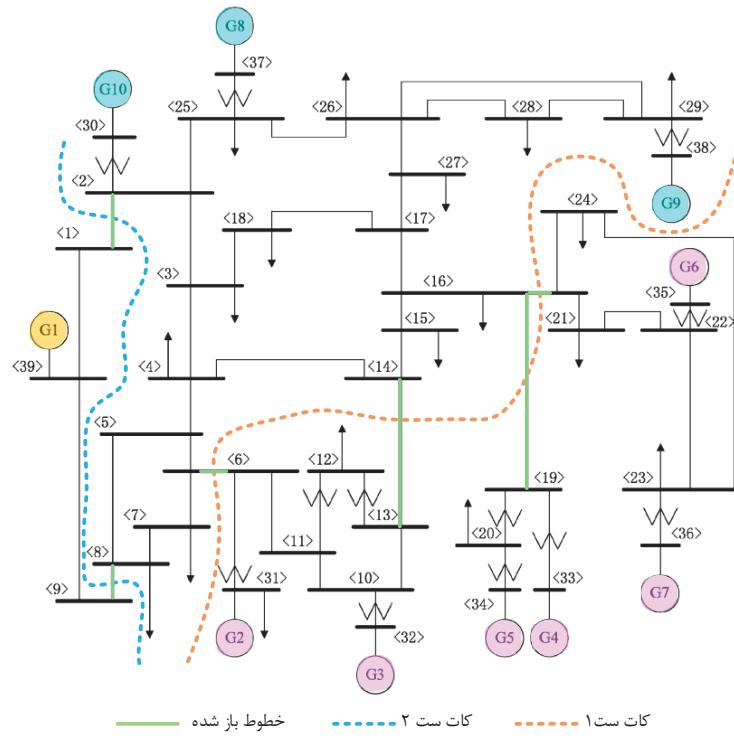
مشاهده می‌گردد که در این حالت نیز ترکیب ژنراتورهای همنوا به دلیل ذکر شده در بخش قبل تغییر نکرده است. اما توجه به چند نکته ضروری به نظر می‌رسد. نخست آن که در این حالت عملأً تمامی باس‌ها بین دو گروه ژنراتوری همنوا که پایدارتر بوده و توانایی جبران کمبودهای یکدیگر را دارند، تقسیم شده‌اند. ژنراتور 1 موجود در باس 39 بدلیل اینکه در یک ناحیه دیگر واقع شده و فاصله زیادی با ژنراتورهای دیگر دارد، عملأً در حالت خطای افزایش ولتاژ، فقط بار محلی خود را تأمین می‌کند. دلیل دیگر مجزا شدن ژنراتور 1 این است که این ژنراتور کوچک بوده و ثابت ایتریسی کوچکی دارد که موجب می‌گردد در مقابل خطا آسیب‌پذیرتر باشد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در حالت افزایش ولتاژ سیستم واکنش شدیدتری را نشان‌داده و پایداری سیستم بیشتر در معرض فروپاشی قرار گیرد، چرا که افزایش ولتاژ موجب افزایش سطح توان راکتیو، اشغال ظرفیت خطوط انتقال و عمل کردن تجهیزات حفاظتی در سیستم خواهد شد. بنابراین، در چنین شرایطی سعیشده است سیستم به نحوی جزیره‌بندی گردد که پایدارترین ترکیب ممکن به دست آید.

شبکه مستعد فروپاشی خواهد شد.

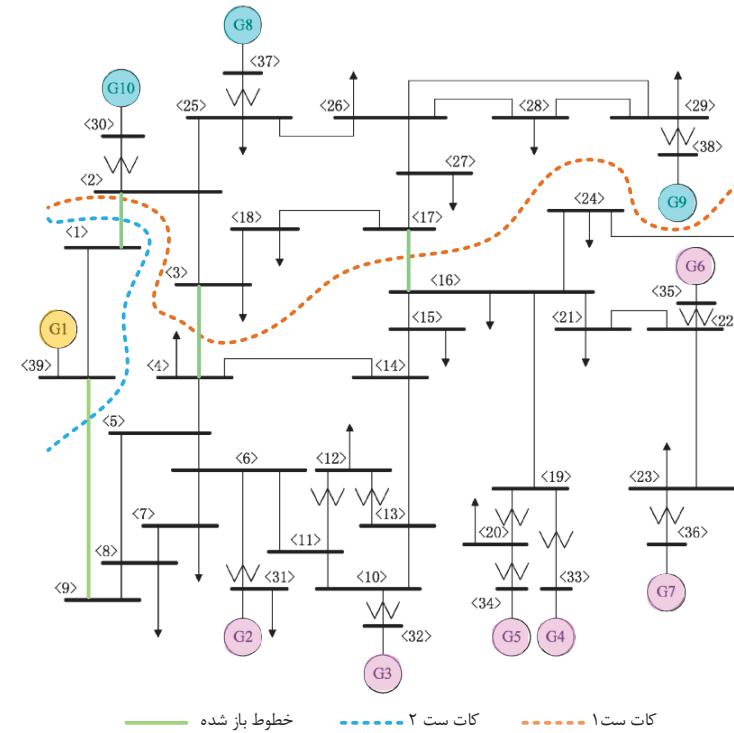
در این حالت 78 ترکیب ممکن وجود دارد که به کمک قواعد معرفی شده در بخش قبل شناسایی و تعیین شده‌اند. پس از دستیابی به ترکیب‌های ممکن از جزیره‌بندی سیستم 39 شینه، در هر کدام از حالات، پخش بار اجرا شده و میزان عدم تامین بار بر حسب درصد به دست آمده است. براساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که ترکیب نخست در جدول 5 منجر به حالت بهینه جزیره‌بندی از نقطه نظر پایداری گذرا و کمترین میزان خاموشی در سیستم پس از جزیره‌بندی برای سیستم 39 شینه خواهد شد. مشاهده می‌شود که نتیجه به دست آمده در بخش قبل برای جزیره‌بندی، حالت بهینه نبوده است.

۱-۴- سناریوی اول: کاهش دامنه ولتاژ

طرح جزیره‌بندی پیشنهادی بایستی علاوه بر شرایط بهره‌برداری عادی در شرایط غیرعادی و خطدار نیز عملکرد مطلوب داشته باشد. در این سناریو مسئله کاهش دامنه ولتاژ شینه‌های سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. این رخداد ممکن است که در اثر عوامل مختلف از قبیل افزایش میزان مصرف، پیک پیش‌بینی نشده، خرایی خازن‌های موجود در سیستم، کاهش سطح توان راکتیو تولیدی در سیستم و عوامل مختلف دیگر ایجاد گردد. در این حالت ولتاژ مربوط به تمامی شینه‌های غیرتولیدی 10 درصد کاهش یافته است. در این حالت جزیره‌بندی کنترل شده مطابق جدول 6 و شکل 3 به دست می‌آید. مشاهده می‌گردد که کاهش سطح دامنه ولتاژ در شینه‌های سیستم موجب تغییر در ترکیب ژنراتورهای همنوا نمی‌گردد. این امر ناشی از این موضوع است که عملأً ولتاژ شینه‌های ژنراتوری به کمک تولید یا تزریق توان راکتیو در حد مطلوب نگه داشته می‌شود. ولی از سوی دیگر، بدلیل تغییر در سطوح ولتاژ شینه‌ها میزان شارش توان در خطوط مختلف تغییر کرده و این امر موجب می‌گردد شینه‌های تعلق گرفته به هر مجموعه از ژنراتورهای همنوا نسبت به حالت قبل تغییر کند.



شکل (۳): نمایی از کاتستهای ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه در سناریو اول



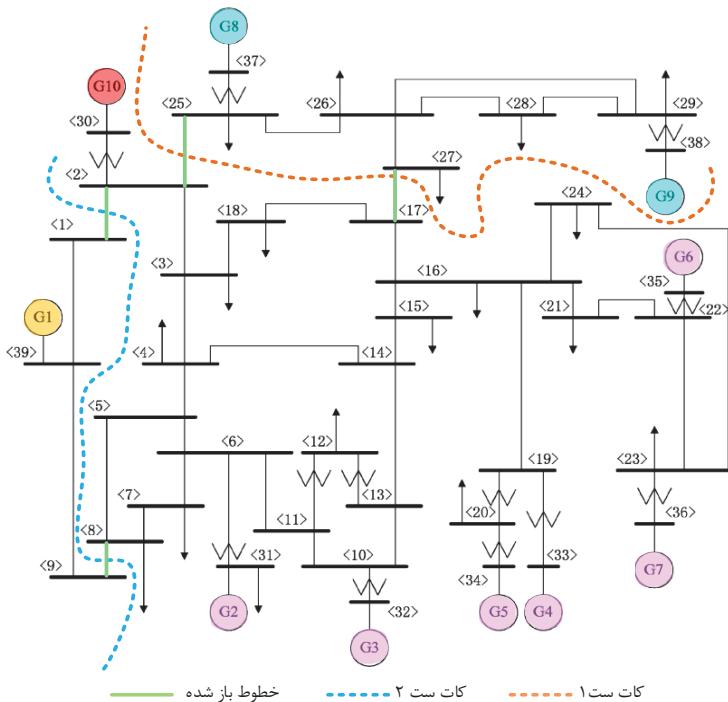
شکل (۴): نمایی از کاتستهای ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه در سناریو دوم

۴-۳- سناریو سوم: خروج ژنراتور

در این سناریو خروج ژنراتور شماره ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. ژنراتور ۱۰ باین دلیل انتخاب شده است که بزرگترین ژنراتور موجود در سیستم می‌باشد و خروج آن می‌تواند موجب وقوع تغییرات مختلفی گردد. نتایج مربوط به جزیره‌بندی سیستم در این حالت در جدول ۸ و شکل ۵ آورده شده است.

جدول (۷): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو دوم

شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه	خوشه
{۲۳،۴،۱۱،۱۳،۱۷،۲۰، ۲۴،۲۵،۲۶،۲۸،۲۹}	$c_1 = \{37, 38, 30\}$
{۱}	$c_2 = \{39\}$
{۵،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۲،۱۴، ۱۵،۱۶،۱۸،۱۹،۲۱،۲۲}	$c_2 = \{31, 32, 33\}$ ۳۴،۳۵،۳۶



شکل (۵): نمایی از کات‌سنت‌های ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه در سناریو سوم

ترکیب ژنراتورهای همنوا و هم باس‌های تعلق گرفته به هر زیرگراف تغییر پیدا کرده است.

۴-۴- شبیه‌سازی زمانی

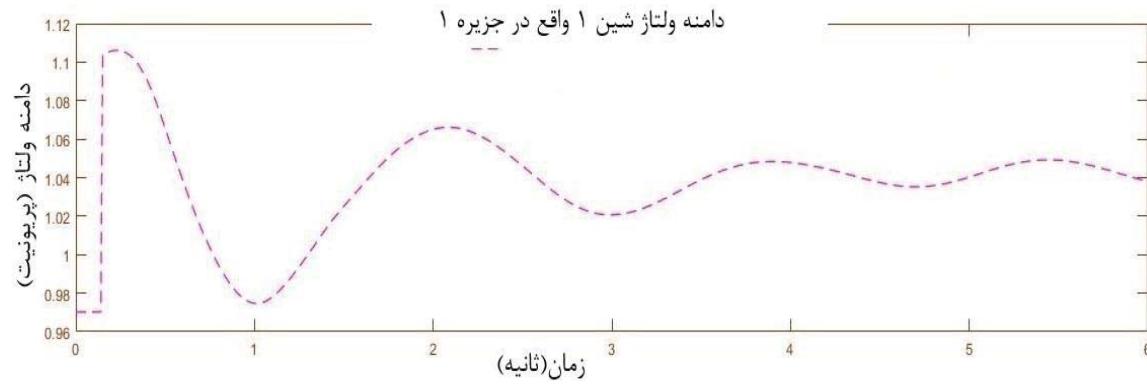
در این بخش مطالعات شبیه‌سازی حوزه زمان بر روی سیستم آزمون ۳۹ شینه براساس ترکیب جزیره‌بندی بهینه به دست آمده صورت گرفته است. شبیه‌سازی زمانی در محیط نرم‌افزاری MATLAB و به کمک جعبه‌آبزار PST صورت گرفته است.

جدول (۸): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو سوم

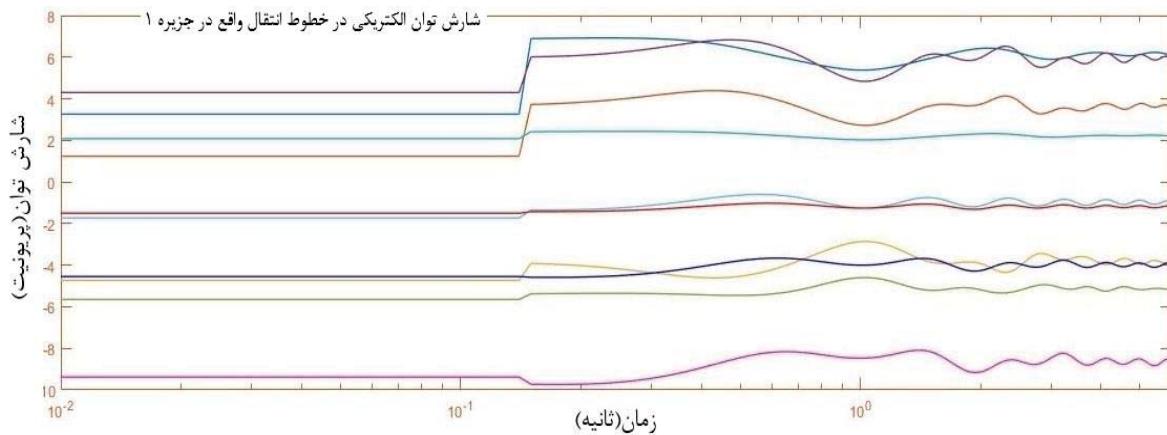
شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه	خوشه
{۱۹}	$c_1 = \{39\}$
{۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۱۰، ۱۱،۱۳،۱۴،۱۴،۲۶،۲۷}	$c_2 = \{37, 38\}$
{۱۲،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹، ۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۸،۲۹}	$c_2 = \{30, 31, 32, 33\}$ ۳۴،۳۵،۳۶

نتایج نشان می‌دهد که در این حالت نیز الگوریتم پیشنهادی به خوبی و بهصورت کنترل شده‌ای سیستم قدرت را جزیره‌بندی می‌کند. در حالت خروج ژنراتور چون هم سطح ولتاژ و هم زاویه δ تغییر می‌کنند، هم

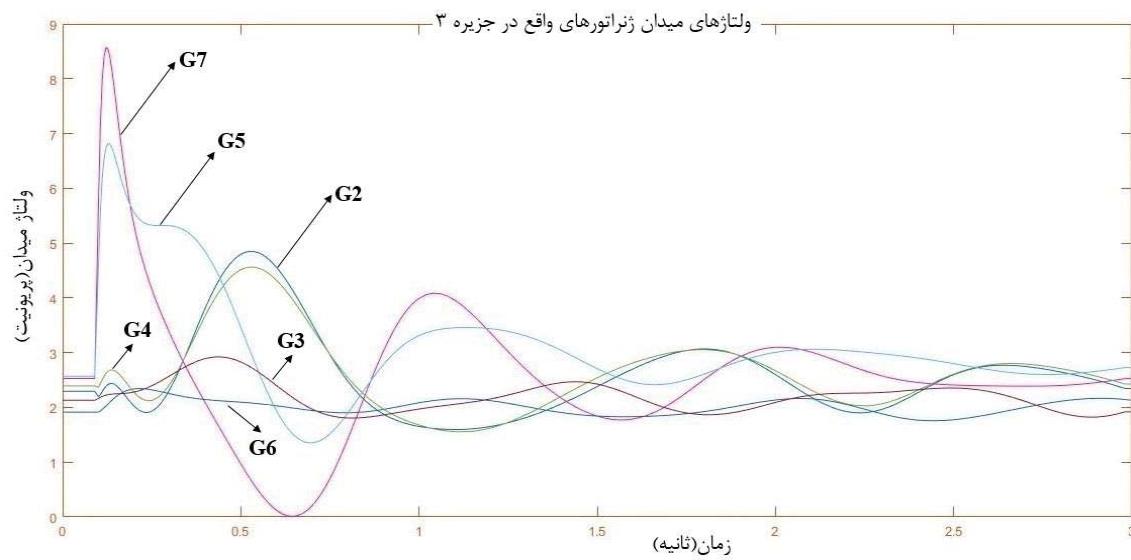




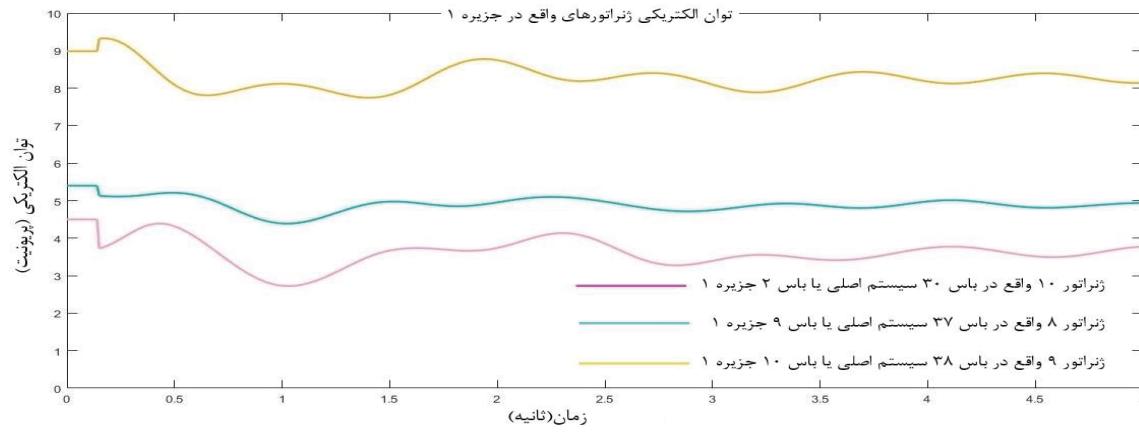
شکل (۶): دامنه ولتاژ شینه شماره ۱ در جزیره شماره ۱ در لحظه بعد از جزیره‌بندی



شکل (۷): شارش توان در خطوط جزیره ۱ قبل و بعد از جزیره‌بندی



شکل (۸): میرا شدن نوسانات ولتاژهای میدان ژنراتورهای جزیره ۳ در لحظه بعد از جزیره‌بندی



شکل(۹): توان‌های تولیدی ژنراتورهای جزیره ۱ در لحظه بعد از جزیره بندی

اهداف فوق الذکر را درنظر نگرفته است. از این‌رو این مطالعه با انجام این کار اقدامات متعاقب موردنیاز در رابطه با بازیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف‌بار را حداقل می‌کند و جزیره با سطح پایداری گذراي بالاتر و كييفيت مناسب‌تری از لحاظ تعادل بار-تولید را ايجاد می‌نماید. در واقع علاوه بر بهبود نتایج خروجي، هر دو تابع هدف مرسوم در فرآيند جزيره‌بندی در نظر گرفته شده‌اند، که اين امر فرآيند سنکرون‌سازی هر يك از جزيره‌ها پس از رفع خطأ، پخش‌بار و ... مورد بازگردانی مجدد سیستم به حالت اوليه را تسهيل می‌نماید. در اين مطالعه روندی مبتنی بر بهينه‌سازی برای انتخاب بردارهای ویژه ماترييس لاپلاسین ارائه گردید که منجر به انتخاب جزيره‌بندی بهينه از بين ترکيب‌های ممکن شد. در نهايىت با پياده سازي الگوريتم پيشنهادى بر روی سیستم آزمون IEEE ۳۹ شينه تحت شرایط عادي و خطدار، کارآيی و اعتبار روش پيشنهادى سنجيده شد. بهينه‌سازی‌های زمانی انجام شده در محيط MATLAB و همچنین به وسیله جعبه‌ابزار PST-شان دهنده کارآيی روش پيشنهادى می‌باشد.

فهرست مراجع

- [1] اسدی ح، صنایع‌پسند م، داوریناه م، معرفی‌بک روش جدید برای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت برمبنای حفاظت گسترشده شبکه، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۴ (۲): ۱۳۸۶، ۱۳-۳.
- [2] Shao, D., Xu, Y., Xi, J., Zhang, S., Wang, Y., He, C., "Controlled Islanding Strategy of Central China Power Grid Based on Branch Potential Energy," IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1792-1796, Oct. 2016.
- [3] Wang, X., "Slow coherency grouping based islanding using minimal cut sets and generator coherency index tracing using the continuation method," Ph.D. dissertation, Iowa State Univ., Ames, 2005.
- [4] Hao, L., Rosenwald, G. W., Jung, J., Liu, C. C., "Strategic power infrastructure defense," Proc. IEEE, vol. 93, no. 5, pp. 918-933, May 2005.
- [5] Peiravi, A., Ildarabadi R., "A fast algorithm for intentional islanding of power systems using the multilevel kernel k-means approach," J. Appl. Sci., vol. 9, no. 12, pp. 2247-2255, 2009.

لازم‌به‌ذکر است که جعبه‌ابزار PST-یک بسته‌کنترل و شبیه‌سازی بر اساس نرم‌افزار متلب می‌باشد که در مطالعات سیستم‌های قدرت همچون تحلیل انواع پایداری، مباحث مختلف خطأ، پخش‌بار و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.[۳۲]

سیستم‌های قدرت ناحیه وسیع به‌دبیال وقوع خطأ، با نوساناتی در فرکانس، زاویه روتور، ولتاژ و ... مواجه می‌شوند. که متناسب با نوع و شدت خطأ، سیستم قدرت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. جزيره‌بندی کنترل شده سیستم‌های قدرت که عموماً متعاقب وقوع اختلالی در شبکه انجام می‌شود، در هنگام پیاده‌سازی با نوساناتی در پارامترهای مختلف شبکه همراه خواهد بود که در صورت مناسب بودن طرح جزيره‌بندی، کلیه این نوسانات پس از مدت زمان کوتاهی میرا شده و سیستم به یک نقطه تعادل ثانویه می‌رسد. در این بخش با توجه به شکل‌های ۶-۹ پاسخ زمانی شبکه‌قدرت به طرح جزيره‌بندی پيشنهادی مطالعه شده است. اعتبار و صحت عملکرد اين الگوريتم با انجام شبیه‌سازی‌های زمانی در ارتباط با توان‌های انتقالی از خطوط، دامنه ولتاژ شينه‌ها، ولتاژ‌های ميدان و ... بررسی گردیده است. ميل نمودن زيرسیستم‌های جزيره‌ای بعد از طی دوره‌های زيرگذرا و گذراي کوتاه‌بهی یك حالت ماندگار و وضعیت تعادل جدید نشان دهنده اعتبار و کارایی طرح پيشنهادی است.

۵- نتیجه‌گیری

در اين مقاله، برخی از نوادر و معايب روش‌های قبلی بطرف و ایده‌های جدیدی برای بهبود نتایج و تشکیل جزيره‌های بهينه ارائه گردید. روش خوشبندی طیفی معرفی شده در مطالعات گذشته صرفا بر پایه افزایش سطح پایداری گذرا در سیستم اجرا می‌شد. هرچند در شرایط بحرانی، در ابتدا هدف حفظ پایداری گذرا در سیستم می‌باشد اما در مرحله بعد توجه به ايجاد جزيره‌هایي متعادل از لحاظ بار-تولید باعث ايجاد زيرسیستم‌هایي بهينه از ديدگاه های مختلفی از جمله توجيه اقتصادي طرح، وقوع حداقل خاموشی‌ها، تسهيل در امر بازگردانی سیستم و ... می‌شود. تاکنون هیچ طرحی بهصورت همزمان

- [22] Lamba, S. S., Nath, R., "Coherency identification by the method of weak coupling," *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 233–242, Oct. 1985.
- [23] Sun, K., Zheng, D., Lu, Q., "Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 912–922, May 2003.
- [24] Henner, V. E., "A network separation scheme for emergency control," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 109–114, 1980.
- [25] Diestel, R., "Graph Theory," Springer-Verlag (2005)
- [26] A. M. Bagirov, J. Ugon, and D. Webb, "Fast modified global k-means algorithm for incremental cluster construction," *Pattern Recognition*, 2011 vol. 44, pp. 866-876.
- [27] Arbin, N., Zafirah Mokhtar, N., Suhailayani Suhaimi, N., Othman, Z., "Comparative Analysis between K-Means and K-Medoids for Statistical Clustering," in *Third International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*, 2015.
- [28] Zadegan, S. M. R., Mirzaie, M., Sadoughi, F., "Ranked k-medoids: A Fast and Accurate Rank-based Partitioning Algorithm for Clustering Large Datasets," in *Knoeldge Based Systems*, 2013, vol. 39, pp. 133-143.
- [29] Theodoridis, S., Koutroumba, K., "Pattern Recognition," 4th ed. New York: Academic, 2008.
- [30] Shi, J., Malik, J., "Normalized cuts and image segmentation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 8, pp. 888–905, Aug. 2000.
- [31] Luxburg, U. V., "A tutorial on spectral clustering," *Statist. Comput.*, vol. 17, no. 4, pp. 395–416, Dec. 2007.
- [32] Chow, J. H., Cheung, K. W., "A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research," *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1559–1564, 1992.
- [33] Ramos, R. A., et al., "IEEE PES Technical Report TR-18: Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control," IEEE PES Resource Center, 2015
- [34] Canizares, C., et al., "Benchmark systems for small signal stability analysis and control", IEEE PES Technical Report-TR18, 2015. [Online] <http://resourcecenter.ieee-pes.org/pes/product/technical-publications/PESTR18>
- [35] Singh, A.K., Pal, B.C., "Report on the 68-Bus, 16-Machine, 5-Area System, IEEE PES Task Force on Bench mark Systems for Stability Controls," 3 Dec. 2013. [Online] <http://eioc.pnln.gov/benchmark/ieeeess/index.htm>.
- [36] Canizares, C., et al., "Benchmark Models for Analysis and Control of Small Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Early Access Article, May 2016.
- [6] Peiravi, A., Ildarabadi R., "Comparison of computational requirements for spectral and kernel k-means bisection of power system," *Australian J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 2366–2388, 2009.
- [7] Ding, L., Gonzalez-Longatt, F. M., Wall, P., Terzija, V., "Two-Step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm," vol. 28, no. 1, Feb. 2013.
- [8] Ding, L., Terzija, V., "A new controlled islanding algorithm based on spectral clustering," in Proc. 4th IEEE Int. Conf. Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technology (DRPT2011), Weihai, China, Jul. 2011.
- [9] Quiros-Tortos, J., Sánchez-García, R., Brodzki, J., Bialek, J., "Constrained spectral clustering-based methodology for intentional controlled islanding of large-scale power systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 1, pp. 31–42, January 2015.
- [10] حسین پور ج.، پروین ح.، انتخاب خوش‌های اولیه به کمک الگوریتم‌های هوشمند برای مشارکت در خوشبندی ترکیبی، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۵، ۱۸۴-۱۶۳ (۲).
- [11] Lin, Z., et al., "Application of Wide Area Measurement Systems to Islanding Detection of Bulk Power Systems," vol. 28, no. 2, May 2013.
- [12] Franco, R., Sena, C., Taranto, G. N., Giusto, A., "Using Synchrophasors for Controlled Islanding—A Prospective Application for the Uruguayan Power System," vol. 28, no. 2, May 2013.
- [13] Isazadeh, G., Khodabakhshian, A., Gholipour, E., "New intelligent controlled islanding scheme in large interconnected power system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 16, pp. 2686-2696, Nov. 2015.
- [14] Fernandez-Porras, P., Panteli, M., Quirós-Tortos, J., "A Risk-Based Methodology for Defining the Time of Intentional Controlled Islanding," IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), pp. 828-832, Oct. 2015.
- [15] Aghamohammadi, M.R., Salimian, M., "Intelligent Out of Step Predictor for Inter Area Oscillations Using Speed-Acceleration Criterion as a Time Matching for Controlled Islanding," *IEEE Trans on Smart Grid*, Sept. 2016.
- [16] Trakas, D. N., Voumvoulakis, E. M., Hatziargyriou, N. D., "Controlled Islanding of Power Networks Using Machine LearningAlgorithm," MedPower, pp. 1-6, NOV. 2014.
- [17] Li, J., Liu, C., Schneider, K. P., "Controlled Partitioning of a Power Network Considering Real and Reactive Power Balance," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 261-269, Dec. 2010.
- [18] Wang, C., Zhang, B., Li, P., Shu, J., Cheng, L., Hao, Z., Bo, Z., "Power System Islanding Based on Multilevel Reduced Graph Partitioning Algorithm," UPEC 43rd International Universities Power Engineering Conference, pp. 1-6, Sept. 2008.
- [19] O, G., A, R. M., "Real time identification of coherent groups for controlled islanding based on graph theory," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(8): 748-758.
- [20] Wang, T., Ding, L., Yin, S., Liu, J., Jia, Y., Zhang, D., "Dynamic performance comparison of different controlled islanding methods," International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), pp. 1363-1367, Nov. 2015.
- [21] Chow, J. H., "Time-Scale Modeling of Dynamic Networks With Applications to Power Systems," New York: Springer-Verlag, 1982.