الگوریتمی جدید برای جزیره‌بندی کنترل‌شده سیستم‌های قدرت مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید

کاوه نادری[1] **علی حسامی نقشبندی[2]**

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: **دراین مقاله الگوریتمی جدید مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید به‌منظور جزیره‌بندی کنترل‌شده سیستم‌های قدرت ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی توابع هدف اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار– تولید در جزیره‌ها را کمینه می‌کند و به‌ترتیب منجر به تضمین پایداری گذرا در جزیره‌ها و انجام حداقل اقدامات لازم در رابطه با بازپیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف‌بار می‌گردد. این الگوریتم کلیه فضای حل را جستجو کرده و ضمن امکان‌سنجی تمامی کاندیداهای طرح جزیره‌بندی، طرح‌های عملی را شناسایی و سپس مورد بهینه را گزینش و اجرا می‌نماید، به‌علاوه به منظور اجتناب از وقوع جزیره‌بندی غیر عمدی، قابلیت تشخیص وتفکیک 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 ۳۹ شینه IEEEدر محیط نرم‌افزاری MATLAB و به‌وسیله جعبه‌ابزار PST نشان‌دهنده کارآیی روش پیشنهادی می‌باشد.**

کلیدی: **جزیره‌بندی کنترل‌شده، خوشه‌بندی 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی نزدیک به حاشیه امنیتی و حد پایداری‌شان 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 کنترل‌شده، 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 کنترل‌شده تفکیک می‌نماید، به‌طوری که بارهای حائز اهمیت حفظ و ضمن قابلیت اطمینان لازم، توسط ژنراتورهای محلی پایدار تغذیه می‌شوند.

اخیرا یک استراتژی جزیره‌بندی جدید با استفاده از داده‌های به‌هنگام واحدهای اندازه‌گیری فازوری بر روی شبکه قدرت مرکزی چین اعمال شده است[۱]، که به‌وسیله معیار انرژی پتانسیل شاخه، شرایط خارج‌ازگام را تشخیص می دهد. 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 جزیره بندی جهت حداقل‌کردن اختلال در شارش توان پیشنهاد شده‌است که هر دوی این روش‌ها راندمان محاسباتی بالایی دارند اما مسئله هم‌نوایی ژنراتورها را درنظر نمی‌گیرند [۵]، سادگی پیاده‌سازی و سرعت از مزایای این الگوریتم است، حال‌آنکه اهمیت انتخاب نقاط اولیه و حساسیت به نویز از معایب این روش‌ها می‌باشد. نادیده گرفتن هم نوایی ژنراتورها به‌معنای 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 بایستی حداقل گردد و قید مهم لحاظ شده در مسئله، موضوع هم‌نوایی 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 می‌باشد. تاکنون مطالعاتی در رابطه با کاربرد سیستم‌های اندازه‌گیری فازوری به‌منظور کشف و تعیین جزیره‌بندی سیستم‌های قدرت به‌هم پیوسته و بزرگ انجام شده است[۸]، [۹]. علاوه بر مکان، زمان مناسب اجرای طرح جزیره بندی موضوع مهم دیگری است که می‌تواند به‌صورت خارج‌ازخط، برخط و به هنگام مطالعه شود؛ این موضوع در مرجع [۱۱] با استفاده از روش فازی-عصبی و ضمن توجه به قید هم‌نوایی آرام و نیز در [۱۲] با رویکرد روش‌شناسی بر اساس ریسک بررسی شده‌است. استفاده از پیش‌بینی شرایط خارج‌ازگام در مورد نوسانات بین ناحیه‌ای راه‌حلی دیگر است که تاکنون در ارتباط با زمان مناسب طرح جزیره‌بندی مطالعه شده است[۱۳]. ازطرف‌دیگر در رابطه با تشخیص خطوط انتقالی که در هنگام اجرای طرح جزیره‌بندی بایستی قطع گردند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله نگاشت خود-سازمان، ازدحام ذرات و ... راهکارهایی موثر به‌نظر می‌رسند[۱۴]. جزیره‌بندی کنترل‌شده بر اساس ملاحظات مربوط به تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در مرجع [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته‌است و همچنین در [۱۶] یک الگوریتم جزیره‌بندی بر اساس گراف کاهش‌یافته چند-سطحی به‌منظور جزیره‌بندی کنترل‌شده پیشنهاد شده‌است. اخیرا مطالعاتی در ارتباط با ترکیب مفاهیم نظریه گراف و هم‌نوایی آرام، صورت گرفته است[۱۷]. با مروری بر روش‌های مختلف جزیره‌بندی، مبتنی بر درخت‌های تصمیم، خوشه‌بندی طیفی و اتصالات ضعیف مزایا و معایب هر کدام از روش ها 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 هم‌نوایی آرام ژنراتورها مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید پیشنهاد شده‌است که در آن قید اصلی مسئله، هم‌نوایی مجموعه ژنراتورهای واقع در یک جزیره بوده و توابع هدفی که در فرآیند این الگوریتم کمینه می‌شوند، اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار– تولید در جزیره‌ها می‌باشند. این تحقیق ضمن حل یک مسئله بهینه‌سازی دو تابع‌هدفه، 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 توابع‌هدف و قید هم‌نوایی ژنراتور و دو قید دیگر (همسایگی و مجاورت) ترکیبات بهینه را می‌یابد. علاوه بر موارد فوق‌الذکر، دو قید همسایگی و مجاورت علاوه بر قید هم‌نوایی آرام که از مفاهیم مربوط به نظریه گراف و خوشه‌بندی استخراج شده و در اینجا در بحث جزیره بندی کنترل‌شده استفاده شده‌اند. در ادامه سناریوهای مختلفی نیز بررسی خواهند شد.

سایر بخش‌های این مقاله بدین شرح سازماندهی شده‌اند: در بخش دوم مقدماتی از نظریه گراف‌ها، مفهوم هم‌نوایی ژنراتورها و خوشه-بندی طیفی مقید آورده شده است. سپس الگوریتم پیشنهادی در بخش سوم به تفصیل معرفی و تشریح شده و اجزاء سیستم قدرت شامل ژنراتورها و خطوط‌انتقال به‌منظور مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی مدلسازی می‌شوند. کارآمدی الگوریتم پیشنهادی با انجام شبیه سازی‌های زمانی تحت شرایط عادی و خطادار بر روی شبکه ۳۹ شینه *IEEE* در محیط نرم‌افزاری متلب و همچنین جعبه ابزار *PST* در بخش چهارم بررسی شده است. بخش پنجم نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]

۲- مفاهیم اساسی

۲-۱- ژنراتورهای هم‌نوا

بر اساس معادله نوسان خطی‌شده کلاسیک ژنراتور، ضمنصرف‌نظر از میرایی، مدل دینامیکی خطی مرتبه دوم یک سیستم‌قدرت با m ژنراتور را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت [۲۱]:

$$\ddot{X} = AX \qquad (۱)$$

که در آن $X = [\Delta\delta_1, ..., \Delta\delta_m]^T$ و $\Delta\delta$ انحراف زاویه‌ی ژنراتور از نقطه‌ی کار حالت ماندگار δ_0 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 زیر ماتریس A_{11} و A_{22} که زیرسیستم‌های G_1 و G_2 را نشان می‌دهند. این روند در رابطه (۲) آورده شده است [۲۲]:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

مجموع نُرم‌های فروبنیوس 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]:

$$S = \|A_{12}\| + \|A_{21}\| \qquad (۳)$$

در این سناریو اگر فرض شود که تعادل توان‌راکتیو با جبران‌سازهای محلیقابل کنترل است، می‌توان اثرات توان‌راکتیو و دامنه‌ی ولتاژ شینه را نادیده گرفت. بنابراین می‌توان معادله‌ی (۳) را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$S = \sum_{j \in V_{G2}} \sum_{i \in V_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} . \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \qquad (۴)$$

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

$$\min S = \min_{V_{G1}, V_{G2} \subset V_G} \left(\sum_{j \in V_{G2}} \sum_{i \in V_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} . \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right) \qquad (۵)$$

۲-۲- توابع‌هدف اختلال در شارش توان و عدم تعادل بار- تولید

هر دو تابع‌هدف اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها، می‌توانند به‌عنوان توابع هدف جزیره‌بندی کنترل‌شده مورد استفاده قرار بگیرند که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند [۱۹،۲۰]، که به‌ترتیب با معادلات (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\left| \sum_{i \in V_1, j \in V_2} P_{ij} \right| \right) \qquad (۶)$$

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left(\sum_{i \in V_1, j \in V_2} \left| P_{ij} \right| \right) \qquad (۷)$$

که در آن P_{ij} مقدار شارش توان اکتیو در خط انتقال بین گره i و j را نشان می‌دهد. در نظر گرفتن اختلال درشارش توان خطوط انتقال به عنوان تابع هدف، جزایری را ایجاد می‌کند که با الگوی توان- جریان حالت بدون اغتشاش کمترین تفاوت را دارند. این ویژگی تابع هدف در مورد هریک از جزیره‌ها،پایداری حالت گذرارا بهبود بخشیده، امکان اضافه‌بار خطوط‌انتقال را کاهش داده و امر بازگردانیسیستم را به حالت اولیه تسهیل می‌نماید [۲۴]. این در حالی است که استفاده از عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها به‌عنوان تابع هدف، باعث ایجاد جزایری با سطح بار-تولید متوازن شده که این ویژگی، هزینه کنترل تولید و حذف‌بار در هر یک از جزیره‌ها را به حداقل می‌رساند. از آنجایی‌که 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 حاشیه‌پایداری مثبت و تعادل بار- تولید ضعیف را می توان از طریق تزریق توان پایدارنمود، لذا بایستی از نقطه نظر طراح، پایداری گذرا بیشتر از تعادل بار-تولید مورد توجه قرار گیرد.

۲-۳- نظریه گراف

هر گراف G زوج مرتبی مانند (V, E) است که در آن V مجموعه‌ای متناهی و ناتهی 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 افراز نمود که هر یال آن دارای یک انتها در X و یک انتها در Y باشد، به‌گونه‌ای که هیچ دورأسی در X یا در Y با هم مجاور نباشند. یال‌ها بر دو نوع ساده و جهت‌دار هستند، که هر کدام در جای‌خود کاربردهای بسیاری دارد. جهت‌دار کردن یک گراف یعنی نسبت دادن جهت به هر یالآنگراف. هرگاه بین دو رأس متمایز از یک گراف بیش از یک یال وجود داشته باشد، آن را یک گراف چندگانه می‌گوییم. منظور از افراز یک مجموعه چون A به چند مجموعه، تقسیم مجموعه‌ی A به چند مجموعه ناتهی دیگر است که باهم اشتراکی نداشته باشند و اجتماع همه آن‌ها برابر مجموعه A باشد. در اینجا اگر Vبه‌عنوان مجموعه رئوس باشد افراز Vبه دو مجموعه ناتهی X و Y به این صورت است که:

$$X \cup Y = V, \;\; X \cap Y = \varnothing \qquad (۸)$$

۲-۴- قواعد الگوریتم خوشه‌بندی طیفی

تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای، روشی برای گروه‌بندی داده‌ها یا مشاهدات باتوجه به شباهت یا درجه نزدیکی آن‌ها است. نخست معیار شباهت یا

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

نزدیکی داده‌ها تعیین می‌گردد، در ادامه روش تجزیه و تحلیل خوشه-ای انتخاب شده و در مورد تعداد خوشه‌ها تصمیم‌گیری می‌شود، در نهایت نتایج گروه‌بندی تفسیر می‌شود. از جمله روش‌های خوشه‌بندی ناحیه‌ای می‌توان به $K-means$ و $K-medoids$ اشاره کرد. الگوریتم $K-means$ فضای مسئله را به K زیر مجموعه غیرتهی 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 مراکز خوشه در نظر می‌گیرد. این الگوریتم پیچیدگی محاسباتی بالاتری دارد اما نسبت به نویز مقاوم‌تر بوده و در مورد پایگاه‌های داده‌ای بزرگ عملکرد مناسب‌تری دارد [۲۷]، [۲۸].

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

۲-۴-۱- خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه

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

$$L = D - W \qquad (۹)$$

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

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

محاسبه‌دو بردار ویژه‌اول 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 به‌صورت ستونی ذخیره می‌کند. $y_i \in R^2$ بردار متناظر با i اُمین سطر J می‌باشد.

۳)تقسیم گره‌های $y_i \in R^2$ به خوشه‌های c_1, c_2 با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند $k-medoids$ و یا $k-means$ [۲۹].

متاسفانه، برای دوبخشیکردن گرافبا استفاده ازخوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، اغلب از روش ساده‌ی جدا کردن یک گره از بقیه گراف استفاده می‌شود، واضح است که این راه‌حل برای مسائل جزیره‌سازی قابل قبول نمی‌باشد.

۲-۴-۲- خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه

این روش از مجموع وزن گره‌های موجود در هر زیرگراف، به‌عنوان شرط تعادل استفاده می‌کند تا مانع از وقوع مشکل مطرح‌شده در خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه شود. این مسئله سبب تعریف برش نرمال ($Ncut$) [۳۰] می‌گردد:

$$Ncut(V_1,V_2) = \frac{cut(V_1,V_2)}{weig(V_1)} + \frac{cut(V_1,V_2)}{weig(V_2)} \qquad (۱۰)$$

که در آن $weig(V_1) = \sum_{i\in V_1} D_i$، مجموع همه وزن‌های گره‌های G_1 می‌باشد. $weig(V_2)$ مشابه همین تعریف در مورد G_2 وجود دارد. استفاده از وزن گره‌ها به‌عنوان شرط تعادل، احتمال ایجاد یک زیرگراف باوزن‌های خیلی‌کوچک 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 به‌دست آورد [۳۰] و [۳۱]:

۱) محاسبه‌ی دو بردار ویژه‌ی 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 به‌صورت ستونی ذخیره می‌کند. $y_i \in R^2$ بردار متناظر با i اُمین سطر J می‌باشد.

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

۳- مدلسازی و معرفی الگوریتم پیشنهادی

در مرحله اول الگوریتم، به کمک روش پیشنهادی ژنراتورهای هم‌نوا گروه‌بندی می‌شوند. سپس این گروه از گره‌هایژنراتوری به‌عنوان قید برای مرحله دوم الگوریتم جزیره‌بندی کنترل شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس در مرحله دوم از الگوریتم، گراف استاتیکی G_Sبا استفاده از داده‌های توان- جریان ساخته می‌شود. این گراف شامل همه گره‌ها ووزن کمان‌هایی است که به‌عنوان مقدار مطلق توان‌اکتیو مبادله شده بین گره‌های i و j تعریف شده‌اند. سپس گره‌هابااستفاده از خوشه‌بندی طیفی مقید گروه‌بندی خواهند شد تامسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده را حل کنند. روندنمای الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳-۱- گراف دینامیکی

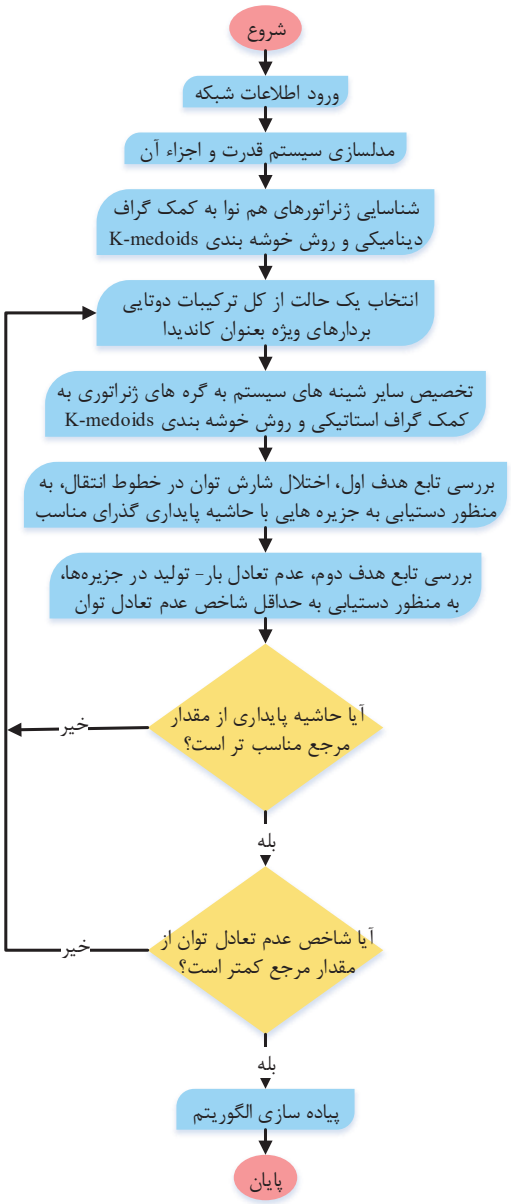
گروه‌های ژنراتوری هم‌نوا در سیستم قدرت در نظر گرفته‌شده را می توان با تشکیل یک گراف که نشان‌دهنده اتصال دینامیکی بین گره‌های ژنراتوری است (گراف دینامیکی)، به‌دست آورد. سپس خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه جهت گروه‌بندی گره‌های ژنراتوری براساس دینامیک اتصالات شان به این گراف اعمال می‌شود. در اینجا قید اصلی مسئله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

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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3 Fall 2017

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]



شکل(۱): روندنمای الگوریتم پیشنهادی

$$[L_D]_{ij}=\begin{cases}-\sum_{l=1,l\neq i}^{m}[L_D]_{ij} & if\ i=j\\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}}=-|V_i||V_j|B'_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j) & if\ i\neq j\end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن B'_{ij} بخش موهومی ماتریس ادمیتانس شبکه است که به گره‌هایژنراتوری کاهش می‌یابد [۲۱]. وزن کمان‌هایگراف 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 لاپلاسین L_D، مدل دینامیک خطی درجه دوم سیستم قدرت با m ژنراتور به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۱]:

$$M\ddot{X}=L_D X \quad (۱۲)$$

$$M=diag(2H_1/\omega_0, 2H_2/\omega_0, ..., 2H_m/\omega_0) \quad (۱۳)$$

که در آن M ماتریس اینرسی است.

بنابراین اولین مرحله از الگوریتم به‌صورت 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) محاسبه‌دو بردار ویژه‌ی 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 به‌صورت ستونی ذخیره می‌کند. $y_i\in R^2$ بردار متناظر با iاُمین سطر J می‌باشد.

۴)تقسیم گره‌های $y_i\in R^2$ به زیرگروه‌های V_{G1} و V_{G2} با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی $k-medoids$.

۵) انتخاب V_{G1} و V_{G2} به‌عنوان گره‌های گراف دینامیکی جدید و بازگشت به مرحله‌ی اول.

۳-۲- گراف استاتیکی

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

گراف استاتیکی $Gs(V_s, E_s, W_s)$ را می‌توان برایسیستم 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 خوشه‌بندی طیفی نیاز است، باید موضوع تلفات درونسیستم را نیز در نظر گرفت. برای تضمین متقارن بودن ماتریس W_s، المان‌های آن به‌صورت $(|P_{ij}|+|P_{ji}|)/2$ تعریف می‌شوند.

ماتریس لاپلاسین L_S برای گراف استاتیکی G_S را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$[L_s]_{ij}=\begin{cases}-\sum_{l=1,l\neq i}^{n}[L_S]_{ij} & if\ i=j\\ \frac{|P_{ij}|+|P_{ji}|}{2}=-|V_i||V_j|B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j) & if\ i\neq j\end{cases} \quad (۱۴)$$

که در آن B_{ij} ماتریس حاصل از درایه‌های موهومی ماتریس ادمیتانس شبکه است.شایان‌ذکر است که گروه‌های ژنراتوری به‌دست‌آمده در مرحله اول، به‌عنوان قیدهایی در مرحله دوم الگوریتم لحاظ می‌شوند [۷].

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

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

۱) قیداتصالات ضروری: تمام گره‌هایژنراتوری که در مرحله‌ی اولدر یک گروه قرار داشتند، باید درمرحله دومبه‌هم متصل شوند.

۲)قید اتصالات غیرمجاز: گره‌های ژنراتوری که در مرحله اول در دو گروه متفاوت قرار داشتند، نمی‌توانند در مرحله دوم به‌هم متصل شوند.

خوشه‌بندی طیفی مقید یک روش کارآمد برای حل مسائل خوشه‌بندی با قیدهای جفت-هوشمند می‌باشد. می‌توان با تصحیح زیرفضای راه‌حل با استفاده از ماتریس تصویر، قیدهای جفت-هوشمند را لحاظ کرد [۷]. بدون از دست دادن کلیت مسئله، می‌توان فرض کرد که اولین گروه m_1 تایی ازگره‌ها، متعلق به خوشه c_1 و m_2 گره بعدی متعلق بهخوشه c_2 می‌باشند، سپس ماتریس تصویر U به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$U=\begin{pmatrix} 1_{m1} & 1_{m1} & 0_{m1\times(n-m)} \\ 1_{m2} & -1_{m2} & 0_{m2\times(n-m)} \\ 1_{(n-m)} & 0_{(n-m)} & I_{(m-n)\times(n-m)} \end{pmatrix} \qquad (۱۵)$$

که در آن I ماتریس واحد است و 1 بردار ستونی با درایه‌های ۱ است و 0 ماتریس یا بردار صفر می‌باشد. به این ترتیب، زیر فضای راه‌حل 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 خوشه‌ی یکسان در فضای n بعدی، دارای یک گره معادل در فضای $(n-m+2)$ بعدی می‌باشند تا قیود جفت- هوشمند تحقق یابند.حال می توان خوشه‌بندی طیفی مقید را به گراف استاتیکی G_S اعمال کرد تا کات‌ست‌هاییبا کمترین اختلال در شارش توان یافت شوند که بتوانند قیدهای گروه‌بندی ژنراتورهای تولیدشده در مرحله اولالگوریتم را تحقق بخشند. بنابراین مرحله دوم الگوریتم را می‌توان به‌صورت زیر بیانکرد:

۱)تشکیل گرافاستاتیکی G_s از همه گره‌ها؛ وزن کمان‌ها به‌صورت $(|P_{ij}|+|P_{ji}|)/2$ تعریف می‌شوند.

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

۳) محاسبه‌یدو 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_{v1}, U_{v2} را به‌صورت ستونی ذخیره می‌کند. $y_i \in R^2$ بردار متناظر با iاُمین سطر J می‌باشد.

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

۶) انتخاب V_1 یا V_2 به‌عنوان مجموعه‌ی گره‌های گراف استاتیکی جدید وبازگشت به مرحله‌ی اول.

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_s 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 خوشه‌بندی شینه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه تمامی ترکیب‌های دوتایی ممکن از بردارهای ویژه در نظر گرفته شده و براساس هر کدام از ترکیب‌ها، خوشه‌بندی طیفی پیاده‌سازی شده و در نهایت جزیره های مطلوب بدست آمده‌اند. تمامی نتایج حاصل از فرآیند خوشه‌بندی، ترکیب‌های ممکن نمی‌باشند، چرا که در جزیره‌بندی باید تمامی شینه‌ها در زیرگراف‌های نهایی به‌دست 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 به‌منظور 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 ژنراتور 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 معرفی شده فوق، حالت‌های غیرممکن شناسایی و ترکیب‌های ممکن نهایی برای جزیره‌بندی بدست آورده می‌شوند.

۴-۳- 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.

$$a_{ij}=\frac{P^{j}_{i,served}}{P^{j}_{i,total}} \qquad (۱۶)$$

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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3 Fall 2017

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]

۴- شبیه سازی و مطالعات عددی

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

$$\left(L_D-\lambda M\right)v=0\rightarrow\left|L_D-\lambda M\right|=0\rightarrow$$
$$\lambda=98.686\,,\ -3.3979\text{ e-}16\,,\ -76.786\,,\ -23.983\,,\ -7.6823,3.0688,35.187,8.3574,24.928,-115.4 \qquad (۱۷)$$

$$\left[L_D-\lambda_1 M\right]v_1=0\rightarrow v_1=\begin{bmatrix}0.000042233723645\\-0.000953605665423\\0.000652745616318\\-0.046460496898016\\0.045490643914213\\-0.003440638503733\\0.003996181212920\\0.002549847132071\\0.002370894352212\\0.000021439527304\end{bmatrix};\left[L_D-\lambda_2 M\right]v_2=0\rightarrow v_2=\begin{bmatrix}1\\1\\1\\1\\1\\1\\1\\1\\1\\1\end{bmatrix};$$

$$y_1=\left[0.000042233723645\quad 1\right];\ y_2=\left[-0.000953605665423\quad 1\right];$$
$$y_3=\left[0.000652745616318\quad 1\right];\ y_4=\left[-0.046460496898016\quad 1\right];$$
$$y_5=\left[0.045490643914213\quad 1\right];\ y_6=\left[-0.003440638503733\quad 1\right];$$
$$y_7=\left[0.003996181212920\quad 1\right];\ y_8=\left[0.002549847132071\quad 1\right];$$
$$y_9=\left[0.002370894352212\quad 1\right];\ y_{10}=\left[0.000021439527304\quad 1\right];$$

ابتدا فرض می‌شود که بردارهای y_1 و y_4 به‌عنوان مراکز خوشه‌ها انتخاب شوند. بنابراین کافی است فاصله بردارهای دیگر نسبت به آنهاتعیین 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:

$$d_{ij}=\left|y_i(1)-y_j(1)\right|+\left|y_i(2)-y_j(2)\right|,i\neq j,i,j=1,2,3 \qquad (۱۸)$$

جدول (۱): نتایج الگوریتم $k-medoids$ با درنظر گرفتن گره‌های ۱ و ۴ به‌عنوان $medoid$ ها

مراکز خوشه ها	$c_1=1$	$c_2=4$
فاصله گره ژنراتور ۲ تا	۱/۰۰۱	۰/۰۴۵۵
فاصله گره ژنراتور ۳ تا	۰/۰۰۰۶	۰/۰۴۷۱
فاصله گره ژنراتور ۵ تا	۰/۰۴۵۴	۰/۰۹۲۰
فاصله گره ژنراتور ۶ تا	۰/۰۰۳۵	۰/۰۴۳
فاصله گره ژنراتور ۷ تا	۱/۰۰۴	۰/۰۵۰۵
فاصله گره ژنراتور ۸ تا	۰/۰۰۲۵	۰/۰۴۹۰
فاصله گره ژنراتور ۹ تا	۰/۰۰۲۳	۰/۰۴۸۸
فاصله گره ژنراتور ۱۰ تا	۱	۰/۰۴۶۵

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

$$y_1=\left[-0.0013\quad 0.0291\right],y_2=\left[0.0007\quad 0.0183\right],y_3=\left[-0.0566\quad 0.0024\right],$$
$$y_4=\left[0.0550\quad 0.0063\right],y_5=\left[-0.0040\quad 0.0062\right],y_6=\left[0.0051\quad 0.0223\right], \qquad (۱۹)$$
$$y_7=\left[0.0047\quad -0.0325\right],y_8=\left[0.0028\quad -0.0310\right],y_9=\left[0\quad -0.0170\right],$$

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 به‌عنوان $medoid$ ها

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

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 $medoid$ 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 اول	گروه دوم	گروه سوم
{۲،۳،۴،۵،۶،۷}	{۸،۹،۱۰}	{۱}

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

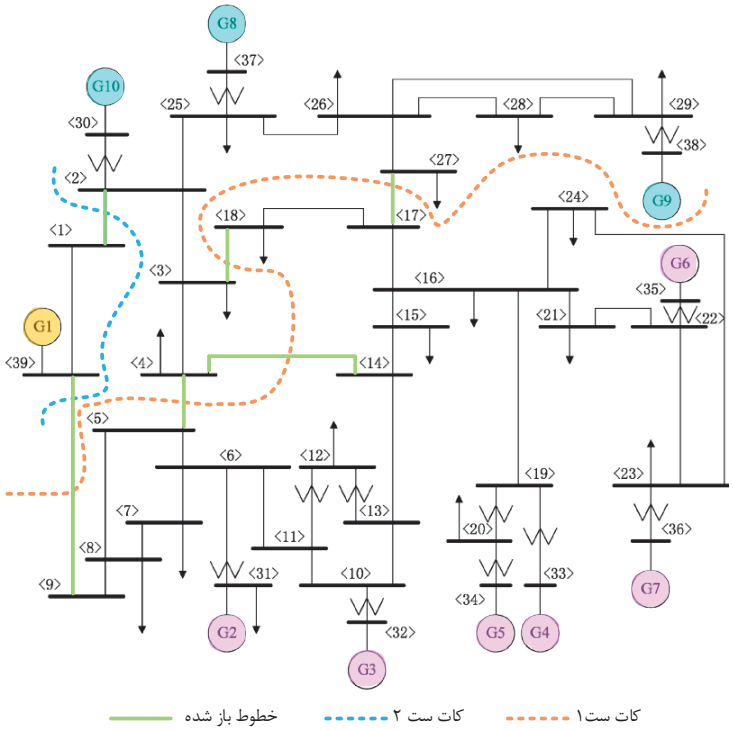
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

جدول (۴): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی

خوشه	شینه های تعلق یافته به هر خوشه
$c_1 = \{۳۰،۳۷،۳۸\}$	{۲،۳،۴،۲۵،۲۶،۲۷،۲۸،۲۹}
$c_2 = \{۳۹\}$	{۱}
$c_3 = \{۳۱،۳۲،۳۳$ ،۳۴،۳۵،۳۶}	{۵،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵ ،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴}



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

همان‌طور که در 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، به‌عنوان ترکیب بهینه ممکن برای جزیره‌بندی انتخاب می‌گردد. در ابتدا هم‌نوایی ژنراتورها بررسی شده و متناسب با گراف دینامیکی به‌دست آمده ترکیب‌های مختلف برای تخصیص بقیه شینه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

روند فوق بر روی سیستم ۳۹ شینه پیاده‌سازی می‌شود. در این حالت ۳۸ بردار ویژه در سیستم وجود خواهد داشت که به ۷۰۳ حالت مختلف می‌توان یک ترکیب دوتایی از این مجموعه انتخاب کرد. بنابراین، باید ۷۰۳ ترکیب مختلف از جزیره‌بندی به‌دست آمده و به‌ازای تمامی حالات پخش‌بار صورت‌گرفته و درصد عدم‌تأمین‌بار به‌ازای هر حالت به‌دست می‌آید. جدول ۵ نتایج به‌دست آمده برای ۵ ترکیب 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 ۳۷، ۳۸ و ۳۰، 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

(*: بردارهای ویژه - **: درصد عدم‌تامین‌بار)

	*	ساختار جزیره‌بندی	**
۱	۲۸و ۳۰	{۱،۹،۲۲،۲۳،۲۴،۲۷} {۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۱۰،۱۱،۱۳،۲۵} {۱۲،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱،۲۶،۲۸،۲۹}	۰
۲	۱۲و ۳۱	{۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۹،۲۰،۲۵} {۱،۹،۱۰،۱۲،۲۲،۲۳،۲۶،۲۷} {۱۱،۱۳،۱۸،۲۱،۲۴،۲۸،۲۹}	۱

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3 Fall 2017
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]

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

در این حالت ۷۸ 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 ۳۹ شینه، در هر کدام از حالات، پخش بار اجرا شده و میزان عدم تامین بار بر حسب درصد به‌دست آمده است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که ترکیب نخست در جدول ۵ منجر به حالت بهینه جزیره‌بندی از نقطه نظر پایداری گذرا و کم‌ترین میزان خاموشی در سیستم پس از جزیره‌بندی برای سیستم ۳۹ شینه خواهد شد. مشاهده می‌شود که نتیجه به‌دست آمده در بخش قبل برای جزیره‌بندی، حالت بهینه نبوده است.

۴-۱- سناریوی اول: کاهش دامنه ولتاژ

طرح جزیره‌بندی پیشنهادی بایستی علاوه بر شرایط بهره‌برداری عادی در شرایط غیرعادی و خطادار نیز عملکرد مطلوب داشته باشد. در این سناریومسئله کاهش دامنه‌ولتاژ شینه‌های سیستم مورد مطالعه قرار گرفته‌است. این رخداد ممکن است که در اثر عوامل مختلف از قبیل افزایش میزان مصرف، پیک پیش‌بینی نشده، خرابی خازن‌های موجود در سیستم، کاهش سطح توان‌راکتیو تولیدی در سیستم و عوامل مختلف دیگر ایجاد گردد. در این حالت ولتاژ مربوط به تمامی شینه‌های غیرتولیدی ۱۰ درصد کاهش یافته است. در این حالت جزیره‌بندی کنترل شده مطابق جدول ۶ و شکل ۳ به‌دست 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 عملاً ولتاژ شینه‌های ژنراتوری به کمک تولید یا تزریق توان راکتیو در حد مطلوب نگه داشته می‌شود. ولی از سوی دیگر، به‌دلیل 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.

جدول (۶): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو اول

خوشه	شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه
{۳۷،۳۸،۳۰} $c_1 =$	{۲،۳،۴،۵،۷،۸،۱۴،۱۵،۱۶ ۱۷،۲۰،۲۵،۲۶،۲۷،۲۸،۲۹}
$c_2 = \{۳۹\}$	{۱،۹}
$c_2 = \{۳۱،۳۲،۳۳$ $۳۴،۳۵،۳۶\}$	{۶،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۸ ۱۹،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴}

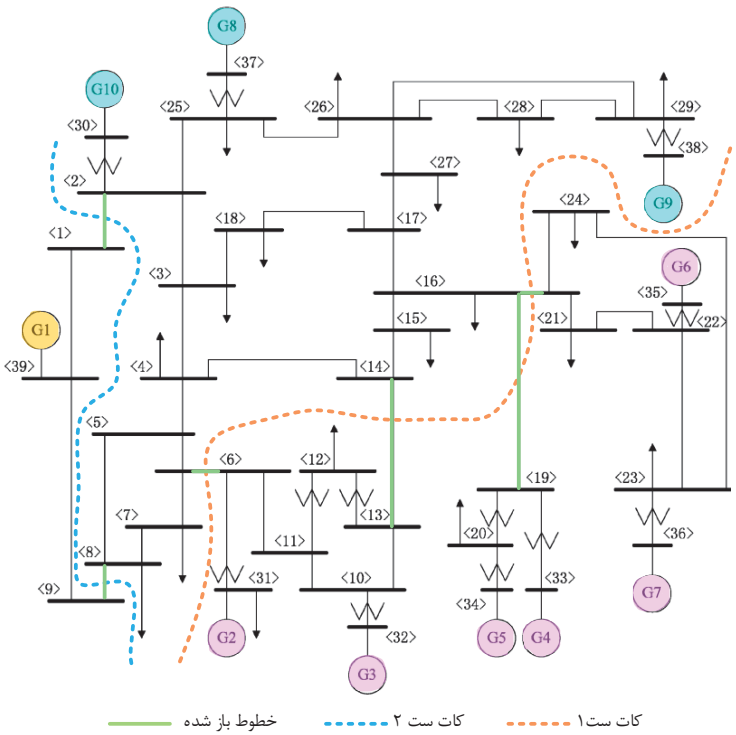
۴-۲- سناریو دوم: افزایش دامنه ولتاژ

در این سناریو افزایش دامنه ولتاژ از حد مجاز که در این مطالعه برابر با ۱/۰۵ پریونیت 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 صورتی‌که مشکل به موقع شناسایی و برطرف نگردد، رله‌های اضافه ولتاژ تریپ داده و در این حالت جزیره‌بندی کنترل‌شده راهکاری موثر برایجلوگیری از فروپاشی سیستم خواهد بود. در سناریو اول فرض شده است که ولتاژ تمام شینه‌های غیرژنراتوری ۱۰ درصد افزایش یافته است. در این سناریو جزیره‌بندی کنترل‌شده مطابق جدول ۷ و شکل ۴ به‌دست خواهد آمد.

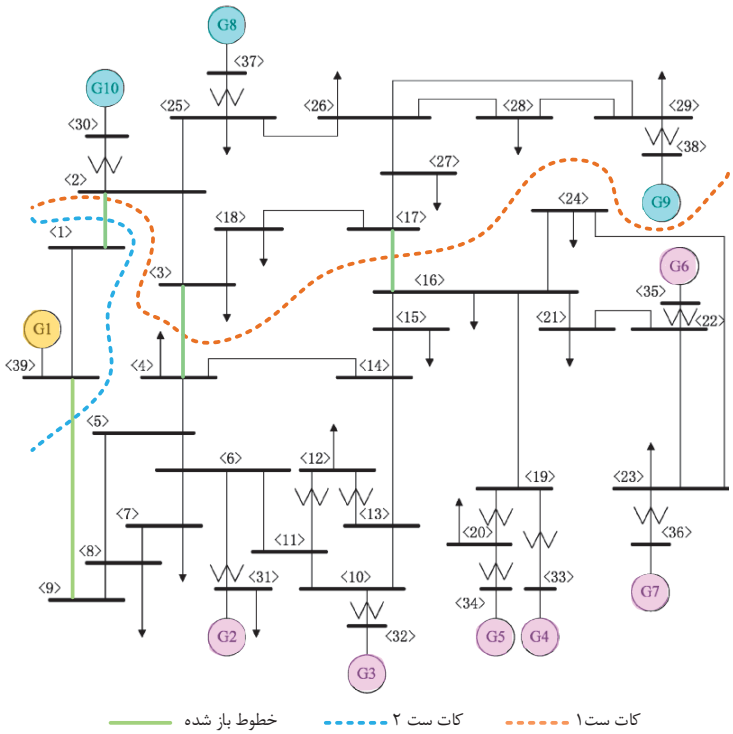
مشاهده می‌گردد که در این حالت نیز ترکیب ژنراتورهای هم‌نوا به‌دلیل ذکرشده در بخش قبل تغییر نکرده است. اما توجه به چند نکته ضروری به‌نظر می‌رسد. نخست آن‌که در این حالت عملاً تمامی باس‌ها بین دو گروه ژنراتوری هم‌نوا که پایدارتر بوده و توانایی جبران کمبودهای یکدیگر را دارند، تقسیم شده‌اند. ژنراتور ۱ موجود در باس ۳۹ به‌دلیل اینکه در یک ناحیه دیگر واقع شده و فاصله زیادی با ژنراتورهای دیگر دارد، عملاً در حالت خطای افزایش ولتاژ، فقط بار محلی خود را تأمین می‌کند. دلیل دیگر مجزا شدن ژنراتور ۱ این است که این ژنراتور کوچک بوده و ثابت اینرسی 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 عمل‌کردن تجهیزات حفاظتی در سیستم خواهدشد. بنابراین، در چنین شرایطی سعیشده است سیستم به نحوی جزیره‌بندی گردد که پایدارترین ترکیب ممکن به‌دست آید.

شبکه مستعد فروپاشی خواهد شد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017



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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

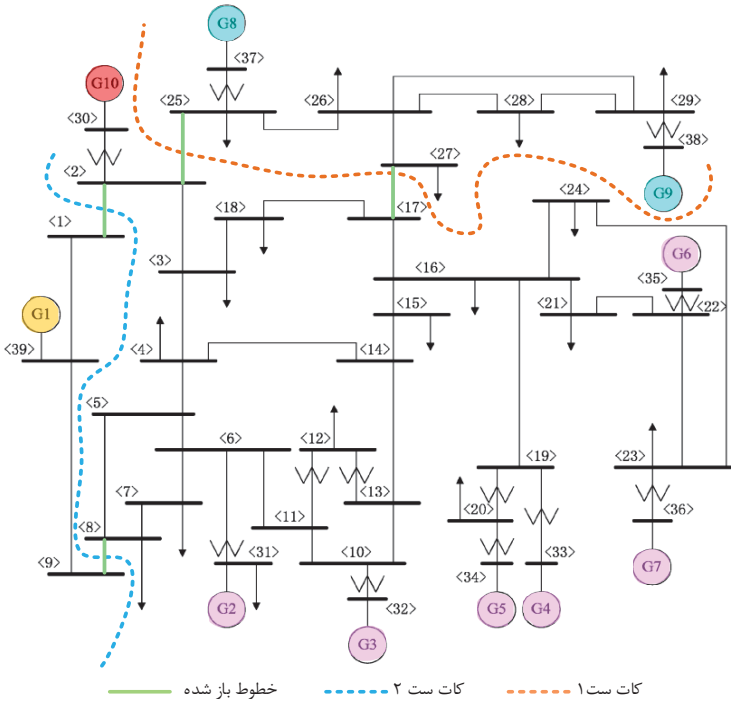
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]

جدول (۷): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو دوم

خوشه	شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه
$c_1 = \{۳۷،۳۸،۳۰\}$	{۲،۳،۴،۱۱،۱۳،۱۷،۲۰ ۲۴،۲۵،۲۶،۲۸،۲۹}
$c_2 = \{۳۹\}$	{۱}
$c_2 = \{۳۱،۳۲،۳۳$ ۳۴،۳۵،۳۶}	{۵،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۲،۱۴ ۱۵،۱۶،۱۸،۱۹،۲۱،۲۲}

۴-۳- سناریو سوم: خروج ژنراتور

در این سناریو خروج ژنراتور شماره ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته‌است. ژنراتور ۱۰ به‌این 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 شده‌است.



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

جدول (۸): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو سوم

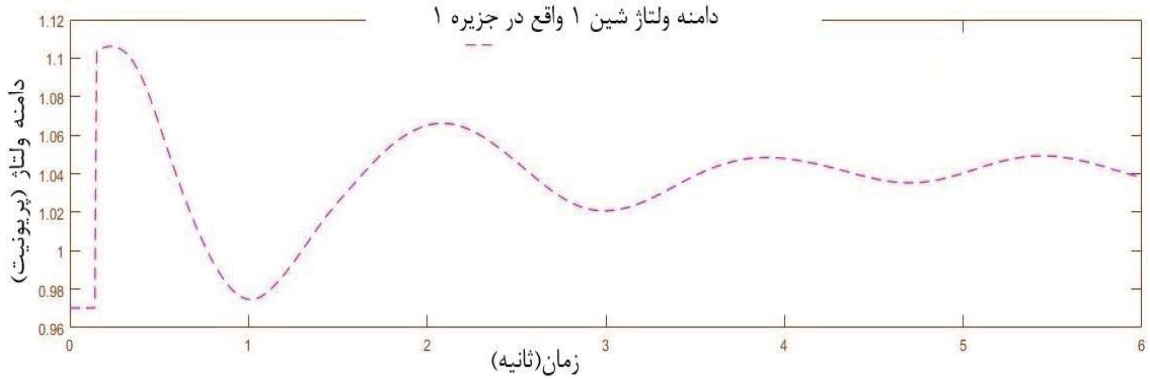
خوشه	شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه
$c_1 = \{۳۹\}$	{۱،۹}
$c_2 = \{۳۷،۳۸\}$	{۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۱۰ ۱۱،۱۳،۱۴،۲۴،۲۶،۲۷}
$c_2 = \{۳۰،۳۱،۳۲،۳۳$ ۳۴،۳۵،۳۶}	{۱۲،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹ ۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۸،۲۹}

نتایج نشان می‌دهد که در این حالت نیز الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی و به‌صورت کنترل‌شده‌ای سیستم‌قدرت را جزیره‌بندی می‌کند. در حالت خروج ژنراتور چون هم سطح ولتاژ و هم زاویه δ تغییر می‌کنند، هم ترکیب ژنراتورهای هم‌نوا و هم باس‌های تعلق گرفته به هر زیرگراف تغییر پیدا کرده است.

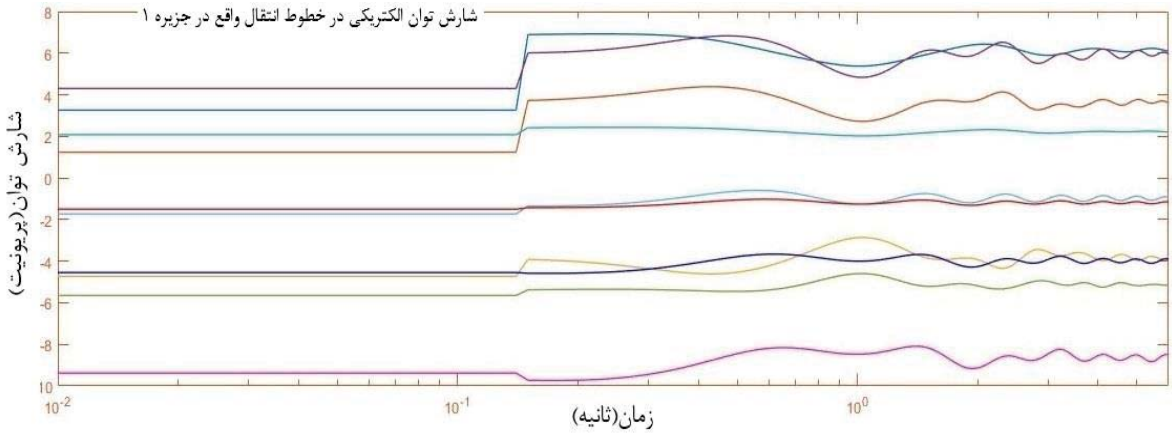
۴-۴- شبیه‌سازی زمانی

در این بخش مطالعات شبیه‌سازی حوزه زمان بر روی سیستم آزمون ۳۹ شینه براساس ترکیب جزیره‌بندی بهینه به‌دست آمده صورت گرفته‌است. شبیه‌سازی زمانی در محیط نرم‌افزاری *MATLAB* و به‌کمک جعبه‌ابزار *PST* صورت گرفته‌است.

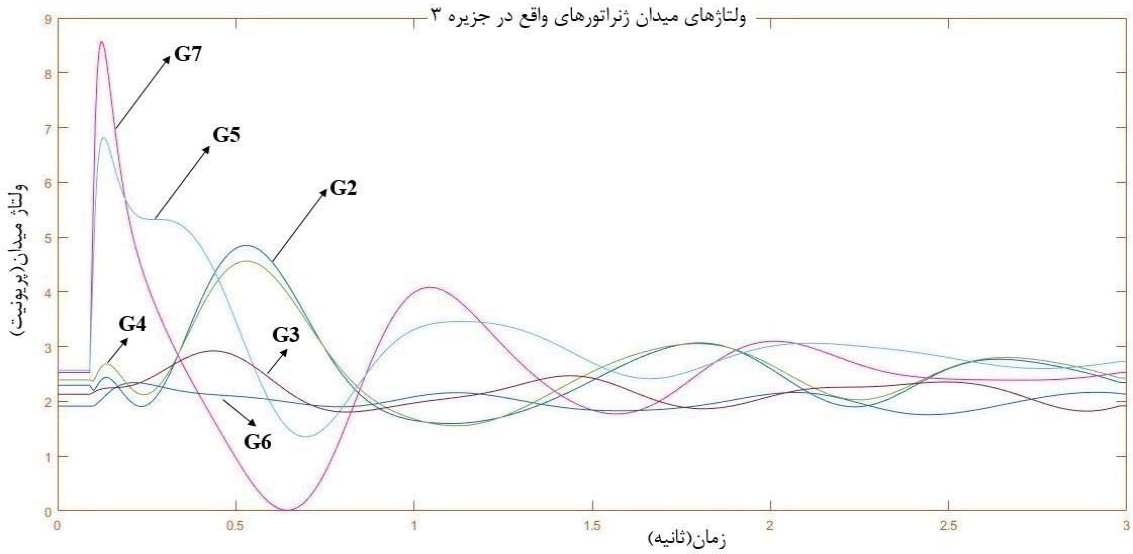
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017



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



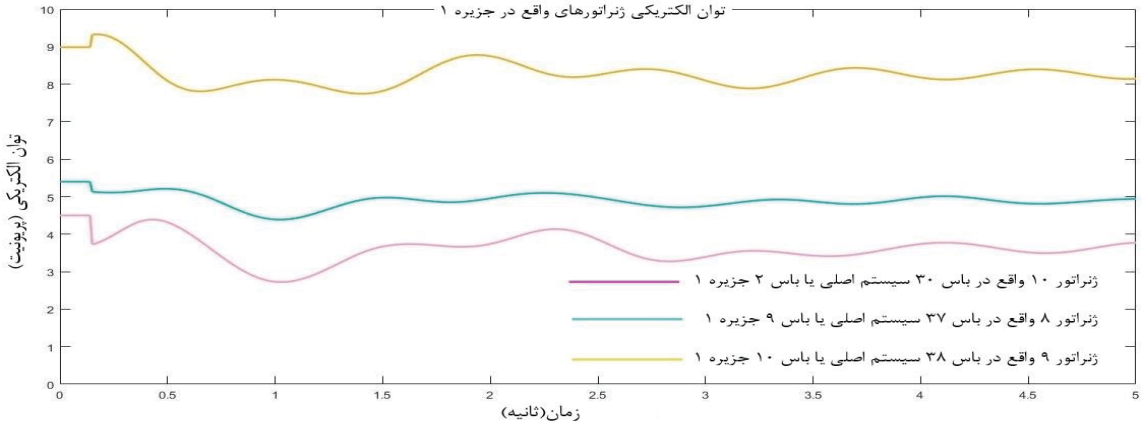
شکل (۷): شارش توان درخطوط جزیره ۱ قبل و بعد از جزیره‌بندی



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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]



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

لازم‌به‌ذکر است که جعبه ابزار PSTیک بستهکنترل و شبیه‌سازی بر اساس نرم‌افزار متلب می‌باشد که در مطالعات سیستم‌های قدرت همچون تحلیل انواع پایداری، مباحث مختلف خطا، پخش‌بار و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد[۳۲].

سیستم‌های قدرت ناحیه وسیع به‌دنبال وقوع خطا، با نوساناتی در فرکانس، زاویه روتور، ولتاژ و ... مواجه می‌شوند. که متناسب با نوع و شدت خطا، سیستم قدرت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. جزیره‌بندی کنترل‌شده سیستم‌های قدرت که عموما 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 جزیره‌بندی، 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 ۹-۶ پاسخ زمانی شبکه‌قدرت به طرح جزیره‌بندی پیشنهادی مطالعه شده است. اعتبار و صحت عملکرد این الگوریتم با انجام شبیه-سازی‌های زمانی در ارتباط با توان‌های انتقالی از خطوط، دامنه ولتاژ شینه‌ها، ولتاژهای میدان و ... بررسی گردیده است. میل نمودن زیرسیستم‌های جزیره‌ای بعد از طی دوره‌های زیرگذرا و گذرای کوتاهبه یک حالت ماندگار و وضعیت تعادل جدید نشان دهنده اعتبار و کارایی طرح پیشنهادی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برخی از نواقص و معایب روش‌های قبلی برطرف و ایده‌های جدیدی برای بهبود نتایج و تشکیل جزیره‌های بهینه ارائه گردید. روش خوشه‌بندی 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 ایجاد جزیره‌هایی متعادل از لحاظ بار-تولید باعث ایجاد زیرسیستم‌هایی بهینه از دیدگاه های مختلفی از جمله توجیه اقتصادی طرح، وقوع حداقل خاموشی‌ها، تسهیل در امر بازگردانی سیستم و ... می‌شود. تاکنون هیچ طرحی به‌صورت هم‌زمان اهداف فوق‌الذکر را درنظر نگرفته است. از این‌رو این مطالعه با انجام این کار اقدامات متعاقب موردنیاز در رابطه با بازپیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف‌بار را حداقل می‌کند و جزایری با سطح پایداری گذرای بالاتر و کیفیت مناسب‌تری از لحاظ تعادل بار-تولید را ایجاد می‌نماید. در واقع علاوه بر بهبود نتایج خروجی، هر دو تابع‌هدف مرسوم در فرآیند جزیره‌بندی در نظر گرفته شده‌اند،که این امر فرآیند سنکرون‌سازی هر یک از جزیره‌ها پس از رفع خطا و نیز بازگردانی مجدد سیستم به‌حالت اولیه را تسهیل می‌نماید. در این مطالعه روندی مبتنی بر بهینه‌سازی برای انتخاب بردارهای ویژه ماتریس لاپلاسین ارائه گردید که منجر به انتخاب جزیره‌بندی بهینه از بین ترکیب‌های ممکن شد. در نهایت با پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم آزمون ۳۹ شینه IEEEتحت شرایط عادی و خطادار، کارآیی و اعتبار روش پیشنهادی سنجیده شد. شبیه‌سازی‌های زمانی انجام شده در محیط MATLABو همچنین به‌وسیله جعبه‌ابزار PSTنشان‌دهنده کارآیی روش پیشنهادی می‌باشد.

فهرست مراجع

[۱]اسدی ح.، صنایع‌پسند م .، داورپناه م.، معرفییک روش جدید برای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت برمبنای حفاظت گسترده شبکه، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۴ (۲): ۳-۱۳، ۱۳۸۶.

[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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

[22]Lamba, S. S., Nath, R., "Coherency identification by the method ofweak 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 operationof large-scale power systems using OBDD-based methods," IEEETrans. 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," IEEETrans. 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 dynamicsand control engineering education and research," IEEE Trans. OnPower 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.pnnl.gov/ benchmark/ ieeess/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-Garcia, 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.
[۱۰]حسین‌پور م.ج.، پروین ح.، انتخاب خوشه‌های اولیه به‌کمک الگوریتم‌های هوشمند برای مشارکت در خوشه‌بندی ترکیبی، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳ (۲): ۱۶۳-۱۸۴، ۱۳۹۵.
[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, Gl. 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.,LiuJ.,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 Applicationsto Power Systems," New York: Springer- Verlag, 1982.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-09-03]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.4.9]