

روشنی مبتنی بر تئوری گراف جهت تعیین بهینه جزیره‌ها در فرآیند بازیابی

حسین افراخته^۱ و محمود رضا حقی فام^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

^۲ آستاد گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۵/۷/۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۴/۱۹، تاریخ تصویب ۸۶/۷/۷)

چکیده

در این مقاله، اثر تغییر تعداد جزیره‌ها در فرآیند بازیابی مورد مطالعه قرار گرفته و یک روش جدید مبتنی بر تئوری گراف به منظور تعیین حدود و مرزهای بهینه هر جزیره ارائه خواهد شد. تابع هدف، مینیمم کردن شاخص انرژی تامین نشده (ENS) با در نظر گرفتن قیود مختلف بهره برداری شامل حدود ولتاژ شینه‌ها، حداکثر ظرفیت خطوط انتقال و محدوده توان واحدهای تولیدی است. تعیین مقدار تقریبی شاخص ENS بر اساس روش اختصاص ظرفیت تولید به بارهای مصرفی انجام گرفته که چگونگی اجرای این روش نیز بیان گردیده است. مبنای بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک بوده و یک کدینگ خاص برای مدل سازی شبکه و اعمال آن به الگوریتم بکار رفته است. به منظور ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهادی، سیستم تست IEEE-118Bus مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بدست آمده در تقسیم شبکه تست به ۲ الی ۷ جزیره و تعیین حدود و مرزهای بهینه آنها در بخش مطالعات عددی داده شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک - انرژی تامین نشده (ENS) - بازیابی بار - بازیابی سیستم قدرت - تئوری

گراف - جزیره

مقدمه

فرآیند بازیابی دارای سه مرحله اساسی است که عبارتند از راه اندازی واحدها، بازیابی سیستم و بازیابی بار که در هر کدام از آنها مسائل پیچیده و مختلفی مطرح خواهد بود [۱۲، ۱۳]. به منظور ایجاد سهولت در اجرای فرآیند بازیابی، طراحی استراتژی‌های بازیابی بسیار ضروری است. هدف اساسی از طرح و بکارگیری استراتژی‌های بازیابی، تامین حداکثر مقدار بار مورد تقاضا در هر لحظه از فرآیند بازیابی است. به عبارت دیگر، بازیابی بیشترین مقدار بار قطع شده در کمترین زمان ممکن به صورتی که قیود بهره برداری سیستم نقض نگردد [۱۴].

تاکنون استراتژی‌های متعددی در زمینه بازیابی سیستم قدرت ارائه گردیده است که عمومی‌ترین آنها عبارتند از [۱۵، ۱۲، ۱]:

۱- روش سری^۴

۲- روش موازی^۵

در روش اول، ابتدا شبکه اصلی انتقال بازیابی شده و سپس مرحله به مرحله بارها و واحدهای تولیدی وارد مدار می‌گردند و بازیابی حالت سری بخود می‌گیرد. عیب عمده این روش، تولید توان راکتیو اضافی بوسیله خطوط وصل شده بی بار است. لذا استفاده از این روش

با توجه به رشد روز افزون مصرف و به منظور استفاده بهینه از سیستم قدرت، بهره برداری از آن در نزدیکی ظرفیت اسمی صورت می‌گیرد. کارکرد سیستم قدرت در شرایط حداکثر ظرفیت اسمی و مسائلی از قبیل حوادث غیرمترقبه، خرابی و معایب سیستم‌های حفاظتی، خطاهای انسانی و ... ممکن است سبب از دست رفتن پایداری و بروز قطعی‌هایی گردد. این قطعی‌ها ممکن است بصورت جزئی^۱ و یا سراسری^۲ ظاهر گردد که هر کدام از آنها ویژگی‌ها و مسائل خاص خود را خواهند داشت [۱، ۲، ۳].

مسائل مربوط به بازگرداندن سیستم قطع شده به حالت بهره برداری عادی در هر دو شرایط قطعی جزئی یا سراسری در قالب بازیابی سیستم قدرت^۳ مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۴]. فرآیند بازیابی به دلیل تنوع مسائل، غیرخطی بودن رفتار و ارتباط بین مولفه‌های مختلف در آن، به صورت یکی از مسائل بسیار پیچیده در سیستم قدرت درآمده است [۵]. روش‌های مختلفی در زمینه فرآیندهای بازیابی با هدف بازگرداندن سیستم به شرایط بهره برداری عادی و تامین حداکثر بار ارائه شده است که می‌توان آنها را به چهار دسته کلی برنامه ریزی ریاضی [۶]، روش محاسبات کامپیوتری [۷]، روش‌های ابتکاری [۸، ۹] و روش سیستم‌های هوشمند [۱۰، ۱۱] تقسیم‌بندی کرد.

می‌شود. سپس عمل بازیابی در هر کدام از این جزیره‌ها به صورت همزمان و مستقل از هم انجام گرفته و در نهایت این جزیره‌ها با هم سنکرون شده و سیستم نهائی را تشکیل خواهند داد.

چنانچه بیان گردید، یکی از مهمترین مراحل اجرای استراتژی بازیابی موازی، تقسیم‌بندی شبکه به چند جزیره است. تشکیل جزیره در شبکه‌های قدرت کاربردهای متعددی داشته و از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است. یکی از عواملی که در شبکه‌های قدرت سبب ایجاد جزیره می‌گردد، بروز خطا است. عمل کردن سیستم‌های حفاظتی، از جمله رله‌های افت فرکانس موجب قطع خطوط، تجهیزات و ایزوله کردن ناحیه معیوب از بقیه سیستم شده تا از گسترش قطعی‌ها جلوگیری گردد. به جزیره تشکیل شده در این حالت، جزیره طبیعی^۷ اطلاق می‌شود. به منظور ایزوله کردن کنترل شده ناحیه معیوب و تسهیل در عملیات بازیابی بعدی، ممکن است ناگزیر به قطع بخشی از شبکه شویم که به جزیره بوجود آمده در این حالت، جزیره اجباری^۸ می‌گویند [۱۹،۲۰]. روش‌های تشخیص جزیره‌های ایجاد شده در شبکه در حال بهره برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که می‌توان آنها را به دو دسته روش‌های پسیو و اکتیو تقسیم‌بندی کرد [۲۱،۲۲]. روش‌های دیگری نیز در زمینه چگونگی تعیین جزیره‌ها ارائه گردیده که گروه‌بندی ژنراتورها بر اساس میزان وابستگی آنها تحت عنوان روش Slow Coherency از جمله آنهاست. در این روش، ابتدا واحدهای تولیدی بر اساس میزان وابستگی شان گروه‌بندی شده، سپس جزیره‌هایی متناظر با این گروه‌ها ایجاد می‌گردند [۲۳،۲۴،۲۵،۲۶]. کاربرد این جزیره‌ها بیشتر در معادل سازی‌های دینامیکی شبکه بوده و در بازیابی سیستم‌های قدرت نیز بکار می‌روند. مرجع [۲۷] روش OBDD، مرجع [۲۸] روش می‌نیمال کات ست و مرجع [۲۹] روش BFS در تئوری گراف را جهت تشخیص و تشکیل جزیره‌ها مطرح نموده است.

قابل ذکر است، موارد فوق عمدتاً در شرایط بهره برداری نرمال سیستم به منظور جلوگیری از گسترش قطعی‌ها و در تحلیل و معادل سازی‌های دینامیکی شبکه کاربرد دارند. اما تشکیل جزیره‌ها در ابتدای فرآیند بازیابی و بعنوان یکی از مراحل آن، به منظور

به سیستم‌های قدرت کوچک با خطوط کوتاه و یا در سیستم‌هایی که قابلیت جذب توان رآکتیو بالائی دارند محدود می‌شود. روش دوم (موازی)، که رایج ترین استراتژی بازیابی است، در صورتی بکار می‌رود که قطعی سراسری بوده و امکان تغذیه شبکه از سیستم‌های مجاور وجود نداشته باشد. در این روش، ابتدا سیستم قدرت به تعدادی جزیره^۹ تقسیم می‌شود. سپس خطوط، بارها و نیروگاهها در هر جزیره بازیابی شده و در نهایت تمامی جزیره‌ها با هم سنکرون شده و سایر تجهیزات باقیمانده نیز وارد مدار می‌گردند [۱۷،۱۶،۱۲].

بکارگیری هر کدام از این روش‌ها بستگی به عوامل متعدد مطرح در فرآیند بازیابی از جمله میزان قطعی در شبکه، امکان رسیدن کمک از سیستم‌های قدرت مجاور، مقدار توان مورد تقاضا و تعداد نیروگاههای Black-start خواهد داشت [۱۶]. وضعیت کلیدها در مراحل اولیه اجرای استراتژی می‌تواند بصورت All Opened یا Selected Operation باشد که سهولت اجرای فرآیند بازیابی از ویژگیهای حالت اول و نیاز به اطلاعات جامع مربوط به باز و بسته بودن کلیدها در حالت دوم ضروری خواهد بود [۱۸].

در این مقاله، بازیابی سیستم از حالت قطعی سراسری مد نظر است، بطوری که امکان کمک از سیستم‌های قدرت مجاور وجود نداشته باشد. بنابر این استراتژی موازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضمناً وضعیت کلیدها در مراحل ابتدائی فرآیند بازیابی بصورت All Open خواهد بود. در اجرای این استراتژی که رایج ترین استراتژی بازیابی در صورت بروز قطعی سراسری است، فرآیند کار دارای مراحل زیر خواهد بود [۱۶]:

- ۱- بررسی و ارزیابی سیستم پس از وقوع عیب
 - ۲- تقسیم شبکه به چند جزیره بطوری که هر جزیره حداقل دارای یک واحد نیروگاهی Black-start بوده و امکان کنترل فرکانس و ولتاژ نیز در آن جزیره وجود داشته باشد.
 - ۳- وصل واحدهای Black-start در هر جزیره جهت راه اندازی واحدهای دیگر
 - ۴- وصل بارها و وارد مدار کردن واحدهای تولیدی بیشتر در هر جزیره در صورت نیاز
 - ۵- سنکرون کردن (موازی کردن) جزیره‌ها
- به عبارت دیگر، در روش بازیابی موازی کل سیستم با توجه به توپولوژی و شرایط شبکه به چند جزیره تقسیم

سیستم‌ها، مرزبندی‌های استانی و تقسیم‌بندی‌های مدیریتی در برق‌های منطقه ای و مبادلات خرید و فروش انرژی الکتریکی نقش تعیین کننده ای در انتخاب تعداد و حدود جزیره‌ها ایفاء می‌کند. مرجع [۳۱] در بازیابی شبکه با ۱۶۲ شین، آن را به ۱۰ جزیره تقسیم‌بندی کرده است. لذا آنالیز ریاضی و تئوریک خاصی برای تعیین تعداد و حدود جزیره‌ها بکار گرفته نمی‌شود. اگر چه این کار بسیار آسان انجام گرفته و بکارگیری تجربیات قبلی بازیابی را ممکن می‌سازد، اما از نقطه نظر تابع هدف و میزان بار بازیابی شده، لزوماً مناسبترین گزینه نبوده و حتی ممکن است از نظر ملاحظات دینامیکی، روند اجرای بازیابی را با مشکل مواجه سازد.

به نظر می‌رسد انتخاب مناسب تعداد و حدود جزیره‌ها، می‌تواند به نتایج مطلوبی در فرآیند بازیابی منجر گردد از جمله :

- ۱- کاهش حجم عملیات بازیابی و ایجاد سهولت در مانورهای مختلف بازیابی
- ۲- بهبود شرایط دینامیکی در مراحل مختلف بازیابی جزیره‌ها و سنکرون کردن آنها با یکدیگر
- ۳- تسریع در فرآیند و کاهش محسوس زمان بازیابی
- ۴- کاهش مقدار هزینه و حداقل کردن شاخص انرژی تامین نشده (ENS) در این مقاله به بررسی اثر تغییر حدود و تعداد جزیره‌ها در فرآیند بازیابی پرداخته و یک روش جدید مبتنی بر تئوری گراف جهت تعیین حدود بهینه هر جزیره ارائه خواهد شد. برای این هدف، شبکه تست IEEE-118bus [۳۲] را به کمک الگوریتم ژنتیک^{۱۱} [۳۳] در یک فرآیند تکراری به ۲ الی ۷ جزیره تقسیم نموده و با روش پیشنهادی، مرزهای بهینه هر جزیره تعیین خواهد شد. بدیهی است، تغییر تعداد جزیره‌ها و جابجائی مرزهای مربوطه می‌تواند مقادیر بدست آمده شاخص ENS را بصورت اساسی تغییر دهد.

تابع هدف

به منظور تامین شرایط مطلوب در فرآیند بازیابی، حداقل کردن مقدار شاخص انرژی تامین نشده (ENS) به عنوان تابع هدف (مطابق ۱) در نظر گرفته شده است

ایجاد سهولت در بازیابی، افزایش قابلیت‌های کنترل پذیری شبکه، کاهش محسوس زمان بازیابی و در نهایت ماکزیمم کردن مقدار بار تغذیه شده در هر مرحله از بازیابی انجام گرفته که می‌توان اثر آن را در شاخص انرژی تامین نشده^۹ (ENS) جستجو کرد.

انتخاب تعداد جزیره‌ها باید با روش منطقی انجام گیرد. بدیهی است افزایش بی رویه تعداد جزیره‌ها حتی در صورتی که شرایط مورد نیاز تشکیل هر جزیره رعایت شده باشد، خود می‌تواند موجب طولانی تر شدن فرآیند بازیابی به دلیل افزایش عملیات سنکرونیزاسیون جزیره‌ها و نیز محدودیت‌های خدمه اجراء کننده بازیابی گردد. عوامل مختلفی در تعیین تعداد، حدود و مرزهای هر جزیره موثر خواهند بود که نقاط کار سیستم، توپولوژی شبکه، وجود تجهیزات حفاظتی، محدودیت تعداد اکیپ‌های اجراء کننده فرآیند بازیابی و حتی ملاحظات دینامیکی [۳۰] از جمله آنهاست.

در انتخاب تعداد و مرزهای حاشیه جزیره‌ها و تقسیم‌بندی آنها باید معیارهای زیر مد نظر قرار گیرد [۸، ۱] :

- ۱- در هر جزیره باید قابلیت راه اندازی از حالت وقفه کامل و تامین توان مورد نیاز راه اندازی تجهیزات وجود داشته باشد.
- ۲- در هر جزیره امکان ایجاد توازن بار مصرفی و تولید در بازه مشخص فرکانسی وجود داشته باشد.
- ۳- در هر جزیره باید امکان کنترل و حفظ پروفیل ولتاژ وجود داشته که با استفاده از عملیات کنترلی مناسب نظیر وارد کردن بارها، تغییر تپ ترانسفورماتورها و ... عملی می‌گردد.
- ۴- در هر جزیره امکان مانیتورینگ و نظارت در مرکز کنترل جهت عملیات ضروری نظیر کلیدزنی بصورت هماهنگ وجود داشته باشد.
- ۵- تبادل توان هر جزیره با جزیره‌های مجاور بوسیله خطوط ارتباطی^{۱۰} ممکن باشد.
- ۶- ایجاد ارتباط مخابراتی بین جزیره‌ها امکان پذیر باشد.
- ۷- تجهیزات مورد نیاز جهت سنکرونیزاسیون در خطوط ارتباطی بین جزیره‌ها موجود باشد.

معمولاً تعداد و حدود جزیره‌هائی که در مراحل اولیه بازیابی در هر سیستم قدرت تشکیل می‌شود، از قبل معلوم بوده و این کار غالباً با تکیه بر تجربیات مهندسين بازیابی و اپراتورهای سیستم قدرت انجام می‌گیرد. در بسیاری از

۳- وجود حداقل یک واحد نیروگاهی Black-start در هر جزیره.

$$\sum_{i \in Is} Ng_{bk}^i \geq 1 \quad (4)$$

که در آن Ng_{bk} تعداد شینه‌های دارای واحدهای Black-start موجود در هر جزیره را نشان می‌دهد.

۴- ملاحظات دینامیکی عملیات کلید زنی و بازیابی بار با در نظر گرفتن زمان کلید زنی (ts).

بدیهی است تغییرات نقطه کار سیستم (توان تولیدی و مورد تقاضا) و توپولوژی شبکه می‌تواند تغییرات اساسی در مرزهای بهینه جزیره‌ها ایجاد کند.

هدف اصلی این مقاله، ارائه یک روش جدید به منظور تعیین حدود بهینه جزیره‌های هر شبکه قدرت در راستای بهبود فرآیند بازیابی است. این مکانیزم مبتنی بر تئوری گراف [۳۴] بوده و ابزار بهینه سازی آن الگوریتم ژنتیک است. روش کار بدین صورت است که ابتدا شبکه به دو جزیره فرضی تقسیم می‌شود. سپس به کمک الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن شرایط مختلف تشکیل جزیره‌ها، حدود و مرزهای آنها تا رسیدن به حالت بهینه جابجا خواهند شد. معیار بهینه سازی، مینیمم کردن شاخص انرژی تامین نشده (ENS) است. در مرحله بعد، شبکه مذکور به سه جزیره اولیه تقسیم و به کمک الگوریتم ژنتیک حدود و مرزهای بهینه آنها تعیین می‌گردد. این فرآیند تا تقسیم شبکه به تعداد مطلوب جزیره ادامه یافته و حد نهائی تعداد جزیره‌ها بوسیله محدودیت تعداد اکیپ‌های اجراء کننده فرآیند بازیابی تعیین می‌گردد. از طرفی، افزایش بی رویه تعداد جزیره‌ها می‌تواند موجب طولانی شدن فرآیند بازیابی به دلیل افزایش تعداد عملیات کلیدزنی مورد نیاز در مرحله سنکرون کردن جزیره‌ها گردد. محاسبه تقریبی شاخص ENS، با استفاده از روش اختصاص ظرفیت تولید به بارهای مصرفی انجام گرفته که در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. برای مدل سازی شبکه جهت بکارگیری در بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک، از کدینگ خاصی استفاده شده است که با استفاده از تئوری گراف حدود و مرزهای هر جزیره و ارتباطات خطوط داخلی آنها تعیین می‌گردد.

که با حداکثر کردن مقدار بار تغذیه شده در هر لحظه از زمان بازیابی مطابقت دارد.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad \text{ENS} &= \sum L_i \cdot T_{di} \\ \text{st} : \\ V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} \\ S_{Line}^i &\leq S_{Line}^{\max} \\ P_{Gi}^{\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن L_i بار مصرفی شینه i ام، T_{di} مدت زمان قطع بار شینه i ام، V_i ولتاژ شینه i ام، P_{Gi} و Q_{Gi} توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور i ام، و S_{Line}^i توان ظاهری ظرفیت خط انتقال i ام است. نحوه تعیین مقدار تقریبی ENS در بخش‌های بعدی بیان خواهد شد.

روش پیشنهادی

چنانچه بیان گردید، در اجرای مراحل مختلف فرآیند بازیابی موازی، ابتدا شبکه به چند جزیره تقسیم گردیده و بطور همزمان اکیپ‌های اجراء کننده فرآیند، جزیره‌ها را بطور مستقل بازیابی خواهند کرد. پس از بازیابی تمامی جزیره‌ها، عملیات سنکرونیزاسیون جزیره‌ها انجام و شبکه بطور یکپارچه مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. تعیین تعداد و حدود جزیره‌ها با توجه به عوامل متعددی از قبیل وجود تجهیزات و واحدهای تولیدی و توپولوژی شبکه صورت گرفته که عمده ترین آنها عبارتند از:

۱- ملاحظات توازن توان اکتیو تولیدی و مصرفی که می‌تواند بصورت افزایش یا کاهش فرکانس بروز نماید.

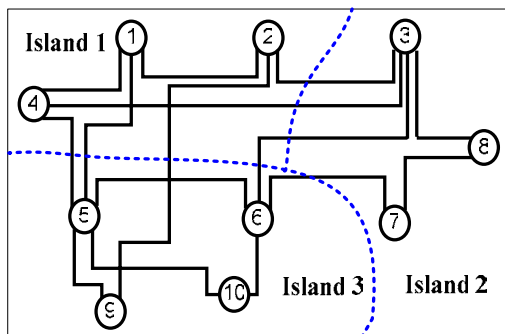
$$\sum_{i \in Is} P_{g_i} - \sum_{j \in Is} L_j - P_{Loss} \geq 0 \quad (2)$$

که در آن، P_{g_i} مقادیر توان تولیدی ژنراتور i ام و L_j بار شینه j ام و P_{Loss} نیز تلفات توان حقیقی در جزیره (Is) را نشان می‌دهد.

۲- ملاحظات مربوط به تعادل توان راکتیو تولیدی، مصرفی و پروفیل ولتاژ در هر جزیره بطور مستقل، که در قالب قید حدود ولتاژ شینه‌ها بیان می‌گردد.

$$V_i^{\min} \leq |V_i| \leq V_i^{\max} \quad (3)$$

که در آن V_i مقدار ولتاژ شینه i ام و V_i^{\min} و V_i^{\max} به ترتیب حدود پائین و بالا ولتاژ شینه‌ها در جزیره i ام را نشان می‌دهد.



شکل ۳: گراف معادل شبکه شکل (۱) با ۳ جزیره.

مطابق شکل (۳)، گره‌های ۱، ۲ و ۴ در جزیره ۱ و گره‌های ۳، ۷ و ۸ در جزیره ۲ و گره‌های ۵، ۶، ۹ و ۱۰ در جزیره ۳ قرار گرفته‌اند. کروموزومی که آرایش جزیره‌های فوق را نشان می‌دهد، بصورت 1121332233 خواهد بود. همچنین رشته‌های کروموزومی 1331254425 و 1332234422 به ترتیب آرایش شبکه فوق با ۴ و ۵ جزیره را نشان می‌دهد.

مراحل اجرای روش پیشنهادی

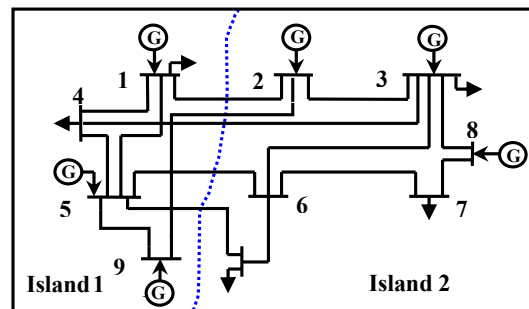
روش پیشنهادی برای تعیین پاسخ بهینه نهایی دارای مراحل زیر است:

۱- تولید جمعیت اولیه: با مشخص بودن تعداد جزیره‌هایی که در ابتدای فرآیند بازیابی باید تشکیل شود، بطور تصادفی جمعیت اولیه ای از کروموزومها تولید می‌گردد که هر کد کروموزومی، یک رشته n رقمی است که در آن n معادل تعداد شیشه‌های شبکه تست است. با استفاده از این آرایش کروموزومی، شبکه داخلی و شیشه‌های درون هر جزیره و مرزهای آن نیز تعیین می‌گردد.

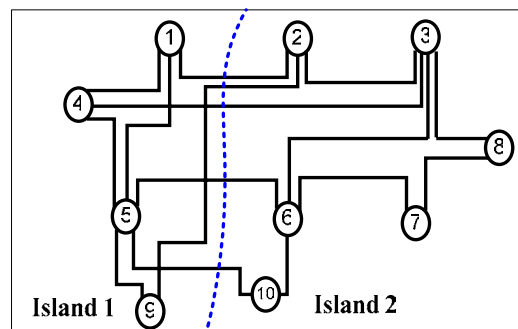
۲- بررسی شرایط مورد نیاز تشکیل جزیره‌ها: شروط مورد نیاز تشکیل هر جزیره برای تمامی کروموزومهای جمعیت اولیه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این شروط شامل وجود حداقل یک واحد نیروگاهی Black-Start و پیوسته بودن گراف شبکه داخلی هر جزیره است. در ابتدا شرط وجود حداقل یک نیروگاه Black-start در هر جزیره بررسی می‌شود. اگر این شرط، حتی در یک جزیره برقرار نباشد، به معنی آن است که جزیره قابلیت بازیابی نداشته و این آرایش کروموزومی از چرخه

مدل سازی شبکه و کدینگ کروموزومی

در این بخش، روش مدل سازی شبکه با یک کدینگ خاص جهت بکارگیری در فرآیند بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردد. مبنای مدل سازی شبکه، تئوری گراف بوده که در آن دیاگرام تک خطی هر شبکه با گراف معادل مربوطه جایگزین می‌شود. فرآیند کار بدین صورت است که ابتدا گراف شبکه رسم شده، سپس به هر شیشه یک کد اختصاص می‌یابد که نشان می‌دهد این شیشه در کدام جزیره قرار گرفته است. کروموزوم مربوط به هر گراف، یک رشته از اعداد صحیح بین ۱ تا تعداد جزیره‌ها است. شکل (۱)، مدار یک شبکه ۱۰ شیشه با دو جزیره را نشان می‌دهد که گراف معادل آن در شکل (۲) داده شده است.



شکل ۱: مدار تک خطی یک شبکه ۱۰ شیشه ای.



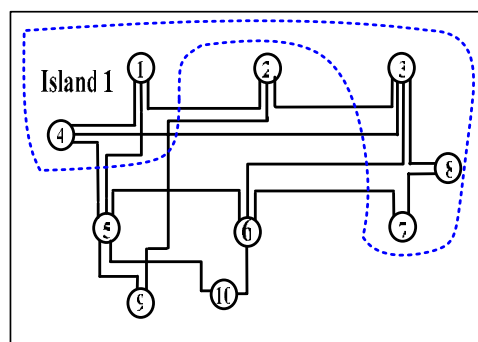
شکل ۲: گراف معادل شبکه شکل (۱).

ملاحظه می‌گردد که گره‌های ۱، ۴، ۵ و ۹ در جزیره ۱ و گره‌های ۲، ۳، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ در جزیره ۲ قرار گرفته‌اند. آرایش کروموزومی که این حالت را نشان می‌دهد، به صورت 1221122212 خواهد بود. در شکل (۳)، این شبکه به ۳ جزیره تقسیم شده است.

بازیابی و اعمال بهینه سازی برای تعیین شاخص ENS، از روش اختصاص ظرفیت تولید به بارهای مصرفی استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا بارهای مصرفی با لحاظ نمودن اولویت آنها برحسب ضریب وزنی رتبه‌بندی می‌شوند. همچنین لیست واحدهای تولیدی با ظرفیت‌های نامی مربوطه تعیین می‌گردد. به کمک تئوری گراف، نزدیکترین واحد تولیدی به اولین بار از لیست بارهای مصرفی مشخص شده و ظرفیت تولیدی مربوطه، به آن بار اختصاص می‌یابد. نزدیکترین واحد تولیدی، واحدی است که برای وصل به بار مورد نظر، نیاز به کمترین تعداد کلیدزنی دارد. اگر مقدار ظرفیت واحد تولید از بار مذکور بیشتر باشد، اولین بار از لیست بارهای مصرفی حذف و از مقدار ظرفیت تولیدی اولین واحد نیز به اندازه مقدار بار مذکور کسر می‌گردد. چنانچه ظرفیت واحد تولیدی از مقدار اولین بار کمتر باشد، واحد تولیدی از لیست مربوطه حذف و از مقدار بار مذکور نیز به اندازه ظرفیت واحد تولیدی کسر خواهد شد. این روند تا تغذیه نهائی بارها بوسیله واحدهای تولیدی ادامه یافته و تمامی عملیات کلیدزنی و روند تغییرات مقدار بار تغذیه شده نیز ثبت می‌گردد. چنانچه به منظور اعمال ملاحظات دینامیکی و برطرف شدن حالت‌های گذرا ناشی از هر کلیدزنی، مدت زمانی به هر عمل کلیدزنی اختصاص یابد ($t_s=20 \text{ Sec.}$)، بوسیله منحنی تغییرات بار تغذیه شده (یا منحنی تغییرات بار تامین نشده) مقدار تقریبی شاخص انرژی تامین نشده (ENS) قابل محاسبه خواهد بود. این شاخص مبنای بهینه سازی بوده و بر اساس روش فوق، به هر کروموزوم یک مقدار ENS اختصاص می‌یابد. شکل (۵) فلوچارت چگونگی اختصاص منابع تولید به بارهای مصرفی را نشان می‌دهد.

۵- بهبود پاسخ نهائی و توقف تکرارها: انجام بهینه سازی و بهبود پاسخ به کمک الگوریتم ژنتیک در یک فرآیند تکراری انجام می‌گیرد. در این فرآیند، پس از تولید یک جمعیت اولیه بصورت تصادفی، با استفاده از عملگرهای ژنتیکی شامل تقاطع^{۱۲}، جهش^{۱۳} و نیز بعضی از عملیات خاص

بهینه سازی خارج خواهد شد [۳۰]. در صورت برقراری شرط وجود حداقل یک نیروگاه Black-start در هر جزیره، پیوستگی شبکه داخلی هر جزیره [۳۴] بررسی می‌شود. به عنوان مثال کروموزوم 1211221122 که تقسیم شبکه به دو جزیره (شکل ۴) را نشان می‌دهد، به دلیل عدم پیوسته بودن شبکه داخلی جزیره ۱، حذف خواهد شد. قابل ذکر است شرط پیوسته بودن شبکه داخلی در هر جزیره به کمک تئوری گراف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۴: مدار تک خطی یک جزیره با گراف داخلی پیوسته.

۳- بررسی قیود و اجرای پخش بار در هر جزیره: بررسی اولیه امکان برقراری تعادل توان اکتیو تولیدی و مصرفی در هر جزیره صورت گرفته و پخش بار در هر جزیره بصورت مستقل و منفک از سایر جزیره‌ها و در شرایط قطع خطوط و واحدهای تولیدی سایر جزیره‌ها به منظور ارزیابی قیود بهره برداری مربوطه اجراء می‌گردد. این قیود شامل محدوده مجاز ولتاژ شینه‌ها، حدود تولید ژنراتورها و نیز محدوده توان قابل انتقال خطوط می‌باشد. به منظور ایجاد همگرایی در اجرای پخش بار در هر جزیره بطور مستقل از سایر جزیره‌ها، الگوریتم با انتخاب شینه اسلک مناسب، جهت شروع از یک حالت اولیه بهتر در تکرارهای پخش بار، ابتدا در چند تکرار اول از روش گوس-سایدل استفاده نموده و پس از رسیدن به مقادیر مناسب به عنوان حالت اولیه تکرارهای بعدی، ادامه محاسبات پخش بار با روش نیوتن-رافسن که قابلیت همگرایی بهتری دارد انجام می‌گیرد. چنانچه باز هم همگرایی حاصل نگردد، به ناچار کروموزوم مربوطه از چرخه بهینه سازی خارج خواهد شد.

۴- فرآیند اختصاص ظرفیت تولید به بارها و محاسبه ENS: به منظور شبیه سازی فرآیند

باشند، مقدار Infeasibility معادل صفر اختصاص یافته و به کروموزوم‌هایی که محدوده قیود را نقض می‌کنند، مقداری به عنوان جریمه^{۱۵} تعلق می‌گیرد که در نهایت مقدار برازندگی کروموزوم مربوطه را کاهش می‌دهد. تابع جریمه بصورت (۶) تعریف شده است.

$$Penalty Function = Infeasibility \cdot Weight \quad (6)$$

که در آن پارامتر Weight، وزنی است که به هر کدام از پارامترهای قید اختصاص یافته و میزان اهمیت و نقش آنها را در تابع هدف نشان می‌دهد. با این شرایط، مقدار برازندگی مطابق (۷) برای هر کروموزوم تعیین شده و در نهایت کروموزومها بصورت نزولی و بر اساس مقدار برازندگی شان مرتب خواهند شد.

$$Fitness Function = \sum MW - PenaltyFun. \quad (7)$$

در انتهای هر تکرار، انتخاب بهترین کروموزومها بر اساس روش انتخاب نخبه^{۱۶} و چرخ رولت^{۱۷} انجام می‌گیرد. فرآیند تکرار در صورت همگرا شدن پاسخ و عدم بهبود بیشتر آن در تکرارهای بعدی متوقف شده و پاسخ نهایی، ضمن حداکثر بودن مقدار تابع هدف، تمامی قیود بهره برداری نیز در محدوده مجازشان قرار خواهند گرفت.

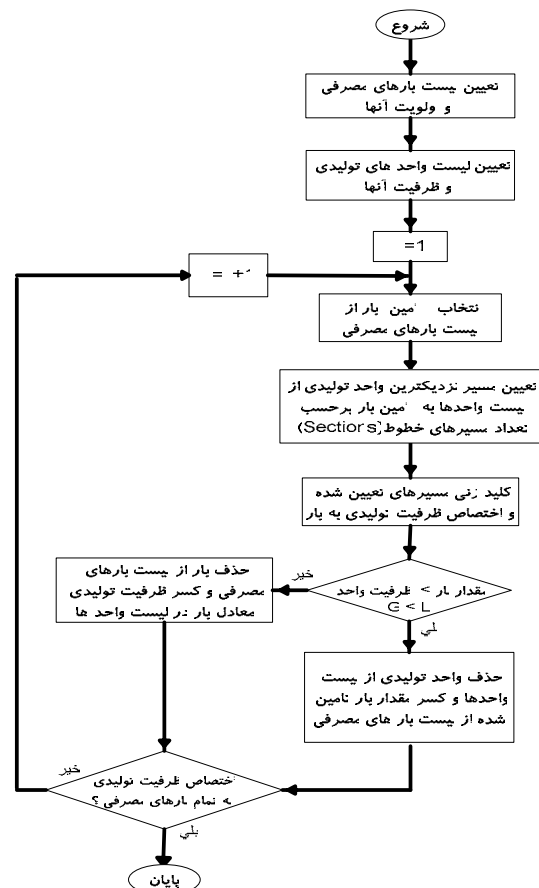
مطالعات عددی

به منظور ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهادی، شبکه استاندارد IEEE-118 Bus بعنوان سیستم تست مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۲]. با توجه به تعداد شینه‌ها (۱۱۸ شینه)، طول رشته کروموزوم در شبیه سازی گراف جهت اعمال به الگوریتم ژنتیک ۱۱۸ رقم می‌باشد.

قیود بهره برداری شبکه شامل حدود ولتاژ شینه‌ها، فلوی عبوری از خطوط و حدود توان اکتیو و رآکتیو ژنراتورها می‌باشد که باید در داخل محدوده مجاز مربوطه قرار گیرند. شکل‌های (۶) و (۷)، منحنی ولتاژ شینه‌ها و فلوی عبوری از خطوط را در شبکه کلی در مقایسه با مقادیر نامی نشان می‌دهد.

حال شبکه تست ۱۱۸ شینه ای با مکانیزم تعریف شده به ۲ الی ۷ جزیره تقسیم شده که نتایج مربوطه در زیر داده شده است.

ژنتیکی که به منظور تسریع در همگرایی فرآیند و رسیدن به پاسخ نهایی بکار می‌رود، بهبود پاسخ مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از هر تکرار، به هر کروموزوم عددی تحت عنوان مقدار برازندگی^{۱۴} اختصاص می‌یابد. برازندگی هر کروموزوم، نشان دهنده میزان مطلوبیت آن کروموزوم در جهت حداکثر کردن تابع هدف است که وابسته به مقدار تابع هدف و نیز قرار گرفتن پارامترهای قید در محدوده مجاز می‌باشد. بررسی قرار گرفتن پارامترهای قید در محدوده مجاز مربوطه با استفاده از محاسبه مقدار Infeasibility انجام می‌گیرد. این مقدار معادل مجموع انحرافات پارامترهای قید (d_i) از محدوده مجاز آنها می‌باشد.

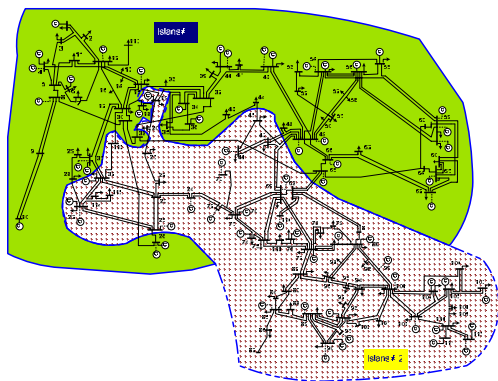


شکل ۵: فلوجارت اختصاص ظرفیت تولید به بارهای مصرفی.

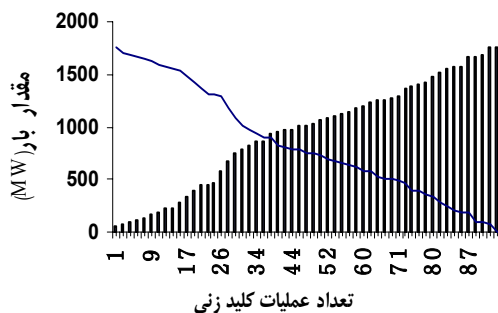
$$Infeasibility = \sum_i d_i \quad (8)$$

در این مقاله، حدود ولتاژ شینه‌ها، محدوده تولید ژنراتورها، و توان عبوری از خطوط انتقال به عنوان پارامترهای قید در نظر گرفته شده است. بدیهی است، به کروموزومی که در آن، تمامی پارامترها در داخل محدوده مجازشان قرار گرفته

مصرفی در هر دو جزیره مطابق با شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌باشد.

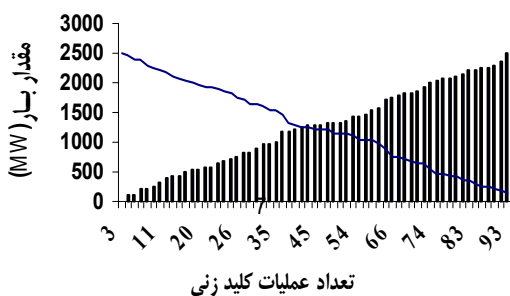


شکل ۸: آرایش مداری تقسیم شبکه تست به دو جزیره مطابق جدول (۱).



مقدار بار تامین نشده (MW) — مقدار بار بازیابی شده (MW)

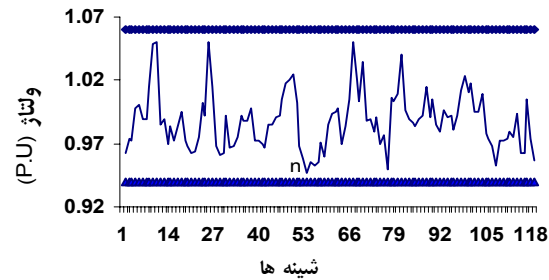
شکل ۹: منحنی اختصاص تولید به بارهای مصرفی جزیره ۱.



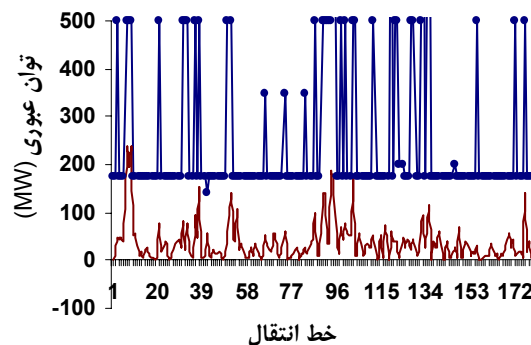
مقدار بار تامین نشده (MW) — مقدار بار بازیابی شده (MW)

شکل ۱۰: منحنی اختصاص تولید به بارهای مصرفی جزیره ۲.

با در نظر گرفتن مدت زمان 20 Sec به منظور اعمال ملاحظات دینامیکی برای هر عملیات کلیدزنی، در نهایت مقادیر ENS جزیره‌ها محاسبه خواهد شد. شکل (۱۱) این مقدار را برای هر دو جزیره و کل شبکه نشان می‌دهد.



شکل ۶: منحنی ولتاژ شینه‌های شبکه تست.



شکل ۷: منحنی فلوی توان عبوری خطوط شبکه تست.

جدول ۱: آرایش کروموزومی نهائی و شینه‌های هر جزیره.

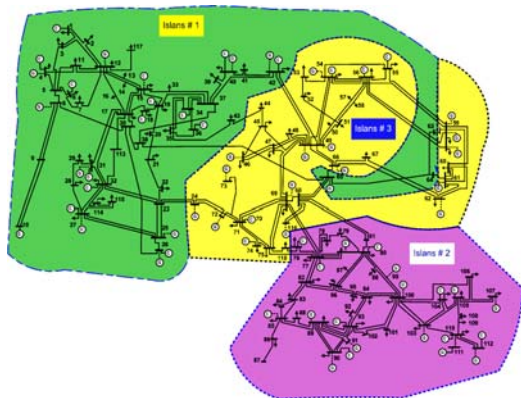
کروموزوم	
	11111111111111111111222222212111... 12111111111111112221111111111111... 111111122222222222222222222222... 222222222222222222222222222212
شینه‌های جزیره‌ها	IS2 19,20,21,22,23,24,25,27,32,45,46,47, 68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79, 80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91, 92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102, 103,104,105,106,107,108,109,110,111, 112,112,113,114,115,116,118
	IS1 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16, 17,18,26,28,29,30,31,33,34,35,36,37, 38,39,40,41,42,43,44,48,49,50,51,52, 53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64, 65, 66,67,117

تقسیم شبکه به ۲ جزیره

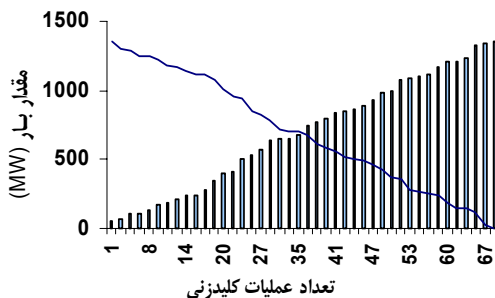
در این مرحله، با استفاده از تئوری گراف و با کدینگ مناسب کروموزوم‌ها، شبکه تست به دو جزیره تقسیم می‌شود. با اعمال روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و با تعداد مناسب تکرارها، در نهایت حدود بهینه مربوطه به دو جزیره مشخص شده است. جدول (۱) آرایش کروموزومی بدست آمده و شکل (۸) حدود بهینه دو جزیره را نشان می‌دهد. نتایج فرآیند مرحله ای اختصاص تولید به بارهای

جدول ۲: آرایش کروموزوم نهائی و شینه‌های جزیره‌های ۱، ۲ و ۳.

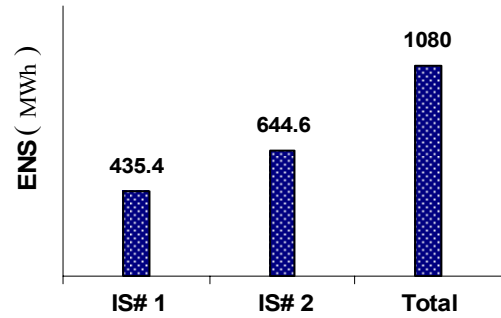
کروموزوم		11111111111111111111111113... 1111111111111111111111133333... 33333333333333331113333333... 333222222222222222222222... 2222222222222222111313	
	شینه‌های جزیره‌ها	IS3	24,44,45,46,47,48,49,50,51,52, 53,54,55,56,57,58,59,60,61,62, 66,67,68,69,70,71,72,73,74,75, 116,118
		IS2	76,77,78,79,80,81,82,83,84,85, 86,87,88,89,90,91,92,93,94,95, 96,97,98,99,100,101,102,103, 104,105,106,107,108,109,110, 111,112
		IS1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14, 15,16,17,18,19,20,21,22,23,25, 26,27,28,29,30,31,32,33,34,35, 36,37,38,39,40,41,42,43,63,64, 65,113,114,115,117



شکل ۱۴: آرایش مداری تقسیم شبکه تست به سه جزیره مطابق جدول (۲).

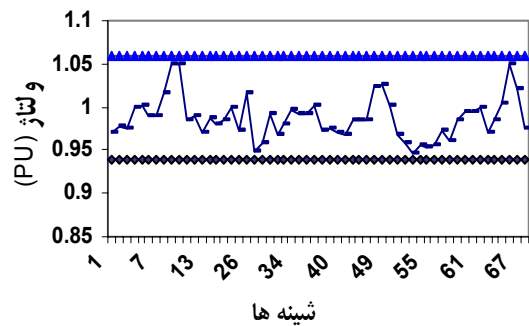


شکل ۱۵: منحنی اختصاص تولید به بارهای مصرفی جزیره ۱.

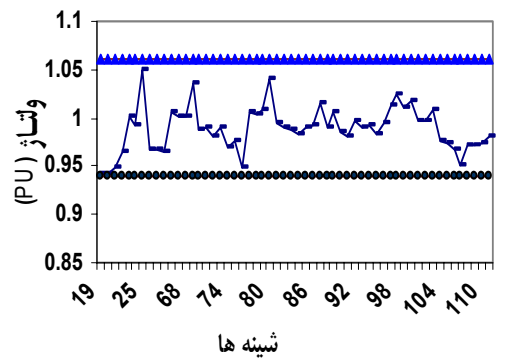


شکل ۱۱: مقادیر ENS جزیره‌های ۱ و ۲ و ENS کل شبکه.

ضمناً تمامی قیود بهره برداری شامل حدود ولتاژ شینه‌ها، فلوی توان عبوری از خطوط و مقادیر تولید ژنراتورها در محدوده مجاز قرار گرفته که شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب ولتاژ شینه‌های جزیره‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲: منحنی ولتاژ شینه‌های جزیره ۱.



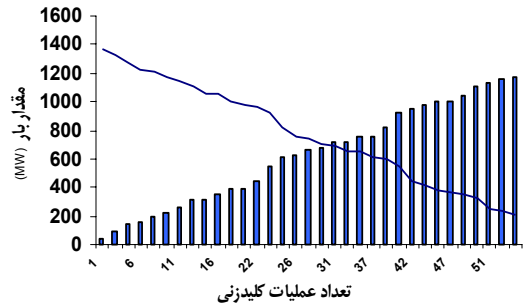
شکل ۱۳: منحنی ولتاژ شینه‌های جزیره ۲.

تقسیم شبکه به ۳ جزیره

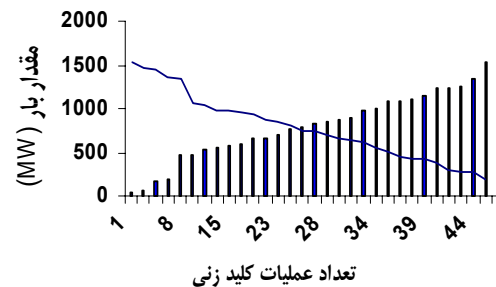
در این حالت، کدینگ یک رشته ۱۱۸ رقمی متشکل از اعداد ۱، ۲ و ۳ می‌باشد که پس از انجام بهینه‌سازی‌های لازم، حدود نهائی تقسیم شبکه به ۳ جزیره مطابق آرایش کروموزومی جدول (۲) بصورت شکل (۱۴) خواهد بود.

جدول ۳: آرایش کروموزومی نهائی و شینه‌های جزیره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴.

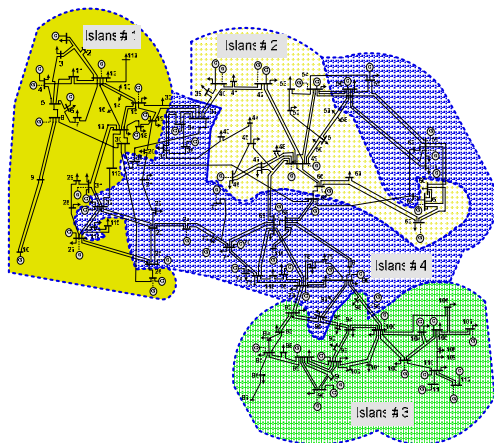
کروموزوم	111111111111111111114444411... 11114144444222222222222222... 44224222444224444444444444... 3333333333333333443433333333... 3333141414
شینه‌های جزیره‌ها	IS4 21,22,23,24,25,32,34,35,36,37,38, 55,56,59,63,64,65,68,69,70,71,72, 73,74,75,76,77,78,79,80,81,96,97, 99,114,116,118
	IS3 82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92, 93,94,95,98,100,101,102,103,104, 105,106,107,108,109,110,111,112
	IS2 39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49, 50,51,52,53,54,57,58,60,61,62,66,67
	IS1 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15, 16,17,18,19,20,26,27,28,29,30,31, 33,113,115,117



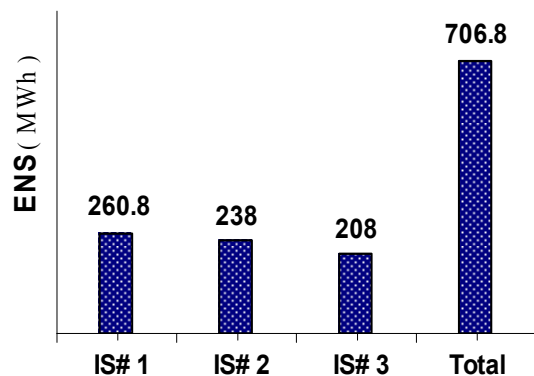
شکل ۱۶: منحنی اختصاص تولید به بارهای مصرفی جزیره ۲.



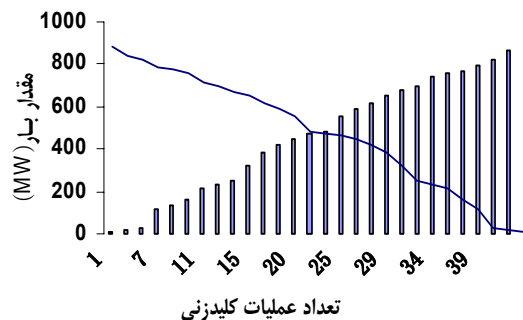
شکل ۱۷: منحنی اختصاص تولید به بارهای مصرفی جزیره ۳.



شکل ۱۹: آرایش مداری تقسیم شبکه تست به چهار جزیره مطابق جدول (۳).



شکل ۱۸: مقادیر ENS جزیره‌های ۱، ۲، ۳ و کل شبکه.



شکل ۲۰: منحنی اختصاص تولید به بارهای مصرفی جزیره ۱.

شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به ترتیب روند اختصاص تولید به بارهای مصرفی در جزیره‌های ۱، ۲ و ۳ را نشان می‌دهد. پس از اعمال زمان 20 Sec به هر عملیات کلیدزنی، شکل (۱۸) مقادیر ENS جزیره‌ها را در مقایسه با کل شبکه نشان می‌دهد.

تقسیم شبکه به ۴ جزیره

در این حالت، شبکه با بار مشخص به ۴ جزیره تقسیم‌بندی شده است که آرایش کروموزومی آن در جدول (۳) و مرزهای جزیره‌ها در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

در نهایت، مقدار ENS محاسبه شده برای هر کدام از جزیره‌ها در مقایسه با ENS کل شبکه در شکل (۲۲) داده شده است.

تقسیم شبکه به ۵، ۶ و ۷ جزیره

فرآیند تقسیم شبکه تست به ۵، ۶ و ۷ جزیره نیز بر اساس روش بیان شده انجام گرفته که آرایش کروموزومی پاسخ‌های نهائی به ترتیب در جداول (۴)، (۵) و ۶ داده شده است.

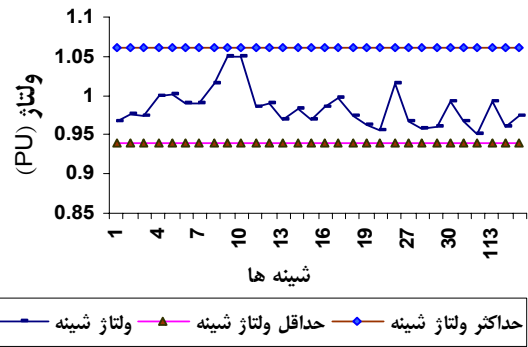
شکل‌های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) به ترتیب مقادیر ENS شبکه تست پس از تقسیم به ۵، ۶ و ۷ جزیره را نشان می‌دهد. ضمناً در تمامی موارد قیود بهره برداری در محدوده مجاز آن قرار گرفته است.

جدول ۵: آرایش کروموزومی نهائی و شینه‌های جزیره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶.

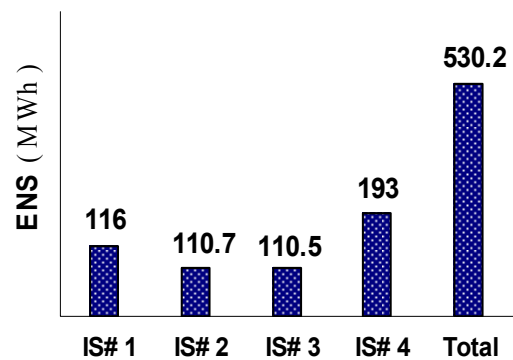
کروموزوم	111111111111111111112222222222... 122133313333333333434444444444... 444444444662222266666666666666... 65555566655555555555555555122616
شینه‌های جزیره‌ها	IS6 68,69,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84, 85,86,87,88,89,95,96,97,116,118
	IS5 90,91,92,93,94,98,99,100,101,102,103, 104,105,106,107,108,109,110,111,112
	IS4 47,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59, 60,61,62,63,64,65,66,67
	IS3 34,35,36,37,39,40,41,42,43,44,45,46, 48
	IS2 19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,31, 32,70,71,72,73,74,114,115
IS1 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16, 17,18,30,33,38,113,117	

جدول ۶: آرایش کروموزومی نهائی و شینه‌های جزیره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ و ۷.

کروموزوم	111111111111111111113222222222... 2212213333133343333333444444... 44444444455555555555777777... 777777766666667767666666666... 6666222515
شینه‌های جزیره‌ها	IS7 76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86, 87,88,89,96,97,99



شکل ۲۱: منحنی ولتاژ شینه‌های جزیره ۱.



شکل ۲۲: مقادیر تقریبی ENS جزیره‌های ۱ الی ۴ و ENS کل شبکه.

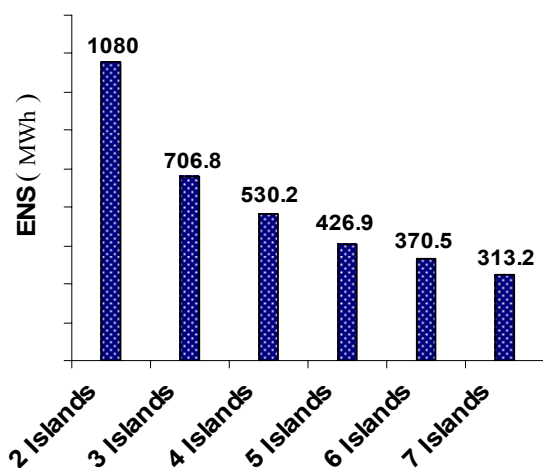
جدول ۴: آرایش کروموزوم نهائی و شینه‌های جزیره‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵.

کروموزوم	11111111111111111111222252222222... 222222223332222333333333333333... 3333333555555555555555555555444... 44444454444444444444444444122515
شینه‌های جزیره‌ها	IS5 24,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78, 79,80,81,82, 83,84,85,86,87,97,116,118
	IS4 88,89,90,91,92,93,94,95,96,98,99,100, 101,102,103,104,105,106,107,108,109, 110,111,112
	IS3 40,41,42,47,48,49,50,51,52,53,54,55, 56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67
	IS2 20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32, 33,34,35,36,37,38,39,43,44,45,46,114, 115
	IS1 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16, 17,18,19,113,117

شکل (۲۰)، روند اختصاص ظرفیت تولید به بارهای مصرفی در جزیره ۱ و شکل (۲۱) نیز تغییرات دامنه ولتاژ شینه‌های جزیره ۱ را نشان می‌دهد.

مقایسه حالت‌ها

شکل (۲۶)، مقادیر ENS محاسبه شده در حالت‌های تقسیم شبکه به ۲ الی ۷ جزیره را نشان می‌دهد. حد نهائی تعداد جزیره‌ها به عوامل مختلفی از جمله محدودیت تعداد اکیپ‌های اجراء کننده طرح بازیابی بستگی دارد. از طرف دیگر، هر چه تعداد جزیره‌ها زیادتر شود، ممکن است تعداد تجهیزات مورد نیاز جهت سنکرونیزاسیون خطوط ارتباطی به شدت افزایش یابد. با توجه به شکل (۲۶)، ملاحظه می‌گردد، با افزایش تعداد جزیره‌ها، در ابتدا مقدار ENS به شدت کاهش یافته و سپس این کاهش بطئی تر شده و در نهایت در حدی تثبیت می‌گردد. پس از آن، افزایش بیشتر تعداد جزیره‌ها ممکن است تاثیر چندانی در کاهش ENS و نهایتاً بهبود فرآیند بازیابی نداشته باشد.

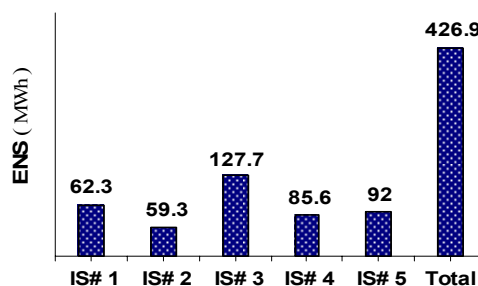


شکل ۲۶: نمودار مقایسه ای مقادیر ENS شبکه در حالت تقسیم به جزیره‌های مختلف.

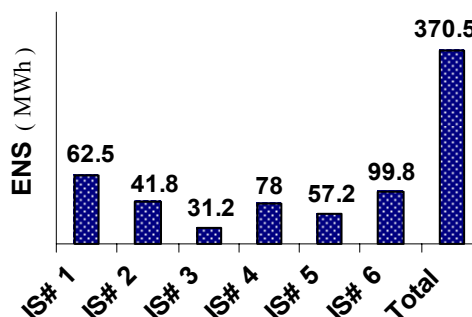
نتیجه گیری

در این مقاله، اثر تغییر تعداد و حدود جزیره‌ها در فرآیند بازیابی مورد مطالعه قرار گرفته و یک روش جدید بر مبنای تئوری گراف به منظور تعیین حدود بهینه جزیره‌های ایجاد شده در مراحل اولیه بازیابی پس از بروز یک قطعی سراسری ارائه گردید. روش بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک و تابع هدف، حداقل کردن شاخص انرژی تامین نشده (ENS) در نظر گرفته شده است. شبکه IEEE-118Bus به عنوان سیستم تست استفاده شده و قابلیت‌های روش پیشنهادی با تقسیم این شبکه به ۲ الی ۷ جزیره مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، با تغییر تعداد جزیره‌ها از ۲

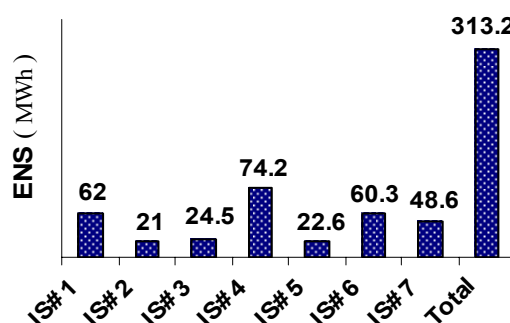
IS6	90,91,92,93,94,95,98,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112
IS5	65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,116,118
IS4	42,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64
IS3	19,34,35,36,37,39,40,41,43,44,45,46,47,48
IS2	20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,31,32,113,114,115
IS1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,30,33,38,117



شکل ۲۳: مقادیر ENS جزیره‌های ۱ الی ۵ و ENS کل شبکه.



شکل ۲۴: مقادیر ENS جزیره‌های ۱ الی ۶ و ENS کل شبکه.



شکل ۲۵: مقادیر ENS جزیره‌های ۱ الی ۷ و ENS کل شبکه.

بهینه جزیره‌ها در مراحل اولیه بازیابی، ضمن تسهیل در روند بازیابی، می‌توان مقدار بار تامین شده در هر لحظه از زمان بازیابی را به حداکثر مقدار ممکن رساند.

به ۳، مقدار شاخص ENS به شدت کاهش می‌یابد. سپس با افزایش بیشتر تعداد جزیره‌ها، این روند تثبیت شده و در نهایت ممکن است افزایش بیشتر تعداد جزیره‌ها تاثیری در کاهش شاخص ENS نداشته باشد. بنابراین با تعیین تعداد

مراجع

- 1 - Adibi, M. M. et al. (1987). "Power system restoration – A task force report." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 2, No. 2, PP. 271-277.
- 2 - Dy Liacco, T. et. Al. (1992). "A hierarchical interactive approach to electric power system restoration." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, PP. 1123-1131.
- 3 - Ewart, D. N. (1978). "Whys and wherefores of power system blackouts." *IEEE Spectrum Magazine*, April PP. 36-41.
- 4 - Adibi, M. M. (2000). "Power system restoration methodologies & implementation strategies." *IEEE Press Power Engineering Series*.
- 5 - Wu, F. F. and Monticelli, A. (1988). "Analytical tools for power system restoration - conceptual design." *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 3, No. 1, Feb. PP. 10–16.
- 6 - Nagata, T., Sasaki, H. and Yokoyama, R. (1995). "Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, PP. 1473–1479.
- 7 - Lee, S., Lim, S. and Ahn, B. (1998). "Service restoration of primary distribution systems based on fuzzy evaluation of multi-criteria." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 3, Aug. PP. 1156–1163.
- 8 - Kafka, R. J., Penders, D. R., Bouchey, S. H. and Adibi, M. M. (1981). "System restoration plan development for a metropolitan electric system." *IEEE Trans. on Power Appar. and Systems*, Vol. PAS-100, PP. 3703–3713.
- 9 - Sakaguchi, T. and Matsumoto, K. (1983). "Development of a knowledge based system for power system restoration." *IEEE Trans. on Power Appar. and Systems*, Vol. PAS-102, Feb. PP. 320–329.
- 10 - Kirschen, D. S. and Volkmann, T. L. (1991). "Guiding a power system restoration with an expert system." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, May. PP. 556–566.
- 11 - Adibi, M. M. (1992). "New approach in power system restoration." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, Nov. PP. 1428–1434.
- 12 - Lester, H. Fink, Kan -Lee Liou, and Chen-Ching Liu, (1995). "From generic restoration actions to specific restoration strategies." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, May. PP. 745-751.
- 13 - Ying-Tung Hsiao, and Ching-Yang Chien, (2000). "Enhancement of restoration services in distribution systems using a combination fuzzy–GA method." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 4, Nov. PP. 1394-1400.
- 14 - Paulo Gomes, Antonio P. Guarini, Antonio C. S. de Lima, and Marcello S. Rocha, (2002). "Guidelines for power system restoration in the brazilian system." *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, Jan. PP. 1299 – 1304.
- 15 - Adibi, M. and Fink, L. (1995). "Power system restoration planning." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, Issue 2, May. PP. 22-28.

- 16 - Evert Agneholm, (1996). "The restoration process following a major breakdown in a power system." *Technical Report, No 230L, School of Electrical & Computer Engineering Chalmers, Goteborg, Sweden.*
 - 17 - A Report by the Power System Restoration Working Group, J. Giri, et. Al, (1992). "New approaches in power system restoration." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, PP. 1428-1434.
 - 18 - Adibi, M. (1992). "Special considerations in power system restoration." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, Nov. PP. 1419-1427.
 - 19 - Rajabi Ghahnavi, R., Parniani, M. and Fotuhi Firuzabad, M. (2004). "Investigating the effects of reactive power on islanding detection." *2004 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2004*, Singapore, 21-24 Nov. PP. 1067-1071.
 - 20 - Archer, Brian A. and Davies, J. Brett. (2002). "System islanding considerations for improving power system restoration at manitoba hydro." *Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, IEEE CCECE*, Vol. 1, Issue 2002, PP. 60-65.
 - 21 - Funabashi, T., Koyanagi, K. and Yokoyama, R. (2003). "A review of islanding detection methods for distributed resources." *IEEE Bologna Power Tech 2003*, Vol. 2, Italy, 23-26 June.
 - 22 - Mizuno, T., Noda, Y., Koizumi, H., Nagasaka, K. and Kurokawa, K. (2003). "The experimental results of an islanding detection method for Japanese AC modules." *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 11-18 May 2003, Osaka, Japan, PP. 2058-2060.
 - 23 - Chow, J. H., Galarza, R., Accari, P. and Price, W. W. (2004). "Inertial and slow coherency aggregation algorithms for power system dynamic model reduction." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, Feb. PP. 483-491.
 - 24 - Chow, J. H., Date, R. A., Othma, H. and Price, W. W. (1990). "Slow coherency aggregation of large power system in eigenanalysis and frequency domain methods for system dynamic performance." *IEEE Publications 90TH0292-3-PWR*, PP. 50-60.
 - 25 - Yusof, S. B., Rogers, G. J. and Alden, R. T. H. (1993). "Slow coherency based network partitioning including load buses." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 8, Issue 3, Aug. PP. 1375-1382.
 - 26 - You, H., Vittal, V. and Wang, X. (2004). "Slow coherency based islanding." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, Feb. PP. 483-491.
 - 27 - Kai Sun, Da-Zhong Zheng, and Qiang Lu, (2003). "Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, No. 2, May. PP. 912-923.
 - 28 - Xiaoming Wang, and Vijay Vittal, (2004). "System islanding using minimal cutsets with minimal net flow." *IEEE 2004 Power Systems Conference Exposition, PSCE*, Poster-A.91, 10-13 Oct.
 - 29 - Thorp, J. S. and Wang, H. (2001). "Computer simulation of cascading disturbances in electric power systems." *Impact of Protection Systems on Transmission System Reliability Final Report, PSERC Publication 01-01*, May.
 - 30 - Xiaoming Wang, (2005). *Slow Coherency Grouping Based Islanding Using Minimal Cutsets and Generator Coherency Index Tracing Using the Continuation Method*, PhD Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
-

- 31 - Arturo Suman Bretas, (2001). *Robust Electric Power Infrastructures. Response and Recovery during Catastrophic Failures*, PhD Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA.
- 32 - IEEE-118 Bus Test System available at : <http://www.ee.Washington.edu/research/pstca/>
- 33 - Chung, A. S. and Wu, F. (2000). "An extensible genetic algorithm framework for problem solving in a common environment." *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, Feb. PP. 15-21.
- 34 - Vinod Chachra, Prabhakar M. Ghare, and James M. Moore, (1979). *Applications of Graph Theory Algorithms*, New York, Elsevier North Holland, ISBN 0-444-00268-5.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Partial Outages
- 2 - Blackouts
- 3 - Power System Restoration
- 4 - The Build Down Strategy
- 5 - The Build Down Strategy
- 6 - Island
- 7 - Natural Island
- 8 - Forced Island
- 9 - Energy Not Supplied
- 10 - Tie Lines
- 11 - Genetic Algorithm
- 12 - Crossover
- 13 - Mutation
- 14 - Fitness
- 15 - Penalty
- 16 - Elitist Selection
- 17 - Roulette Wheel