

بهبود فرایند بازیابی در سیستمهای قدرت با خطوط جبران شده به صورت سری

حسین افراخته^۱، محمودرضا حقی فام^{۲*}، علی یزدیان ورجانی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

haghifam@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۶)

چکیده- در این مقاله، به بررسی تشکیل جزیره‌ها در مراحل ابتدایی فرایند بازیابی از حالت قطعی سراسری پرداخته و اثر تغییر تعداد جزیره‌ها را در روند بازیابی مطالعه می‌کنیم. همچنین، روشی جدید برای تعیین حدود و مرزهای بهینه هر جزیره ارائه شده و قابلیت جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور (TCSC) در تسهیل فرایند بازیابی و بهبود پاسخ بهینه ارزیابی می‌شود. تابع هدف، حداقل کردن مقدار انرژی تأمین نشده (ENS) و روش بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک است. مدلسازی شبکه با کدگذاری کروموزومی خاصی انجام شده و قیود مختلف بهره‌برداری شامل حدود ولتاژ شینه‌ها، حداکثر ظرفیت خطوط انتقال و محدوده توان واحدهای تولید کننده در فرایند بهینه‌سازی و پاسخ نهایی مدنظر قرار گرفته است. در نهایت، شبکه IEEE-118bus به‌عنوان سیستم آزمون در ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهادی استفاده شده و برخی از نتایج به‌دست آمده، در بخش مطالعات عددی آورده شده است.

کلید واژگان: الگوریتم ژنتیک، انرژی تأمین نشده (ENS)، بازیابی بار، جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور (TCSC)، جزیره.

۱- مقدمه

است [۱، ۲]. قطع برق علاوه بر ایجاد زیانهای ناشی از عدم فروش انرژی الکتریکی شرکت‌های تولیدی، به مصرف‌کننده‌ها و جامعه نیز هزینه‌های سنگینی را تحمیل می‌کند. بنابراین بازگرداندن سریع سیستم قطع شده به حالت بهره‌برداری نرمال - که در قالب مسائل بازیابی سیستم قدرت ارزیابی می‌شود - از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بازیابی شبکه قطع شده در هر

سیستمهای به هم پیوسته قدرت، به دلایل متعددی در معرض خطا قرار دارند. بروز خطا که ممکن است به صورت قطعیهای جزئی^۱ یا سراسری^۲ ظاهر شود، عمدتاً با قطع برق بخشی از مشترکان یا کل آنها همراه

1. Partial Outages
2. Blackout

جزیره‌ها با هم سنکرون شده و شبکه نهایی را تشکیل خواهند داد. بنابراین، به‌کارگیری این روش در شبکه‌های بزرگ موجب تسریع فرایند بازیابی و بهبود تابع هدف خواهد شد.

انتخاب تعداد، حدود و مرزهای هر جزیره یکی از مهمترین مراحل اجرای راهبرد بازیابی موازی است. بدیهی است، تغییر تعداد جزیره‌ها موجب تغییر هندسه شبکه داخلی هر جزیره شده و روند بازیابی آن را به‌طور اساسی دگرگون می‌سازد. این وضعیت، همچنین مقدار تابع هدف و میزان بار تأمین شده در هر لحظه از زمان بازیابی را به‌طور محسوسی تغییر خواهد داد. علاوه بر موارد فوق، سنکرون کردن مجدد جزیره‌ها پس از بازیابی، از نظر دینامیکی نیز ممکن است با مشکلاتی نظیر زیاد بودن تفاضل زاویه فاز ولتاژ دو طرف کلیدهای قدرت روبه‌رو شود. در بسیاری از موارد، عدم امکان وصل کردن کلیدهای قدرت به‌دلیل زیاد بودن این زاویه، ممکن نیست و این مسأله روند بازیابی را با مشکل روبه‌رو خواهد ساخت. انتخاب مناسب تعداد و حدود جزیره‌ها می‌تواند روند بازیابی را از نظر دینامیکی تسهیل کند.

تعیین تعداد و حدود جزیره‌ها با توجه به عوامل متعددی از جمله وجود تجهیزات مختلف کنترلی، وضعیت واحدهای تولیدکننده و هندسه شبکه صورت می‌گیرد. در انتخاب هر جزیره باید شرایط مختلفی ملحوظ شود از جمله [۱، ۱۲]:

- ۱- در هر جزیره، باید حداقل یک واحد نیروگاهی Black-Start با ظرفیت مناسب برای راه‌اندازی تجهیزات ضروری از حالت وقفه کامل وجود داشته باشد.
- ۲- در هر جزیره، قابلیت برقراری توازن توان اکتیو و راکتیو تولید شده و مصرف شده به‌منظور حفظ و کنترل حدود فرکانس و ولتاژ وجود داشته باشد.
- ۳- تجهیزات سنکرونیزاسیون برای وصل کردن

دو حالت قطعی جزئی و سراسری دارای مسائل خاص خود است. تابع هدف بازیابی، تغذیه حداکثر مقدار بار قطع شده در هر مرحله از فرایند است. به‌بیان دیگر، هدف اساسی در فرایند بازیابی، کاهش مدت زمان بازیابی با شرط حداکثر بودن مقدار بار بازیابی شده در هر لحظه از زمان بازیابی است [۳].

برای اجرای عملیات بازیابی در شبکه‌ها، از طراحی و به‌کارگیری راهبردهای بازیابی استفاده می‌شود. طراحی راهبردهای بازیابی متأثر از عوامل مختلفی مانند تعداد و شرایط واحدهای تولیدکننده و توپولوژی شبکه است. بنابراین، شبکه‌ها برای بازیابی، از راهبردهای خاص خود استفاده می‌کنند [۳، ۴، ۵]. فرایند بازیابی با شروع از حالت قطعی سراسری دارای سه مرحله اصلی آماده‌سازی و راه‌اندازی واحدهای تولیدی، بازیابی شبکه و بازیابی بار است که در هر مرحله، مسائل متنوعی مطرح خواهد بود.

تاکنون راهبردهای مختلفی برای بازیابی شبکه‌ها ارائه شده است [۶] تا [۹]. در اجرای هر یک از این راهبردها، معمولاً روشهای مشخصی به‌کار گرفته می‌شود که روشهای بازیابی سری^۱ و موازی^۲ [۱۰، ۱۱] از جمله آنها است. در روش بازیابی سری، ابتدا شبکه اصلی بازیابی شده و سپس مرحله به مرحله، واحدهای تولیدکننده و بارها به مدار وارد می‌شوند. به‌کارگیری این روش در شبکه‌های بزرگ، سبب طولانی شدن فرایند بازیابی شده و تابع هدف را به‌شدت از شرایط مطلوب دور می‌سازد. در روش بازیابی موازی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، ابتدا شبکه به چند جزیره تقسیم می‌شود. سپس گروههای بازیابی، همزمان جزیره‌ها را به‌طور مستقل از یکدیگر بازیابی می‌کنند. در نهایت، با وصل کردن خطوط ارتباطی^۳، این

1. Build Down Strategy
2. Build Up Strategy
3. Tie Lines

(FACTS) که در شرایط عادی بهره‌برداری از سیستم طراحی و به‌کار گرفته می‌شوند، می‌تواند تأثیر محسوسی بر بهبود فرایند بازیابی داشته باشد. حضور این تجهیزات در شبکه، ضمن ایجاد انعطاف‌پذیری در انتخاب حدود جزیره‌ها، مقدار شاخص ENS را می‌تواند کاهش دهد. چنانچه این تجهیزات با ظرفیت کافی و در موقعیتهای مکانی مناسبی نصب شود، این مسأله می‌تواند ضمن حفظ شرایط بهینه تابع هدف، تعداد جزیره‌ها را نیز تا حدی کاهش داده و روند بازیابی را تسهیل نماید.

در این مقاله، برای مطالعه اثر تغییر تعداد جزیره‌ها در فرایند بازیابی، شبکه آزمون IEEE-118bus [۱۴] به ۲ تا ۷ جزیره تقسیم شده و مقدار شاخص ENS در هر حالت تعیین می‌شود. اثر تغییر حدود جزیره‌ها در بهبود فرایند بازیابی با تعیین مرزهای بهینه هر جزیره و محاسبه شاخص ENS مربوط مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین اثر حضور جبران‌سازهای سری کنترل شده با تایریستور^۳ (TCSC) در بهبود فرایند بازیابی در شرایط تقسیم شبکه آزمون به ۲ تا ۷ جزیره مطالعه شده و حدود بهینه جزیره‌ها در هر حالت تعیین می‌شود. روش بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک بوده و برخی از نتایج به‌دست آمده در بخش مطالعات عددی آورده شده است.

۲- تابع هدف

به‌منظور تأمین شرایط مطلوب در فرایند بازیابی، حداقل کردن مقدار شاخص انرژی تأمین نشده (ENS) به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است که با حداکثر کردن مقدار بار تغذیه شده در هر لحظه از زمان بازیابی مطابقت دارد.

خطوط ارتباطی بین جزیره‌ها موجود باشد.

۴- تبادل توان بین جزیره‌ها از طریق خطوط ارتباطی امکانپذیر بوده و تجهیزات مانیتورینگ و ارتباط مخابراتی برای ایجاد هماهنگی بین عملیات مختلف بازیابی از جمله کلیدزنی‌ها وجود داشته باشد.

معمولاً تعداد و حدود جزیره‌هایی که در مرحله اولیه بازیابی هر سیستم قدرت تشکیل می‌شوند، از قبل تعیین شده که این کار غالباً با تکیه بر تجربیات اپراتورها و مهندسان بازیابی سیستم انجام می‌شود [۱۳]. در بسیاری از کشورها، تقسیمات استانی، حوزه‌های مدیریتی برقهای منطقه‌ای و مبادلات انرژی بین آنها، مانع از تغییر تعداد و حدود جزیره‌ها می‌شود. لذا تحلیل ریاضی و نظری خاصی برای تعیین تعداد و حدود جزیره‌ها به‌کار گرفته نمی‌شود. اگرچه این کار بسیار آسان انجام شده و به‌کارگیری تجربیات قبلی، بازیابی را ممکن می‌سازد، اما از نظر تابع هدف و میزان بار بازیابی شده، لزوماً مناسب‌ترین گزینه نبوده و حتی ممکن است روند اجرای بازیابی را از جنبه دینامیکی با مشکل مواجه سازد.

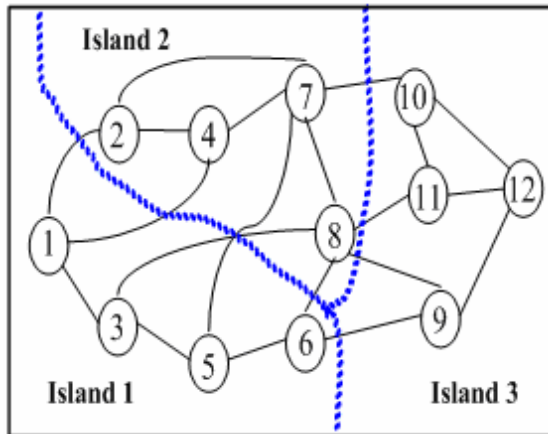
به‌نظر می‌رسد که با انتخاب مناسب تعداد و حدود جزیره‌ها، می‌توان مقدار بار بازیابی شده در هر لحظه از زمان بازیابی را حداکثر کرده و مدت زمان بازیابی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. همچنین این روند ممکن است مشکلات احتمالی در سنکرون کردن جزیره‌ها با وصل کردن خطوط ارتباطی را تا حد ممکن برطرف سازد. اثر بهبود تابع هدف ناشی از انتخاب بهینه تعداد و حدود جزیره‌ها را می‌توان با شاخص انرژی تأمین‌نشده^۱ (ENS) نشان داد.

سیستمهای انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب^۲

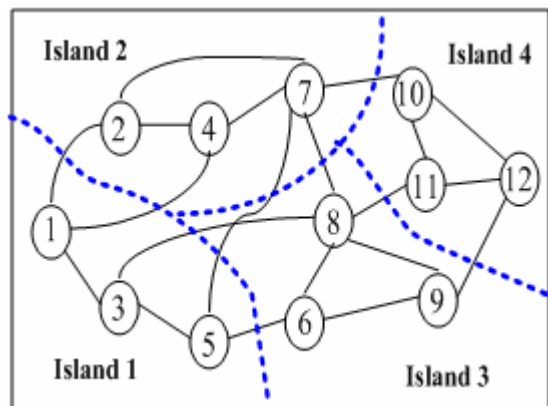
3. Thyristor Controlled Series Compensator

1. Energy Not Supplied (ENS)
2. Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

۱۰، ۱۱ و ۱۲ در جزیره سوم قرار گرفته‌اند. شکل ۲، آرایش کروموزومی ۱۲۱۲۱۳۲۳۳۴۴۴ همان شبکه را با ۴ جزیره نشان می‌دهد.



شکل ۱ گراف شبکه ۱۲ شینه با ۳ جزیره



شکل ۲ گراف شبکه ۱۲ شینه با ۴ جزیره

کروموزوم متناظر با شبکه آزمون ۱۱۸ شینه دارای ۷ جزیره، رشته‌ای ۱۱۸ رقمی است که ارقام آن از اعداد ۱ تا ۷ تشکیل شده است.

۴- مدلسازی TCSC

شکل ۳ مدار الکتریکی سیستم جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور (TCSC) متصل به شینه‌های k و

$$\text{Min} \quad ENS = \sum_i L_i T_{di}$$

st :

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (1)$$

$$S_{Line}^i \leq S_{Line}^{i, \max}$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}$$

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

۳- مدلسازی شبکه و کدگذاری کروموزومها

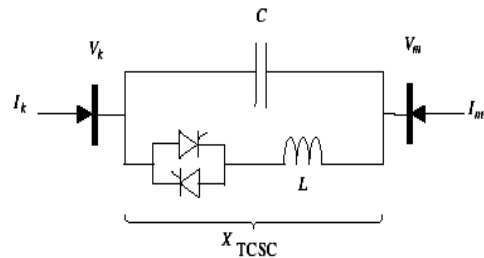
برای تعیین حدود بهینه جزیره‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده که در آن کدگذاری خاص و متناسب با جزیره‌بندی شبکه و تعداد جزیره‌ها به کار گرفته می‌شود. در شبیه‌سازی شبکه، دیاگرام تک‌خطی شبکه با گراف معادل آن جایگزین می‌شود. هر گره در گراف، معادل یک شینه در شبکه بوده که با شماره آن شینه (گره متناظر در گراف شبکه) نشان داده می‌شود. هر کروموزوم، یک رشته n تایی است که تعداد رقمهای آن نشان‌دهنده تعداد شینه‌های شبکه (یا تعداد گره‌های گراف معادل) است. ارقام رشته، نشان‌دهنده شماره جزیره‌ای است که شینه مربوط در آن قرار گرفته. کروموزوم شبکه آزمون با ۱۱۸ شینه، رشته‌ای ۱۱۸ رقمی است که نشان می‌دهد هر شینه در کدام جزیره قرار گرفته. (شکل ۱)، گراف معادل شبکه ۱۲ شینه را نشان می‌دهد. آرایش کروموزومی ۱۲۱۲۱۳۲۳۳۴۴۴ نشان‌دهنده آن است که شینه‌های ۱، ۳، ۵ و ۶ در جزیره اول و شینه‌های ۲، ۴، ۷ و ۸ در جزیره دوم و شینه‌های ۹،

خطوط در محدوده مجاز مربوط قرار گرفته و روند مرحله‌ای فرایند بازیابی با کاهش تعداد حالت‌های اضافه بار در خطوط و حتی بهبود پروفیل ولتاژ تسهیل خواهد شد.

۵- مدلسازی فرایند بازیابی و محاسبه ENS

به منظور شبیه‌سازی فرایند بازیابی و اعمال بهینه‌سازی برای تعیین شاخص ENS، از روش اختصاص ظرفیت تولید به بارهای مصرفی استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا بارهای مصرفی با ملحوظ کردن اولویت آنها برحسب ضریب وزنی رتبه‌بندی می‌شوند. همچنین لیست واحدهای تولیدکننده با ظرفیتهای نامی مربوط تعیین می‌شود. به کمک نظریه گراف، نزدیکترین واحد تولیدکننده به اولین بار، از فهرست بارهای مصرفی مشخص شده و ظرفیت تولید مربوط، به آن بار اختصاص می‌یابد. نزدیکترین واحد تولیدکننده، واحدی است که برای وصل شدن به بار موردنظر، به کمترین تعداد کلیدزنی نیاز دارد. اگر ظرفیت واحد تولیدکننده از بار مذکور بیشتر باشد، اولین بار از فهرست بارهای مصرفی حذف و از مقدار ظرفیت تولیدی اولین واحد نیز به اندازه بار مذکور کسر می‌شود. چنانچه ظرفیت واحد تولیدکننده از مقدار اولین بار کمتر باشد، واحد تولیدکننده از فهرست مربوط حذف و از مقدار بار مذکور به اندازه ظرفیت واحد تولیدکننده کسر خواهد شد. این روند تا تغذیه نهایی بارها به وسیله واحدهای تولیدکننده ادامه یافته و تمامی عملیات کلیدزنی و روند تغییرات مقدار بار تغذیه شده نیز ثبت می‌شود. چنانچه در راستای اعمال ملاحظات دینامیکی و برطرف شدن حالت‌های گذرای ناشی از کلیدزنیها،

m را نشان می‌دهد که از بانک خازنی (C)، مجموعه راکتورهای شنت (L) و سویچهای تایریستوری با سرعت بالا (TH) تشکیل شده است [۱۵]. با کنترل زاویه آتش تایریستور (α)، مقدار راکتانس کلی TCSC به طور پیوسته از $-XC$ تا XL تغییر خواهد کرد. V_k و V_m ولتاژ شینه‌های k و m و I_k و I_m به ترتیب جریان تزریق شده به شینه‌های k و m است.



شکل ۳ ساختار مداری جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور (TCSC)

جبران‌ساز TCSC، یکی از ادوات سری FACTS است که می‌تواند با اتصال راکتانس متغیر سری با خط، مقدار راکتانس مؤثر خط را به طور پیوسته تغییر دهد. تاکنون در کاربردهای مختلفی از جمله در مطالعات پخش بار، مدل‌های مختلفی از TCSC ارائه شده است [۱۶] تا [۱۹]. مدل‌های کنترل زاویه آتش^۱ و کنترل مقدار توان عبوری^۲، دو مدل عمومی از TCSC در مطالعات شبکه‌های مجهز به این ادوات است [۲۰]. در این مقاله، به منظور رفع اضافه بارهای احتمالی به وجود آمده در خطوط در طی فرایند بازیابی، از مدل کنترل توان عبوری استفاده می‌شود که در آن با تغییر راکتانس TCSC، مقدار توان عبوری از

1. α - Regulated Model
2. P- Regulated Model

می‌گیرد. این شروط شامل پیوسته بودن گراف شبکه داخلی هر جزیره، وجود حداقل یک واحد نیروگاهی Black-Start و امکان برقراری توازن توان اکتیو تولیدی و مصرفی در هر جزیره است. کروموزومهایی که هر یک از شروط مذکور را نقض کنند، از چرخه بهینه‌سازی حذف خواهند شد.

۳- برای بررسی قیود مختلف بهره‌برداری، اجرای پخش بار در هر جزیره به‌طور مستقل و منفک از بقیه سیستم انجام می‌گیرد. با نتایج به‌دست آمده از پخش بار، قیود سطوح ولتاژ شینه‌ها، مقدار تولید ژنراتورها و میزان توان عبوری از خطوط انتقال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مرحله، می‌توان از قابلیت‌های ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه برای رفع نقض قیود مذکور استفاده کرد. در این مقاله، جبران‌سازهای سری کنترل شده با تایریستور (TCSC) نصب شده در شبکه برای رفع اضافه بار احتمالی به‌وجود آمده در خطوط انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، چنانچه قیود مذکور همچنان نقض شوند، کروموزوم مربوط از چرخه بهینه‌سازی حذف خواهد شد. لازم است یادآوری شود که در این تحقیق، فقط از قابلیت‌های تجهیزات TCSC موجود در شبکه - که از قبل برای بهره‌برداری عادی شبکه طراحی و نصب شده - استفاده شده و هدف، نصب تجهیزات جدید به‌منظور بهبود بازیابی نیست.

پس از عملیات مختلف ژنتیکی شامل تداخل و جهش، شاخص ENS و مقدار برازندگی^۴ برای هر کروموزوم محاسبه شده و پس از آن، کروموزومها براساس مقدار برازندگی مرتب خواهند شد. در نهایت، کروموزومهای برتر با روش انتخاب نخبه^۵ و چرخ رولت^۶ تعیین و در فرایند تکراری بهبود پاسخ شرکت خواهند

مدت زمانی به هر عمل کلیدزنی اختصاص یابد ($T_s=120 \text{ Sec.}$)، به‌کمک منحنی تغییرات بار تغدیه‌شده (یا منحنی تغییرات بار تأمین نشده)، مقدار تقریبی شاخص انرژی تأمین نشده (ENS) قابل محاسبه خواهد بود. این شاخص، مبنای بهینه‌سازی قرار گرفته و به هر یک از کروموزومها براساس روش فوق، یک مقدار ENS اختصاص می‌یابد. بدیهی است، با تغییر حدود و مرزهای هر جزیره، فرایند اختصاص ظرفیت تولید به بارها نیز تغییر کرده و شاخص ENS به‌دست آمده نیز متفاوت خواهد بود. رتبه‌بندی کروموزومها براساس مقدار برازندگی آنها که عکس مقدار ENS است، انجام شده و در فرایندی تکراری و با عملیات خاص ژنتیکی از جمله تداخل^۱، جهش^۲ و انتخاب^۳، پاسخ نهایی تعیین می‌شود. اگر نتایج به مقدار حداکثر برازندگی یا حداقل ENS همگرا شود، فرایند بهینه‌سازی متوقف خواهد شد.

۶- مراحل اجرای روش پیشنهادی

مراحل روش پیشنهادی برای تعیین پاسخ بهینه به قرار زیر است:

۱- با مشخص بودن تعداد جزیره‌هایی که در مراحل ابتدایی فرایند بازیابی باید تشکیل شود، جمعیت اولیه‌ای از کروموزومها به‌طور تصادفی تولید می‌شود که هر کروموزوم رشته‌ای n رقمی است که n تعداد شینه‌های شبکه آزمون است. با استفاده از این آرایش کروموزومی، می‌توان شبکه و شینه‌های داخل هر جزیره و مرزهای آن را نیز تعیین کرد.

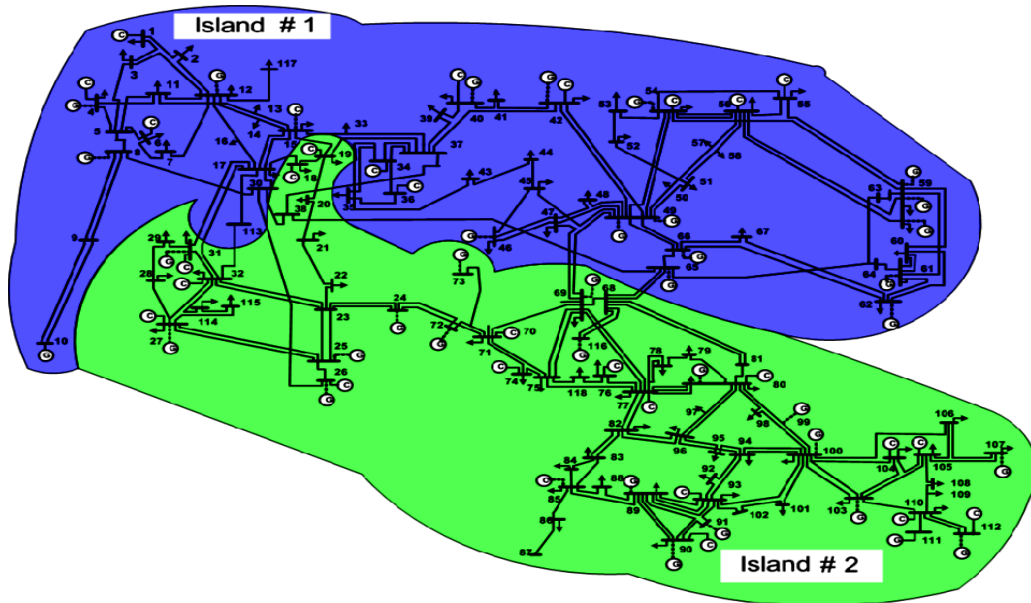
۲- شروط مورد نیاز تشکیل هر جزیره برای تمامی کروموزومهای جمعیت اولیه مورد ارزیابی قرار

4. Fitness Value
5. Elitist Selection
6. Roulette Wheel

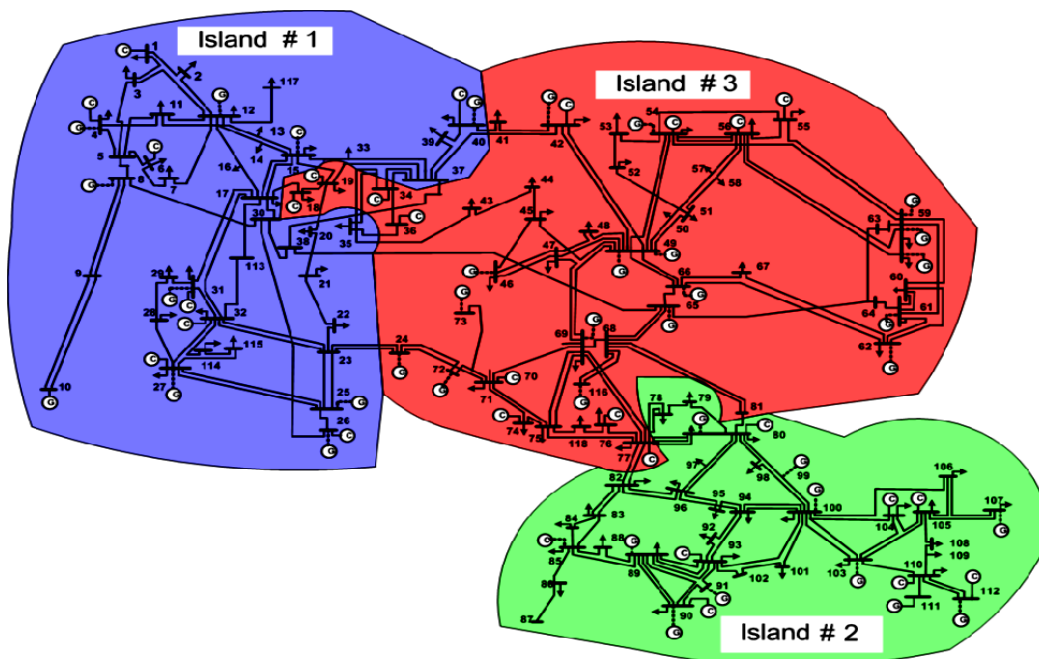
1. Crossover
2. Mutation
3. Selection

جزیره و کل بار شبکه را نسبت به روند کلیدزنی و شکلهای ۸ و ۹ مقدار ENS هر یک از جزیره‌ها و ENS کل شبکه را با ۲ و ۳ جزیره نشان می‌دهد.

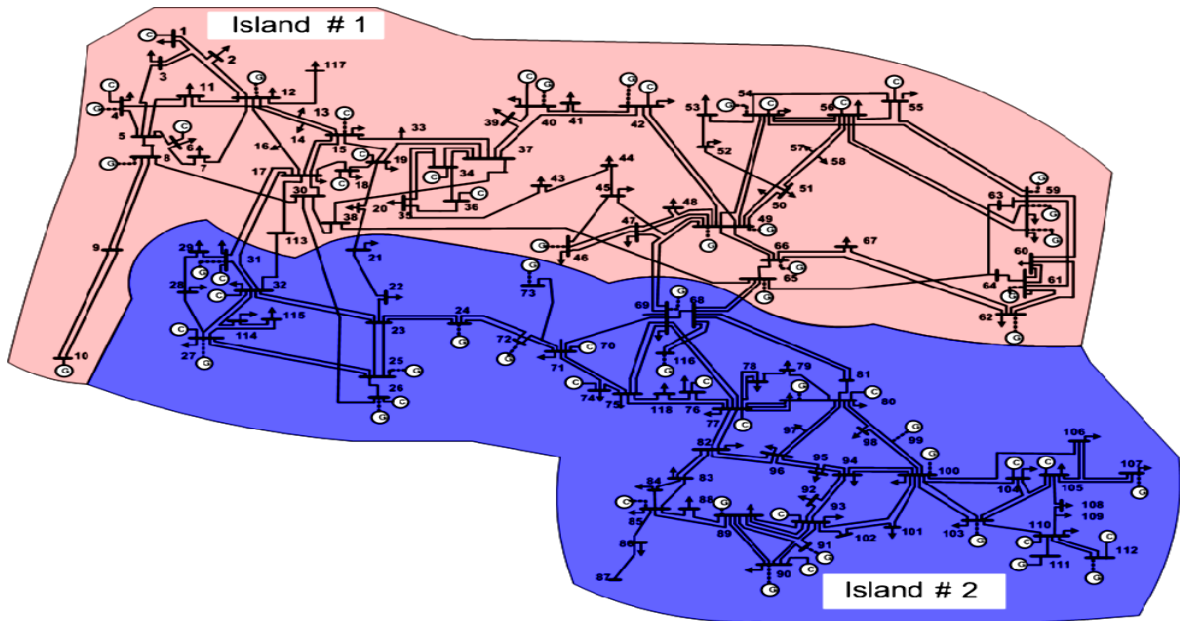
شکلهای ۴ و ۵، آرایش مداری جزیره‌ها را در حالت‌های تقسیم شبکه آزمون با ۲ و ۳ جزیره نشان می‌دهد. شکلهای ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات مقدار بار تغذیه شده هر



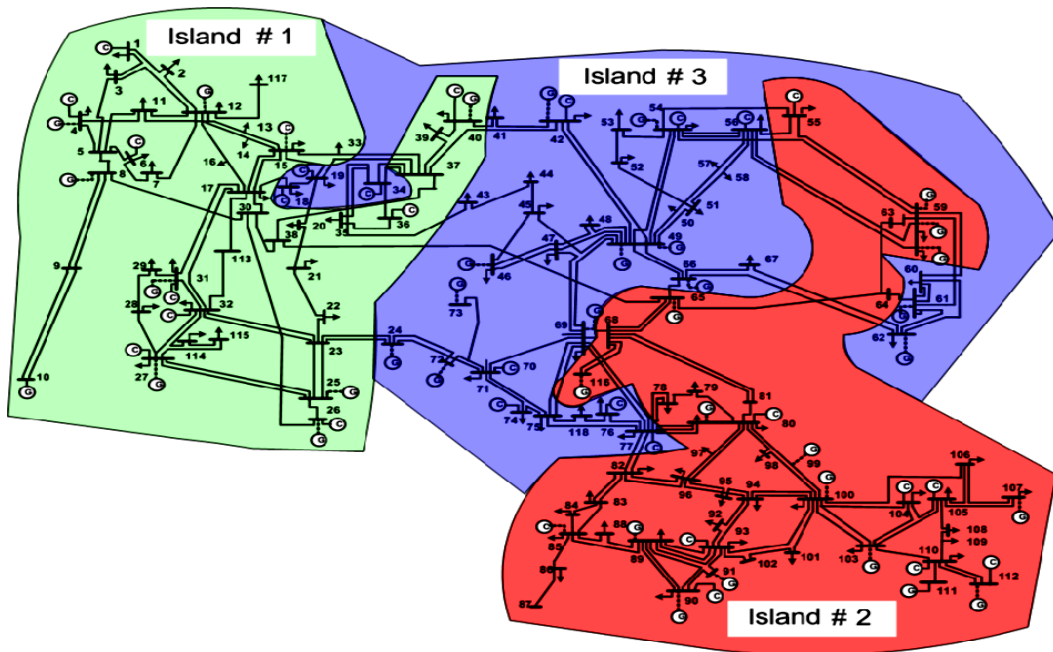
شکل ۴ آرایش مداری تقسیم شبکه آزمون به دو جزیره



شکل ۵ آرایش مداری تقسیم شبکه آزمون به سه جزیره مطابق جدول ۱



شکل ۱۳ آرایش مداری تقسیم شبکه آزمون به دو جزیره در حضور TCSC مطابق جدول ۵



شکل ۱۴ آرایش مداری تقسیم شبکه آزمون به سه جزیره در حضور TCSC مطابق جدول ۵

تعداد دفعات عملیات کلیدزنی در حالت‌های شبکه با TCSC غالباً کمتر از شرایط بدون حضور TCSC است. بنابراین با تعیین تعداد بهینه جزیره‌ها و در صورت وجود تعداد کافی ادوات TCSC با ظرفیتهای مناسب - که در موقعیتهای مکانی مناسبی از شبکه نصب شده باشند، - علاوه بر بهبود شرایط دینامیکی روند اجرای فرایند بازیابی، زمان بازیابی را نیز می‌توان به‌طور محسوسی کاهش داده و تابع هدف را نیز بهبود بخشید.

۸- نتیجه

در این مقاله، اثر تغییر تعداد جزیره‌ها در فرایند بازیابی مورد مطالعه قرار گرفته و به‌کمک روش ارائه شده، حدود و مرزهای بهینه جزیره‌ها تعیین شد. همچنین به‌کمک روش پیشنهادی، نقش ادوات کنترلی TCSC موجود در شبکه در تسهیل و بهبود فرایند بازیابی ارزیابی شد. تابع هدف، حداقل کردن مقدار انرژی تأمین نشده (ENS) بوده و روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده است. برای بررسی قابلیت‌های روش پیشنهادی، از شبکه IEEE-118bus به‌عنوان سیستم آزمون استفاده شد که نتایج تقسیم شبکه به ۲ تا ۷ جزیره در صورت حضور TCSC و بدون آن مورد مطالعه قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست آمده، ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد جزیره‌ها، مقدار شاخص ENS در ابتدا به‌شدت کاهش یافته و سپس این روند کندتر شده و در حدی تثبیت خواهد شد. از طرف دیگر، با افزایش تعداد جزیره‌ها در حضور تجهیزات TCSC، شدت کاهش شاخص ENS نسبت به حالت شبکه بدون TCSC بیشتر است. بنابراین با تکیه بر قابلیت‌های کنترلی ادوات FACTS از جمله TCSC، می‌توان مقدار ENS را به‌طور محسوسی کاهش داده و روند اجرای فرایند بازیابی را تسهیل کرد.

جدول ۸ مقادیر مقایسه‌ای تعداد عملیات کلیدزنی در حالت‌های تقسیم شبکه آزمون به ۲ تا ۷ جزیره بدون TCSC و در حضور TCSC

تعداد جزیره‌ها	تعداد کلیدزنی با TCSC	تعداد کلیدزنی بدون TCSC
۲	۱۹۶	۱۹۷
۳	۱۸۹	۱۹۱
۴	۱۸۳	۱۸۷
۵	۱۸۵	۱۸۷
۶	۱۷۸	۱۸۷
۷	۱۸۴	۱۸۷

ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد جزیره‌ها، مقدار تابع هدف در ابتدا به‌شدت کاهش یافته و سپس این روند بطئی‌تر شده و در نهایت تثبیت می‌شود. پس از آن، افزایش بیش از حد تعداد جزیره‌ها تأثیر چندانی بر کاهش ENS و در نهایت بهبود فرایند بازیابی نخواهد داشت؛ این شرایط در هر دو حالت شبکه با TCSC و بدون TCSC به‌خوبی دیده می‌شود. از طرف دیگر، با استفاده از قابلیت‌های تجهیزات TCSC موجود در شبکه، مقدار تابع هدف بیشتر از حالت بدون TCSC به مقدار بهینه نزدیک شده است. بنابراین با افزایش تعداد TCSC و با فرض نصب این ادوات در موقعیتهای مکانی مناسب در شبکه، قطعاً روند اجرای فرایند بازیابی به‌طور محسوس بهبود می‌یابد. همچنین مطابق جدول ۸، ملاحظه می‌شود که با افزایش جزیره‌ها، از تعداد عملیات کلیدزنی در دو حالت شبکه با TCSC و بدون TCSC کاسته شده که این مسأله کاهش یافتن زمان بازیابی در صورت افزایش تعداد جزیره‌ها را به‌دنبال خواهد داشت. همچنین در صورت یکسان بودن تعداد جزیره‌ها،

۹- منابع

- Power Systems, Vol. 10, No. 3, 1995, PP. 1473-1479.
- [7] S. Lee, S. Lim, and B. Ahn, "Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", IEEE Trans. on Power Systems., Vol. 13, No. 3, Aug. 1998, PP. 1156-1163.
- [8] T. Sakaguchi and K. Matsumoto, "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, Feb. 1983, PP. 320-329.
- [9] D. S. Kirschen and T. L. Volkman, "Guiding a Power System Restoration with an Expert System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 1991, PP. 556-566.
- [10] Lester. H. Fink, Kan -Lee Liou, Chen-Ching Liu, "From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, PP. 745-751.
- [11] M. Adibi and L. Fink, "Power System Restoration Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, Issue 2, May 1995, PP. 22-28.
- [12] R. J. Kafka, D. R. Penders, S. H. Bouchey, and M. M. Adibi, "System Restoration Plan Development for a Metropolitan Electric System", IEEE
- [1] M. M. Adibi, et al, "Power System Restoration – A task Force Report", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 2, No. 2, 1987, PP. 271-277.
- [2] T. Dy Liacco, et. al, "A Hierarchical Interactive Approach to Electric Power System Restoration", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 3, 1992, PP. 1123-1131.
- [3] Paulo Gomes, Antonio P. Guarini, Antonio C. S. de Lima, Marcello S. Rocha, "Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, NewYork, Jan. 2002, PP. 1299-1304.
- [4] O. Y. Bong, M. R., N. H. Lee, "Development of Automatic Power Restoration Systems in KEPCO Real Power System", Pacific IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 3, Oct. 2002, PP. 1691-1694.
- [5] R. Kearsley, "Restoration in Sweden and Experience from the Blackout of 1983", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 2, No. 2, May 1987, PP. 422-428.
- [6] T. Nagata, H. Sasaki, and R. Yokoyama, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach", IEEE Trans. on

- [17] C. R. Puerle-Esquivel and E. Acha, "A Newton-Type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 4, Nov. 1997, PP. 1474-1480.
- [18] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, S.G. Tan, and J. Rico, "Efficient Object Oriented Power Systems Software for the Analysis of Large - Scale Networks Containing FACTS-Controlled Branches", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, PP. 464-472.
- [19] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles-Camacho, "FACTS Modeling and Simulation in Power Networks", UK, Wiley, 2004.
- [20] Martin Geidl, "Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform", Diploma Thesis, Zurich, 2003.
- Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, 1981 PP. 3703-3713.
- [13] Arturo Suman Bretas, "Robust Electric Power Infrastructures. Response and Recovery During Catastrophic Failures", Ph.D Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.
- [14] IEEE-118 Bus Test System available at <http://www.ee.Washington.edu/research/pstca/>
- [15] N. Cbristl, R. Hcdin, K. Sadck, P. Lltzelberger, P. E. Krduse, S. M. McKcna, A. H. Maiitaya, and D. Togerson, "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impedance", In Conf: Large High Voltage Electric Systems (CIGXEJ, Paris, Paper 14/37/38-05, Sept. 1992.
- [16] S. G. Helbing and G. G. Kaiiidy, "Investigations of an Advanced Form of Series Compensation", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, Apr. 1994, PP. 939-947.