بازگردانی جزیره‌ای سیستم‌های قدرت به‌صورت یک‌پارچه با استفاده از روش بهینه‌سازی دوسطحی

امین کریمی زاده[1]، دانشجوی دکتری؛ عباس کتابی[2]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران - karimizadeh@grad.kashanu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان-کاشان- ایران - aketabi@kashanu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی جدید پیشنهاد شده‌است که در شرایط خاموشی سراسری سیستم قدرت، ترتیب اقدامات لازم جهت بازگرداندن هر چه سریع‌تر سیستم قدرت را تعیین می‌کند. چنان‌چه در سیستم قدرت بیش از یک واحد با قابلیت خودراه‌اندازی وجود داشته‌باشد، جهت سرعت بیش‌تر، بازگردانی به‌صورت جزیره‌ای صورت می‌گیرد. روش پیشنهادی از یک الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی بهره می‌برد که مجموعه اقدامات جهت بازگردانی جزیره‌ای یک سیستم قدرت اعم از جزیره‌سازی، تعیین توالی راه‌اندازی واحدها، تعیین مسیر بهینه بین شین‌ها و ترتیب برق‌دارکردن شین‌ها و خطوط انتقال را به‌صورت یک‌پارچه و هم‌زمان انجام می‌دهد. محدودیت‌های واحدها و شبکه انتقال به‌صورت قیود در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌است. جهت مقایسه و نشان‌دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم، شبیه‌سازی برروی شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE انجام شده‌است.

واژه‌های کلیدی: بازگردانی سیستم قدرت، جزیره‌سازی، توالی راه‌اندازی واحدها، مسیر بهینه انتقال توان، بهینه‌سازی دوسطحی، قابلیت تولید انرژی.

An Integrated Islanding Restoration of Power Systems Using Bi-level Optimization Approach

Abbas Ketabi[1], Associate Professor; Amin Karimizadeh[2], PhD Student

1- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: aketabi@kashanu.ac.ir
2- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: karimizadeh@grad.kashanu.ac.ir

Abstract: In this paper, a novel method has been proposed that, determines the necessary actions to restore the power system as quickly as possible in the event of an overall outage of the power system, when there is more than one black start unit in the power system, it will be divided into several islands in order to faster restoration. The proposed method uses a bi-level optimization algorithm that, determines needed actions for restoration process in an integrated approach. These actions are partitioning of the power system, units' start-up sequence, determination of optimal transmission path between buses and sequence of energizing transmission lines and buses. The proposed algorithm has been implemented on IEEE 39-bus test system to show the advantage of the method.

Keywords: Power system restoration, partitioning, units start-up sequence, optimal transmission path, bi-level optimization, energy generation capability.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۰۴و ۱۳۹۷/۰۲/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۵
نام نویسنده مسئول: عباس کتابی
نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۱- مقدمه

مسئله بازگردانی شبکه‌های قدرت بعد از یک خاموشی جزئی یا خاموشی سراسری از ابتدای ایجاد شبکه‌های قدرت از دغدغه‌های مهندسین برق بوده‌است. در سال‌های اخیر با مقررات‌زدایی در صنعت برق و ایجاد فضای رقابتی بنا به دلایل اقتصادی، بهره‌برداری از شبکه‌های برق به نزدیکی مرزهای پایداری سیستم کشیده شده‌است. ضمن‌این‌که سیستم‌های قدرت هم ازنظر اندازه و هم ازنظر پیچیدگی رشد فراوانی داشته‌اند. همه فاکتورهای ذکرشده ریسک ایجاد خاموشی های بزرگ در سیستم‌های قدرت را روزبه‌روز افزایش می‌دهد. باتوجه به این‌که در یک سیستم قدرت به‌ندرت خاموشی بزرگ اتفاق می‌افتد اما در صورت ایجاد خاموشی تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و امنیتی زیادی خواهدداشت؛ بنابراین اهمیت توجه به این مسئله دوچندان می‌گردد.

از مهم‌ترین خاموشی‌های سال‌های اخیر می‌توان به چند مورد اشاره کرد: خاموشی سراسری آمریکای شمالی در ۱۴ اوت سال ۲۰۰۳ که طی آن و تا زمان بازگردانی کامل شبکه زمانی حدود دو هفته خاموشی‌های وسیعی در شبکه به وجود آمد[۱]. خاموشی ۴ نوامبر سال ۲۰۰۶ در اروپا که منجربه خاموشی شبکه برق در یک جامعه ۱۵ میلیون نفری برای مدت‌زمان دو ساعت شد. خاموشی وسیع در شبکه برق برزیل و پاراگوئه در ۱۰ نوامبر ۲۰۰۹ و همچنین خاموشی وسیع بخش شمالی شبکه برق هندوستان در ۳۰ جولای ۲۰۱۲ منجربه خاموشی ۵۰ گیگاوات مصرف حدود ۶۷۰ میلیون نفر از جمعیت این کشور شد[۲].

بعد از ایجاد یک خاموشی در سیستم قدرت، بایستی هر چه سریع‌تر سیستم بازگردانده شده و توان مصرفی مشترکان تأمین گردد؛ بنابراین لازم است بهره‌برداران سیستم قدرت از قبل، جهت مواجهه با چنین شرایطی آمادگی لازم داشته‌باشند و جهت بازگرداندن سیستم قدرت برنامه مناسب تهیه کرده‌باشند. بازگردانی سیستم قدرت بعد از یک خاموشی سراسری نیازمند هماهنگی بین واحدهای تولیدی، سیستم انتقال و مصرف‌کنندگان است. فرایند بازگردانی شامل سه مرحله اصلی راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی، بازگردانی شبکه قدرت و بازگردانی بار است[۳، ۴]. هدف اصلی بازگردانی سیستم قدرت تأمین حداکثر توان مشترکان در حداقل زمان طی فرایند بازگردانی سیستم است، ضمن‌این‌که به‌منظور جلوگیری از ایجاد خاموشی مجدد و همچنین جلوگیری از آسیب‌رسیدن به تجهیزات سیستم، محدودیت‌های سیستم قدرت رعایت گردد.

بازگردانی در یک سیستم قدرت از واحدهای خودراه‌انداز[1] شروع‌شده و با انتقال توان تولیدی آن‌ها ازطریق خطوط انتقال ارتباطی، توان اولیه لازم جهت راه‌اندازی واحدهای غیرخودراه‌انداز[2] تأمین می گردد. هم‌زمان با راه‌اندازی واحدها و با ایجاد ظرفیت تولید توان در سیستم، بارهای مصرفی جهت حفظ پایداری شبکه در مدار قرار می گیرند[۵].

واحدهای تولیدی براساس توان موردنیاز جهت راه‌اندازی به دودسته تقسیم می‌شوند: واحدهای خودراه‌انداز که می‌توانند با منابع داخلی خود و بدون استفاده از منابع خارجی راه‌اندازی شوند و واحدهای غیرخودراه‌انداز که برای راه‌اندازی نیاز به توان راه‌انداز[3] از منابع خارجی دارند[۶].

واحدهای خودراه‌انداز شامل سه دسته واحدها می‌باشند:

- واحدهای برقابی: این واحدها جهت راه‌اندازی به انرژی اولیه بسیار کمی جهت بازکردن دریچه ورودی آب نیاز دارند، دارای سرعت پاسخ بالا بوده و می‌توانند توان موردنیاز جهت راه‌اندازی واحدهای حرارتی بزرگ و واحدهای اتمی را تأمین نمایند.
- واحدهای دیزل: دیزل ژنراتورها معمولاً توسط محرک اولیه باتری به‌سرعت راه‌اندازی می‌شوند. این واحدها توان موردنیاز جهت راه‌اندازی واحدهای بزرگ‌تر را تأمین می‌کنند. اندازه این واحدها کوچک است و عموماً جهت برق‌دارکردن تجهیزات بزرگ سیستم انتقال استفاده نمی‌شود.
- واحدهای توربین گاز: توربین‌های گاز آئرودینامیکی می‌توانند با کمک منابع باتری راه‌اندازی شوند. واحدهای گازی بزرگ‌تر مجهز به دیزل ژنراتور می‌باشند که شین کمکی واحد را برق‌دار کرده و توربین گاز را راه‌اندازی می‌کند. سرعت راه‌اندازی توربین‌های گازی بالاست و می‌توانند در مدت‌زمان کوتاهی توان موردنیاز بخشی از بارهای سیستم را تأمین کنند.

بسته به ساختار و مشخصه سیستم‌های قدرت، فرایند بازگردانی هر سیستم متفاوت با دیگری است. در سیستم‌های قدرت دارای واحدهای خودراه‌انداز زیاد، به‌علت فراهم‌بودن منابع توان اولیه کافی، بازگردانی سیستم قدرت به‌راحتی و با سرعت انجام می‌گیرد درحالی‌که در سیستم‌های با واحدهای خودراه‌انداز محدود، بازگردانی سیستم قدری پیچیده‌تر بوده و در مدت‌زمان طولانی‌تری انجام می‌شود. در این مقاله به بازگردانی سیستم‌های قدرت معمولی که دارای منابع خودراه‌انداز محدود می‌باشند پرداخته می‌شود.

راهبردهای مختلفی جهت بازگردانی سیستم‌های قدرت وجود دارد که در دودسته راهبرد بازگردانی از بالا به پایین[4] یا ستون فقرات و راهبرد بازگردانی از پایین به بالا[5] یا جزیره‌ای دسته‌بندی می‌شوند. در راهبرد بازگردانی از بالا به پایین در مرحله اول کل شبکه انتقال برق‌دار شده، سپس بارهای سیستم به‌صورت مرحله‌به‌مرحله به شبکه متصل می‌گردند، به‌همین‌دلیل به این راهبرد، بازگردانی سری گفته می‌شود. مهم‌ترین مشکل این راهبرد کنترل توان راکتیو و اضافه‌ولتاژهای شبکه کم‌بار است؛ بنابراین استفاده از این راهبرد محدود به شبکه‌های کوچک با خطوط انتقال کوتاه و واحدهای باقابلیت جذب توان راکتیو زیاد است[۷]. در راهبرد از پایین به بالا که بیش‌تر مورداستفاده قرار می گیرد، ابتدا شبکه قدرت به چند جزیره تقسیم می‌گردد، سپس هر جزیره به‌صورت مستقل برق‌دار شده و درنهایت جزیره‌ها به‌هم متصل شده و شبکه قدرت یک‌پارچه را تشکیل می‌دهند[۸]. به این راهبرد،

بازگردانی موازی یا جزیره‌ای گفته می شود و ازنظر زمانی دارای سرعت بیش‌تر نسبت به راهبرد اول است. تقسیم‌بندی شبکه‌های قدرت به چند جزیره به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که در هر جزیره حداقل یک واحد خود راه‌انداز وجود داشته‌باشد، اندازه جزایر تاحدممکن به‌هم نزدیک باشد و ظرفیت توان تولید هر جزیره جهت تأمین بار مصرفی آن جزیره کفایت داشته‌باشد[۹].

با توجه به اهمیت بازگردانی سیستم‌های قدرت از همان ابتدای ظهور سیستم‌های قدرت، تحقیقات پژوهشگران در این زمینه آغاز شده‌است. در [۱۰] مروری بر مهم‌ترین خطاهای منجربه خاموشی در شبکه برق آمریکای شمالی در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۳ انجام شده و مشکلات مواجه شده مرتبط با بازگردانی سیستم در این دوره ۵ ساله موردبررسی قرار گرفته‌است. در [۱۱]موضوعات مختلف مرتبط با فرایند بازگردانی سیستم‌های قدرت ازجمله مشخصه‌های تولید واحدهای بخار و توربین گاز، نقش سیستم کنترل نیروگاه در بازگردانی سیستم همراه با ملاحظات الکتریکی، مکانیکی و کنترل فرکانس، کنترل و حفظ تعادل توان راکتیو سیستم، دینامیک سیستم حین بازگردانی و جزیره‌سازی عمدی معرفی شده‌است.

بیش‌تر تحقیقاتی که درزمینه‌ی بازگردانی سیستم‌های قدرت انجام شده‌است در یکی از دسته موضوع‌های زیر قرار می‌گیرد:

- جزیره‌سازی عمدی شبکه‌های قدرت به‌منظور بازگردانی به‌صورت موازی.
- تعیین توالی راه‌اندازی واحدها.
- تعیین مسیر بهینه بین شین‌ها و بازگردانی شبکه انتقال.
- اتصال بارها و پایداری شبکه.

در [۱۲] یک روش بهینه‌سازی دوسطحی جهت جزیره‌سازی سیستم قدرت با تأکید بر حداقل‌شدن زمان خاموشی بارهای بحرانی با مشخصه بارهای سرد پیشنهاد شده‌است. این روش به‌گونه‌ای عمل می کند که بین بازگردانی بارهای بحرانی و بارگیری واحدهای تولیدی سیستم، هماهنگی کامل وجود داشته‌باشد. یک روش سه‌مرحله‌ای جدید برمبنای نظریه گراف‌ها جهت جزیره‌سازی سیستم‌های قدرت به‌منظور بازگردانی سریع در [۱۳] معرفی شده‌است. در این روش به‌منظور افزایش پایداری سیستم قدرت حین بازگردانی، تلاش می‌شود تا حداقل اختلاف قابلیت تولید و مصرف در جزیره‌ها بیشینه گردد.

یک رویکرد خوشه‌بندی برمبنای الگوریتم فازی C-medoid در[۱۴] جهت جزیره‌سازی سیستم‌های قدرت بزرگ استفاده شده‌است. این الگوریتم از اطلاعات زمان حقیقی[۶] اندازه‌گیری‌شده توسط واحدهای اندازه‌گیر فاز[۷] استفاده می‌کند.

در [۱۵] یک مدل جدید برای واحدهای تولیدی پیشنهاد شده‌است که مسئله بهینه‌سازی را به یک مسئله بهینه‌سازی خطی مختلط با اعداد صحیح تبدیل و جواب بهینه مسئله را به‌دست می‌آورد. همچنین تأثیر محل واحدهای خودراه‌انداز با تغییر محل این واحدها در شبکه بررسی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییر محل واحد خودراه‌انداز در شبکه، فرایند بازگردانی را تغییر داده و قابلیت تولید انرژی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

یک مدل جدید جهت تعیین توالی راه‌اندازی واحدهای تولیدی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مختلط با اعداد صحیح[۸] در [۱۶] پیشنهاد شده‌است. تابع هدف به‌گونه‌ای در مسئله بهینه‌سازی مدل شده‌است که قابلیت تولید توان کل سیستم در دوره زمان بازگردانی بیشینه گردد.

تأثیر استفاده از منابع تجدیدپذیر در بازگردانی سیستم‌های قدرت در [۱۷] موردبررسی قرار گرفته‌است. منابع تجدیدپذیر به‌صورت دو واحد توربین بادی و دو واحد فتوولتائیک در سیستم در نظر گرفته‌شده‌اند که این واحدها پس از در مدار قرارگرفتن تمامی واحدهای خودراه‌انداز و غیرخودراه‌انداز وارد مدار می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از منابع تجدیدپذیر حتی پس از راه‌اندازی تمامی واحدهای سیستم قدرت و در مراحل نهایی بازگردانی، باعث افزایش قابلیت تولید انرژی سیستم و درنتیجه کاهش بارهای تأمین‌نشده سیستم در دوره زمانی بازگردانی می‌گردد.

در [۱۸] مانیتورینگ و ارزیابی پایداری سیستم قدرت حین فرایند بازگردانی به صورت آنلاین با استفاده از یک سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده[۹] انجام می شود. باتوجه به بازگردانی سیستم قدرت به صورت جزیره‌ای، ارزیابی پایداری سیستم در دو مرحله انجام می‌گیرد: مرحله اول حین راه‌اندازی واحدها و اتصال بارها در جزیره‌ها و مرحله دوم در زمان یکسان‌سازی زاویه فاز مرجع جزیره‌ها و اتصال جزیره‌ها به‌هم پس از بازگردانی کامل جزیره‌ها.

اتصال بار سرد[۱۰] یکی از مباحثی است که درزمینه‌ی بازگردانی بار موردتوجه قرار می‌گیرد. بررسی اتصال بار سرد از این نظر اهمیت دارد که میزان بار مصرف‌کنندگان در زمان اتصال آن‌ها طی فرایند بازگردانی متفاوت با میزان بار آن‌ها قبل از ایجاد خاموشی است. باتوجه به این‌که رفتار مصرف‌کنندگان مختلف از این نظر متفاوت است، جهت برآورد بار مصرفی سیستم قدرت حین فرایند بازگردانی موردتوجه قرار می‌گیرد. در [۱۹] پدیده اتصال بار سرد پس از ایجاد خاموشی و قطعی منبع تغذیه برای بارهای خانگی و بارهای صنایع پرمصرف موردبررسی قرار گرفته‌است. همچنین تأثیرات متقابل بار و فرکانس و همچنین رفتار بار در شرایط مختلف ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

در شبکه‌های توزیع شعاعی نیز بعد از ایجاد خطای اتصال کوتاه مسئله بازگردانی مطرح می‌گردد، بدین صورت که بعد از ایجاد اتصال کوتاه، تجهیزات حفاظتی وارد عمل شده و خطا را پاکسازی و بخش معیوب را از بقیه شبکه ایزوله می‌کند. پس از ایزوله سازی خطا، شبکه به سه بخش تقسیم می شود: بخش بالادست که ازطریق فیدر اصلی تغذیه می‌شود، بخش پایین‌دست که ازطریق فیدرهای مجاور تغذیه می شود و بخش معیوب که بعد از رفع خطا به شبکه متصل می‌گردد. مسئله اصلی در بازگردانی شبکه‌های توزیع اتصال بیش‌ترین بار بدون انرژی از شبکه پایین‌دست ازطریق تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه در کوتاه‌ترین زمان می‌باشد. بارهای بخش معیوب نیز پس از رفع خطا به

شبکه متصل می‌گردد. مهم‌ترین قید در مسئله بازگردانی شبکه‌های توزیع حفظ ساختار شعاعی شبکه می‌باشد[۲۰].

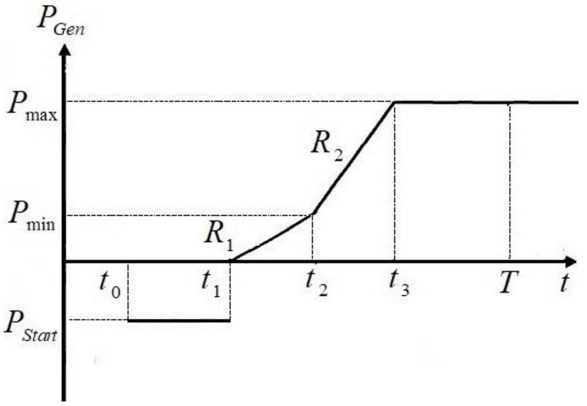
اکثر مطالعاتی که درزمینه‌ی بازگردانی سیستم‌های قدرت صورت گرفته‌است و به‌اجمال به مهم‌ترین حوزه‌های آن اشاره شد، نیازمند شبیه‌سازی فرایند بازگردانی سیستم قدرت است. این شبیه‌سازی شامل تعیین جزیره‌ها، تعیین توالی راه‌اندازی واحدها، تعیین مسیر انتقال توان بین شین‌ها و درنهایت اتصال بارهای سیستم است. روی‌کرد معمولی که در شبیه‌سازی بازگردانی سیستم‌های قدرت به کار می‌رود بدین صورت است که در صورت وجود بیش از یک واحد خودراه‌انداز در سیستم، به جهت بازگردانی سریع‌تر، ابتدا سیستم قدرت به چند جزیره تقسیم می‌شود، سپس برای هرکدام از جزیره‌ها فرایند بازگردانی به‌صورت مستقل و به‌صورت موازی باهم شبیه‌سازی می‌گردد. در برخی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی بازگردانی جزیره‌ها، ابتدا توالی راه‌اندازی واحدها تعیین می‌گردد سپس مسیرهای انتقال بین شین‌ها باتوجه به توالی واحدها تعیین می‌گردد. تعیین توالی راه‌اندازی واحدها بدون درنظرگرفتن مسیرهای بین شین‌ها، در بیش‌تر مواقع منجربه یافتن جواب‌های غیرممکن برای توالی راه‌اندازی واحدها می‌گردد، بنابراین لازم است که توالی راه‌اندازی واحدها براساس مسیرهای به‌دست‌آمده مجدداً اصلاح گردد؛ بنابراین محاسبه توالی راه‌اندازی واحدها و مسیرهای انتقال توان بین شین‌ها به‌صورت مجزا در بیش‌تر مواقع مانع از رسیدن مسئله به جواب بهینه مطلق می‌گردد.

در این مقاله روشی برمبنای بهینه‌سازی دوسطحی به‌صورت تعاملی[۱۱] پیشنهاد شده‌است که جزیره‌سازی سیستم قدرت، تعیین توالی بهینه راه‌اندازی واحدها، تعیین توالی برق‌دارشدن شین‌ها و تعیین مسیرهای انتقال بهینه بین شین‌های شبکه را به‌صورت هم‌زمان و به‌صورت یک مرحله محاسبات[۱۲] انجام می‌دهد. در الگوریتم پیشنهادی جزیره‌سازی سیستم قدرت در ابتدای فرایند بازگردانی به‌صورت مجزا تعیین نمی‌شود بلکه هم‌زمان با تعیین توالی راه‌اندازی واحدها و همچنین تعیین مسیر بهینه بین واحدها تعیین می‌گردد. در الگوریتم پیشنهادی مسئله بازگردانی سیستم‌های قدرت به‌گونه‌ای مدل شده‌است که در سطح بالایی الگوریتم، توالی بهینه راه‌اندازی واحدها تعیین می‌شود و هم‌زمان در سطح پایینی الگوریتم، مسیرهای انتقال بهینه بین شین‌ها تعیین‌شده و واحدها، شین‌ها و خطوط انتقال به جزیره‌ها اختصاص می‌یابد.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ مسئله بازگردانی سیستم‌های قدرت به‌صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شود. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی تشریح می‌گردد. در بخش ۴ مطالعات عددی برروی سیستم آزمون ۳۹ شینه IEEE انجام می‌شود و فرایند بازگردانی با روش مرسوم و روش پیشنهادی شبیه‌سازی می‌گردد. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی مورد بحث و تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. در بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی و بیان ریاضی مسئله

همان‌طورکه پیش‌تر بیان شد بسته‌به‌اینکه یک واحد قابلیت خودراه‌اندازی دارد یا خیر، واحدهای نیروگاهی به دودسته واحدهای خودراه‌انداز و واحدهای غیرخودراه‌انداز تقسیم‌بندی می‌شوند. یک واحد خودراه می‌تواند بدون کمک‌گرفتن از شبکه و به‌طور مستقل راه‌اندازی گردد؛ اما واحدهای فاقد قابلیت خودراه‌اندازی بایستی با کمک ازطریق توان الکتریکی شبکه قدرت راه‌اندازی گردند. بعد از راه‌اندازی یک واحد نیروگاهی و اتصال به شبکه قدرت، توان تولیدی واحد تا رسیدن به مقدار حداکثر ظرفیت تولید آن واحد طبق منحنی مشخصه تولید آن واحد افزایش می‌یابد. در [۱۶] منحنی مشخصه تولید یک واحد به‌صورت یک منحنی خطی با یک شیب معین مورداستفاده قرار گرفته‌است. شکل واقعی‌تری از مشخصه تولید یک واحد در [۲۱] مورداستفاده قرار گرفته‌است که به‌صورت یک منحنی تکه‌ای خطی بیان می‌گردد. در شکل ۱ منحنی تکه‌ای‌خطی مشخصه تولید یک واحد نوعی که در این مقاله مورداستفاده قرار خواهدگرفت نشان داده شده‌است.



شکل ۱: مشخصه تولید توان یک واحد نیروگاهی نوعی

فرم ریاضی منحنی تکه‌ای خطی مشخصه تولید یک واحد به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_{Gen}=\begin{cases}0 & t\le t_0\\ -P_{Start} & t_0\le t\le t_1\\ R_1.t & t_1\le t\le t_2\\ P_{\min}+R_2.(t-t_2) & t_2\le t\le t_3\\ P_{\max} & t_3\le t\le T\end{cases} \qquad (۱)$$

$$t_0=t_{Start} \qquad (۲)$$

$$t_1=t_{Start}+t_{ctp} \qquad (۳)$$

$$t_2=t_{Start}+t_{ctp}+\frac{P_{\min}}{R_1} \qquad (۴)$$

$$t_3=t_{Start}+t_{ctp}+\frac{P_{\min}}{R_1}+\frac{P_{\max}-P_{\min}}{R_2} \qquad (۵)$$

که P_{Start}، t_{Start} و t_{ctp} به‌ترتیب توان موردنیاز واحد غیرخودراه‌انداز جهت راه‌اندازی، لحظه راه‌اندازی و مدت‌زمان راه‌اندازی واحد

غیرخودراه‌انداز است. R_1 و R_2 نرخ‌های افزایشی تولید، $P_{\min}$ و $P_{\max}$ حداقل و حداکثر توان مجاز تولیدی واحد است. مشخصه تولید توان بیان شده، برای واحدهای خودراه‌انداز نیز قابل‌استفاده است با این تفاوت که واحدهای خودراه‌انداز نیازی به توان شبکه جهت راه‌اندازی ندارند ضمن این‌که در ابتدای فرایند بازگردانی شبکه قدرت در مدار قرار می‌گیرند؛ بنابراین P_{Start}، t_{Start} و t_{ctp} برای این واحدها برابر صفر است.

همان‌طورکه بیان شد مهم‌ترین هدف در بازگردانی سیستم‌های قدرت، برق‌دارکردن بیش‌ترین مشترک در کوتاه‌ترین زمان پس از وقوع خاموشی است؛ بنابراین با ایجاد بیش‌ترین قابلیت تولید انرژی حین فرایند بازگردانی امکان برق‌دارکردن بیش‌ترین مشترک فراهم می‌گردد. ازاین‌رو قابلیت تولید انرژی سیستم قدرت در ساعات اولیه فرایند بازگردانی به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی بازگردانی سیستم‌های قدرت تعریف می‌گردد که بایستی بیشینه گردد. قابلیت تولید انرژی سیستم قدرت به صورت جمع جبری انرژی تولیدی و مصرفی تمامی واحدهای نیروگاهی به‌دست می‌آید، بنابراین برای تابع هدف می‌توان نوشت:

$$Max\ \left(E_{system}=\sum_{i=1}^{N}E_{iGen}-\sum_{j=1}^{M}E_{jStatrt}\right) \qquad (۶)$$

که N و M به‌ترتیب تعداد کل واحدها و تعداد واحدهای غیرخودراه‌انداز سیستم قدرت است. باتوجه به مشخصه تولید توان واحدها، توان تولیدی و توان مصرفی واحدها در دوره زمانی بازگردانی سیستم قدرت T به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned}E_{iGen}&=\frac{1}{2}P_{i\,\min}.\frac{P_{i\,\min}}{R_1 i}\\&+\frac{1}{2}(P_{i\,\min}+P_{i\,\max})(\frac{P_{i\,\max}-P_{i\,\min}}{R_{2i}})\\&+P_{i\,\max}(T-t_{iStart}+t_{ictp}+\frac{P_{i\,\min}}{R_{1i}}+\frac{P_{i\,\max}-P_{i\,\min}}{R_{2i}})\end{aligned} \qquad (۷)$$

$$E_{jStart}=P_{jStart}\ .\ t_{jctp} \qquad (۸)$$

با جای‌گذاری روابط ۷ و ۸ در رابطه ۶، تابع هدف به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned}E_{system}&=\sum_{i=1}^{N}\begin{bmatrix}\frac{1}{2}\frac{P_{i\,\min}^{2}}{R_{i1}}\\+\frac{P_{i\,\min}+P_{i\,\max}}{2R_{i2}}(P_{i\,\max}-P_{i\,\min})\\+P_{i\,\max}(T+t_{ictp}+\frac{P_{i\,\min}}{R_{i1}}\\+\frac{P_{i\,\max}-P_{i\,\min}}{R_{i2}})\end{bmatrix}\\&-\sum_{i=1}^{N}P_{i\,\max}t_{iStart}+\sum_{j=1}^{M}P_{jStart}\,t_{jctp}\end{aligned} \qquad (۹)$$

در رابطه ۹ جمله اول که درون براکت قرار دارد و جمله سوم ثابت اما جمله دوم متغیر است، بنابراین می‌توان بخش ثابت تابع هدف را حذف و تابع هدف را برای واحدهای غیرخودراه‌انداز به صورت زیر ساده کرد:

$$Min\ \sum_{i=1}^{M}P_{j\,\max}\,t_{jStart} \qquad (۱۰)$$

مهم‌ترین قیدهای این مسئله بهینه‌سازی که موردتوجه قرار می گیرد عبارت است از:

حداقل و حداکثر زمان بحرانی: حداکثر زمان بحرانی حداکثر زمانی است که یک واحد حرارتی از نوع بویلر درام‌دار[۱۳] بایستی پس از خاموش‌شدن راه‌اندازی گردد درغیراین‌صورت باید یک زمان معین بگذرد تا بتواند مجدداً راه‌اندازی گردد. حداقل زمان بحرانی حداقل زمانی است که بعد از خاموش‌شدن یک واحد حرارتی از نوع بویلر یک‌بار گذر[۱۴] باید بگذرد تا امکان راه‌اندازی مجدد آن واحد وجود داشته‌باشد[۱۱].

$$t_{jStatr}\geq t_{jc\,\min} \qquad (۱۱)$$

$$t_{jStart}\leq t_{jc\,\max} \qquad (۱۲)$$

که $t_{jc\,\min}$ و $t_{jc\,\max}$ به‌ترتیب حداقل زمان بحرانی و حداکثر زمان بحرانی است.

قید قابلیت توان: در تمامی طول فرایند بازگردانی سیستم قدرت بایستی قابلیت توان سیستم مثبت باشد بدین معنی که توان قابل‌تولید سیستم از توانی که توسط واحدهای غیرخودراه‌انداز مصرف می شود بیش‌تر باشد.

$$P_{system}\geq 0 \qquad (۱۳)$$

که برابر است با:

$$\sum_{i=1}^{N}P_{iGen}\geq\sum_{j=1}^{M}P_{jStatrt} \qquad (۱۴)$$

قیود ولتاژ مجاز شین‌ها و جریان مجاز خطوط: در حین فرایند بازگردانی بایستی حداکثر جریان عبوری از خطوط، همچنین حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز شین‌های شبکه رعایت گردد.

$$L_{mn}\leq L_{mn}^{\max} \qquad (۱۵)$$

$$V_{n\,\min}\leq V_n\leq V_{n\,\max} \qquad (۱۶)$$

قید محدودیت تولید واحدها: توان تولیدی واحدها بایستی همواره در محدوده مجاز تولید آن‌ها باشد.

$$P_{i\,\min}\leq P_i\leq P_{i\,\max} \qquad (۱۷)$$

قید مدت‌زمان برق‌دار شدن خطوط و ترانسفورمرها: حداقل زمانی که برای برق‌دارشدن پایدار یک خط انتقال یا یک ترانسفورمر لازم است.

$$T_{\min}\leq t_{mnStart} \qquad (۱۸)$$

علاوه‌بر قیدهای بیان‌شده، در سیستم‌های قدرت مختلف براساس شرایط و ساختار آن‌ها قیدهای خاص آن سیستم‌ها به قیدهای کلی مسئله بازگردانی اضافه می‌گردد.

۳- الگوریتم پیشنهادی

روش‌های مختلفی جهت حل مسائل بهینه سازی مورداستفاده قرار می گیرد. این روش‌ها به دودسته روش‌های مبتنی‌بر گرادیان (مشتق) و

روش‌های تکاملی دسته‌بندی می‌شوند. در مواردی که مسئله فقط دارای یک نقطه کمینه (بیشینه) بوده و تابع هزینه نسبت به متغیرها مشتق‌پذیر باشد، روش‌های مبتنی‌بر گرادیان بهترین انتخاب هستند و به‌سادگی و با سرعت‌بالا، بهترین جواب مسئله را به‌دست می‌دهند؛ اما در مسائل بهینه‌سازی بزرگ‌تر و پیچیده‌تر، در بیش‌تر مواقع تابع هزینه مشتق‌پذیر نیست و همچنین مسئله دارای تعداد زیادی نقاط بهینه محلی است. برای حل چنین مسائل بهینه سازی، بیش‌تر از روش‌های دیگر بهینه‌سازی همچون روش‌های بهینه‌سازی تکاملی استفاده می شود.

مسئله بازگردانی سیستم‌های قدرت یک مسئله بهینه سازی پویا (وابسته به زمان) با توابع غیرخطی و مختلط با اعداد صحیح با تعداد قیدهای زیاد است. این مسئله مشابه با مسئله در مدار قرارگرفتن واحدها مقید به قیود امنیت[۱۵] (SCUC) جزء پیچیده‌ترین مسائل بهینه سازی کاربردی در سیستم‌های قدرت محسوب می شود. عمده روش‌هایی که برای این حل این مسائل استفاده می‌شود روش‌های تکاملی است. در این مقاله از یک الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی متشکل از یک الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی مبتنی‌بر آموزش و یادگیری[۱۶] و یک الگوریتم جستجوی مبتنی‌بر نظریه گراف‌ها جهت حل مسئله بازگردانی سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی‌بر آموزش و یادگیری، یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند یا تکاملی و یا هوش ازدحامی[۱۷] است که در سال ۲۰۱۱ با الهام از فرایند آموزش و یادگیری برای اولین بار معرفی شده‌است[۲۲]. در این الگوریتم بهینه‌سازی یک مدل ریاضی به‌منظور آموزش و یادگیری مدنظر بوده که در دو مرحله اجرا می‌شود و می‌تواند مسائل بهینه‌سازی را حل کند[۲۳]. این دو مرحله عبارت است از:

الف) مرحله آموزش: در این مرحله بهترین عضو جامعه به‌عنوان معلم انتخاب می‌گردد و میانگین جمعیت را به‌سوی خود هدایت می کند. در عمل سطح علمی جمعیت به معلم نمی‌رسد ولی معلم می‌تواند تا حدودی بسته به توانایی جمعیت، میانگین سطح علمی جمعیت را به خود نزدیک کند. این امر مثل کاری است که به‌طور واقعی یک معلم در کلاس درس انجام می‌دهد.

ب) مرحله یادگیری: در این مرحله افراد جمعیت که باهم هم‌کلاسی محسوب می‌شوند، با هم‌کاری هم اطلاعات و دانش خودشان را گسترش می‌دهند. درواقع جمعیت علاوه‌بر استفاده از دانش معلم، با تبادل اطلاعات با یکدیگر دانش خود را می‌افزایند. این موضوع هم مثل اتفاقی هست که به‌طور واقعی در جمع دوستان و همکلاسی‌ها صورت می‌گیرد[۲۴]. باتوجه به این که در مسئله بازگردانی، متغیرهای بهینه سازی زمان راه‌اندازی واحدها است، جهت به‌دست‌آوردن مقادیر بهینه این متغیرها ضمن برآورده شدن قیود و شرایط سیستم قدرت، بایستی فرایند بازگردانی سیستم قدرت در الگوریتم بهینه‌سازی شبیه سازی گردد. این فرایند در الگوریتم پیشنهادی شبیه سازی می گردد. در شکل ۲ فلوچارت الگوریتم بهینه سازی دوسطحی پیشنهادی نشان داده شده‌است. همان‌طورکه در فلوچارت پیشنهادی دیده می‌شود الگوریتم به‌صورتی عمل می‌کند که در سطح بالایی، توالی راه‌اندازی واحدها با استفاده از الگوریتم مبتنی‌بر آموزش و یادگیری تعیین می شود و در سطح پایینی، فرایند بازگردانی با جزیره‌سازی و برق‌دارکردن شین‌ها و خطوط انتقال مسیرهای بهینه با استفاده از الگوریتم جستجوی مسیر مبتنی‌بر گراف Dijkstra's شبیه‌سازی می‌شود.

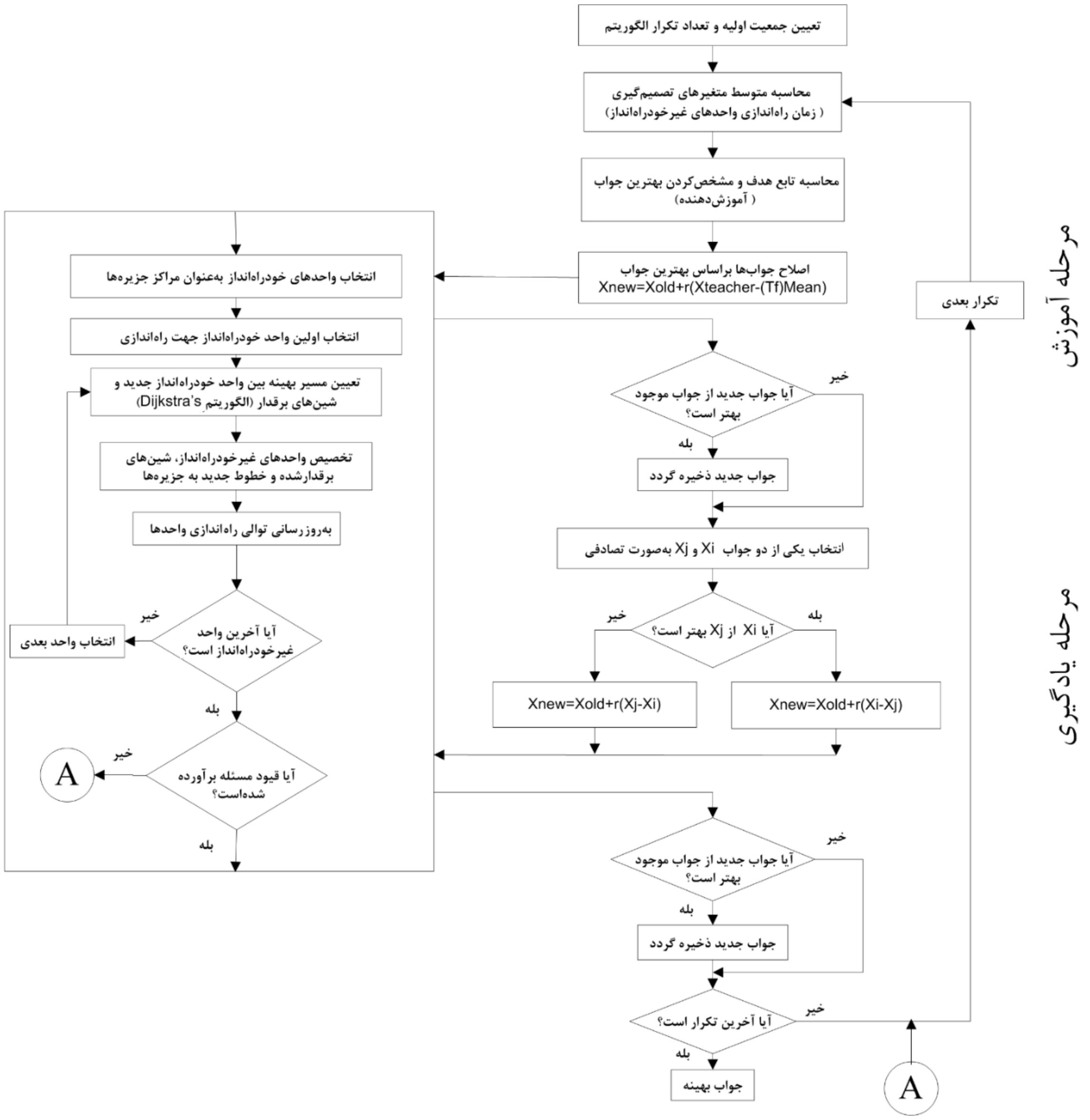
۴- مطالعات عددی

جهت نشان‌دادن کاربرد و مزایای الگوریتم پیشنهادی در بازگردانی سیستم‌های قدرت، مطالعات عددی برروی شبکه ۳۹ شینه IEEE انجام می‌شود. این سیستم دارای ۱۰ واحد نیروگاهی است که واحدهای شماره ۴ واقع در شین شماره ۳۳ و واحد شماره ۸ واقع‌در شین شماره ۳۷ دارای قابلیت خودراه‌اندازی است. این شبکه دارای ۴۶ خط انتقال و ترانسفورمر است که جهت سادگی ترانسفورمرها با معادل امپدانسی آن‌ها به‌صورت خط انتقال مدل‌سازی شده‌است. اطلاعات مربوط به واحدهای این سیستم قدرت در جدول ۱ نشان داده شده‌است[۲۵].

جدول ۱: مشخصات واحدهای سیستم ۳۹ شینه IEEE

واحد	نوع واحد	P_{Start}	t_{ctp}	$P_{\max}$	R_1	R_2
۱	غیرخودراه‌انداز	۱۰۴	۱۰	۱۰۴۰	۱۲	۱۵
۲	غیرخودراه‌انداز	۶۴	۱۰	۶۴۶	۸	۱۰
۳	غیرخودراه‌انداز	۷۲	۱۰	۷۲۵	۱۲	۱۵
۴	خودراه‌انداز	۶۵	۱۰	۶۵۲	۸	۱۰
۵	غیرخودراه‌انداز	۵۰	۱۰	۵۰۸	۸	۱۰
۶	غیرخودراه‌انداز	۶۸	۱۰	۶۸۷	۱۲	۱۵
۷	غیرخودراه‌انداز	۵۸	۱۰	۵۸۰	۸	۱۰
۸	خودراه‌انداز	۵۶	۱۰	۵۶۴	۸	۱۰
۹	غیرخودراه‌انداز	۸۶	۱۰	۸۶۵	۱۲	۱۵
۱۰	غیرخودراه‌انداز	۱۱۰	۱۰	۱۱۰۰	۱۲	۱۵

باتوجه به وجود دو واحد خودراه‌انداز در شبکه، راهبرد بازگردانی موازی ازنظر سرعت بازگردانی نسبت به راهبرد بازگردانی سری برتری دارد، بنابراین برای بازگردانی این سیستم قدرت راهبرد موازی پیشنهاد می‌شود. جهت بررسی و مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با تحقیقات پیشین، شبیه سازی در دو حالت بهینه سازی به صورت مجزا (روش مرسوم) و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به‌صورت هم‌زمان و یک‌پارچه انجام شده‌است. در این مقاله مدت‌زمان لازم جهت برق‌دارشدن هر خط انتقال یا ترانسفورمر به‌صورت پایدار، ۵ دقیقه درنظر گرفته شده‌است.


تعیین جمعیت اولیه و تعداد تکرار الگوریتم
محاسبه متوسط متغیرهای تصمیم‌گیری (زمان راه‌اندازی واحدهای غیرخودراه‌انداز)
محاسبه تابع هدف و مشخص‌کردن بهترین جواب (آموزش‌دهنده)
اصلاح جواب‌ها براساس بهترین جواب Xnew=Xold+r(Xteacher-(Tf)Mean)
تکرار بعدی
مرحله آموزش
انتخاب واحدهای خودراه‌انداز به‌عنوان مراکز جزیره‌ها
انتخاب اولین واحد خودراه‌انداز جهت راه‌اندازی
تعیین مسیر بهینه بین واحد خودراه‌انداز جدید و شین‌های برقدار (الگوریتم Dijkstra's)
تخصیص واحدهای غیرخودراه‌انداز، شین‌های برقدارشده و خطوط جدید به جزیره‌ها
به‌روز رسانی توالی راه‌اندازی واحدها
آیا آخرین واحد غیرخودراه‌انداز است؟
خیر
انتخاب واحد بعدی
بله
آیا قیود مسئله برآورده شده‌است؟
خیر
A
بله
آیا جواب جدید از جواب موجود بهتر است؟
خیر
بله
جواب جدید ذخیره گردد
انتخاب یکی از دو جواب Xi و Xj به‌صورت تصادفی
آیا Xi از Xj بهتر است؟
خیر
بله
Xnew=Xold+r(Xj-Xi)
Xnew=Xold+r(Xi-Xj)
مرحله یادگیری
آیا جواب جدید از جواب موجود بهتر است؟
خیر
بله
جواب جدید ذخیره گردد
آیا آخرین تکرار است؟
خیر
بله
جواب بهینه
A

شکل ۲: الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی

۴-۱- مورد مطالعاتی اول: بازگردانی با روش مرسوم به‌صورت بهینه‌سازی مجزا

بیش‌تر تحقیقاتی که درزمینه‌ی بازگردانی جزیره‌ای سیستم‌های قدرت انجام شده‌است به نحوی است که در صورت وجود بیش از یک واحد خودراه‌انداز در سیستم قدرت، ابتدا سیستم قدرت به چند جزیره تقسیم‌شده، سپس هرکدام از جزیره‌ها به‌صورت مستقل و موازی باهم برق‌دار می‌گردند[۱۲، ۳۰-۲۶]. تقسیم‌بندی سیستم به جزیره‌ها با توجه به معیارهایی است پیش‌تر بیان شد. در [۱۳] و [۳۱] که از مهم‌ترین مقالاتی هستند که بحث جزیره‌سازی به‌منظور بازگردانی سیستم‌های قدرت در آن‌ها پرداخته شده‌است، مطالعات برروی سیستم ۳۹ شینه IEEE انجام شده‌است.

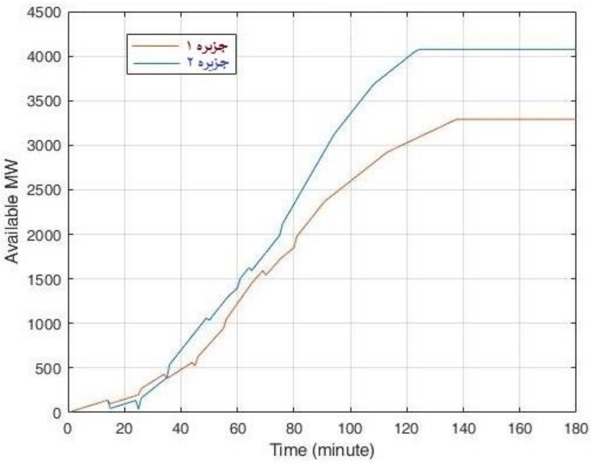
نتایج حاصل از جزیره‌سازی در این مقالات به‌گونه‌ای است که واحدهای سیستم قدرت مطابق با جدول ۲ در جزیره‌ها قرار می‌گیرند. با درنظرگرفتن همین جزیره‌ها به‌عنوان جزیره‌های پیش‌فرض سیستم قدرت موردمطالعه، با اجرای برنامه بهینه‌سازی تعیین توالی راه‌اندازی واحدها برای هرکدام از جزیره‌ها، زمان راه‌اندازی واحدهای هر یک از جزیره‌ها مطابق با جدول ۲ به‌دست می‌آید. همان‌طورکه در جدول ۲ مشاهده می‌شود در هر یک از جزیره‌ها، بازگردانی از واحدهای باقابلیت خودراه‌انداز شروع‌شده و پس از گذشت زمان ۷۰ دقیقه تمامی واحدهای سیستم قدرت در مدار قرار می‌گیرد.

جدول ۲: توالی راه‌اندازی واحدها (مورد مطالعاتی اول)

جزیره۱					جزیره ۲					
G9	G7	G6	G5	G4	G10	G8	G3	G2	G1	
۷۰	۴۵	۳۵	۱۵	۰	۲۵	۰	۶۵	۵۰	۱۵	t_{Start}

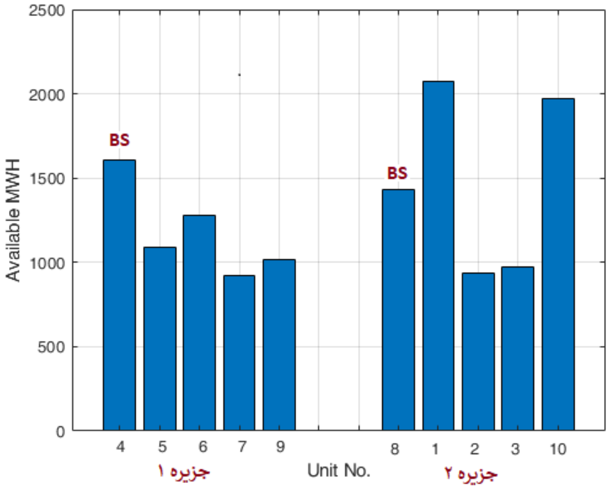
در شکل ۳ قابلیت تولید توان در هر یک از جزیره‌ها در ۱۸۰ دقیقه اول فرایند بازگردانی برای سیستم ۳۹ شینه IEEE نشان داده شده‌است. همان‌طورکه در شکل مشاهده می‌شود بعد از گذشت حدود

۱۴۰ دقیقه از زمان شروع فرایند بازگردانی، تمامی ظرفیت تولید توان کل سیستم قدرت دردسترس قرار دارد.



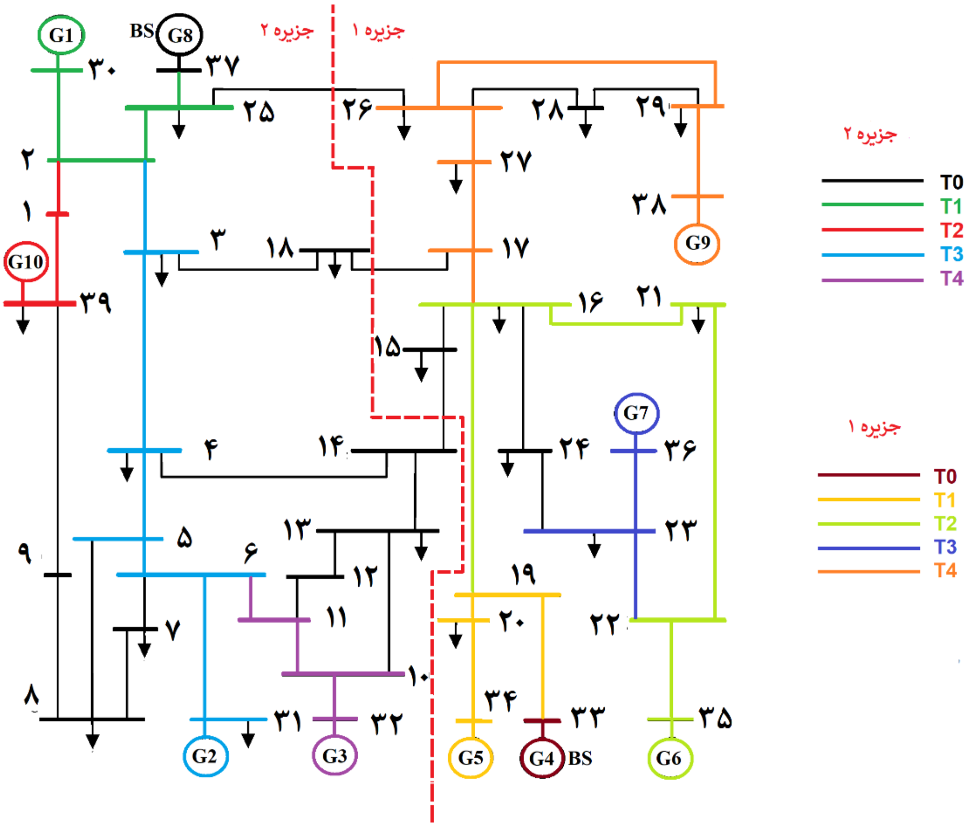
شکل ۳: قابلیت تولید توان در هر یک از جزیره‌ها حین فرایند بازگردانی سیستم ۳۹ شینه IEEE (مورد مطالعاتی اول)

در شکل ۴ قابلیت تولید انرژی هر یک از واحدهای سیستم ۳۹ شینه IEEE در بازه زمانی ۱۸۰ دقیقه اول فرایند بازگردانی برای هر یک از جزیره‌ها به صورت تفکیک شده نشان داده شده است. با بررسی نتایج در این شکل مشاهده می‌شود که در فرایند بازگردانی، واحدهایی قابلیت تولید انرژی بیش‌تری دارند که حداکثر ظرفیت تولید و نرخ افزایشی توان آن‌ها بیش‌تر باشد و به واحد خودراه‌انداز جزیره نزدیک‌تر باشند. در جزیره ۱ واحد ۹ بیش‌ترین ظرفیت توان را دارد اما به‌علت دوربودن از واحد خودراه‌انداز جزیره ۱ ازنظر قابلیت تولید انرژی بعد از واحد ۶ قرار دارد.



شکل ۴: قابلیت تولید انرژی واحدهای سیستم ۳۹ شینه IEEE در ۱۸۰ دقیقه اول فرایند بازگردانی (مورد مطالعاتی اول)

در جزیره ۲ نیز واحدهای ۱ و ۱۰ با دارابودن بیش‌ترین ظرفیت توان و نرخ افزایشی توان، از جهت قابلیت تولید انرژی حین فرایند بازگردانی، بیش‌ترین قابلیت تولید انرژی را دارا هستند.


G1
BS
G8
جزیره ۲
جزیره ۱
۳۰
۳۷
۲۵
۲۶
۲۸
۲۹
۲
۲۷
۳۸
G9
۱
۳
۱۸
۱۷
G10
۳۹
۱۶
۲۱
۱۵
G7
۴
۱۴
۲۴
۳۶
۹
۵
۱۳
۲۳
۶
۱۲
۱۹
۷
۱۱
۲۰
۲۲
۱۰
۸
۳۴
۳۱
۳۲
۳۳
۳۵
G2
G3
G5
G4
BS
G6
جزیره ۲
T0
T1
T2
T3
T4
جزیره ۱
T0
T1
T2
T3
T4

شکل ۵: جزیره‌سازی و فرایند بازگردانی سیستم ۳۹ شینه IEEE (مورد مطالعاتی اول)

شکل ۵ جزیره‌سازی و اقدامات حین بازگردانی سیستم ۳۹ شینه IEEE را نمایش می‌دهد. همان‌طورکه در شکل دیده می‌شود در جزیره ۱ ابتدا واحد خودراه‌انداز ۴ در مدار قرار می‌گیرد و شین متصل به آن برق‌دار می‌شود. باتوجه به این‌که واحد بعدی که باید راه‌اندازی شود واحد غیرخودراه‌انداز ۵ است، باید توان لازم جهت راه‌اندازی این واحد ازطریق واحد ۴ تأمین گردد، بدین‌منظور باید ابتدا ازطریق خطوط انتقال مابین این دو شین، شین متصل به آن برق‌دار گردد. مسیر بهینه منتهی‌به شین ۳۴ از طریق شین‌های ۱۹، ۲۰ و ۳۴ است که ازطریق الگوریتم جستجوگر مسیر مبتنی‌بر گراف تعیین می‌شود. باتوجه به این‌که بین دو شین ۳۳ و ۳۴ سه خط انتقال وجود دارد و زمان لازم برای برق‌دار شدن هرکدام از خطوط ۵ دقیقه است، بنابراین حداقل ۱۵ دقیقه زمان لازم است تا امکان انتقال توان به واحد ۵ و راه‌اندازی آن وجود داشته‌باشد. ازاین‌رو زمان راه‌اندازی واحد ۵ باید حداقل ۱۵ دقیقه بعد باشد. ازطرفی در زمان برق‌دارشدن شین متصل به واحد ۵ باید حداقل به‌اندازه توان راه‌اندازی این واحد، توان دردسترس باشد. با توجه به امکان تأمین توان راه‌اندازی واحد ۵ توسط واحد ۴ در این زمان، زمان راه‌اندازی واحد ۵ در دقیقه ۱۵ تعیین می‌شود. پس از راه‌اندازی واحد ۵ سایر واحدهای جزیره ۱ پس از برق‌دارشدن شین‌های متصل به آن‌ها به‌ترتیب تعیین‌شده در جدول ۲ راه‌اندازی می‌شوند. چنین فرایند مشابهی برای جزیره ۲ نیز طی خواهد شد و هم‌زمان و موازی با جزیره ۱ به‌صورت مستقل بازگردانده می‌شود.

پس از راه‌اندازی تمامی واحدها در هر یک از جزیره‌ها، فرایند بازگردانی با برق‌دارکردن سایر شین‌های بی‌برق جزیره‌ها ادامه می‌یابد تا درنهایت تمامی شین‌های هر یک از جزیره‌ها برق‌دار گردد. اتصال بارها در هر یک از جزیره‌ها از همان ابتدای فرایند بازگردانی جهت حفظ پایداری فرکانس و ولتاژ جزیره‌ها و باتوجه به قابلیت توان دردسترس هر یک از جزیره‌ها انجام می‌شود که موضوع بحث این مقاله نیست و در تحقیقات بعدی نویسنده موردبررسی قرار خواهدگرفت. مرحله نهایی بازگردانی، اتصال جزیره‌ها و تشکیل شبکه یک‌پارچه است که پس از بازگردانی کامل هرکدام از جزیره‌ها، دو جزیره بااتصال ازطریق خطوط انتقال بین‌جزیره‌ای صورت می‌گیرد. باتوجه به این‌که قبل از اتصال جزیره‌ها، هرکدام از جزیره‌ها مانندِ یک شبکه قدرت مستقل عمل می‌کند، اتصال جزیره‌ها به‌هم مانندِ اتصال و سنکرون‌سازی شبکه‌های قدرت به‌هم دارای ملاحظاتی از جهت فرکانس، ولتاژ و زاویه فاز است[۳۲].

۴-۲- مورد مطالعاتی دوم: بازگردانی با الگوریتم پیشنهادی به‌صورت هم‌زمان و یک‌پارچه

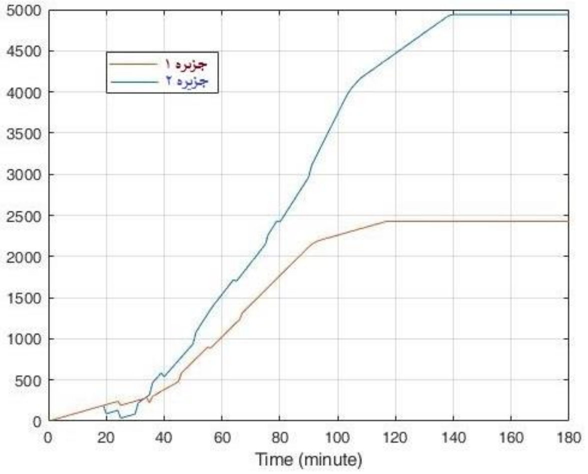
در این بخش از مطالعات عددی، بازگردانی سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به‌نحوی انجام می‌شود که کلیه اقدامات شامل جزیره‌سازی سیستم قدرت، تعیین توالی بهینه راه‌اندازی واحدهای هر جزیره، توالی برق‌دارشدن شین‌های هر جزیره و تعیین مسیرهای بهینه بین شین‌های هر جزیره، در قالب یک برنامه بهینه‌سازی دوسطحی به صورت یک‌بار محاسبه انجام می شود. با اجرای الگوریتم پیشنهادی برروی سیستم ۳۹ شینه IEEE مطابق فلوچارت نشان‌داده‌شده در شکل ۲ توالی راه‌اندازی واحدها به‌صورت جدول ۳ به‌دست می‌آید.

جدول ۳: توالی راه‌اندازی واحدها (مورد مطالعاتی دوم)

جزیره ۱				جزیره ۲						
G4 G5 G6 G7				G1 G2 G3 G8 G9 G10						
۴۵	۳۵	۱۵	۰	۲۵	۴۰	۰	۸۰	۶۵	۱۵	t_{Start}

در این مورد مطالعاتی نیز مشابه با مورد مطالعاتی اول باتوجه به وجود دو واحد خودراه‌انداز در سیستم قدرت، واحدهای خودراه‌انداز به‌عنوان مرکز جزیره‌ها تعیین‌شده و فرایند بازگردانی به‌صورت جزیره‌ای انجام می شود. همان‌طورکه در جدول ۳ دیده می شود واحدها با اندکی تغییر نسبت به مورد مطالعاتی اول به جزیره‌ها اختصاص یافته‌است. علت این تغییر، نزدیک‌تربودن واحد ۹ به واحد ۸ که مرکز جزیره دوم است می‌باشد که باعث می‌گردد مدت‌زمان انتظار این واحد نسبتاً بزرگ، تا برق‌دارشدن شین متصل‌به‌آن در مقایسه با مورد مطالعاتی اول کم‌تر گردد که این باعث می‌شود این واحد سریع‌تر در مدار قرار گیرد و درنهایت قابلیت تولید انرژی سیستم افزایش یابد.

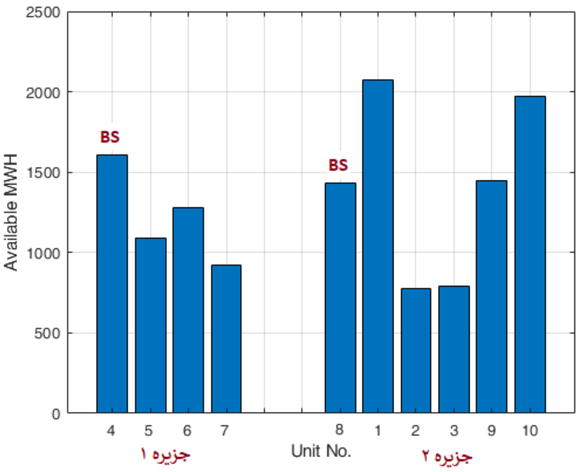
در شکل ۶ قابلیت تولید توان در هر یک از جزیره‌ها در ۱۸۰ دقیقه اول فرایند بازگردانی نشان داده شده‌است. همان‌طورکه در شکل ۶ نشان داده شده‌است پس از گذشت زمان حدود ۱۴۰ دقیقه از شروع فرایند بازگردانی تمامی ظرفیت تولید سیستم دردسترس قرار دارد. باتوجه به این‌که تعداد واحدهای جزیره ۲ کم‌تر از جزیره ۱ است، بنابراین قابلیت تولید توان این جزیره در دوره زمانی مشابه کم‌تر است.



شکل ۶: قابلیت تولید توان در هر یک از جزیره‌ها حین فرایند بازگردانی سیستم ۳۹ شینه IEEE (مورد مطالعاتی دوم)

در شکل ۷ قابلیت تولید انرژی هر یک از واحدهای سیستم ۳۹ شینه در بازه زمانی ۱۸۰ دقیقه اول فرایند بازگردانی برای هر یک از جزیره‌ها برای مورد مطالعاتی دوم به‌صورت تفکیک‌شده نشان داده شده‌است. مشابه با استدلال بیان‌شده در مورد مطالعاتی اول، واحدهای

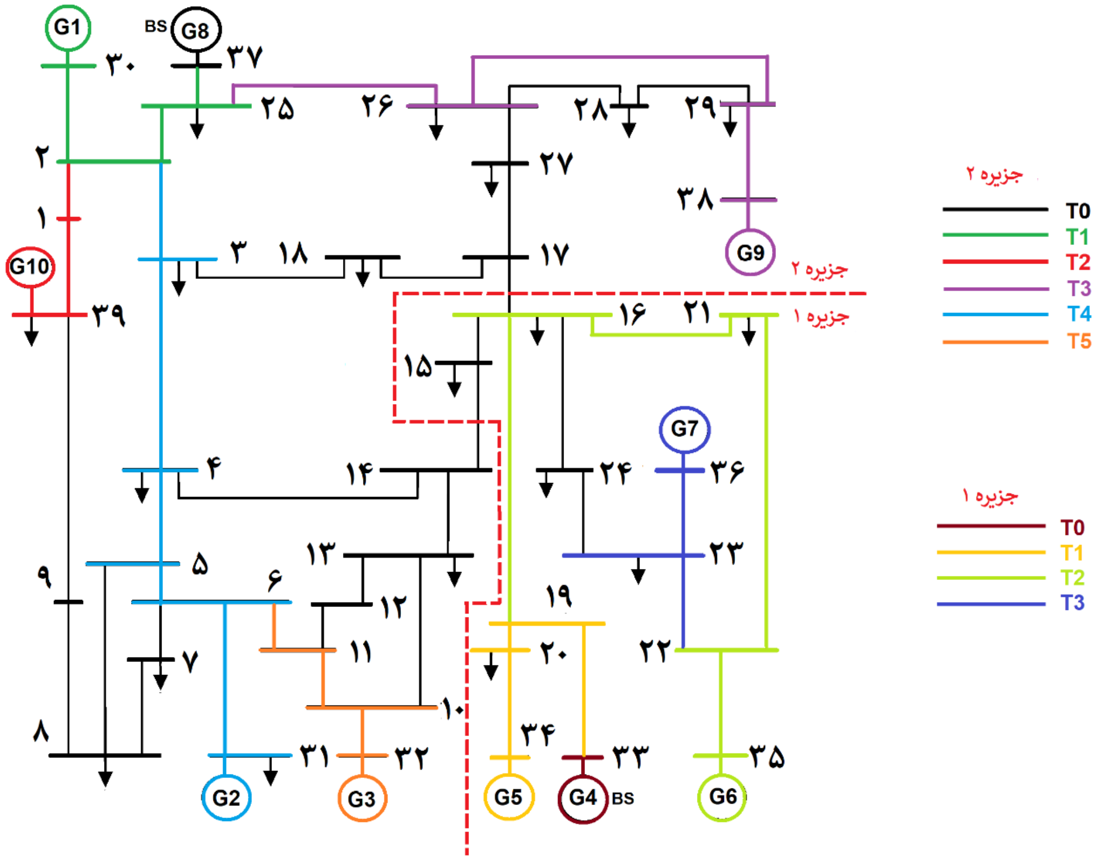
۶، ۵ و ۷ بعد از واحد خودراه‌انداز به‌ترتیب بیش‌ترین قابلیت تولید انرژی را حین فرایند بازگردانی دارند. در جزیره ۲ واحدهای ۱ و ۱۰ به‌علت داشتن ظرفیت و نرخ افزایشی توان بیش‌تر و همچنین نزدیک‌بودن به واحد خودراه‌انداز جزیره ۲ بیش‌ترین قابلیت تولید انرژی دارند. واحدهای ۲ و ۳ به‌علت دوربودن از واحد خودراه‌انداز جزیره ۲ در زمان دیرتری در مدار قرار می‌گیرند، بنابراین کم‌ترین قابلیت تولید انرژی حین فرایند بازگردانی سیستم دارند.



شکل ۷: قابلیت تولید انرژی واحدهای سیستم ۳۹ شینه IEEE در ۱۸۰ دقیقه اول فرایند بازگردانی (مورد مطالعاتی دوم)

در شکل ۸ جزیره‌سازی و کلیه اقداماتی که حین بازگردانی واحدهای شبکه انجام می‌گیرد نشان داده شده است. همان‌طورکه در شکل ۸ دیده می شود جزیره ۱ شامل یک واحد خودراه‌انداز و ۳ واحد غیرخودراه‌انداز و جزیره ۲ شامل یک واحد خودراه‌انداز و ۵ واحد غیرخودراه‌انداز است. برنامه زمان‌بندی راه‌اندازی واحدها، ترتیب برق‌دار شدن شین‌های شبکه و همچنین مسیرهای بهینه بین شین‌ها در شکل ۸ نشان داده شده‌است.

مدت زمان اجرای برنامه با تعداد جمعیت اولیه برابر ۲۰۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر ۱۰۰ با استفاده از کامپیوتر CPU Core i7 ۲/۵ گیگاهرتز، ۵۵ دقیقه است. باتوجه به تعدد مسیرهای بین شین‌های سیستم قدرت، بیش‌ترین زمان اجرای برنامه صرف یافتن مسیر بهینه بین شین‌ها می‌گردد. برای ارزیابی دقت و سرعت الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم دو سطحی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی[۱۸] جهت اجرای برنامه بازگردانی جزیره‌ای سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده از این الگوریتم با جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم دو سطحی با استفاده از الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) کاملاً یکسان است، اما مدت زمان اجرای آن حدود ۷۰ دقیقه است که در مقایسه با الگوریتم دو سطحی با استفاده از TLBO زمان بیش‌تری است.



شکل ۸: جزیره‌سازی و فرایند بازگردانی سیستم ۳۹ شینه IEEE (مورد مطالعاتی دوم)

جدول ۴: مقایسه نتایج دو روش بهینه‌سازی

مورد مطالعاتی اول- روش مرسوم بهینه‌سازی به‌صورت مجزا	مورد مطالعاتی دوم- روش پیشنهادی بهینه‌سازی به‌صورت یک‌پارچه و هم‌زمان	
۷۰	۸۰	زمان راه‌اندازی آخرین واحد (دقیقه)
۱۴۰	۱۴۰	زمان دردسترس قرارگرفتن کل ظرفیت تولید سیستم (دقیقه)
۲۴۰۸۴۰	۲۳۵۴۵۵	مقدار تابع هدف
۱۳۳۰۵	۱۳۳۹۴/۵	انرژی دردسترس (Mwh) در فرایند بازگردانی

۵- بحث و بررسی نتایج

با بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند بازگردانی به روش مرسوم و روش پیشنهادی موارد زیر قابل ملاحظه است:

در مورد مطالعاتی اول که بهینه‌سازی به‌صورت مجزا انجام شده‌است باتوجه به این‌که اندازه جزیره‌های ازپیش‌تعیین‌شده به‌هم نزدیک است، مدت زمان بازگردانی جزیره‌ها به هم نزدیک و زمان راه‌اندازی آخرین واحد ۷۰ دقیقه بعد از شروع فرایند بازگردانی است. در مورد مطالعاتی دوم که بهینه‌سازی به‌صورت یک‌پارچه انجام شده‌است مشاهده می‌شود که آخرین واحد بعد از گذشت ۸۰ دقیقه از شروع فرایند بازگردانی در مدار قرار می‌گیرد، دلیل آن این است که جزیره‌سازی به‌گونه‌ای انجام شده‌است که یکی از جزیره‌ها از دیگری بزرگ‌تر بوده و مدت‌زمان بازگردانی آن طولانی‌تر است درحالی‌که جزیره کوچک‌تر در مدت‌زمان کوتاه‌تری بازگردانده می‌شود؛ با بررسی شکل‌های ۳ و ۶ مشاهده می‌شود که پس از گذشت نزدیک به ۱۴۰ دقیقه از شروع فرایند بازگردانی، در هر دو مورد مطالعاتی، تمامی ظرفیت تولید سیستم دردسترس قرار می‌گیرد. ضمن‌این‌که میزان انرژی قابل‌تولید سیستم که مجموع مساحت‌های زیر منحنی‌های توان جزیره‌ها است، در مورد مطالعاتی دوم بیش‌تر از مورد مطالعاتی اول است. همچنین تابع هدف که از رابطه انرژی سیستم به‌دست‌آمده‌است و یک تابع کمینه‌سازی[۱۹] است، در مورد دوم مقدار کم‌تری نسبت به مورد اول دارد که نشان از بهبود عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی در مقایسه با روش بهینه‌سازی مرسوم دارد. در جدول ۴ نتایج حاصل از روش بهینه‌سازی پیشنهادی با روش بهینه‌سازی مرسوم جهت مقایسه آورده شده‌است.

۶- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین اقدامات در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت بازگردانی سیستم پس از وقوع خاموشی است. در سیستم‌های قدرت دارای بیش از یک واحد خودراه‌انداز، جهت بازگرداندن سریع‌تر سیستم قدرت، بازگردانی به‌صورت جزیره‌ای و موازی انجام می‌شود. در بازگردانی موازی، ابتدا سیستم قدرت به چند جزیره تقسیم می‌شود، سپس هر جزیره به‌صورت مستقل و موازی با دیگر جزیره‌ها بازگردانده شده و درنهایت جزیره‌ها از طریق خطوط ارتباطی بین‌جزیره‌ای به‌هم متصل می‌شوند و سیستم قدرت یک‌پارچه را تشکیل می‌دهند.

در این مقاله یک روی‌کرد جدید جهت بازگردانی سیستم‌های قدرت به‌صورت جزیره‌ای با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی دوسطحی پیشنهاد شده‌است. در این روی‌کرد تمامی اقدامات، از ابتدای فرایند بازگردانی تا راه‌اندازی تمام واحدهای سیستم قدرت به‌صورت هم‌زمان و یک‌پارچه و با یک‌بار محاسبه انجام می‌شود. الگوریتم دوسطحی پیشنهادی به‌نحوی عمل می‌کند که در سطح بالایی با استفاده از یک الگوریتم مبتنی‌بر آموزش و یادگیری توالی بهینه راه‌اندازی واحدها را تعیین می‌کند و در سطح پایینی جزیره‌سازی سیستم قدرت، تعیین توالی برق‌دار شدن شین‌ها و تعیین مسیر بهینه انتقال توان بین شین‌ها را با استفاده از الگوریتم جستجوی مسیر مبتنی‌بر گراف Dijkstra's انجام می‌دهد. محدودیت‌های واحدها و شبکه انتقال به صورت قیود در مسئله بهینه سازی منظور شده است. بررسی مطالعات عددی برروی سیستم آزمون ۳۹ شینه IEEE نشان می‌دهد که روی‌کرد پیشنهادی برای حل مسئله بازگردانی جزیره‌ای سیستم‌های قدرت در مقایسه با روش معمول منجربه یافتن جواب بهتر می‌گردد. اتصال بارهای سیستم قدرت هم‌زمان با درمدار قرارگرفتن واحدها جهت حفظ پایداری سیستم و همچنین فراهم‌نمودن شرایط اتصال و سنکرون‌سازی جزیره‌ها، می‌تواند عنوان موضوع تحقیقاتی باشد که بعد از این تحقیق انجام پذیرد.

مراجع

[1] E. H. Allen, R. B. Stuart, and T. E. Wiedman, "No light in August: power system restoration following the 2003 North American blackout," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 12, pp. 24-33, 2014.

[2] L. Yutian, F. Rui, and V. Terzija, "Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, pp. 332-341, 2016.

[3] H. Afrakhte and M. Haghifam, "Optimal islands determination in power system restoration," Iranian Journal of Science and Technology, vol. 33, p. 463, 2009.

[4] Y.-T. Hsiao and C.-Y. Chien, "Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 1394-1400, 2000.

[5] W. Sun, C.-C. Liu, and R. F. Chu, "Optimal generator start-up strategy for power system restoration," in Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on, pp. 1-7, 2009.

[6] W. Sun, C.-C. Liu, and S. Liu, "Black start capability assessment in power system restoration," in Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, pp. 1-7, 2011.

[7] M. Adibi and L. Fink, "Power system restoration planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, pp. 22-28, 1994.

[8] S. A. N. Sarmadi, A. S. Dobakhshari, S. Azizi, and A. M. Ranjbar, "A sectionalizing method in power system restoration based on WAMS," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, pp. 190-197, 2011.

[9] C. Li, J. He, P. Zhang, and Y. Xu, "A novel sectionalizing method for power system parallel restoration based on minimum spanning tree," Energies, vol. 10, p. 948, 2017.

[10] M. Adibi, J. Borkoski, and R. Kafka, "Power system restoration-the second task force report," IEEE Transactions on Power systems, vol. 2, pp. 927-932 ،1987.

[11] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Happ, R. Kafka, J. Raine, et al., "Power system restoration-a task force report," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2, pp. 271-277, 1987.

[12] W. Liu, Z. Lin, F. Wen, C. Chung, Y. Xue, and G. Ledwich ، "Sectionalizing strategies for minimizing outage durations of critical loads in parallel power system restoration with bi-level programming," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 71, pp. 327-334, 2015.

[13] N. Ganganath, J. V .Wang, X. Xu, C.-T. Cheng, and K. T. Chi, "Agglomerative Clustering Based Network Partitioning for Parallel Power System Restoration," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017.

[14] I. Kamwa, A. K. Pradhan, G. Joos, and S. Samantaray, "Fuzzy partitioning of a real power system for dynamic vulnerability assessment," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 1356-1365, 2009.

[15] Y. Jiang, S. Chen, C.-C. Liu, W. Sun, X. Luo, S. Liu, et al., "Blackstart capability planning for power system restoration," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 86, pp. 127-137, 2017.

[16] W. Sun, C.-C. Liu, and L. Zhang, "Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26 ،pp. 1357-1366, 2011.

[17] A. M. El-Zonkoly, "Renewable energy sources for complete optimal power system black-start restoration," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 531-539, 2014.

[18] S. Nourizadeh, M. Karimi, A. Ranjbar, and A. Shirani, "Power system stability assessment during restoration based on a wide area measurement system," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, pp. 1171-1179, 2012.

[19] E. Agneholm, "The restoration process following a major breakdown in a power system," Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, Tech. Rep. L, vol. 230, 1996.

[۲۰] میثم غلامی، جمال مشتاق، الگوریتم ابتکاری کارآمد برای حل مسئله بازیابی در توزیع الکتریکی با در نظر گرفتن حذف بار، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۳، صفحات ۱۳-۲۱، ۱۳۹۳.

[21] A. Ketabi, H. Asmar, A. Ranjbar, and R. Feuillet, "An approach for optimal units start-up during bulk power system restoration," in Power Engineering, 2001. LESCOPE'01. 2001 Large Engineering Systems Conference On, pp. 190-194, 2001.

[22] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. Vakharia, "Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," Computer-Aided Design, vol. 43, pp. 303-315, 2011.

[23] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. Vakharia, "Teaching–learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems," Information Sciences, vol. 183, pp. 1-15, 2012.

[۲۴] محمودرضا شاکرمی، مسعود طرهانی، اسماعیل رک رک، مکان یابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازن‌ها به طور همزمان در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل بار چندسطحی و وابسته به ولتاژ، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۱۲۳-۱۳۹، ۱۳۹۶.

[25] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and D. Gan, "Matpower," PSERC.[Online]. Software Available at: http://www. pserc. cornell. edu/matpower, 1997.

[26] S. Abbasi, M. Barati, and G. J. Lim, "A parallel sectionalized restoration scheme for resilient smart grid systems," IEEE Transactions on Smart Grid, 2017.

[27] F. Qiu and P. Li, "An Integrated Approach for Power System Restoration Planning," Proceedings of the IEEE, 2017.

[28] L. Sun, C. Zhang, Z. Lin, F. Wen, Y. Xue, M. A. Salam, et al., "Network partitioning strategy for parallel power system restoration," IET Generation, Transmission & Distribution ،vol. 10, pp. 1883-1892, 2016.

[29] C. Wang, V. Vittal, and K. Sun, "OBDD-based sectionalizing strategies for parallel power system restoration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, pp. 1426-1433, 2011.

[30] J. Quirós-Tortós, M. Panteli, P. Wall ،and V. Terzija, "Sectionalising methodology for parallel system restoration based on graph theory," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 1216-1225, 2015.

[31] J. Quirós-Tortós, P. Wall, L. Ding, and V. Terzija, "Determination of sectionalising strategies for parallel power system restoration: A spectral clustering-based methodology," Electric Power Systems Research, vol. 116, pp. 381-390, 2014.

[32] H. Ye and Y. Liu, "A new method for standing phase angle reduction in system restoration by incorporating load pickup as a control means," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 53, pp. 664-674, 2013.

زیرنویس‌ها

---

[1] Black start unit
[2] Non-black start unit
[3] Cranking power
[4] The build down strategy
[5] The build up strategy
[6] Real time
[7] Phasor measurement unit
[8] Mixed integer linear programming
[9] Wide area measurement system
[10] Cold load pick-up
[11] interactive
[12] Single execution
[13] Dram type boiler
[14] Once through boiler
[15] Security-constrained unit commitment
[16] Teaching-learning based optimization
[17] Swarm intelligence
[18] Differential Evolution (DE)
[19] Minimization