

# تعیین ترتیب بهینه راه اندازی واحدها در پروسه بازیابی سیستم قدرت با در نظر گرفتن بارگذاری‌های اجباری و اختیاری

هانی رئوف شیبانی<sup>۱</sup>، محمد حسین جاویدی دشت بیاض<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده - پروسه بازیابی سیستم قدرت، از مراحل مختلفی شامل استارت واحدهای شبکه، بارگذاری بر روی سیستم و برق‌دار کردن خطوط انتقال سیستم قدرت تشکیل شده است. در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، پروسه استارت واحدهای شبکه به همراه بارگذاری اجباری و اختیاری بر روی سیستم قدرت با هدف ماکزیمم نمودن سطح انرژی قابل تولید شبکه و همچنین ماکزیمم نمودن ارزش بارهای تأمین شده در هر بازه زمانی از پروسه بازیابی تعیین می‌گردد. قیود در نظر گرفته شده در این پروسه، شامل قیود دینامیکی و استاتیکی سیستم انتقال و همچنین قیود فنی واحدها مانند منحنی توانایی تولید، توان راه‌اندازی و کمترین و بیشترین فاصله زمانی بحرانی واحدها، می‌باشد. در نهایت، کارایی الگوریتم پیشنهادی با شبیه‌سازی بر روی شبکه ۱۴ باسه IEEE، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. کلید واژه - بازیابی سیستم قدرت، ارزش بار از دست رفته، بهینه‌سازی زمان بازیابی

## ۱- تعاریف

### ۲- مقدمه

اخیراً، در پی بهبود امکانات تجهیزات سیستم انتقال و تولید، پیچیدگی تحلیل سیستم‌های قدرت نیز افزایش یافته است. همچنین، ورود مباحث تجدید ساختار در عرصه صنعت برق و بهره‌برداری شبکه در شرایط رقابتی، باعث نزدیک شدن قیود بهره‌برداری سیستم‌های قدرت به مرزهای خود گردیده است. از طرف دیگر، وابستگی شدید زندگی روزمره به انرژی الکتریکی باعث افزایش اهمیت چشمگیر این نوع از انرژی شده است. بنابراین، فقدان آن باعث بروز مشکلات عدیده‌ای در زمینه‌های مختلف اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و ... خواهد شد. بر این مبنا، یکی از بخش‌های با اهمیت بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، تعیین پروسه بازیابی شبکه‌ها در شرایط بروز خاموشی‌های سراسری و جزئی می‌باشد.

بازیابی سیستم‌های قدرت شامل پروسه‌های متعددی از جمله استارت واحدهای شبکه، بارگذاری و برق‌دار کردن سیستم‌های انتقال می‌باشد. مهمترین بخش بازیابی، استارت واحدهای شبکه و افزایش سطح توانایی تولید می‌باشد. این امر، بعنوان یکی از بخش‌های زمانبر بازیابی مطرح است. تعیین ترتیب بهینه استارت واحدها در این پروسه، باعث کاهش مدت

$T$  زمان کل بازیابی سیستم قدرت  
 $t$  لحظه شروع سناریو جاری  
 $N_{G\&P}$  شماره ژنراتورها و شماره مسیرهای فعال شده  
 $N_{FLB_i}$  شماره باس‌هایی که جهت برق‌دار کردن مسیر  $i$ ، نیاز به بارگذاری اجباری دارند  
 $N_{VLB_i}$  مجموعه باس‌هایی که در مسیر  $i$  قابلیت بارگذاری اختیاری دارند بعلاوه سایر باس‌های برق‌دار شبکه  
 $t_{switch_i}$  مدت زمان لازم سوئیچینگ مسیر  $i$ ام در سناریو  
 $P_{gen_i}$  میانگین توان قابل تولید ژنراتور  $i$ ام در هر سناریو  
 $\overline{VOLL}$  میانگین ارزش از دست رفته بارهای تأمین نشده  
 $L_{f_j}$  توان پله‌های بارگذاری اجباری در باس  $j$   
 $L_{v_j}$  توان پله‌های بارگذاری اختیاری در باس  $j$   
 $V_{Lf_j}$  ارزش پله‌های بارگذاری اجباری در باس  $j$   
 $V_{Lv_j}$  ارزش پله‌های بارگذاری اختیاری در باس  $j$   
 $P_{cr_i}$  توان راه‌اندازی واحد  $i$ ام  
 $P_t$  توان اولیه سیستم در لحظه  $t$ .

زمان بازیابی و همچنین افزایش توانایی بارگذاری بر روی سیستم قدرت می‌گردد.

برخی مطالعات که بر روی نحوه استارت شبکه‌های قدرت و همچنین بررسی ویژگی‌های فنی واحدهای تولید کننده انرژی بعنوان واحدهای خودراه‌انداز در سیستم انجام پذیرفت، منجر به شکل‌گیری ضمنی مسئله ترتیب استارت واحدهای غیر خودراه‌انداز در شبکه گردید [۱-۳]. در سال ۱۹۹۴، انتخاب واحدها بر اساس شاخص "ظرفیت قابل تولید واحدها در کمترین زمان سنکرون سازی" در مرجع [۴] ارائه شد. بر اساس این شاخص، واحدهایی جهت انرژی‌دار شدن انتخاب می‌شوند که در کمترین زمان ممکن، بیشترین سطح انرژی را برای شبکه فراهم نمایند. پس از آن، در سال ۲۰۰۱، در مرجع [۵]، با استفاده از روش جستجوی پیشروی قابل برگشت<sup>۱</sup>، روشی جهت تعیین زمان‌های استارت ژنراتورها با هدف ماکزیمم نمودن انرژی تأمین شده بار در طول کل بازه زمانی بازیابی سیستم قدرت، ارائه گردید. اما، قیود بهینه‌سازی این مقاله، محدود به مشخصه‌های دینامیکی انواع واحدها و قید کمترین مسیر ممکن بین ژنراتور و باس مبدا شده است.

در مرجع [۶]، با استفاده از روش GSM<sup>۲</sup> و با تعریف مشخصه‌های واحدها و مسیره‌های ممکن بین واحد خودراه‌انداز و واحدهای غیر خودراه‌انداز سیستم بعنوان ورودی‌ها و همچنین تعریف میزان انرژی تأمین شده سیستم بعنوان خروجی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs)، برنامه‌های ممکن جهت استارت واحدها رتبه‌بندی گردیده ولی قیود دینامیکی سیستم انتقال و تغییر وضعیت واحدها از حالت گرم به سرد لحاظ نشده است. در مرجع [۷]، ابتدا مسئله بازیابی سیستم قدرت، با توجه به بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده، به مجموعه‌ای از مسائل کوله‌پشتی<sup>۳</sup> تجزیه شده سپس، با کمک روش کلاسیک جستجوی پیشروی قابل برگشت، مسائل کوله‌پشتی تجزیه شده حل می‌شوند. این درحالیست که قیود شبکه، در ساده‌ترین حالت نیز، در مسئله بهینه‌سازی مطرح نشده است. مدلی تصادفی<sup>۴</sup> برای برنامه‌ریزی بهینه بازیابی واحدهای تولیدکننده انرژی بر اساس توابع هدف مختلفی مانند ریسک کلی سیستم، کل انرژی تأمین شده در بازه‌های زمانی بازیابی و همچنین زمان کلی بازیابی، در مرجع [۸] ارائه شده ولی قیود شبکه، بصورت جدولی ساده در نظر گرفته شده

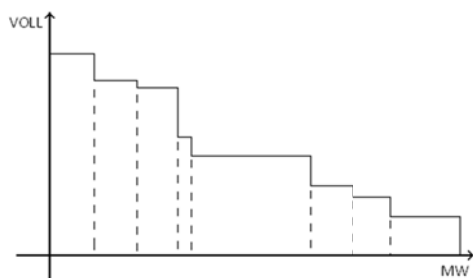
است. تعیین ترتیب استارت واحدها، با استفاده از سیستم پایگاه معلومات<sup>۵</sup> (KBS)، و با تبدیل فرمول‌بندی مسئله پایگاه دانش (KBS) به یک مسئله برنامه‌ریزی مقید عدد صحیح-مختلط درجه دوم (MIQCP)<sup>۶</sup>، با کمک الگوریتم ژنتیک، در مرجع [۹] انجام شده است. در این مرجع، تقریباً تمام قیود فنی واحدها، بطور کامل در نظر گرفته شده ولی، قیود فنی شبکه شامل مسیر مناسب برقرار کردن و امکان‌پذیری آن، مورد بررسی واقع نگردیده است.

در این مقاله، مرحله استارت واحدهای شبکه همزمان با مرحله بارگذاری در نظر گرفته شده و علاوه بر افزایش سطح توانایی تولید شبکه، تأمین انرژی بارهای با اهمیت آن در کمترین زمان ممکن نیز جزء اهداف بازیابی لحاظ شده است. لذا، با استفاده از پله‌های ارزش بار از دست رفته در هر باس شبکه و همچنین قیود فنی واحدها و قیود دینامیکی و استاتیکی سیستم انتقال، پروسه بارگذاری هدفمند بر روی سیستم، همزمان با پروسه استارت واحدها بدست می‌آید. در این میان، قیود دینامیکی و استاتیکی سیستم‌های قدرت، علاوه بر قیود فنی واحدها و شرایط تغییر حالت بویلر و توربین آنها در حل مسئله بهینه‌سازی لحاظ گردیده است.

### ۳- فرمول‌بندی مسئله

#### ۳-۱- فرضیات

اهمیت بارهای مختلف سیستم را می‌توان با بیان ارزش بار از دست رفته آنها سنجید. بنابراین، در هر باس شبکه، پله‌های مختلفی از ارزش بارهای از دست رفته مشابه شکل (۱) وجود خواهد داشت.



شکل(۱): نمونه‌ای از پله‌های ارزش بار از دست رفته در باس

علاوه بر این، با فرض انجام پروسه بازیابی به روش Bottom-up، الگوریتم پیشنهادی در هریک از جزایر شبکه

<sup>1</sup> Backtracking Search

<sup>2</sup> Group Standard Method

<sup>3</sup> Knapsack Problems

<sup>4</sup> Stochastic Model

<sup>5</sup> Knowledge-based System

<sup>6</sup> Mixed Integer Quadratically Constrained Program

انجام خواهد شد و پس از اتمام بازیابی در هر جزیره، سنکرون سازی جزایر انجام می‌گردد.

### ۲-۳- بیان مسئله

الگوریتم پیشنهادی این مقاله به دنبال تعیین زمانبندی استارت واحدهای سیستم با هدف ماکزیم نمودن انرژی قابل تولید شبکه و بازیابی بارهای با اهمیت شبکه در کمترین زمان ممکن می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، مسئله بهینه‌سازی کلی به دو مسئله بهینه‌سازی مقدماتی و اصلی که به یکدیگر وابسته هستند، تقسیم می‌گردد. در مسئله بهینه‌سازی مقدماتی، شناسایی تمام مسیرهای ممکن از باس‌های برق‌دار شبکه تا باس ورودی ژنراتورهای خاموش شبکه صورت می‌گیرد. سپس، امکان‌پذیری برق‌دار شدن این مسیرها با در نظر گرفتن قیود دینامیکی سیستم انتقال، بررسی می‌گردد.

در مسئله بهینه‌سازی اصلی، با در نظر گرفتن قیود فنی واحدها شامل منحنی توانایی تولید، میزان توان راه‌اندازی و وضعیت بویلر و توربین ژنراتورها و همچنین با لحاظ نمودن ارزش بارهای از دست رفته، ترتیب استارت واحدها به نحوی تعیین می‌گردد که انرژی قابل تولید شبکه ماکزیم شده و شرایط برای انرژی‌دار شدن بارهای با اهمیت شبکه با برقرار کردن مسیرهای عبوری از آنها نیز، در کمترین زمان ممکن، فراهم گردد. همچنین، استارت تمام ژنراتورهای شبکه، بر اساس میزان انرژی اولیه سیستم، بارگذاری اجباری خطوط و همچنین توان راه‌اندازی واحدها، در یک یا چندین مرحله انجام می‌شود. در هر مرحله، یک سناریو برای استارت واحدها به بهره‌بردار سیستم پیشنهاد می‌گردد که در آن، ژنراتورهای غیرخودراه‌انداز دارای اولویت استارت و همچنین مسیرهای لازم جهت تأمین انرژی خودراه‌اندازی آنها مشخص شده است. استارت این ژنراتورها می‌تواند بصورت همزمان توسط بهره‌بردار سیستم انجام گردد. البته، جهت همپوشانی برق‌دار نمودن مسیرهای اعلام شده، می‌بایست اقدامات بهره‌برداری لازم انجام شود. در طول اجرای هر سناریو، به بهره‌بردار سیستم اعلام می‌گردد که قابلیت انرژی‌دار نمودن بارهای با اهمیت، در کدام باس و به چه میزان وجود دارد. بنابراین، بهره‌بردار به راحتی می‌تواند علاوه بر استارت همزمان چندین واحد، انرژی مورد نیاز بارهای با اهمیتی که در مسیرهای برق-

دار شده وجود دارند (بارگذاری اجباری) را نیز، تأمین نماید. روندنمای کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): روندنمای کلی الگوریتم پیشنهادی دوم

### ۳-۳- تابع هدف

هدف زیر مسئله اصلی الگوریتم پیشنهادی، یافتن سناریوی استارت بهینه واحدها و همچنین تعیین بارگذاری-های اجباری و اختیاری بهینه در طول پروسه استارت واحدها می‌باشد. بنابراین، تابع هدف زیر مسئله اصلی را می‌توان بصورت رابطه (۱) بیان نمود.

$$\max \sum_{i \in N_{G\&P}} \left[ (P_{gen_i} \cdot VOLL(T - t - t_{switch_i})) + \left( \sum_{j \in N_{FLb_i}} (L_{f_j} \cdot V_{L_{f_j}}) + \sum_{j \in N_{VLb_i}} (L_{V_j} \cdot V_{L_{V_j}}) (T - t) \right) \right] \quad (1)$$

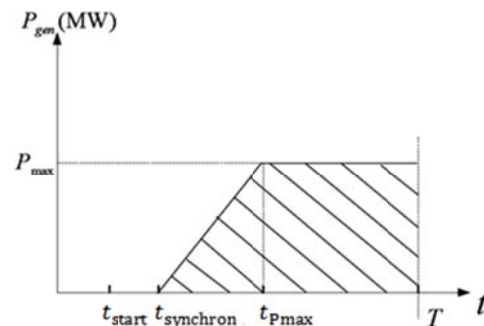
این تابع هدف، از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول آن، سطح انرژی قابل تولید شبکه با در نظر گرفتن قیود زمانی واحدها ماکزیمم می‌شود. بخش دوم آن نیز مربوط به ماکزیمم نمودن ارزش بار از دست رفته برای بارهای تأمین شده سیستم و یا بارهای قابل تأمین سیستم با توجه به خطوط انتقال برق دار شده شبکه می‌باشد.

### ۳-۴- قیود مسئله بهینه‌سازی

در زیر مسئله مقدماتی، قیود دینامیکی و استاتیکی سیستم انتقال جهت رتبه‌بندی مسیرهای ممکن برای انتقال انرژی راه‌اندازی واحدها به باس‌های ورودی آنها، در نظر گرفته می‌شود. در این میان، قیودی مانند برابری میزان انرژی اولیه شبکه با مجموع توان‌های راه‌اندازی ژنراتورهای استارت شده و بارگذاری‌های اجباری در هر سناریو از مسئله بهینه‌سازی اصلی به صورت معادله (۲) مد نظر قرار می‌گیرند.

$$\sum_{i \in N_{G\&P}} \left( P_{cr_i} + \sum_{j \in N_{FLb_i}} L_{f_j} + \sum_{j \in N_{VLb_i}} L_{v_j} \right) = P_t \quad (2)$$

علاوه بر این، منحنی توانایی تولید واحدها که در شکل (۳) نشان داده شده است، به همراه کمترین و بیشترین فاصله زمانی بحرانی واحدها نیز، از قیود این مسئله بهینه‌سازی می‌باشند.



شکل (۳): منحنی توانایی تولید واحد

### ۳-۵- روش حل

زیر مسئله اصلی، تلفیقی از متغیرهای عدد صحیح و متغیرهای پیوسته می‌باشد. تصمیم‌گیری استارت واحد و همچنین تعیین شماره مسیر انتخاب شده جهت استارت آن واحد، بعنوان متغیرهای عدد صحیح و میزان بارگذاری‌های اختیاری در هر سناریو نیز، بعنوان متغیر پیوسته مسئله بهینه‌سازی جاری، محسوب می‌شوند. الگوریتم ژنتیک، بعنوان

یکی از تواناترین ابزار در حل مسائل بهینه‌سازی عدد صحیح-مختلط، برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. پس از مشخص شدن چند مسیر بهینه ممکن برای هر ژنراتور، برای حل زیر مسئله اصلی بهینه‌سازی، نیاز به تولید سناریوها می‌باشد. در هر سناریو مشخص می‌شود که کدامیک از ژنراتورهای شبکه و از طریق کدامیک از چند مسیر برگزیده، استارت می‌شوند. برای برق‌دار شدن مسیره‌ها، ممکن است نیاز به بارگذاری اجباری باشد. در هر سناریو، جهت تأمین راه‌اندازی واحدهای انتخاب شده جهت استارت و همچنین بارگذاری اجباری، مقداری انرژی لازم است که از انرژی اولیه سیستم قدرت در لحظه شروع انجام عملیات سناریو تأمین می‌گردد. بنابراین، در صورتیکه انرژی لازم برای اجرای هر سناریو بیشتر از انرژی اولیه سیستم باشد، آن سناریو مردود خواهد بود.

در زیر مسئله اصلی این الگوریتم، هر سناریو از دو بخش اساسی تشکیل شده است. بخش اول هر سناریو، مربوط به شماره واحدهای انتخابی جهت استارت و بخش دوم آن نیز مربوط به شماره مسیر انتخابی جهت انتقال انرژی به باس ورودی آن ژنراتورها است. ساختار یک سناریو در الگوریتم ژنتیک بصورت شکل (۴) است. در بخش اول سناریو، وضعیت واحدها جهت استارت، با کدهای 0 و 1 نشان داده شده است. در صورتیکه وضعیت واحدی 1 باشد، آن واحد جهت استارت در سناریو انتخاب شده است. بعلاوه، به خروجی‌های زیر مسئله مقدماتی برای هر ژنراتور، یک شماره اختصاص داده می‌شود. در هر سناریو، شماره مسیر انتقال انرژی به باس ورودی هر ژنراتور بوسیله کد باینری عدد مربوط به هر مسیر، در بخش دوم آن مشخص می‌گردد.



شکل (۴): ساختار یک سناریو در الگوریتم پیشنهادی

در ابتدای حل زیر مسئله دوم، چندین سناریو به صورت اتفاقی تولید می‌شوند. در پروسه حل این زیر مسئله، ممکن است نیاز به استارت سریع برخی از ژنراتورها، بعلاوه کمترین و بیشترین فاصله زمانی بحرانی استارت آنها باشد. در نتیجه، در تمامی سناریوهای تولید شده، این واحدها استارت می‌گردند. سپس، با توجه به انرژی اولیه سیستم و انرژی مورد

#### ۴- شبیه‌سازی

##### ۴-۱- اطلاعات شبکه

شبکه تست ۱۴ باسه IEEE جهت بررسی نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی انتخاب شده است. اطلاعات واحدهای تولید کننده انرژی در این شبکه، در جدول (۱) بیان شده است. واحد ۳، واحد خودراه‌انداز در این شبکه می‌باشد. اگر وضعیت دمای بویلر و توربین واحد در حالت سرد قرار داشته باشد، استارت واحد پس از مدت زمان  $T_{cc}$  امکان‌پذیر خواهد بود. اگر وضعیت دمای بویلر و توربین واحد در لحظه شروع بازیابی، داغ باشد، واحد می‌بایست تا قبل از مدت زمان  $T_{ch}$  استارت شود، در غیر اینصورت استارت واحد برای مدت زمان طولانی به تعویق خواهد افتاد. در لحظه شروع، واحد ۱ در شرایط سرد و واحدهای ۲ و ۶ در شرایط داغ هستند. همچنین، بهره‌بردار سیستم قادر به استارت واحد ۸ در لحظه برق‌دار شدن باس ورودی واحد بدون در نظر گرفتن این قیود می‌باشد.

##### ۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

در زیر مسئله اصلی، با استفاده از خروجی‌های زیر مسئله مقدماتی و همچنین با کمک الگوریتم ژنتیک، بهترین سناریوی استارت واحدها در مرحله اول با بارگذاری‌های اجباری و اختیاری بهینه بدست می‌آید. این روند، برای مرحله دوم شبیه‌سازی نیز ادامه می‌یابد.

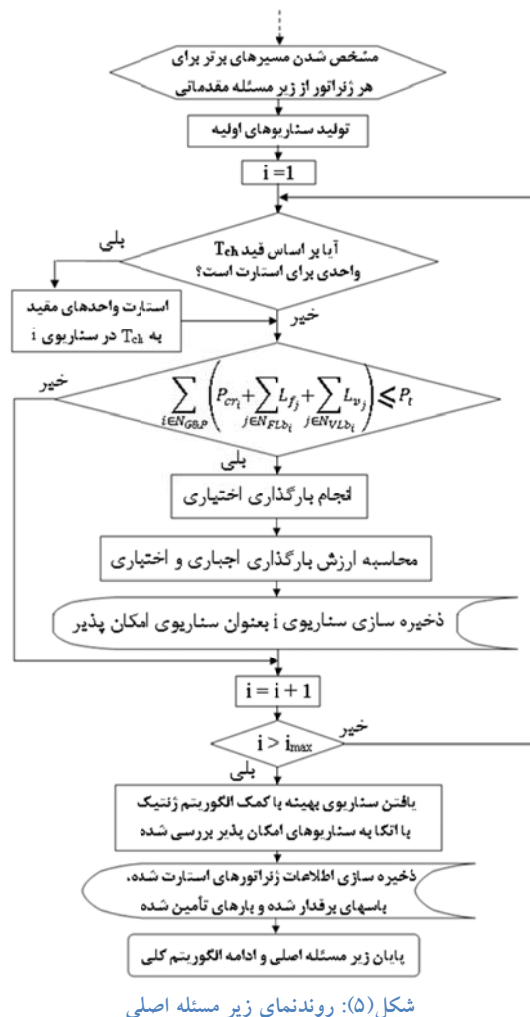
جدول (۱): اطلاعات ژنراتورهای شبکه

| شماره واحد | توان ماکزیمم (MW) | توان راه-اندازی (MW) | شیب بارگیری واحد (MW/h) | زمان سنکرون شدن با شبکه (h) | $T_{cc}$ (h) | $T_{ch}$ (h) |
|------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| ۱          | ۲۰۰               | ۸                    | ۱۴۸                     | ۱/۶۷                        | ۴            | -            |
| ۲          | ۱۲۰               | ۱۳                   | ۱۳۵                     | ۲                           | -            | ۲,۵          |
| ۳          | ۳۲                | ۰                    | ۱۱۲                     | ۰                           | -            | -            |
| ۶          | ۹۰                | ۵                    | ۱۰۸                     | ۲/۶۷                        | -            | ۳,۳          |
| ۸          | ۸۰                | ۱۳                   | ۱۵۶                     | ۰/۵                         | -            | -            |

در نهایت، سناریوهای بهینه جهت استارت واحدها در جدول (۲) نشان داده شده است. توان اولیه سیستم برابر با ماکزیمم توان تولیدی واحد ۳ (خودراه‌انداز) و برابر با ۳۲ مگاوات است.

نیاز برای اجرای هر سناریو، سناریوهای مردود از لیست سناریوهای ممکن، حذف می‌گردند. برای هر یک از سناریوهای ممکن، مقدار تابع برازندگی<sup>۱</sup> با کمک تابع هدف زیر مسئله اصلی محاسبه می‌شود.

پس از تعیین سناریوی برتر در مرحله اول، زمان بازیابی بر اساس سوئیچینگ این سناریو محاسبه می‌شود. در صورتیکه تمام ژنراتورهای موجود شبکه در مرحله اول استارت نشده باشند، الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن توپولوژی به روز شده شبکه و شرایط جدید اجزاء آن، سناریوی جدیدی را برای استارت سایر واحدها در مرحله بعدی، ارائه می‌نماید. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام ژنراتورهای موجود سیستم قدرت، استارت شوند. روند نمای زیر مسئله اصلی در شکل (۵) نشان داده شده است.



<sup>1</sup> Fitness Function

جدول (۲): سناریوهای بهینه استارت واحدهای شبکه

| زمان برق دار شدن<br>باس ورودی<br>واحدهای سناریو | بارگذاری اختیاری   |               | بارگذاری اجباری           |               | باس های<br>برق دار شده   | مسیرهای برق دار شده | استارت شده<br>واحدهای | شماره سناریو |
|---|--|---------------|---------------------------|---------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|
|   | پله بارگذاری<br>(bus, MW)  | میزان<br>(MW) | پله بارگذاری<br>(bus, MW) | میزان<br>(MW) |                          |                     |                       |              |
| دقیقه ۲۴  | .۶, ۵(MW)<br>(۳, ۱MW)  | ۶             | .                         | .             | ۱, ۲, ۳, ۴, ۵ و<br>۶     | ۱←۲←۳               | ۱                     | ۱            |
|   |  |               |                           |               |                          | ۲←۱←۵←۴←۳           | ۲                     |              |
|   |  |               |                           |               |                          | ۶←۵←۴←۳             | ۶                     |              |
| دقیقه ۱۵۶                                       | .۲, ۲۱/۷(MW)<br>.۳, ۹۳/۲(MW)<br>.۴, ۴۷/۸(MW)<br>.۵, ۷/۵(MW)<br>.۶, ۶/۲(MW)<br>.۹, ۲۹/۵(MW)<br>.۱۲, ۶/۱(MW)<br>.۱۳, ۱۳/۵(MW)<br>(۱۴, ۵/۳MW) | ۲۳۰/۸         | (۱۴, ۹/۶۸۵MW)             | ۹/۶۸۵         | .۱۲, ۹, ۸, ۷,<br>۱۴ و ۱۳ | ۹←۱۴←۱۳←۱۲←۶        | ۸                     | ۲            |
|   |  |               |                           |               |                          | ۸←۷←                |                       |              |

ورودی واحد ۸ که در سناریوی دوم استارت شده است، پس از ۲ ساعت و ۳۶ دقیقه از شروع بازیابی که برابر با مجموع زمان سنکرون شدن واحد ۲ (۲ ساعت)، سوئیچینگ مسیر انتخاب شده در سناریوی دوم (۱۲ دقیقه) و زمان سپری شده مرحله اول (۲۴ دقیقه) است، برق دار می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

تعیین ترتیب استارت واحدهای شبکه، یکی از زمانبرترین مراحل پروسه بازیابی سیستم قدرت می‌باشد. معمولاً این مرحله، با بارگذاری جهت پایدارسازی سیستم قدرت همراه می‌باشد. در مطالعات پیشین پژوهشگران، مرحله تعیین ترتیب استارت واحدها بطور مجزا از بارگذاری بهینه بر روی سیستم بررسی گردیده است.

در این مقاله، با در نظر گرفتن پله‌های ارزش بار از دست رفته در باس‌های بار سیستم، ترتیب استارت واحدها با هدف ماکزیم‌سازی سطح توانایی تولید شبکه به همراه ماکزیم نمودن ارزش بارهای تأمین شده سیستم، با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داده است که مسیرهای انتخاب شده در الگوریتم پیشنهادی، زیر ساخت لازم جهت انرژی‌دار کردن بارهای با ارزش سیستم را همزمان با تأمین ماکزیم سطح قابل تولید شبکه، فراهم می‌سازد. بعلاوه، در برخی از مسیرها نیز، در نظر گرفتن قیود دینامیکی، منجر به بارگذاری‌های اجباری در پله‌های با ارزش بارها در مسیر مربوطه، گردیده است.

در مرحله اول، باس ورودی واحدهای ۱، ۲ و ۶ از طریق مسیرهای مشخص شده در جدول (۲) بدون بارگذاری اجباری، در دقیقه ۲۴ از زمان بازیابی برق دار می‌شوند. در این مرحله، ۶ مگاوات از توان اولیه سیستم که مازاد بر توان راه-اندازی واحدهای بیان شده است، به تأمین بارهای با اهمیت سیستم اختصاص یافته است. واحدهای ۲ و ۶، بواسطه قید کمترین فاصله زمانی بحرانی استارت ( $Tch$ )، در مرحله اول بازیابی استارت می‌شوند. واحد ۱ نیز، بواسطه بیشترین فاصله زمانی بحرانی ( $Tcc$ ) می‌بایست در مراحل بعدی استارت گردد. با اینحال، در مقایسه توان ماکزیم تولیدی و توان راه‌اندازی مورد نیاز این واحد با واحد ۸، استارت این واحد در مرحله اول بازیابی انجام می‌پذیرد زیرا، در صورتیکه استارت این واحد با توان ماکزیم ۲۰۰ مگاواتی به تعویق بیافتد، تأمین انرژی بخش اعظمی از بارهای شبکه نیز به تأخیر خواهد افتاد. از طرف دیگر، انرژی راه‌اندازی ۱۳ مگاواتی واحد ۸ در برابر توان ماکزیم ۸۰ مگاواتی آن، منجر به عدم امکان استارت این واحد در مرحله اول بازیابی می‌شود.

توان اولیه سیستم در ابتدای مرحله دوم از شبیه‌سازی برابر با ۴۱۰ مگاوات است. این توان در آغاز مرحله دوم شبیه‌سازی در شبکه وجود ندارد ولی، توانایی تولید آن در شبکه با توجه به عملیات انجام شده در مرحله اول وجود خواهد داشت. بخش اندکی از این توان، صرف تأمین توان راه‌اندازی واحد ۸ می‌شود و باقیمانده آن نیز با توجه به باس‌های برق دار شبکه و پله‌های ارزش بار از دست رفته در باس‌های بار، جهت تأمین انرژی بارهای با اهمیت شبکه استفاده می‌گردد. در انتها، باس

- [1]. E. J. Simburger, and F. J. Hubert, "Low Voltage Bulk Power System Restoration Simulation", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, Issue. 11, pp. 4479-4484, 1981.
- [2]. M. M. Adibi, D. P. Milanicz, and T. L. Volkman, "Remote Cranking of Steam Electric Stations", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 11, No. 3, pp. 1613-1618, Aug. 1996.
- [3]. F. P. DeMello, and J. C. Westcott, "Steam Plant Startup and Control in System Restoration", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 9, No. 1, pp. 93-101, Feb. 1994.
- [4]. M. M. Adibi, and L. H. Fink, "Power System Restoration Planning", IEEE Trans. On power Systems, vol. 9, No. 1, pp. 22-28, 1994.
- [5]. A. Ketabi, H. Asmar, A. M. Ranjbar, and R. Feuillet, "An Approach for Optimal Units Start-Up during Bulk Power System Restoration", IEEE Power Engineering Conference on Large Power Systems, pp. 190-194, 2001.
- [6]. Y. Wu, and X. Fang, "GSM Based Algorithm for Decision-Support Expert System to Assess Black-Start Plans", IEEE Conference Nanjing China, pp. 2339-2342, 2008.
- [7]. Q. Liu, L. Shi, M. Zhou, G. Li, and Y. Ni, "A New Solution to Generation Start-Up Sequence during Power System Restoration", IEEE Conference Nanjing China, pp. 2845-2849, 2008.
- [8]. S. Nouri-Zadeh, and A. M. Ranjbar, "Multi Objective Power System Restoration", IEEE Electrical Power & Energy Conference, Canada, pp. 1-5, 2008.
- [9]. W. Sun, and C. C. Liu, "Optimal Generator Start-Up Strategy for Power System Restoration", Intelligent System Applications to Power Systems, pp. 1-7, 2009.