

بازیابی حداکثر بار در شبکه‌های مجهز به SVC و TCSC

حسین افراخته^۱، محمدرضا حق‌فام^{۲*}، علی یزدیان ورجانی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

haghifam@modares.ac.ir

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

چکیده- در این مقاله، بازیابی سیستم‌های قدرت مجهز به ادوات SVC و TCSC در صورت بروز قطعیهای جزئی مورد مطالعه قرار گرفته و روشی جدید برای تأمین حداکثر بار با استفاده از ترکیبهای مختلف متغیرهای کنترلی ارائه شده است. این متغیرها شامل تپ ترانسفورمرهای قدرت، برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی و تعیین نقاط کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه می‌شود. تابع هدف، حداکثر کردن مقدار بار بازیابی شده است و قیود مختلف بهره‌برداری، شامل دامنه ولتاژ شینه‌ها، مقدار توان عبوری از خطوط انتقال و محدوده تولید واحدها در فرایند بهینه‌سازی و تعیین پاسخ نهایی ملحوظ شده است. همچنین در حالت خروج یک خط انتقال، به‌منظور جلوگیری از ایجاد شرایط گذرای شدید و جابه‌جایی توانهای زیاد در شبکه، شرط قرار گرفتن تفاضل زاویه استاتیکی (SPA) ولتاژ دو طرف کلید در محدوده مجاز، در تعیین پاسخ نهایی مدنظر قرار گرفته است. با توجه به تعدد متغیرهای کنترلی، بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک انجام شده و سیستم IEEE-118bus به‌عنوان شبکه تست برای ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته که نتایج شبیه‌سازیها در بخش مطالعات عددی آورده شده است.

کلید واژگان: ادوات FACTS، الگوریتم ژنتیک، بازیابی بار، برنامه‌ریزی مجدد تولید، تپ ترانسفورماتور، قطع بار، متغیر کنترلی.

۱- مقدمه

امروز به دلیل رشد روزافزون تعداد مصرف‌کننده‌ها و افزایش تقاضای بار، سیستم‌های قدرت ناگزیر به کارکرد در نزدیکی ظرفیت اسمی هستند. همچنین وجود محدودیتهای شدید زیست‌محیطی و هزینه‌های سنگین احداث شبکه‌های جدید، به‌عنوان موانع توسعه سیستم‌های قدرت، این شرایط را تشدید می‌کند. از طرف دیگر، مسائلی مانند قوانین حاکم بر بازار

آزاد انرژی الکتریکی و توقع استفاده بهینه و اقتصادی از شبکه‌ها، بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت را در حدود ظرفیت طراحی آنها ناگزیر می‌سازد. در این شرایط و با توجه به اینکه سیستم‌های قدرت به‌طور دائمی در معرض خطا قرار دارند، وقوع قطعیهای جزئی^۱ یا سراسری^۲ در آنها اجتناب‌ناپذیر است [۱، ۲، ۳]. قطعیهای جزئی معمولاً پس از

1. Partial Outages
2. Blackout

بروز خطا، با نقض بعضی از قیود بهره‌برداری شروع شده و در نهایت ممکن است به خروجی‌های پی‌درپی^۱ منتهی شود. در این شرایط، با عمل کردن سیستم‌های حفاظتی و احیاناً قطع بعضی از خطوط و بارها، از گسترش ناحیه عیب جلوگیری شده که این سبب قطع برق بخشی از مصرف‌کنندگان خواهد شد. این وضعیت به عوامل متعددی از جمله شدت خطا، توپولوژی شبکه و نقطه کار بهره‌برداری در زمان وقوع عیب بستگی دارد. در بعضی از شرایط ممکن است قطع‌های پی‌درپی آنقدر گسترش یابند که امکان کنترل آنها وجود نداشته باشد و در نهایت شبکه دچار قطعی سراسری شود.

بازگرداندن شبکه قطع شده به وضعیت بهره‌برداری عادی، در هر دو حالت قطعی جزئی و سراسری، در قالب مباحث بازیابی سیستم‌های قدرت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که به دلیل تنوع مسائل و غیرخطی بودن ارتباط پارامترهای مختلف در آن، به پیچیده‌ترین مباحث سیستم‌های قدرت تبدیل شده است [۴]. هدف اساسی فرایند بازیابی، تأمین حداکثر مقدار بار قطع شده در کوتاهترین زمان ممکن است [۵]. برای نیل به این هدف، از طراحی و به‌کارگیری راهبردهای بازیابی استفاده می‌شود. این راهبرد علاوه بر هندسه شبکه، به نوع قطع‌ها شامل قطعی جزئی یا سراسری نیز وابسته است. به همین دلیل، معمولاً در هر شبکه از راهبردهای بازیابی خاص آن شبکه استفاده می‌شود [۵-۷]. برای مثال، راهبردهای بازیابی سری^۲ و موازی^۳ [۸، ۹] از روشهای بازیابی شبکه در شرایط قطعی سراسری بوده که دارای سه مرحله اساسی راه‌اندازی واحدها، بازیابی سیستم و بازیابی بار است [۸، ۱۰].

اگر چه بروز قطع‌های جزئی دارای گستره کمتری نسبت به قطعی سراسری بوده و صدمات کمتری به شبکه و مصرف‌کننده وارد می‌سازد، اما فراوانی وقوع آنها، به مراتب از

تعداد قطع‌های سراسری به وجود آمده بیشتر است. بنابر این ضروری است همواره راهبردهای مشخصی برای بازگرداندن شبکه قطع شده به حالت بهره‌برداری عادی در این شرایط نیز در دسترس باشد. در وضعیت بهره‌برداری عادی، بر اثر وقوع عیب در یکی از واحدهای تولیدکننده آن واحد به وسیله رله‌های حفاظتی یا به صورت دستی از مدار خارج می‌شود تا از گسترش بیشتر قطع‌ها جلوگیری شود. بدیهی است در چنین شرایطی ممکن است قیود بهره‌برداری نرمال شبکه نقض شده و در صورت تداوم آن، قطع‌های پی‌درپی ایجاد شود. این قیود شامل دامنه ولتاژ شینه‌ها، توان عبوری از خطوط انتقال و محدوده تولید ژنراتورها است که به منظور تداوم بهره‌برداری پایدار از شبکه، ضروری است این قیود مجدداً در محدوده مجاز قرار گیرند. به عنوان نمونه دیگر، خروج یک خط در اثر عیب به وجود آمده در آن، ممکن است موجب کاهش ولتاژ در بعضی از شینه‌ها یا بروز اضافه بار در سایر خطوط شود. در چنین شرایطی ممکن است با استفاده از روشهایی از جمله مانور تپ ترانسفورماتورهای قدرت یا جابه‌جایی تولید و بارها بتوان نقض قیود را تا حدی برطرف کرد. در نهایت، در صورت عدم موفقیت و به منظور جلوگیری از بدتر شدن وضعیت شبکه، لازم است بخشی از بارها قطع شود. در بسیاری از مواقع به دلیل شدت خطا و ناکافی بودن عملیات بازدارندگی، ممکن است چند خط و یا واحد تولیدی به صورت پی‌درپی از مدار خارج شده و حتی شبکه جزیره‌ای شود.

برای بازگرداندن شبکه به حالت نرمال پس از جداسازی نقطه عیب، خطوط قطع شده به مدار وارد شده و بارها بازیابی می‌شوند. لذا با توجه به خروج خطوط یا تجهیزات آسیب‌دیده‌ای که به رفع عیب و تعمیر نیاز دارند، معمولاً نمی‌توان کل بار قطع شده را بازیابی کرده، لذا بخشی از بارها تا رفع عیب نقاط معیوب و بازگرداندن

1. Cascading Outages
2. Build Down Strategy
3. Build Up Strategy

روبه‌رو شویم. در این حالت، رله‌های سینکروچک^۴ موجود به‌منظور اجتناب از ایجاد شرایط گذرای شدید و ضربات عمده ناشی از جابه‌جایی توانهای بالا در شبکه، از وصل خط مذکور جلوگیری می‌کند [۱۴]. معمولاً مقدار این تفاضل زاویه (SPA) باید در محدوده $\pm 30^\circ$ درجه قرار گیرد تا از شدت حالت‌های گذرای به‌وجود آمده در موقع وصل کلید کاسته شود [۱۵]. به‌همین دلیل، شرط قرار داشتن تفاضل زاویه فاز ولتاژ دو طرف کلید در حالت قطع خط انتقال نیز به مجموعه قیود اضافه شده است:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum L_i \cdot w_i \\ \text{st} : \quad & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ & S_{Line}^i \leq S_{Line}^{\max} \\ & P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ & Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\ & -30^\circ < SPA_{ij} < 30^\circ \quad \text{if a line } (l_{ij}) \text{ is out.} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن L_i بار مصرفی شینه i ام، w_i ضریب وزنی اهمیت بارها، V_i ولتاژ شینه‌ها، P_{Gi} و Q_{Gi} تولید ژنراتورها و S_{Line}^i توان ظاهری (ظرفیت MVA) خط انتقال i ام و SPA_{ij} تفاضل زاویه استاتیکی دو طرف کلید در خط انتقال معیوب بین شین‌های i و j ام (l_{ij}) است.

۳- روش پیشنهادی

به‌منظور تأمین شرایط تابع هدف - که بازیابی حداکثر مقدار بار در حالت وقوع قطعی‌های جزئی است - از ترکیب‌های مختلف متغیرهای کنترلی به‌کمک تجهیزات موجود در شبکه استفاده خواهد شد. با خروج خط انتقال یا واحد تولیدکننده بر اثر خرابی، ممکن است قیود مختلف بهره‌برداری شامل حدود ولتاژ شینه‌ها، دامنه توان عبوری از خطوط انتقال و محدوده تولید واحدها نقض شود. این مسأله پس از انجام مانورهای

مجدد آنها همچنان قطع باقی خواهند ماند. برای ارزیابی میزان و شرایط قطعی در شبکه معمولاً از دو شاخص مقدار بار قطع شده $P(MW)$ و انرژی تأمین نشده (ENS)^۱ استفاده می‌شود [۱۱، ۱۲].

در این مقاله روشی برای بازیابی حداکثر مقدار بار قطع شده در صورت بروز قطعی جزئی به‌کمک ترکیب‌های مختلف برخی از متغیرهای کنترلی شبکه ارائه می‌شود. این متغیرها شامل موقعیت تپ ترانسفورماتورهای قدرت (T)، نقاط کار ادوات کنترلی FACTS^۲ موجود در شبکه (F) و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید می‌شود. به‌دلیل تعدد متغیرهای کنترلی و ارتباط غیرخطی و پیچیده بین آنها، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. شبکه IEEE-118 bus [۱۳] به‌عنوان سیستم تست مورد استفاده قرار گرفته و نتایج به‌دست آمده در بخش مطالعات عددی آورده شده است.

۲- تابع هدف

در این مقاله تابع هدف، بازگرداندن بیشترین مقدار بار قطع شده در کمترین زمان ممکن با شرط رعایت قیود بهره‌برداری شامل حدود ولتاژ شینه‌ها، حد توان عبوری خطوط انتقال و محدوده تولید ژنراتورها است. در این راستا، تمامی تجهیزات یا خطوط انتقال قطع شده، به‌جز مؤلفه‌های معیوب که در شرایط تعمیر قرار دارند، مجدداً به شبکه وارد شده و به‌دنبال آن، تجهیزات معیوب پس از تعمیر و برطرف شدن عیب، در مدار قرار خواهند گرفت. از طرف دیگر، چنانچه خطا در یک خط انتقال ایجاد شود، پس از تعمیر و در موقع وصل مجدد آن به شبکه، ممکن است با مسأله زیاد بودن تفاضل زاویه استاتیکی (SPA)^۳ ولتاژ دو طرف کلید در خط مربوط

1. Energy Not Supplied
2. Flexible AC Transmission Systems
3. Standing Phase Angle

4. Synchrocheck Relay

اولیه و عدم بهبود وضعیت شبکه ممکن است با قطع پله‌ای بعضی از بارها یا خطوط دیگر همراه شود. در صورتی که رفع بلادرنگ عیب به وجود آمده در خط یا واحد تولیدی ممکن نبوده و به انجام تعمیرات نیاز داشته باشد، تأمین کل بار با وصل مجدد باقیمانده تجهیزات و خطوط عملی نبوده و ناگزیر به اعمال قطع محلی بار برای رفع نقض قیود خواهیم بود.

در این تحقیق، هدف حداکثر کردن مقدار بار بازیابی شده با تعیین بهینه متغیرهای کنترلی تجهیزات موجود در سیستمهای مجهز به برخی از ادوات FACTS است. این متغیرهای کنترلی شامل تپ ترانسفورماتورهای قدرت، تعیین نقطه کار تجهیزات کنترلی FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی می‌شود. به منظور سهولت، متغیر کنترلی تپ را با (T)، نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه را با (F) و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی را با (GR) نشان می‌دهیم. ترکیبهای مختلف به کار رفته برای بهینه‌سازی، شامل متغیر کنترلی ادوات FACTS موجود در شبکه (F)، برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی (GR)، استفاده همزمان از تپ ترانسفورماتورهای قدرت و متغیر نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه (T&F)، به کارگیری همزمان تپ ترانسفورماتورهای قدرت و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (T&GR)، استفاده همزمان متغیر نقاط کار ادوات FACTS و برنامه‌ریزی تولید (F&GR) و در نهایت استفاده از سه متغیر تپ ترانسفورماتور، نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی (T&F&GR) می‌شود. چنانچه با استفاده از ترکیبهای متغیرهای کنترلی فوق بتوانیم کل بار را بازیابی کنیم، در نهایت قطع بخشی از بارهای کم‌اهمیت به عنوان آخرین گزینه برای رفع نقض قیود بهره‌برداری، اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

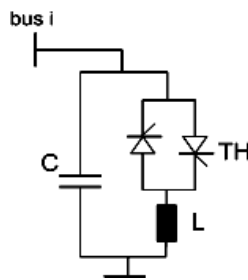
اولویت استفاده از این متغیرها در بازیابی حداکثر بار، به شرایط مختلفی از جمله هندسه شبکه و دسترسی یا عدم دسترسی به این ادوات کنترلی بستگی خواهد داشت. به عنوان مثال، استفاده از متغیر کنترلی F در صورتی میسر خواهد بود که شبکه مجهز به ادوات FACTS باشد یا اثرپذیری متغیر کنترلی تپ به تعداد ترانسفورماتورهای دارای تپ و موقعیت قرار گرفتن آنها در شبکه بستگی خواهد داشت. از طرف دیگر، بعضی از ترکیبهای کنترلی مانند (T&F) با توجه به کم هزینه بودن و سهولت کنترل‌پذیری آنها به آسانی قابل استفاده بوده و در اولویت اول بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. در بخش مطالعات عددی به بررسی این ترکیبها در بهینه‌سازی تابع هدف خواهیم پرداخت.

۴- مدل‌سازی ادوات FACTS

ادوات FACTS به منظور استفاده در شرایط نرمال بهره‌برداری شبکه طراحی و نصب می‌شوند. در این تحقیق از قابلیت‌های ادوات کنترلی جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو^۱ (SVC) و جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور^۲ (TCSC) موجود در شبکه برای بازیابی حداکثر بار استفاده می‌شود. شکل ۱ مدار الکتریکی سیستم جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور (TCSC) متصل به شینه‌های k و m را نشان می‌دهد که از بانک خازنی (C)، مجموعه راکتورهای شنت (L) و سویچ‌های تایریستوری با سرعت بالا (TH) تشکیل شده است [۱۶]. با کنترل زاویه آتش تایریستور (α)، مقدار راکتانس کلی TCSC به طور پیوسته از مقدار -XC تا XL تغییر خواهد کرد. V_k و V_m ولتاژ شینه‌های k و m و نیز I_k و I_m به ترتیب جریان تزریق شده به شینه‌های k و m را نشان می‌دهد.

1. Static Var Compensator

2. Thyristor Controlled Serise Compensator

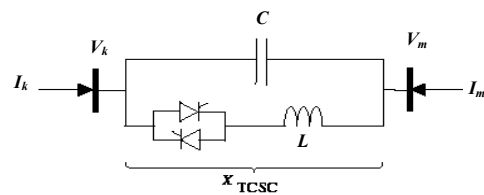


شکل ۲ جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC)

تاکنون مدل‌سازیهای مختلفی از SVC نیز ارائه شده که می‌توان آنها را به دو دسته کلی مدل‌های پسیو و اکتیو تقسیم‌بندی کرد [۲۰]. در مدل پسیو، SVC به‌عنوان نوعی امپدانس متغیر در نظر گرفته شده که سطح ولتاژ را به‌صورت مداوم کنترل کرده و در مدل اکتیو، SVC به‌گره مربوط توان راکتیو تزریق می‌کند.

دسته‌بندی دیگر مدل‌سازی SVC با توجه به اهداف به‌کارگیری آن در شبکه انجام می‌شود که می‌تواند به‌منظور تنظیم توان راکتیو^۳، تنظیم ولتاژ^۴ و تنظیم زاویه آتش^۵ استفاده شود [۱۹]. در حالت تنظیم توان راکتیو، SVC به‌صورت بار راکتیوی مدل‌سازی می‌شود که مقدار تعیین شده‌ای از توان راکتیو را مصرف می‌کند. این مدل‌سازی از نوع تزریق توان به‌حساب می‌آید. اگر SVC با هدف تنظیم ولتاژ شینه به‌کار رود، مانند ژنراتور PV با توان صفر مطابق با مدل تزریق به محاسبات وارد خواهد شد. در حالتی که بخواهیم تنظیم زاویه آتش را مدنظر قرار دهیم، SVC به‌صورت سوسپتانس شنت مدل‌سازی خواهد شد.

در این مقاله، از SVC به‌منظور بهبود و تنظیم پروفیل ولتاژ در مراحل بازیابی استفاده شده است. بنابراین این مدل تزریقی SVC با شرایط تنظیم ولتاژ به‌کار می‌رود که به شکل شینه PV با توان اکتیو تزریقی صفر ($P=0$) به مدل‌سازی وارد خواهد شد.



شکل ۱ ساختار مداری جبران‌ساز سری کنترل شده با تایریستور (TCSC)

TCSC به‌عنوان یکی از ادوات کنترلی سری FACTS می‌تواند با اتصال راکتانس متغیر سری با خط، راکتانس مؤثر خط را به‌طور پیوسته تغییر دهد. تاکنون در کاربردهای متفاوت و مطالعات پخش بار، مدل‌های مختلفی از TCSC ارائه شده است [۱۷، ۱۸]. مدل‌های کنترل زاویه آتش^۱ و کنترل مقدار توان عبوری^۲، دو مدل عمومی از TCSC در مطالعات شبکه‌های مجهز به ادوات TCSC است [۱۹]. در این مقاله به‌منظور رفع اضافه بارهای احتمالی به‌وجود آمده در خطوط در طی فرایند بازیابی، از مدل کنترل توان عبوری استفاده می‌شود که با تغییر راکتانس TCSC، مقدار توان عبوری از خطوط در محدوده مجاز مربوط قرار گرفته و روند مرحله‌ای فرایند بازیابی را با حذف حالت‌های اضافه بار خطوط و حتی بهبود پروفیل ولتاژ تسهیل خواهد کرد.

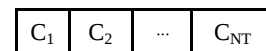
شکل ۲ ساختار مداری جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) را نشان می‌دهد که از بانک‌های خازنی موازی (C)، مجموعه راکتور شنت (L) و سویچ‌های تایریستوری با سرعت بالا (TH) تشکیل شده است [۱۶]. با کنترل زاویه آتش تایریستور (α)، مقدار راکتانس اندوکتیو به‌طور پیوسته تغییر کرده و راکتانس کلی مجموعه SVC نیز مقداری از $-XC$ تا XL را خواهد داشت.

3. Q-Regulated
4. Voltage Regulated
5. α Regulated

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

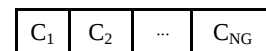
۵- مدل‌سازی شبکه و کدگذاری متغیرها

به‌منظور تعیین شرایط بهینه و تأمین حداکثر بار، از متغیرهای کنترلی قابل دسترسی در شبکه استفاده خواهد شد. این متغیرها شامل تپ ترانسفورماتورهای قدرت (T)، تعیین نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه (F) و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی (GR) است. روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک است که کدگذاری کروموزومها بر اساس ترکیب متغیرهای کنترلی انجام می‌شود. کدگذاری کروموزومی متغیر تپ (T)، رشته‌ای NT رقمی است که هر رقم آن می‌تواند از اعداد صحیح بین ۱ تا مقدار حداکثر شماره پله‌های تپ ترانسفورماتور باشد. شکل ۳ آرایش کروموزومی مربوط به این متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۳ کدگذاری کروموزومی متغیر کنترلی تپ ترانسفورماتورهای قدرت (T)

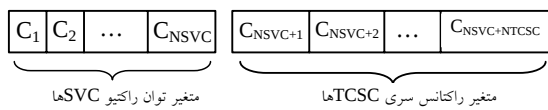
که در آن C_i نشان‌دهنده هر ژن کروموزوم و NT تعداد ترانسفورماتورهای قدرت دارای تپ است. کدگذاری مربوط به برنامه‌ریزی مجدد تولید (GR) نیز رشته‌ای NG رقمی است که هر رقم آن می‌تواند متغیری پیوسته بین صفر تا حداکثر ظرفیت مجاز توان تولیدی ژنراتور مربوط باشد و NG، تعداد ژنراتورهای قابل برنامه‌ریزی است. کدگذاری این متغیر در شکل ۴ داده شده است.



شکل ۴ کدگذاری کروموزومی متغیر کنترلی برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (GR)

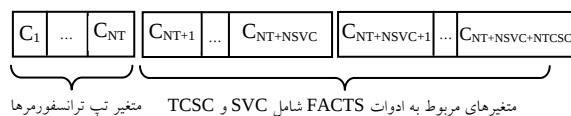
کدگذاری متغیرهای ادوات FACTS که در این مقاله انواع TCSC و SVC آن مورد استفاده قرار گرفته، یک کروموزوم NF رقمی است که NF معادل مجموع تعداد ادوات

FACTS موجود در شبکه شامل TCSC و SVC است. این کدگذاری مطابق شکل ۵ دارای دو جزء است که جزء اول آن مقادیر توان راکتیو تزریق شده به شینه‌ها به‌وسیله SVC‌های مربوط است که متغیری پیوسته بین صفر تا حداکثر مقدار ظرفیت سلفی و خازنی آنها است. جزء دوم مقادیر راکتانس TCSC‌های نصب شده در خطوط انتقال را نشان می‌دهد که می‌تواند در محدوده راکتانس مجاز هر TCSC تغییر کند.



شکل ۵ کدگذاری کروموزومی متغیر نقاط کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه تست (F)

که در آن NSVC و NTCSC به‌ترتیب تعداد ادوات SVC و TCSC به‌کار رفته در شبکه را نشان می‌دهد. چنانچه بخواهیم از آرایش ترکیبی متغیرهای کنترلی استفاده کنیم، کافی است هر یک از آرایشهای مربوط را در کنار هم قرار دهیم. شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به‌ترتیب آرایش کروموزومی متغیرهای ترکیبی (T&F) و (T&GR) و (F&GR) را نشان می‌دهد.



شکل ۶ کدگذاری کروموزومی متغیر ترکیبی تپ ترانسفورماتورهای قدرت و نقاط کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه تست (T&F)



شکل ۷ کدگذاری کروموزومی متغیر ترکیبی تپ ترانسفورماتورهای قدرت و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (T&GR)

عددی به نام مقدار برازندگی^۳ اختصاص می‌یابد.

برازندگی هر کروموزوم نشان‌دهنده میزان مطلوبیت آن کروموزوم در جهت حداکثر کردن تابع هدف است که وابسته است به مقدار تابع هدف و نیز قرار گرفتن در محدوده قیود تعریف شده. بررسی قرار گرفتن پارامترهای قید در محدوده مجاز مربوط با محاسبه مقدار Infeasibility انجام می‌شود. این مقدار معادل مجموع انحرافات پارامترهای قید (d_i) از محدوده مجاز آنها است:

$$Infeasibility = \sum_i d_i \quad (2)$$

در این مقاله، حدود و لتاژ شینه‌ها، محدوده تولید ژنراتورها و توان عبوری از خطوط انتقال و نیز تفاضل زاویه دو طرف کلید قدرت (در صورت قطع بودن خط انتقال) نیز به عنوان پارامترهای قید در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است به کروموزومی که در آن، تمامی پارامترها در داخل محدوده مجاز قرار گرفته باشند، Infeasibility صفر اختصاص یافته و به کروموزومهایی که محدوده قیود را نقض می‌کنند، مقداری به عنوان جریمه تعلق می‌گیرد که در نهایت مقدار برازندگی کروموزوم مربوط را کاهش می‌دهد. تابع جریمه^۴ به صورت (۳) استفاده شده است.

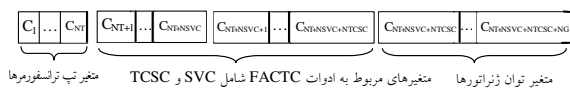
$$Penalty Function = Infeasibility \cdot Weight \quad (3)$$

که در آن پارامتر Weight وزنی است که به هر یک از پارامترهای قید اختصاص یافته و میزان اهمیت و نقش آنها را در تابع هدف نشان می‌دهد. با این شرایط، مقدار نهایی برازندگی مطابق (۴) برای هر کروموزوم تعیین شده و در نهایت کروموزومها به صورت نزولی بر اساس مقدار برازندگی شان مرتب خواهند شد.



شکل ۸ کدگذاری کروموزومی متغیر ترکیبی نقاط کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (F&GR)

آخرین متغیر کنترلی، ترکیبی همزمان سه متغیر (T&F&GR) است که در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ کدگذاری کروموزومی متغیر ترکیبی تپ ترانسفورماتورها قدرت، نقاط کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (T&F&GR)

قابل ذکر است که در صورت عدم امکان تأمین بار موردنظر به کمک متغیرهای کنترلی فوق، استفاده از قطع بارهای کم اهمیت به عنوان آخرین گزینه اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این شرایط، برای بهبود ولتاژ در شینه‌هایی که کمبود ولتاژ دارند یا برای رفع اضافه بار بعضی از خطوط، از قطع بار براساس پله‌های تعریف شده به صورت مرحله‌ای استفاده می‌شود تا نقض قیود بهره‌برداری به صورت کامل برطرف شود.

۶- فرایند بهینه‌سازی

بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک در فرایندی تکراری انجام می‌شود. در این فرایند، پس از تولید جمعیت اولیه تصادفی، با استفاده از عملیات ژنتیکی شامل تقاطع^۱، جهش^۲ و نیز بعضی عملیات خاص که به منظور تسریع در همگرایی فرایند و رسیدن به پاسخ نهایی به کار می‌رود، بهبود پاسخ بررسی می‌شود. در هر تکرار، به هر کروموزوم

3. Fitness
4. Penalty Function

1. Crossover
2. Mutation

$$Fitness \text{ Function} = \sum MW - Penalty \text{ Fun.} \quad (4)$$

در انتهای هر تکرار، انتخاب بهترین کروموزومها بر اساس روش انتخاب نخبه^۱ و چرخ رولت^۲ انجام می‌شود. فرایند تکرار در صورت همگرا شدن پاسخ و عدم بهبود بیشتر آن در تکرارهای بعدی متوقف شده و پاسخ نهایی تعیین خواهد شد. بدیهی است در پاسخ نهایی، ضمن حداکثر بودن مقدار تابع هدف، تمامی قیود بهره‌برداری نیز در محدوده مجاز قرار خواهند گرفت.

۷- مطالعات عددی

به‌منظور ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهاد شده، از شبکه IEEE-118 bus به‌عنوان سیستم تست استفاده شده است. همچنین دو حالت مختلف از شبکه شامل قطع یک خط و خروج یک واحد تولیدکننده، مطالعه شده است. در هر یک از این حالتها، ترکیبهای مختلفی از متغیرهای کنترلی به‌منظور بازیابی حداکثر بار در شرایط تأمین قیود مختلف بهره‌برداری بررسی شده و برخی از نتایج به‌دست آمده، آورده شده است. در این مطالعات اهمیت بارها یکسان فرض شده و ضریب وزنی اولویت بارها برابر یک در نظر گرفته شده است ($w_i = 1$).

۷-۱- قطع خط بین شینه‌های ۸۲-۸۳

در این حالت، فرض می‌کنیم که شبکه تست در وضعیت بهره‌برداری بوده و بر اثر وقوع عیب در خط انتقال بین شینه‌های ۸۲ و ۸۳، این خط قطع می‌شود. پس از بروز قطعی، حدود بعضی از پارامترهای قید از محدوده مجاز تجاوز کرده و به‌دلیل عدم امکان کنترل این شرایط، در نهایت به خروجیهای پی‌درپی منجر می‌شود. مطابق نتایج به‌دست آمده از پخش بار که بخشی از آن در جدول ۱ داده شده، ملاحظه می‌شود که توان عبوری از خط انتقال بین شینه‌های ۸۹ و ۹۲ پس از قطع خط

۸۲-۸۳ از محدوده مجاز تجاوز کرده است. با عمل کردن رله‌های کمبود ولتاژ^۳ شینه‌ها، قطع محلی بار در شینه‌هایی که دارای کمبود هستند انجام شده و رله اضافه بار^۴ خطوط نیز مقدار بار را در خطوطی که اضافه بار دارند کاهش می‌دهد. به‌علت برطرف نشدن مشکل نقض قیود، قطعیهای پی‌درپی در خطوط ایجاد می‌شود که در نهایت به خروج مرحله‌ای ۷ خط انتقال و حذف بار در ۶ شینه مطابق جداول ۲ و ۳ منجر شده و پس از آن سیستم به حالت پایدار دیگری می‌رسد. ملاحظه می‌شود که پس از وقوع قطعیها، تمامی قیود بهره‌برداری در داخل محدوده مجاز قرار گرفته‌اند.

جدول ۱ نتایج پخش بار در شبکه تست مربوط به بعضی از خطوط انتقال بلافاصله پس از خروج خط ۸۲-۸۳

ظرفیت نهایی (MVA)	مقدار توان عبوری (MVA)	به شینه	از شینه	شمار ه خط
۱۰۰۰	۱۰۰/۰۰۶۵	۹۰	۸۹	۱۳۳
۱۷۵	۱۸/۶۴۹۹	۹۱	۹۰	۱۳۴
۲۱۵	۲۲۸/۶۰۶۲	۹۲	۸۹	۱۳۵
۱۷۵	۲۸/۵۳۲۵	۹۲	۹۱	۱۳۶
۱۷۵	۱۵/۱۷۸۲	۹۳	۹۲	۱۳۷

جدول ۲ خطوط انتقال قطع شده بعد از خروج خط ۸۲-۸۳ و وقوع قطعیهای پی‌درپی پس از آن

شینه‌های دو طرف خط انتقال	خط انتقال قطع شده
۷۷-۶۹	۱۱۵
۸۰-۷۷	۱۱۹
۸۳-۸۲	۱۲۴
۹۱-۹۰	۱۳۴
۹۲-۸۹	۱۳۵
۹۲-۹۱	۱۳۶
۹۹-۸۰	۱۴۶

3. Under Voltage Relay
4. Over Load Relay

1. Elitist Selection
2. Roulette Wheel

جدول ۳ مقادیر بارهای قطع شده به وسیله رله‌های حفاظتی شینه‌های دارای کمبود ولتاژ و خطوط دارای اضافه بار

پس از خروج خط انتقال ۸۳-۸۲

بار تأمین شده (MW)	بار قطع شده (MW)	بار اولیه (MW)	شینه
۷۰	۲۱۰	۲۸۰	۷۰
۳۴	۳۴	۶۸	۷۶
۰	۱۳۰	۱۳۰	۸۰
۰	۱۶۳	۱۶۳	۹۰
۰	۱۰	۱۰	۹۱
۲۱۰	۹۰	۳۰۰	۹۲
جمع ۶۳۷			

به شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که $623/4 \text{ MW}$ از کل بار تأمین شده (4943 MW) و تمامی پارامترها در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند. همچنین تفاضل زاویه دو طرف کلید در خط معیوب (تفاضل زاویه بین شینه‌های ۸۲ و ۸۳) برابر $5/33$ درجه است که این مسأله وصل نهایی خط معیوب پس از تعمیرات را بدون ایجاد حالت‌های گذرای شدید میسر می‌سازد.

جدول ۴ مشخصات جبران‌سازهای (SVC) نصب شده در شبکه تست

شماره	شینه	MVAR حداقل	MVAR حداکثر
۱	۲۲	-۵۰	۸۰+
۲	۳۸	-۵۰	۱۲۵+
۳	۵۳	-۵۰	۱۰۰+
۴	۹۶	-۵۰	۱۲۰+

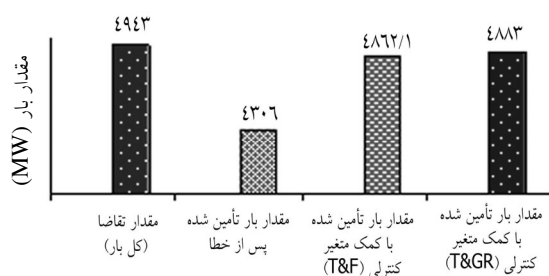
جدول ۵ مشخصات جبران‌سازهای سری (TCSC) نصب شده در شبکه

شماره خط	از شینه	به شینه	مشخصات TCSC
۱	۲۳	۳۲	$XC=0/1 \text{ P.U.}$ $XL=0/1 \text{ P.U.}$
۲	۶۶	۶۷	$XC=0/3 \text{ P.U.}$ $XL=0/3 \text{ P.U.}$
۳	۷۷	۸۰	$XC=0/1 \text{ P.U.}$ $XL=0/045 \text{ P.U.}$
۴	۸۹	۹۲	$XC=0/03 \text{ P.U.}$ $XL=0/03 \text{ P.U.}$

در مرحله دوم، متغیر برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (GR) نیز در راستای بازیابی حداکثر بار به کار گرفته شده است. متغیر GR یک رشته ۳۴ رقمی است که هر رقم آن مقدار توان اکتیو تولیدی یکی از ژنراتورها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار 4870 MW از کل بار مورد تقاضا، تأمین شده و تمامی متغیرهای قید از

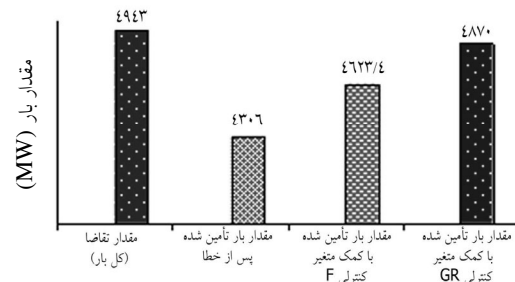
با استفاده از روش پیشنهادی و ترکیب‌های مختلف متغیرهای کنترلی، می‌خواهیم ضمن رعایت محدوده مجاز پارامترهای قید، بیشترین بار را تأمین نماییم. همچنین فرض می‌شود که تمامی خطوط و بارهای قطع شده قابلیت وصل مجدد دارند، به جز خط معیوب (خط انتقال بین شینه‌های ۸۲ و ۸۳) که برای بازگرداندن آن، نیاز به سپری شدن زمان تعمیرات مربوط است. در اولین مرحله، از متغیر نقطه کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه (F)، شامل چهار دستگاه SVC و چهار دستگاه TCSC نصب شده در شبکه - که اطلاعات مربوط به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ داده شده - استفاده می‌شود. لازم است یادآوری شود که این تجهیزات به منظور بهره‌برداری در شرایط نرمال شبکه طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرند و هدف ما محاسبه و نصب این تجهیزات به منظور بهبود فرایند بازیابی نیست. کروموزوم به کار رفته در این بهینه‌سازی، یک رشته ۸ رقمی است که چهار رقم اول آن مقدار توان راکتیو تزریقی SVCها به شینه‌های مربوط و چهار رقم بعدی مقدار راکتانس‌های اعمال شده به خطوط به وسیله TCSCهای موجود در شبکه را نشان می‌دهد. با توجه

این مرحله از شبیه‌سازی به‌کار رفته است که مقدار 4883 MW از کل بار با شرط رعایت حریم پارامترهای قید بازیابی گردیده و مقدار تفاضل زاویه بین دو طرف کلید خط بین شینه‌های ۸۲ و ۸۳ برابر $12/30$ درجه است. شکل ۱۱ مقدار بار بازیابی شده را در حالت‌های استفاده از متغیرهای $(T\&F)$ و $(T\&GR)$ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ مقادیر بار بازیابی شده در حالت‌های استفاده از ترکیب متغیرهای کنترلی $(T\&F)$ و $(T\&GR)$ در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا و مقدار کل بار در شرایط خروج خط ۸۳-۸۲

جمله تفاضل زاویه بار بین دو طرف کلید موجود در خط بین شینه‌ها ۸۲ و ۸۳ (برابر $15/47$ درجه) نیز در محدوده مجاز قرار گرفته است. شکل ۱۰ بارهای تأمین شده در شرایط استفاده از متغیرهای کنترلی F و GR را در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا نشان می‌دهد.

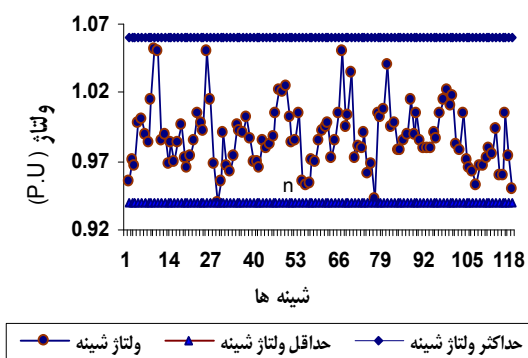


شکل ۱۰ مقدار بار بازیابی شده در حالت‌های استفاده از ترکیب متغیرهای کنترلی (F) و (GR) در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا و کل بار در شرایط خروج خط ۸۳-۸۲

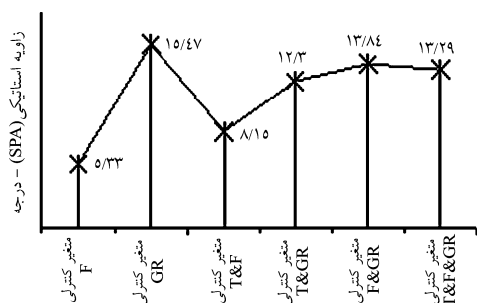
ترکیب متغیر کنترلی نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی واحدهای تولید $(F\&GR)$ برای بازیابی حداکثر بار، منجر به تأمین 4943 MW از بار شده که معادل کل بار مورد تقاضا است. در این شرایط نیز تمامی پارامترهای بهره‌برداری در محدوده مجاز قرار گرفته و مقدار تفاضل زاویه فاز استاتیکی ولتاژ (SPA) دو طرف کلید نصب شده در خط انتقال ۸۲-۸۳ نیز برابر $13/84$ درجه است. در مرحله نهایی، از متغیر کنترلی سه‌گانه تپ ترانسفورماتورهای قدرت، نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی $(T\&F\&GR)$ استفاده شده که رشته‌ای ۵۱ رقمی است که ۹ رقم اول آن متغیر تپ ترانسفورماتورها، ۸ رقم بعدی آن متغیر ادوات FACTS و ۳۴ رقم بعدی توان

در مرحله بعد، از متغیر نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه و تپ ترانسفورماتورهای قدرت $(T\&F)$ استفاده می‌کنیم. کد کروموزومی، رشته‌ای ۱۷ رقمی است که ۹ رقم اول آن پله‌های تپ ترانسفورماتورهای قدرت مربوط به ۹ ترانسفورماتور موجود در شبکه، چهار رقم بعدی مقادیر توان راکتیو SVCها و چهار رقم آخر مقدار راکتانس اعمالی چهار TCSC موجود در شبکه را نشان می‌دهد. نتایج این بهینه‌سازی نشان می‌دهد که $4862/1 \text{ MW}$ از کل بار قابل بازیابی بوده و $81/25 \text{ MW}$ از بار مورد تقاضا غیر قابل تأمین است. ضمناً مقدار تفاضل زاویه استاتیکی دو طرف کلید خط ۸۲-۸۳ نیز برابر $8/15$ درجه است.

آرایش متغیرهای کنترلی تپ ترانسفورماتورها و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی $(T\&GR)$ نیز در



شکل ۱۳ مقادیر ولتاژ شینه‌های شبکه تست پس از بازیابی به کمک متغیر کنترلی (F&GR) در شرایط خروج خط ۸۲-۸۳



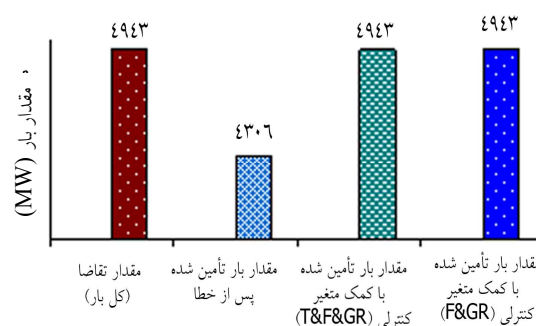
شکل ۱۴ مقادیر تفاضل زاویه فاز استاتیکی (SPA) ولتاژ شینه‌های دو طرف کلید موجود در خط ۸۲-۸۳

۲-۷- خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹

در این مرحله، واحد نیروگاهی ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹ بر اثر وقوع خرابی از مدار خارج می‌شود. بدیهی است بروز این حالت بسته به نقطه کار نیروگاه و شرایط مختلف حاکم بر شبکه ممکن است موجب نقض بعضی از قیود بهره‌برداری شود و معمولاً قطع بار یا خروجی‌های پی‌درپی را به همراه خواهد داشت.

مطابق نتایج به دست آمده از پخش بار پس از خروج واحد که بخشی از آن در جدول ۶ داده شده، ملاحظه می‌شود که توان عبوری از خط انتقال بین شینه‌های

اکتیو تولیدی هر یک از ژنراتورها را نشان می‌دهد. در این حالت، مشابه حالت قبل (F&GR)، کل بار تأمین شده و تمامی قیود بهره‌برداری نیز رعایت شده و تفاضل زاویه ولتاژ بین شینه‌های ۸۲ و ۸۳، برابر ۱۳/۲۹ درجه است. شکل ۱۲ بار تأمین شده در حالت استفاده از ترکیب‌های متغیرهای کنترلی (F&GR) و (T&F&GR) را به طور همزمان نشان می‌دهد. شکل ۱۳ مقادیر ولتاژ شینه‌های شبکه تست را در حالت بازیابی با استفاده از متغیر ترکیبی (F&GR) در مقایسه با حدود مجاز مربوط نشان می‌دهد. شکل ۱۴ مقادیر تفاضل زاویه استاتیکی (SPA) ولتاژ دو طرف کلید موجود در خط بین شینه‌های ۸۲-۸۳ (در شرایطی که با استفاده از ترکیب‌های مختلف متغیرهای کنترلی تمامی خطوط به استثنای خط معیوب به مدار وارد شده‌اند) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مقدار SPA دو طرف کلید در تمامی حالتها کمتر از ۳۰ درجه بوده که این کاهش شدت حالت‌های گذرای احتمالی در موقع وصل خط معیوب (خط بین شینه‌های ۸۲-۸۳) پس از انجام تعمیر را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۱۲ مقادیر بار بازیابی شده در حالت‌های استفاده از ترکیب متغیرهای کنترلی (F&GR) و (T&F&GR) در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا و مقدار کل بار در شرایط خروج خط ۸۲-۸۳

جدول ۷ مقادیر بارهای قطع شده به وسیله رله‌های حفاظتی شینه‌های دارای کمبود ولتاژ و خطوط دارای اضافه بار پس از خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹

شینه	بار تأمین شده (MW)	بار قطع شده (MW)	بار اولیه (MW)
۷۰	۲۳۸	۴۲	۲۸۰
۷۴	۰	۲۰	۲۰
۷۵	۰	۳	۳
۷۶	۰	۶۸	۶۸
۸۷	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰
۷۹	۰	۳۹	۳۹
۸۰	۰	۱۳۰	۱۳۰
جمع ۴۰۹/۴			

جدول ۸ خطوط انتقال قطع شده پس از خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹ و وقوع قطعیهای پی‌درپی پس از آن

شینه‌های دو طرف خط انتقال	خط انتقال قطع شده
۶۹-۷۷	۱۱۵
۷۷-۸۰	۱۱۹
۸۲-۸۳	۱۲۴
۹۰-۹۱	۱۳۴
۸۹-۹۲	۱۳۵
۹۱-۹۲	۱۳۶
۸۰-۹۹	۱۴۶

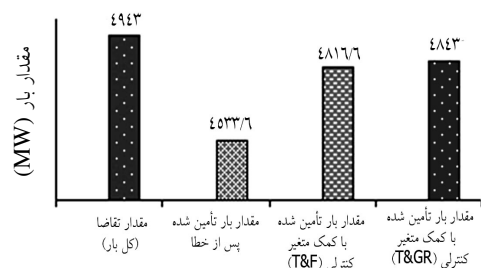
مطابق بخش (۷-۱)، به منظور بازگرداندن خطوط قطع شده و بازیابی حداکثر بار، در مرحله اول متغیر کنترلی ادوات FACTS نصب شده در سیستم (F) به کار رفته که بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار $4664/7 \text{ MW}$ از بار، قابل تأمین شده است. در مرحله دوم، به کمک کدگذاری متغیرهای کنترلی برنامه‌ریزی مجدد تولید (GR)، بازیابی حداکثر بار انجام شده که مقدار 4798 MW از کل بار 4943 MW قابل تأمین بوده و مقدار 145 MW

۷۷-۶۹ از محدوده مجاز خارج شده است. با عمل کردن رله اضافه بار خط برای کاهش مرحله‌ای بار آن و عمل کردن رله کمبود ولتاژ شینه‌ها برای برطرف کردن نقض قید ولتاژ به وجود آمده، در نهایت پس از قطع $409/45 \text{ MW}$ از بار مورد تقاضا و خروجیهایی پی‌درپی ۷ خط انتقال، شبکه به حالتی پایدار می‌رسد که در آن تمامی فیودر در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند. جدولهای ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر بارهای قطع شده از شینه‌ها و خطوط انتقالی را که به صورت پی‌درپی قطع شده‌اند نشان می‌دهد. مقدار بار تأمین شده پس از بروز خطا و عمل کردن رله‌های حفاظتی و اعمال قطع محلی بارها برابر $4533/6 \text{ MW}$ از کل بار مورد تقاضا (4943 MW) بوده و مقدار $409/4 \text{ MW}$ بار در این شرایط غیرقابل تأمین است. در این مرحله از مطالعه، قید تفاضل زاویه مدنظر قرار نمی‌گیرد، زیرا هیچ خطی در حالت تعمیر وجود نداشته و فقط واحد تولیدکننده از مدار خارج شده است. پس از رفع خرابی واحد و انجام عملیات سنکرونیزاسیون، نیروگاه مربوط نیز به مدار وارد خواهد شد.

جدول ۶ نتایج پخش بار در شبکه تست مربوط به بعضی از خطوط انتقال بلافاصله پس از خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹

ظرفیت نهایی (MVA)	مقدار توان عبورکننده (MVA)	به شینه	از شینه	شماره خط
۱۷۵	۷/۶۱۳۶	۷۵	۷۴	۱۱۳
۱۷۵	۴۱/۷۸۱۰	۷۷	۷۶	۱۱۴
۱۷۵	۲۴۱/۷۰۳۹	۷۷	۶۹	۱۱۵
۱۷۵	۴۱/۵۹۰۲	۷۷	۷۵	۱۱۶
۱۷۵	۶۳/۳۶۳۹	۷۸	۷۷	۱۱۷

مقادیر بار تأمین شده در حالت‌های استفاده از متغیرهای کنترلی (T&GR) و (T&F) را در مقایسه با مقدار کل تقاضا و مقدار بار تأمین شده پس از بروز خطا به‌طور همزمان نشان می‌دهد.

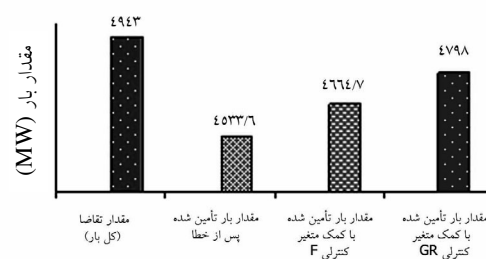


شکل ۱۶ مقادیر بار بازیابی شده در حالت‌های استفاده از ترکیب متغیرهای کنترلی (T&F) و (T&GR) در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا و کل بار در شرایط خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹

آرایش متغیرهای ترکیبی برنامه‌ریزی واحدهای تولید و ادوات FACTS موجود در سیستم (F&GR) ضمن حفظ تمامی شرایط و قیود تولید، توانسته است کل بار مورد تقاضا را بازیابی کند.

در آخرین مرحله، از ترکیب متغیرهای کنترلی تپ ترانسفورماتورهای قدرت، نقاط کار ادوات کنترلی FACTS موجود در شبکه و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولید (T&F&GR) استفاده شده که این ترکیب مانند آرایش متغیرهای کنترلی حالت قبل (F&GR)، کل بار مورد تقاضا را تأمین کرده است. شکل ۱۷ مقادیر بار تأمین شده پس از وقوع اغتشاش و به‌کارگیری ترکیبهای متغیرهای کنترلی (F&GR) و (T&F&GR) را در مقایسه با کل بار نشان می‌دهد. شکل ۱۸ مقادیر ولتاژ شینه‌ها را در حالت استفاده از متغیر ترکیبی (T&F&GR) نشان می‌دهد که در داخل محدوده مجاز قرار دارد.

غیرقابل بازیابی بوده و تمامی خطوط هم به مدار وارد شده‌اند. شکل ۱۵ مقدار بار تأمین شده در صورت استفاده از متغیر کنترلی نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه تست (F) و متغیر کنترلی برنامه‌ریزی تولید (GR) در مقایسه با بار مورد تقاضا و بار تأمین شده پس از بروز خطا را نشان می‌دهد.



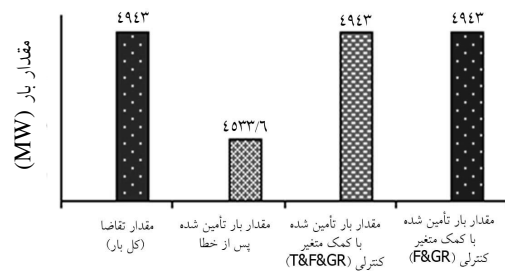
شکل ۱۵ مقادیر بار بازیابی شده در حالت‌های استفاده از ترکیب متغیرهای کنترلی (F) و (GR) در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا و مقدار کل بار در شرایط خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹

در ترکیبی دیگر، از متغیرهای کنترلی تپ ترانسفورماتورهای قدرت و نقاط کار ادوات FACTS موجود در شبکه (T&F) به‌طور همزمان استفاده شده است. کدگذاری مربوط ۱۷ رقم دارد که ۹ رقم اول آن را موقعیت تپ هر ترانسفورماتور، چهار رقم بعدی را توان راکتیو تولید شده توسط SVCها و چهار رقم آخری مقدار راکتانس TCSCهای موجود در شبکه را نشان می‌دهد. مقدار بار تأمین شده در این مرحله برابر ۴۸۱۶/۶ MW بوده و محدوده تمامی قیود بهره‌برداری نیز رعایت شده است.

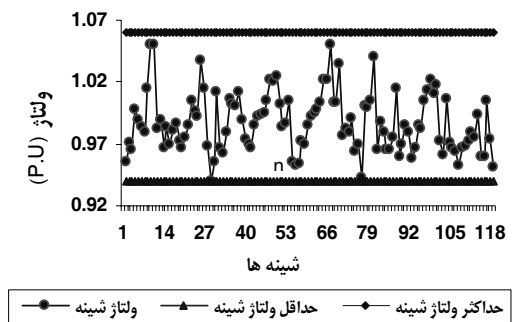
در ترکیبی دیگر، از متغیرهای کنترلی تپ ترانسفورماتورها و برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی (T&GR) استفاده شده که منجر به بازیابی ۴۸۴۳ MW از کل ۴۹۴۳ MW بار مورد تقاضا شده است. شکل ۱۶

به‌منظور برطرف شدن این محدودیت، می‌توان از روشهای مختلفی استفاده کرد. چنانچه الگوریتم پیشنهادی از پاسخ اولیه مناسبی شروع به‌کار کند، زمان رسیدن به پاسخ نهایی به‌طور محسوسی کاهش خواهد یافت. برای به‌دست آوردن پاسخهای اولیه مورد نیاز در هر حالت از قطعیهای جزئی، می‌توان قبل از بروز قطعی با استفاده از اطلاعات موجود، الگوریتم را اجرا کرد. نتایج به‌دست آمده از این مرحله، به‌عنوان نقاط شروع تقریبی مناسب، قابلیت به‌کارگیری الگوریتم در زمان واقعی را به‌طور منطقی افزایش می‌دهد. همچنین در شرایطی که الگوریتم برای شبکه‌های بزرگ به‌کار می‌رود، با تقسیم شبکه به چند شبکه محلی می‌توان سرعت همگرایی را افزایش داد. وجود کامپیوترهای سریع در مراکز کنترل شبکه، محدودیت زمانی اجرای الگوریتم را تا حد زیادی برطرف می‌کند. قابل ذکر است که در نرم‌افزار طراحی الگوریتم، برای ارتقای هر چه بیشتر سرعت رسیدن به پاسخ نهایی، از تدابیر خاص بهبود همگرایی در روند عملیات ژنتیکی مربوط استفاده شده است. به‌عنوان نمونه، مدت زمان رسیدن به پاسخ نهایی در مطالعه موردی بخش ۷-۱ (قطع خط بین شینه‌های ۸۳-۸۲)، با شروع از حالت اولیه مناسب، با استفاده از کامپیوتر Pentium4-1800MHZ مناسب، با استفاده از کامپیوتر ۱۹ دقیقه و ۳۷ ثانیه است.

در نهایت، این الگوریتم می‌تواند برای تهیه و تدوین دستورالعملهای بازیابی در صورت بروز قطعیهای جزئی به‌کار رود. این دستورالعملها با شبیه‌سازی و اجرای الگوریتم در خارج از شبکه^۳ در حالت‌های مختلف بروز قطعیهای جزئی (که احتمال وقوع بالاتری دارند) استخراج شده و نتایج حاصل از آنها به‌عنوان راهنما برای کمک به اپراتور در رویارویی با شرایط مربوط به‌کار گرفته شود.



شکل ۱۷ مقادیر بار بازیابی شده در حالت‌های استفاده از ترکیب متغیرهای کترلی (F&GR) و (T&F&GR) در مقایسه با بار تأمین شده پس از خطا و کل بار در شرایط خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹



شکل ۱۸ مقادیر ولتاژ شینه‌های شبکه تست پس از بازیابی به‌کمک متغیر کترلی (T&F&GR) در شرایط خروج نیروگاه ۷۰۷ مگاواتی شینه ۸۹

۸- بهبود زمان پاسخ الگوریتم

با توجه به تعدد متغیرهای کترلی در فرایند بازیابی و ارتباط پیچیده و غیرخطی بین آنها به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ، استفاده از الگوریتم ژنتیک با تکیه بر قابلیت جستجوی فراگیر فضای پاسخ و انعطاف‌پذیری آن، غالباً رسیدن به پاسخ بهینه سراسری^۱ را ممکن می‌سازد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه فرایند بازیابی در قالب زمان واقعی^۲ ارزیابی می‌شود، مطابقت زمانی عملیات بازیابی با استفاده از الگوریتم که فرایندی زمانبر است، با محدودیت روبه‌رو می‌شود.

1. Global Optimum
2. Real Time

۹- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر به کارگیری ترکیبهای مختلف متغیرهای کنترلی در بازیابی بهینه سیستمهای قدرت مجهز به ادوات SVC و TCSC در شرایط بروز اغتشاش و ایجاد قطعیهای جزئی مطالعه شده است. این متغیرها شامل تب ترانسفورماتورهای قدرت (T)، تعیین نقطه کار ادوات FACTS موجود در شبکه (F) و برنامه ریزی مجدد واحدهای تولیدکننده (GR) است. اثر به کارگیری این ترکیبها در بازیابی بهینه و حداکثر کردن بار تأمین شده به عنوان تابع هدف بررسی شده و نتایج به دست آمده، داده شده است. قیود مختلف بهره برداری شامل حدود مجاز ولتاژ شینه ها، حدود توان عبوری از خطوط و محدوده تولید ژنراتورها در انجام بهینه سازی و به دست آوردن پاسخ نهایی مدنظر قرار گرفته و در شرایط بروز خطا و قطع خط انتقال، تفاضل زاویه استاتیکی (SPA) ولتاژ دو طرف کلید نصب شده در این خط در هنگام وصل مجدد پس از تعمیر نیز به مجموعه قیود اضافه شده است. شبکه IEEE-118 bus به عنوان سیستم تست به منظور بررسی قابلیت های روش پیشنهادی به کار گرفته شده و روش بهینه سازی نیز الگوریتم ژنتیک بوده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با استفاده از قابلیت های ادوات کنترلی موجود در شبکه مانند تب ترانسفورماتورهای قدرت، نقاط کار تجهیزات FACTS و برنامه ریزی مجدد واحدهای تولیدی، ضمن بازیابی حداکثر بار قطع شده در شرایط قطعیهای جزئی - که به طور مستمر در شبکه ها ایجاد می شوند، می توان مقدار بار بازیابی شده را حداکثر کرده و ENS را به طور محسوسی کاهش داده و از بروز حالت های گذرای شدید مربوط تا حد ممکن جلوگیری کرد. این بهینه سازی با توجه به فراوانی بروز قطعیهای جزئی در شبکه می تواند صرفه جویی زیادی را (از نظر هزینه) ایجاد کرده و وضعیت بهره برداری سیستم را نیز بهبود بخشد.

۱۰- منابع

- [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] D. N. Ewart, "Whys and wherefores of power system blackouts", IEEE Spectrum Magazine; April 1978, pp. 36-41.
- [4] M. M. Adibi, Power System Restoration Methodologies & Implementation Strategies, IEEE Press Power Engineering Series, 2000.
- [5] 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; New York, Jan. 2002, pp. 1299-1304.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [15] 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.
- [16] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles-Camacho, FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, UK. Wiley, 2004.
- [17] 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.
- [18] 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. 474-1480.
- [19] Martin Geidl, Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform, Diploma Thesis, Zurich, 2003.
- [20] H. Ambriz-Perez; E. Acha, and C. Fuerte-Esquivel; "Advanced SVC models for Newton-Raphson load flow and Newton optimal power flow studies", IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 15, Feb. 2000.
- [8] 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.
- [9] M. Adibi and L. Fink; "Power system restoration planning", IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 10, Issue 2, May 1995, pp. 22-28.
- [10] Ying-Tung Hsiao, Ching-Yang Chien; "Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination Fuzzy-GA method", IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 15, No. 4, Nov. 2000, pp. 1394-1400.
- [11] M. M. Adibi, D. P. Milanicz, SM; "Time of outage restoration analysis in distribution systems", IEEE Trans. on Power Delivery; Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1652-1658.
- [12] M. M. Adibi, D. P. Milanicz, SM; "Estimating restoration duration", IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 14, No. 4, Nov. 1999, pp. 1493-1498.
- [13] IEEE-118 Bus Test System available at: <http://www.ee.Washington.edu/research/pstca/>.
- [14] M. Kheradmandi, M. Ehsan; "Dynamic analysis of transmission line connection in restoration of interconnected power systems", IEEE Canadian Electrical and Computer Engineering Conference; Canada, Vol. 3, May 2004, pp. 1621-1624.