برنامه ریزی چند مرحله ای توسعه خطوط انتقال شبکه های الکتریکی در حضور منابع توان راکتیو

محمود مخدوم زاده توده [۱]، سعید مهدوی [۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد، ایران

mahmood.makhdoomzadeh@gmail.com

[۲]استادیار، گروه برق، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد، ایران

saeed.seyyedmahdavi@gmail.com

خلاصه

برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال یکی از مهمترین بخشهای برنامه ریزی سیستم قدرت می باشد. با ورود فنّاوری‌های نوینی همچون خودروهای الکتریکی، تقاضای انرژی الکتریکی با آهنگ سریع‌تری رشد خواهد داشت ، مسئله برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال را که از مهم‌ترین مسائل در صنعت برق است، تحت تاثیر قرار خواهد داد. محدودیت های سیاسی و اجتماعی، مهم‌ترین چالش‌های پیشروی توسعه خطوط انتقال هستند. در این مقاله، از جبران سازهای شنت خازنی جهت حضور در برنامه ریزی توسعه خطوط استفاده می‌گردد. تا با استفاده از این ادوات جبران ساز در برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال، با تولید توان راکتیو در بأس‌ها، ظرفیت انتقال خطوط را افزایش داده که تا هزینه و تعداد خطوط قابل نصب در شبکه کاهش یابد. مدل پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ باس استاندارد IEEE پیاده سازی شده و نتایج در چند سناریو ارائه خواهند گشت. جهت حل مسئله بهینه‌سازی برنامه ریزی چندمرحله ای توسعه خطوط انتقال نیز از الگوریتم رقابت استعماری استفاده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده کارآمدی مدل پیشنهادی را تائید می‌کنند.

کلمات کلیدی: برنامه ریزی توسعه خطوط، جبران سازهای خازنی شنت، الگوریتم رقابت استعماری

۱. مقدمه

امروزه سیستم های قدرت نقش چشمگیری در پیشرفت کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه ایفا می کنند منوط بر اینکه توانایی لازم را برای تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی داشته باشند[۱]. ساختار فیزیکی شبکه های الکتریکی همواره به‌واسطه رشد تقاضای مصرف‌کنندگان و حضور منابع و تجهیزات جدید تغییر می‌کند. تولیدات جدید به‌منظور تأمین نیاز بار جدید لازم است به سیستم اضافه گردد، به‌ویژه منابع تجدید پذیر که غالباً در نقاط دوردست از شهرها نصب می‌گردند. یک جزء اصلی شبکه قدرت، سیستم انتقال است که نقش اساسی را در بهره‌برداری و برنامه-ریزی سیستم‌های قدرت الکتریکی ایفا می‌نماید. هدف از برنامه‌ریزی سیستم انتقال تعیین برنامه زمان‌بندی و نوع تجهیزات جدید انتقال شامل خطوط و انواع جبران سازها است. این تجهیزات جبران ساز به‌منظور تأمین ظرفیت کافی انتقال برای تولید اضافی و ملزومات توزیع بار موردنیاز هستند [۲]. برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال یکی از بخش‌های اساسی برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های قدرت است که هدف از انجام آن مشخص کردن زمان، مکان، و تعداد خطوط انتقال جدید در راستای بهینه‌سازی هزینه ساخت و بهره‌برداری این خطوط جهت نیل به‌کفایت در تحویل توان الکتریکی به مراکز بار می‌باشد [۵-۳]. با توجه به تأثیرگذاری قابل‌ملاحظه ادوات جبران ساز شنت در بهبود پایداری شبکه و نیز کاهش تلفات، در این مطالعه این ادوات نیز در برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال مورداستفاده قرار خواهند گرفت. برخلاف سایر مطالعات که اغلب برنامه ریزی استاتیک را محور تحقیق خود قرار می‌دهند، در این مقاله برنامه ریزی چندمرحله ای مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. مدل پیشنهادی در این تحقیق بر روی شبکه استاندارد IEEE پیاده سازی شده.

۲. برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال

یکی از مهمترین بخشهای برنامه ریزی سیتمهای قدرت برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال است. با توجه به اینکه محققین در حوزه سیستم‌های الکتریکی جنبه‌های متفاوتی را درزمینه برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال در نظر گرفته‌اند، تاکنون مدل‌های متفاوتی از این مسئله ارائه‌شده است. برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال که در آن افق زمانی در بلندمدت نظر گرفته‌شده برای این نوع برنامه ریزی نیز بین ۱۰ الی ۳۰ سال است. با توجه به افق زمانی در نظر گرفته‌شده، برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال در غالب دو مدل برنامه ریزی استاتیک توسعه انتقال [۱] و برنامه ریزی چندمرحله ای توسعه انتقال [۲] در برنامه ریزی استاتیک فقط به مکان و نوع خط انتقال توجه می‌شود. درواقع فاکتور زمان در برنامه ریزی استاتیک لحاظ نمی‌گردد. اما در برنامه ریزی چندمرحله ای، زمان ساخت خط نیز لحاظ می‌گردد. اکثر محققین توجه خود را معطوف به برنامه ریزی استاتیک کرده‌اند. زیرا حل مسئله برنامه ریزی استاتیک توسعه انتقال با لحاظ فاکتور زمان بسیار پیچیده‌تر می‌گردد [۲]. درکشورهای درحال‌توسعه به خاطر اینکه اکثر نیروگاه‌های تولید برق در فواصل صدها کیلومتری از مراکز بار قرارگرفته‌اند مسئله برنامه‌ریزی استاتیکی توسعه شبکه انتقال بایستی به‌طور دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد. پس از مقاله گاورور در سال ۱۹۷۰ روش‌های مختلفی ازجمله GRASP [۵]، جداسازی بندرز [۷]، HIPER [۸]، الگوریتم شاخه و کران [۹]، آنالیز حساسیت [۶]، الگوریتم ژنتیک [۱]، شبیه‌سازی تیبرید [۱۰] و جست‌وجوی تابو [۱۱] ارائه‌شده‌اند.

برای حل مسئله برنامه ریزی چندمرحله ای توسعه انتقال نیز روش‌های متفاوتی ارائه‌شده است. این روش‌ها به دودسته بهینه‌سازی ریاضی و ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند. از روش‌های ریاضی که در حل این مسئله بکار گرفته‌شده است می‌توان به LP [۱۲]، NLP [۱۳]، و برنامه ریزی دینامیک [۱۴] اشاره کرد. از روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی می‌توان به [۱۵] اشاره نمود که در آن‌ها از الگوریتم ژنتیک به‌منظور حل مسئله برنامه ریزی چندمرحله ای توسعه انتقال استفاده‌شده است. الگوریتم ژنتیک به‌خوبی قابلیت پیدا کردن جواب‌های بهینه در مسائل بزرگ را دارد. در [۱۶] با ترکیب GA، TS و SA روش نوینی برای حل این مسئله ارائه شد، درحالی‌که SA احتمال رسیدن به جوابی باکیفیت بالا را تضمین می‌سازد.

نویسندگان در [۱۷] مدلسازی ادوات FACT و مطالعات پخش بار و نقش مدلسازی در مطالعه ادوات را پیشنهاد کردند روش‌های همزمان حل مجموعه ترکیبی معادلات پخش توان و معالات کنترل FACTS نیز در [۱۸] ارائه شد. بکارگیری TCSC در شبکه های الکتریکی جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه در [۱۹] معرفی گردید. در [۲۰] یک روش دو مرحله ای سنتی و جدید (به کمک منطق فازی) برای مکان‌یابی بهینه ادوات FACTS از نوع شنت معرفی کرده‌اند که هدف آن یافتن مکانی مناسب برای این تجهیزات بگونه‌ای است که انتقال حداکثر توان مهیا گردد.

محققین در مطالعه‌ای دیگر مدلی در یک شبکه با حضور UPFC جهت کنترل بار و حداقل سازی تلفات سیستم ارائه کردند. شبیه‌سازی‌ها اثر ولتاژ سری تزریقی با دامنه و فاز متغیر بر روی پخش بار نشان می‌دهند. همچنین اثر شاخه موازی روی ولتاژ شین مربوطه بررسی شده است. سرانجام محل بهینه جهت نصب UPFC بر اساس نتایج و ساختار سیستم پیشنهادشده است [۲۱]. همچنین در یک مطالعه جامع، محققین یک فرآیند مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک جهت جایابی بهینه چندین نوع ادوات FACTS در شبکه های قدرت ارائه کرده‌اند. فرآیند بهینه‌سازی بدنبال حداکثرسازی توان منتقل شده از می‌باشد. بر این اساس پنج نوع از ادوات شامل SVC، TCSC، TCVR، TCPAR و UPFC مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این ادوات نشان می‌دهد که روش پیشنهادی کاملا مؤثر است. این محققین همچنین در اثری دیگر ماحصل مطالعات خود را در زمینه جایابی بهینه ادوات FACTS در غالب یک نرم افزار ارائه کرده‌اند که در محیط برنامه MATLAB پیاده سازی شده است. برای پیاده سازی برنامه پخش بار بهینه نیز از برنامه Matpower استفاده شده است [۲۲] و [۲۳].

۳. پیاده سازی برنامه ریزی چندمرحله ای توسعه خطوط انتقال با در نظر گرفتن جبران سازهای شنت

در برنامه ریزی چندمرحله ای افق زمانی موردمطالعه به چند دوره تقسیم شده و در ابتدای هر مرحله خطوط مدنظر به شبکه اضافه می‌گردند و سپس ارزیابی فنی و اقتصادی برای هر مرحله صورت می‌گیرد. در نهایت، هزینه نصب خطوط و تجهیزات جبران ساز و نیز هزینه تلفات از محاسبه مجموع هزینه‌های دوره های موردمطالعه بدست می‌آید.

تابع هدف و قیود این مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌گردند:

[۱] Static Transmission Expansion Planning

[۲] Multi-Stage Transmission Expansion Planning

$$C_T = C_{Installation} + C_{Losses} \quad (۲)$$

$$C_{Installation} = \sum_{t=1}^{T} \gamma^t \left(\sum_{l \in L} C_{L,l} \sum_{k \in K} u_{l,k}^t \right) + \sum_{t=1}^{T} \gamma^t \left(\sum_{b \in B} C_{SH,b} \sum_{j \in J} v_{b,j}^t \right) \quad (۳)$$

$$SH_C = C_0 + C_1 Q_{SH} \quad (۴)$$

در روابط بالا؛ T تعداد دوره های موردمطالعه، CL,l هزینه نصب خط l، utl,k متغیر باینری مربوط به احداث خط l در تعداد K (تعداد خطوط موازی در کریدور i و j) در دوره t، CSH,b هزینه نصب جبران ساز در باس b در دوره t، vtb,j متغیر باینری مربوط به احداث جبران ساز b به ظرفیت j در دوره t هستند. در برنامه ریزی چند مرحله ای پیشنهادی در این مطالعه، پس از نصب خطوط پیشنهادی جدید در ابتدای هر دوره، تلفات در انتهای هر سال محاسبه می گردد. برای تسریع در محاسبات، ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه (معیار n-1) در انتهای هر دوره صورت می گیرد. هزینه تلفات شبکه نیز با انجام پخش بار و با استفاده از روابط زیر محاسبه می گردد:

$$C_{Losses} = \sum_{y=1}^{Y} \gamma^y LC_y \quad (۵)$$

$$LC_y = T_{el,y} \times P_{Loss,y} \times Electricity\ \mathrm{Price} \quad (۶)$$

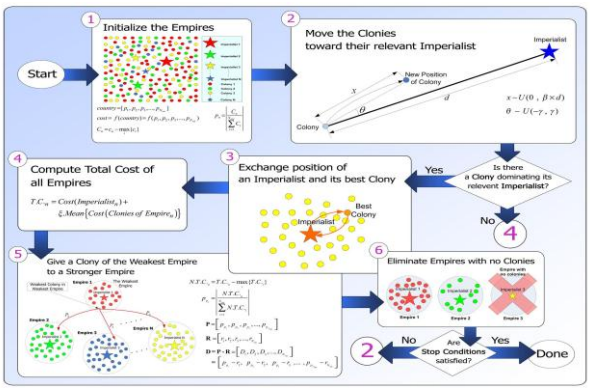
$$T_{el,y} = \frac{\sum_{t=1}^{365} P_{dt,y}^2}{\max_t \{P_{dt,y}^2\} \times 365} \times 8760 \quad (۷)$$

که در این روابط؛ PLoss,y تلفات شبکه در سال y (با نرخ رشد بار سالیانه r)، Tel تعداد ساعات معادل تلفات سالیانه، و LCy هزینه تلفات سالیانه هستند. γ نیز نرخ تنزیل می‌باشد. قیمت برق نیز از بازارهای برق به دست می‌آید.

قیود این مسئله شامل قیود پخش بار شبکه (قید ولتاژ و بارگذاری خطوط انتقال) و نیز قید ارزیابی خروج یک خط از شبکه (N-1) هستند.

۱.۳ بکارگیری الگوریتم رقابت استعماری در حل مساله برنامه ریزی چند مرحله ای توسعه خطوط انتقال

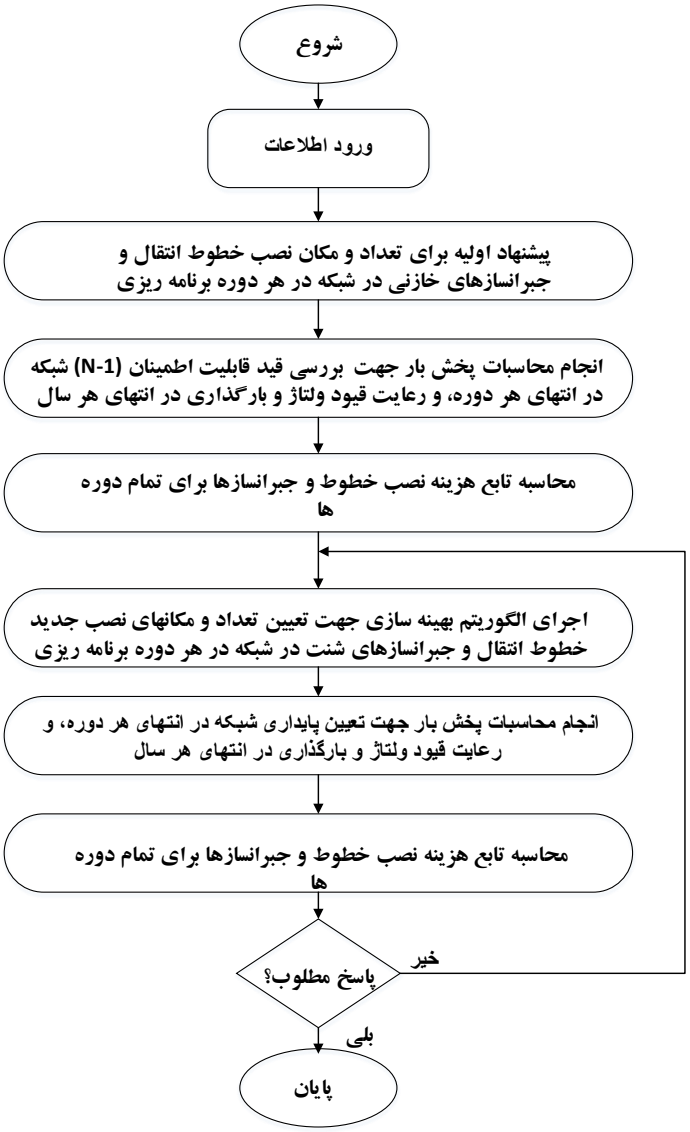
ترکیب یک استعمارگر و چند مستعمره یک امپراطوری را شکل می‌دهد. قدرت در هر امپراطوری نیز مبتنی بر دو جزء تشکیل دهنده آن، یعنی استعمارگر و مستعمره‌ها می‌باشد که جهت تعریف در روابط ریاضی، این قدرت بصورت حاصل جمع قدرت استعمارگر و ضریبی از مجموع قدرت مستعمره‌ها تعریف می گردد. رقابت میان استعمارگران نیز با شکل‌دهی امپراطوری‌ها شروع می گردد. استعمارگران پرقدرت تر همیشه بدنبال جذب مستعمره‌های بیشتر و گسترش امپراطوری خود خواهند بود و در مقابل، امپراطوری‌هایی که در رقابت استعماری متحمل شکست شده و مستعمره خود را از دست دهند، از گردونه رقابت حذف خواهند شد. در نتیجه بقای هر امپراطوری در توانایی آن در جذب مستعمره‌های سایر امپراطوری‌ها خواهد بود. بر این اساس قدرت امپراطوری‌های بزرگتر در رقابت میان استعمارگران بمرور افزایش یافته و امپراطوری‌های کوچک در صورت از دست دادن مستعمره-های خود، ضعیفتر خواهند شد و در نهایت با ترک آخرین مستعمره، استعمارگر خود به مستعمره‌ای تبدیل می گردد[۲۴] و [۲۵]. شکل ۱ شمای کلی الگوریتم ICA[1] را نشان می‌دهد.



شکل ۱–شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری

[1] Imperialist Competitive Algorithm

شکل ۲ نیز فلوچارت حل مسأله برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه خطوط انتقال را با لحاظ جبرانسازهای شنت نشان می‌دهدکه با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی قابل پیاده‌سازی است. براساس این فلوچارت، ابتدا چندین پاسخ اولیه (شامل تعدادی خطوط و جبرانساز) بصورت رندوم در هر مرحله از برنامه ریزی جهت اضافه شدن به شبکه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردند. سپس مطالعات پخش بار بر روی شبکه انجام شده و مقادیر ولتاژ باس‌ها، توان عبوری از خطوط و تلفات شبکه محاسبه می‌گردند. بعد از این مرحله، هزینه نصب خطوط و جبرانسازها در انتهای هر دوره محاسبه شده و برای هر پاسخ یک هزینه (مجموع هزینه‌های تلفات و نصب تجهیزات) اطلاق می‌گردد. پس از این مرحله، پروسه بهینه‌سازی توسط الگوریتم رقابت استعماری (که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفت)، آغاز می‌گردد. با ایجاد هر پاسخ جدید و یا هر تغییر در وضعیت پاسخ‌ها، مجددا محاسبات پخش بار انجام شده و هزینه تلفات و نصب تجهیزات هم مجددا محاسبه می‌گردند. این پروسه تا برآورده شدن شرط خاتمه (رسیدن به یک حد مشخصی از تکرار در الگوریتم بهینه‌سازی) ادامه خواهد یافت و در نهایت، پاسخی با کمترین هزینه به عنوان پاسخ مطلوب انتخاب می‌شود.



شکل ۲-فلوچارت حل مسأله برنامه ریزی چند مرحله ای توسعه خطوط انتقال

۴. شبکه مورد مطالعه

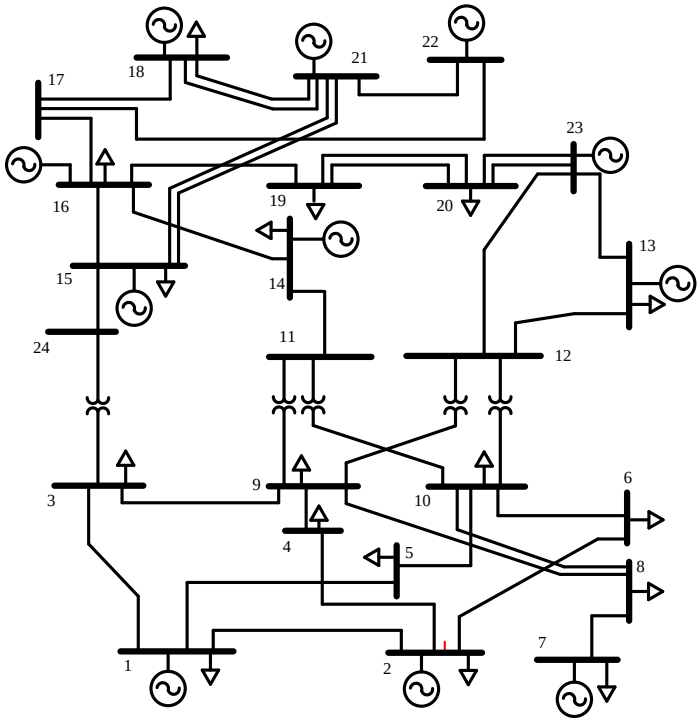
در این پروژه، نتایج مطالعات بر روی شبکه ۲۴ باس استاندارد IEEE موردبررسی قرار می‌گیرند. شبکه فوق متشکل ۳۲ ژنراتور است که وظیفه تأمین باری به میزان ۳۴۰۵ مگاوات را بر عهده‌دارند. خطوط فعلی شبکه شامل ۳۴ خط هوایی و کابل می‌باشند. شکل ۳ شبکه موردمطالعه را نشان می‌دهد. خطوط قسمت پایین شبکه از نوع ۱۳۸ کیلوولت و خطوط قسمت بالای شبکه از نوع ۲۳۰ کیلوولت می‌باشند. انجام مطالعات پخش بار این شبکه نشان می‌دهد که خطوط انتقال در قسمت پایین شبکه بیشتر در معرض اضافه بار و کاهش ولتاژ هستند. دلیل این وضعیت وجود بارهای قابل ملاحظه و نیز خطوط تک مداره است. لذا قابل پیش بینی است که در آینده و با افزایش رشد بار، شبکه در این قسمت با مشکل مواجه خواهد شد. بر اساس مطالعات مشابه، برای بهبود وضعیت شبکه و جلوگیری از مشکلات ناپایداری احتمالی، احداث خطوط جدید به‌صورت گزینه‌های زیر پیشنهاد می‌گردند:

خطوط تک مداره به خطوط دو یا سه مداره ارتقا یابند

خطوط دو مداره به خطوط سه مداره ارتقا یابند

خطوط تک مداره، دو مداره و یا سه مداره جدید نصب گردند

که تعداد خطوط کاندید برای اضافه شدن به شبکه برابر ۴۱ خط است که ۳۴ خط موجود و ۷ مسیر جدید می باشند. مشخصات خطوط موجود و جدید برای احداث در جداول ۶ و ۷ پیوست آمده است.



شکل ۳- شبکه ۲۴ باس استاندارد IEEE

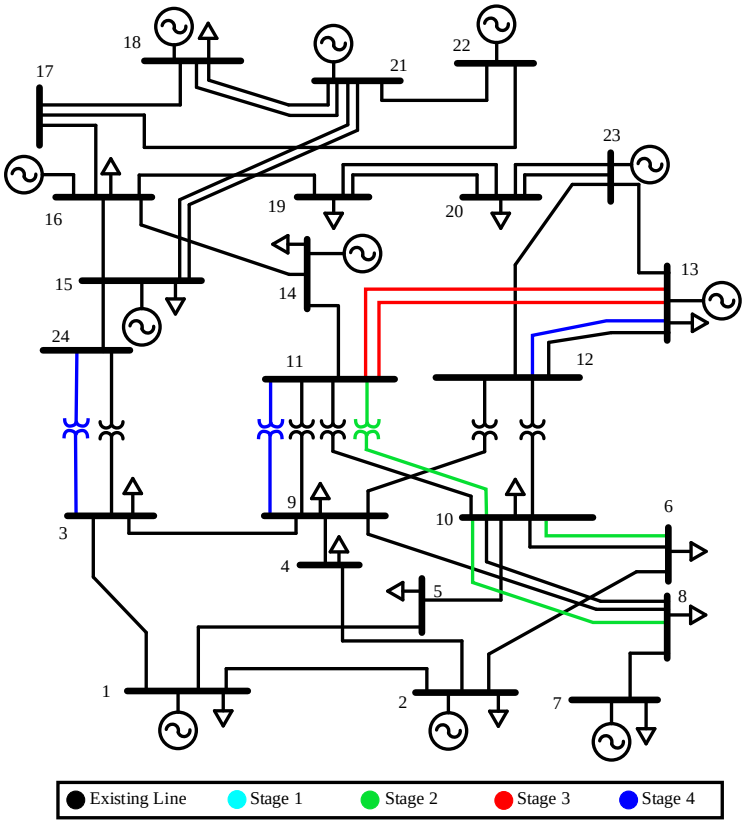
۵. شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش شبیه‌سازی بر روی شبکه ۲۴ باس استاندارد IEEE انجام می‌گیرد. افق زمانی برنامه‌ریزی ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود که شامل ۴ دوره ۵ ساله است. هزینه نصب خطوط یک‌میلیون دلار به ازای هر مایل در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. مقدار $Tel_{,y}$ برابر با ۴۸۹۷/۹ و قیمت برق (بر اساس قیمت در بازار خرده‌فروشی سال ۲۰۱۰ در امریکا) نیز ۹۸/۲ دلار به ازای هر مگاوات خواهد بود [۲۶]. نرخ تورم سالیانه نیز ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مدل پیشنهادی در این بخش، خطوط پیشنهادی در ابتدای هر دوره در مکان‌های مدنظر نصب‌شده و سپس مطالعات پخش بار و قابلیت اطمینان بر روی شبکه جدید انجام می‌شود. بر این اساس، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری، مسئله مدنظر در دو وضعیت با و بدون در نظر گرفتن معیار قابلیت اطمینان N-1 حل‌شده است. در تمامی سناریوهای تعداد مستعمره‌ها و تعداد استعمارگران نیز به ترتیب ۲۰ و ۴ انتخاب می‌گردند.عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی نیز به نحوی خواهد بود تا درمجموع ۴ دوره، هزینه نصب و تلفات شبکه با و بدون در نظر گرفتن جبران سازهای خازنی حداقل گردد.

۱.۵ سناریوی اول

شکل۴ وضعیت شبکه را در انتهای افق زمانی ۲۰ ساله بدون در نظر گرفتن جبران سازهای خازنی و نیز بدون معیار قابلیت اطمینان نشان می‌دهد. جدول ۲ خطوط پیشنهادی جهت نصب در ابتدای هر دوره و نیز هزینه نصب خطوط را با و بدون در نظر گرفتن معیار N-1 نشان می‌دهند. با توجه به نتایج برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای بدون معیار N-1، الگوریتم هیچ خطی را مرحله اول پیشنهاد نمی‌دهد. در مرحله دوم، الگوریتم سه خط را جهت نصب بین باس‌های ۶ و ۱۰، ۸ و ۱۰ و نیز باس‌های ۱۰ و ۱۱ پیشنهاد می‌دهد (رنگ سبز). در مرحله سوم و در آغاز سال دهم بهره‌برداری از شبکه، دو خط موازی در باس‌های ۱۱ و ۱۳ پیشنهاد می‌گردند تا شبکه در حالت نرمال به کارکرد خود ادامه دهد (رنگ قرمز). در ابتدای دوره چهارم نیز ۳ خط مابین باس‌های ۳ و ۲۴، ۹ و ۱۱ و نیز ۱۲ و ۱۳ پیشنهاد می‌گردند که بهره‌برداری پایدار از شبکه را تا انتهای سال بیستم تضمین می‌نمایند. به‌طور مشابه، شکل ۵ نیز خطوط پیشنهادی جهت نصب در شبکه مدنظر را با لحاظ معیار N-1 نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج، به ترتیب ۲، ۴ و ۳ خط جهت نصب در دوره دوم، سوم و چهارم نصب‌شده‌اند. حضور این خطوط تضمین می‌نماید که چنانچه در طول ۲۰ سال آینده خطای دائمی در شبکه رخ دهد، شبکه به‌صورت عادی بکار خود ادامه خواهد داد.



شکل ۰٤ برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه خطوط انتقال بدون لحاظ معیار N-1

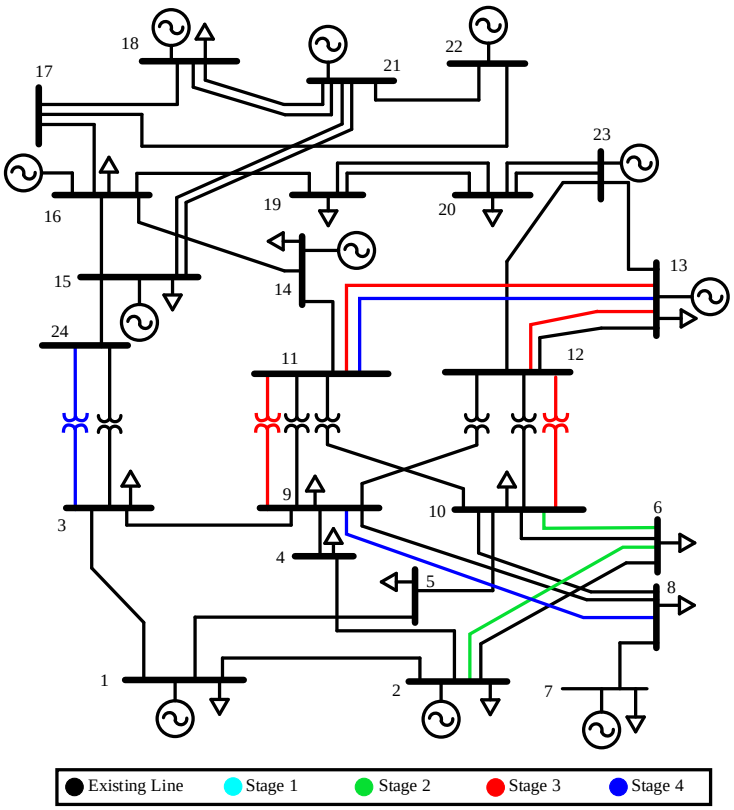
جدول ۱-هزینه نصب خطوط و تلفات در سناریوی اول

هزینه	برنامه‌ریزی توسعه خطوط بدون لحاظ معیار N-1	برنامه‌ریزی توسعه خطوط با لحاظ معیار N-1
هزینه نصب خطوط جدید (میلیون دلار)	۲۴۶/۲۹	۲۷۰/۶
هزینه تلفات	۴۰۴/۲۶	۴۰۹/۴
هزینه کل	۶۵۰/۵۵	۶۸۰

جدول ۲-خطوط پیشنهادی جهت نصب در شبکه در سناریوی اول

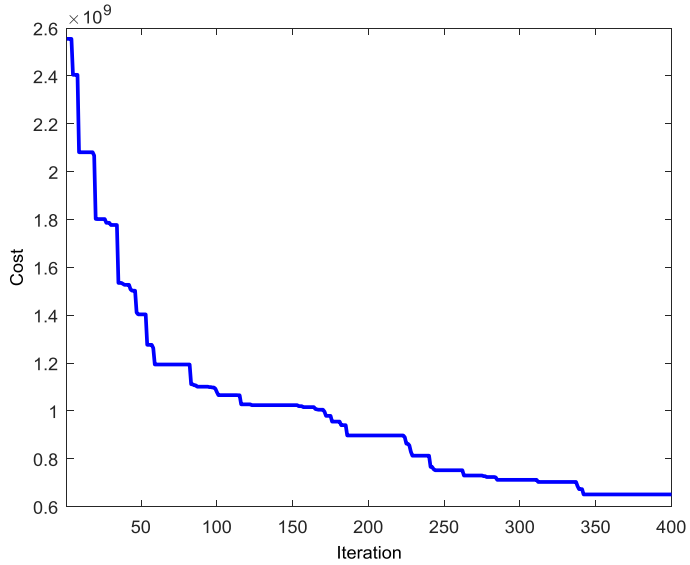
	خطوط جدید بین باس i و باس j بدون لحاظ معیار N-1	تعداد	خطوط جدید بین باس i و باس j با لحاظ معیار N-1	تعداد
خطوط پیشنهادی در مرحله اول	–	۱ ۱	–	–
خطوط پیشنهادی در مرحله دوم	۶-۱۰ ۸-۱۰ ۱۰-۱۱	۱ ۱ ۱	۲-۶ ۶-۱۰	۱۱
خطوط پیشنهادی در مرحله سوم	۱۱-۱۳	۲	۹-۱۱ ۱۰-۱۲ ۱۱-۱۳ ۱۲-۱۳	۱ ۱ ۱ ۱
خطوط پیشنهادی در مرحله چهارم	۳-۲۴ ۹-۱۱ ۱۲-۱۳	۱ ۱ ۱	۳-۲۴ ۸-۹ ۱۱-۱۳	۱ ۱ ۱

با توجه نتایج جدول ۱، هزینه کلی در برنامه‌ریزی بدون لحاظ معیار N-1 حدود ۶۵۰ میلیون دلار (شامل ۲۴۶ میلیون دلار هزینه نصب خطوط جدید و نیز ۴۰۴ میلیون دلار هزینه تلفات ۲۰ ساله) به‌دست‌آمده هست. در برنامه‌ریزی با لحاظ معیار N-1 نیز هزینه نصب خطوط ۲۷۰ میلیون، هزینه تلفات ۴۰۹ میلیون و مجموع هزینه‌ها ۶۸۰ میلیون دلار به‌دست‌آمده هست. اختلاف ۳۰ میلیون دلاری در دو برنامه‌ریزی صورت گرفته بیانگر هزینه لازم جهت تأمین قابلیت اطمینان شبکه در صورت وقوع یک خطای دائم است.

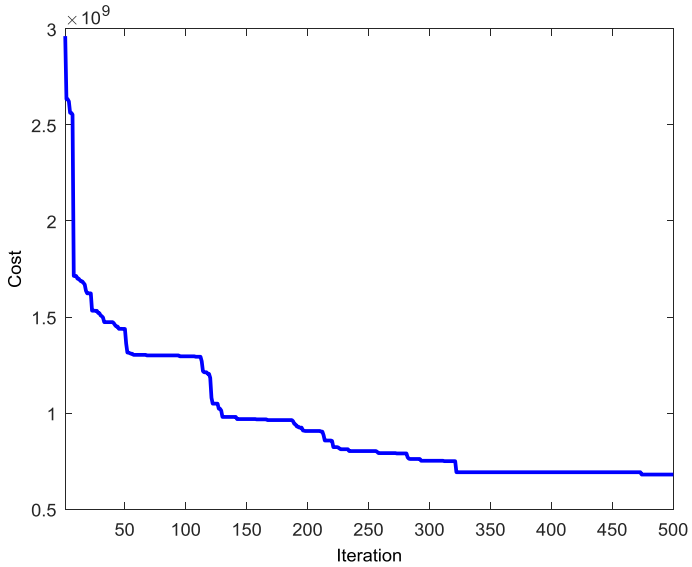


شکل ۵- برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه خطوط انتقال با لحاظ معیار N-1

منحنی همگرایی تابع هزینه سناریوی اول با و بدون در نظر گرفتن معیار N-1 در شکل ۶ و ۷ نشان داده می‌شوند.



شکل ٦-منحنی همگرایی تابع هزینه سناریوی اول بدون در نظر گرفتن معیار N-1

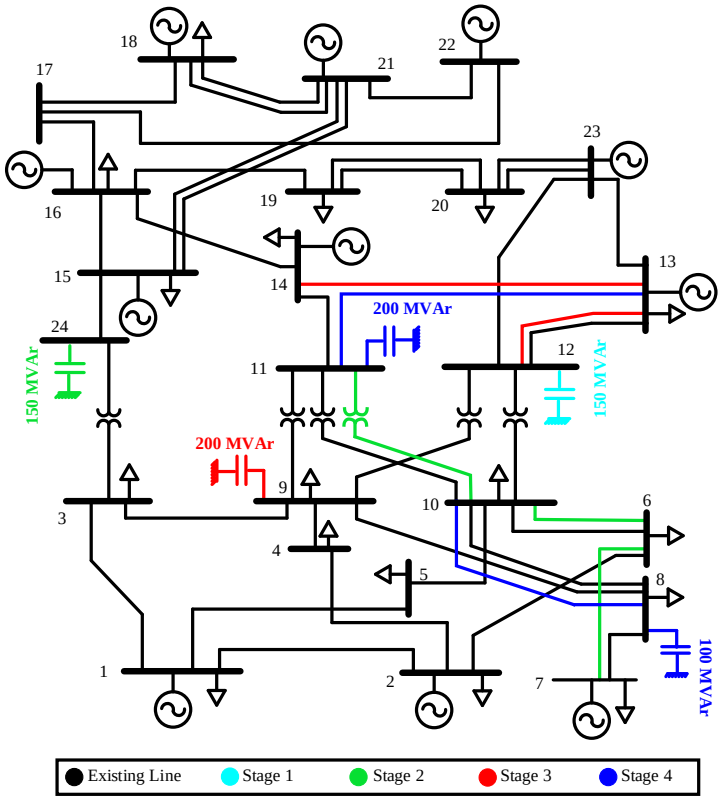


شکل ۷-منحنی همگرایی تابع هزینه سناریوی اول با در نظر گرفتن معیار N-1

۱.۵ سناریوی دوم

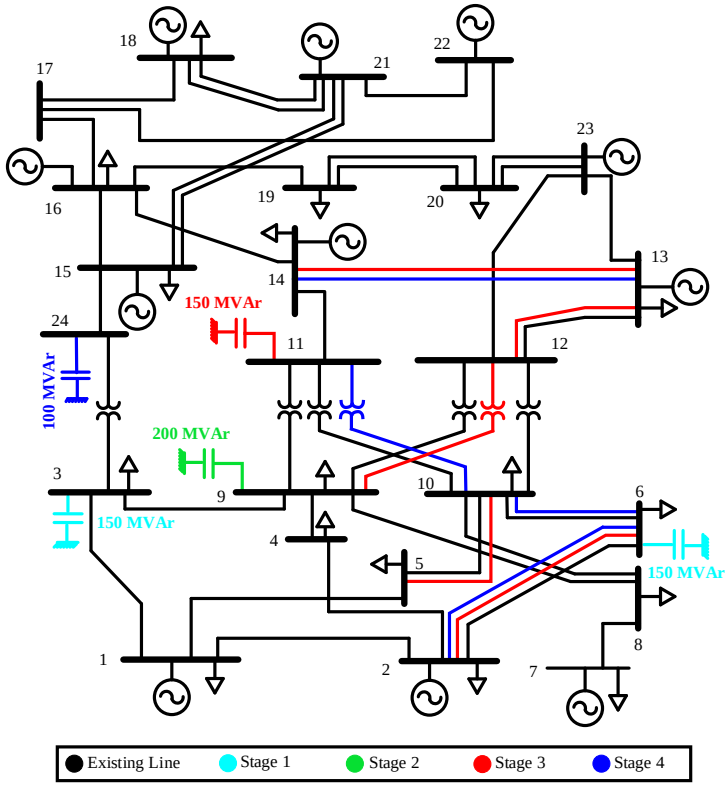
در این سناریو جبران سازهای خازنی شنت نیز قادر خواهند بود در ابتدای هر دوره‌ای به شبکه اضافه گردند. الگوریتم می‌تواند جبران سازهایی به ظرفیت ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاوار را جهت نصب در هر باس شبکه پیشنهاد دهد. همانند سناریو، قبل نتایج برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای با و بدون در نظر گرفتن معیار قابلیت اطمینان (N-1) ارائه می‌گردند.

شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی بدون لحاظ معیار N-1 را نشان می‌دهد. بر این اساس، برای دوره اول برنامه‌ریزی، یک جبران ساز خازنی به ظرفیت ۱۵۰ مگاوار جهت نصب در باس ۱۲ پیشنهادشده است. در مرحله دوم برنامه‌ریزی نیز سه خط بین باس‌های ۱۰ و ۶، بین باس‌های ۸ و ۷ و نیز بین باس‌های ۱۰ و ۱۱ و یک جبران ساز به ظرفیت ۱۵۰ مگاوار در باس ۲۴ پیشنهادشده‌اند. همچنین، الگوریتم بهینه‌سازی ۲ خط را جهت نصب بین باس‌های ۱۲ و ۱۳ و نیز ۱۳ و ۱۴ پیشنهاد داده است. در همین مرحله، یک جبران ساز به ظرفیت ۲۰۰ مگاوار جهت نصب در باس ۹ پیشنهاد می‌گردد. در مرحله آخر نیز دو خط بین باس‌های ۸ و ۱۰ و نیز باس‌های ۱۳ و ۱۱ پیشنهادشده‌اند. بر همین اساس، دو جبران ساز خازنی به ظرفیت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاوار در باس‌های ۸ و ۱۱ باید نصب گردند.



شکل ۸-برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه خطوط با در نظر گرفتن جبران ساز شنت و بدون لحاظ معیار N-1

شکل ۹ نیز نتایج مربوط به برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال با حضور عناصر جبران ساز و بدون لحاظ معیار N-1 را نشان می‌دهد. در این حالت، ۵ خط در مرحله سوم و ۴ خط در مرحله چهارم پیش‌بینی‌شده‌اند. همچنین، دو جبران ساز در مرحله اول، یک جبران ساز در هر یک از مراحل دوم تا چهارم پیشنهادشده‌اند.



شکل ۹-برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه خطوط انتقال با در نظر گرفتن جبران ساز شنت و با لحاظ معیار N-1

نتایج مربوط به تعداد خطوط و جبران سازهای نصب‌شده در هر مرحله و نیز هزینه سرمایه‌گذاری و تلفات در برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای خطوط انتقال (با و بدون لحاظ معیار N-1) در جداول ۳ تا ۵ نشان داده می‌شوند. با توجه به نتایج در برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای بدون لحاظ معیار N-1، هزینه نصب خطوط حدود ۲۱۶ میلیون دلار، هزینه نصب جبران سازها ۲۲ میلیون دلار، هزینه تلفات ۴۰۱ میلیون دلار، و مجموع هزینه‌ها ۶۳۹ میلیون دلار برآورد می‌گردد. در برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای با لحاظ N-1 نیز به ترتیب ۲۳۰/۷ میلیون دلار و ۲۵ میلیون دلار هزینه نصب خطوط و جبران سازهای شنت خواهد بود. هزینه تلفات ۴۰۰ و هزینه مجموع نیز ۶۵۶ میلیون دلار برآورد می‌گردد.

جدول ۳-هزینه نصب خطوط، جبران ساز شنت و تلفات در سناریوی دوم

هزینه	برنامه‌ریزی توسعه خطوط بدون لحاظ معیار N-1	برنامه‌ریزی توسعه خطوط با لحاظ معیار N-1
هزینه نصب خطوط جدید (میلیون دلار)	۲۱۶	۲۳۰/۷
هزینه نصب جبران سازهای شنت جدید (میلیون دلار)	۲۲/۳	۲۵
هزینه تلفات	٤۰۱	٤۰۰/۳
هزینه کل	٦۳۹/۳	٦٥٦

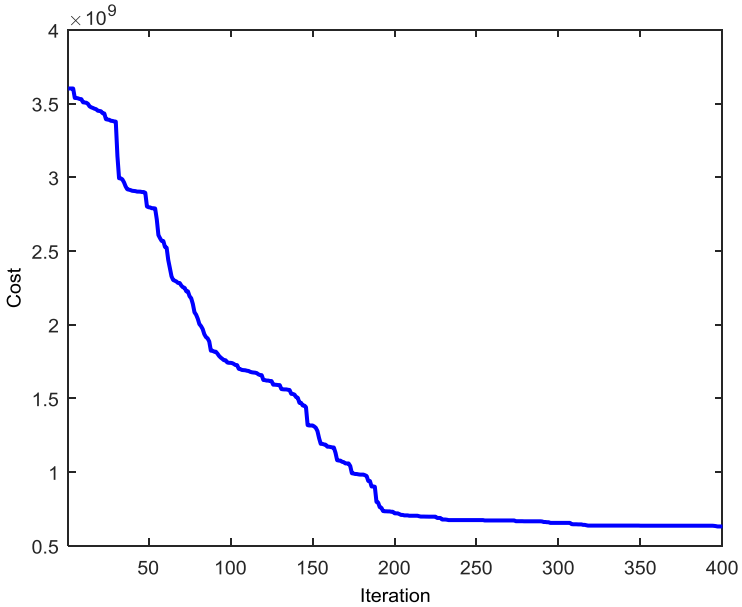
جدول ٤-خطوط پیشنهادی جهت نصب در شبکه در سناریوی دوم

	خطوط جدید بین باس i و باس j بدون لحاظ معیار N-1	تعداد	خطوط جدید بین باس i و باس j با لحاظ معیار N-1	تعداد
خطوط پیشنهادی در مرحله اول	–	-	–	–
خطوط پیشنهادی در مرحله دوم	٦–۱۰	۱	–	–
	۷–۸	۱	–	–
	۱۰–۱۱	۱	–	–
خطوط پیشنهادی در مرحله سوم		۱	۲–٦	۱
	۱۳–۱۲	۱	۱۰–۵	۱
	۱٤–۱۳	۱	۱۲–۹	۱
	–	–	۱۳–۱۲	۱
	–	–	۱٤–۱۳	۱
خطوط پیشنهادی در مرحله چهارم	۸–۱۰	۱	۲–٦	۱
	۱۳–۱۱	۱	۱۰–٦	۱
	–	–	۱۱–۱۰	۱
	–	–	۱٤–۱۳	۱

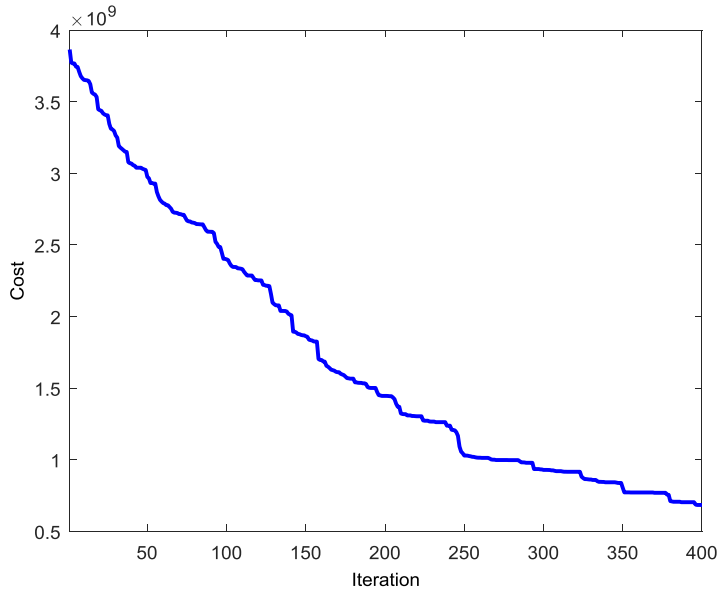
جدول ۵-جبران سازهای شنت پیشنهادی جهت نصب در شبکه در سناریوی دوم

	جبران سازهای قابل‌نصب با لحاظ معیار N-1	ظرفیت (مگاوار)	جبران سازهای قابل‌نصب با لحاظ معیار N-1	ظرفیت (مگاوار)
جبران سازهای پیشنهادی در مرحله اول	باس ۱۲	۱۵۰	باس ۳ باس ٦	۱۵۰ ۱۵۰
جبران سازهای پیشنهادی در مرحله دوم	باس ۲٤	۱۵۰	باس ۹	۲۰۰
جبران سازهای پیشنهادی در مرحله سوم	باس ۹	۲۰۰	باس ۱۱	۱۵۰
جبران سازهای پیشنهادی در مرحله چهارم	باس ۸ باس ۱۱	۱۰۰ ۲۰۰	باس ۲٤	۱۰۰

منحنی همگرایی تابع هزینه سناریوی دوم با و بدون در نظر گرفتن معیار N-1 در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده می‌شوند.



شکل ۱۰- منحنی همگرایی تابع هزینه سناریوی دوم بدون در نظر گرفتن معیار N-1



شکل ۱۱-منحنی همگرایی تابع هزینه سناریوی دوم با در نظر گرفتن معیار N-1

۶. نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال از مهم‌ترین مسائل صنعت برق است که به دلیل جایگاه بسیار حیاتی خطوط در انتقال حجم وسیعی از انرژی از منابع به مصرف‌کنندگان، همواره موردتوجه بهره‌برداران صنعت برق و نیز محققین این صنعت بوده است. به دلیل چالش‌های پیش روی بهره‌برداران شبکه‌های الکتریکی در احداث خطوط انتقال جدید (از قبیل موانع اقتصادی، جغرافیایی، فنی، اجتماعی و زیست‌محیطی)، محققین به دنبال یافتن راهکارهای نوینی هستند تا ضمن غلبه بر چالش‌های فوق، نیاز مصرف‌کنندگان را در یک بازه زمانی طولانی‌مدت تعیین نمایند. یکی از جذاب‌ترین ایده‌ها در حل مسئله برنامه‌ریزی استاتیک و چندمرحله‌ای توسعه خطوط انتقال به‌کارگیری جبران سازهای خازنی شنت است که در این مطالعه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

که بر اساس کامل‌ترین مدل پیشنهادی در برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای، الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری این اجازه را داشته است تا در یک افق زمانی ۲۰ ساله، خطوط و جبران سازها را در ابتدای هر یک از ۴ دوره ۵ ساله نصب نماید، به‌نحوی‌که قیود پخش بار و قابلیت اطمینان رعایت شده و تقاضای مصرف‌کنندگان را نیز تأمین گردد. در این وضعیت، هزینه نصب خطوط ۲۳۰/۷ میلیون دلار، هزینه نصب جبران ساز شنت ۲۵ میلیون دلار و هزینه تلفات نیز ۴۰۰/۳ میلیون دلار برآورد شد. مجموع هزینه‌ها نیز ۶۵۶ میلیون دلار محاسبه گردید.

ارزیابی نتایج سایر سناریوها با سناریوی کامل نشان می‌دهد که حضور جبران سازهای شنت نه‌تنها با کاهش هزینه‌ها قادر به تأمین کلیه قیود و نیاز مصرف‌کنندگان هست، همچنین می‌تواند به میزان فراوانی از نصب خطوط زیاد جلوگیری نمایید. چنین مزیتی باعث می‌شود تا بهره‌برداران شبکه دیگر با چالش‌های مربوط به محدودیت‌های جغرافیایی و فنی و اقتصادی و غیر نشوند و با عناصر ساده‌تری مانند جبران سازهای شنت، به همان اهداف مدنظر خود در برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال دست یابند. در انتها می‌توان نتیجه گرفت که حضور جبران سازها در برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال قطعاً به شرایط و پاسخ‌های بهتری برای شبکه و بهره‌برداران منتج می‌گردد.

۷. پیوست

جدول ٦-اطلاعات خطوط شبکه ٢٤ باس استاندارد IEEE

Bus(from)	Bus(to)	Distance(mile)	R(pu)	X(pu)	Capacity(MW)
1	2	3	0.0026	0.139	175
1	3	55	0.054	0.2112	175
1	5	22	0.0218	0.0845	175
2	4	33	0.0328	0.1267	175
2	6	50	0.0497	0.192	175
3	9	31	0.0308	0.119	175
3	24	50	0.0023	0.0839	400
4	9	27	0.0263	0.1037	175
5	10	23	0.0228	0.0883	175
6	10	16	0.0139	0.0026	175
7	8	16	0.0159	0.0614	175
8	9	43	0.0427	0.1651	175
8	10	43	0.0427	0.1651	175
9	11	50	0.0023	0.0839	400
9	12	50	0.0023	0.0839	400
10	11	50	0.0023	0.0839	400
10	12	50	0.0023	0.0839	400
11	13	33	0.0061	0.0476	500
11	14	29	0.0054	0.0418	500
12	13	33	0.0061	0.0476	500
12	23	67	0.0124	0.0966	500
13	23	60	0.0111	0.0865	500
14	16	27	0.005	0.0389	500
15	16	12	0.0022	0.0173	500
15	21	34	0.0063	0.049	500
15	24	36	0.0067	0.0519	500
16	17	18	0.0033	0.0259	500
16	19	20	0.003	0.0231	500
17	18	10	0.0018	0.0144	500
17	22	73	0.0135	0.1053	500
18	21	18	0.0033	0.0259	500
19	20	27.5	0.0051	0.0396	500
20	23	15	0.0028	0.0216	500
21	22	47	0.0087	0.0675	500

جدول ۷- اطلاعات خطوط پیشنهادی قابل‌نصب در شبکه ۲۴ باس استاندارد IEEE

Bus(from)	Bus(to)	Distance(mile)	R(pu)	X(pu)	Capacity(MW)
1	8	35	0.034	0.134	175
2	8	330	0.032	0.126	175
6	7	50	0.049	0.192	175
13	14	62	0.005	0.044	500
14	23	86	0.008	0.062	500
16	23	114	0.01	0.082	500
19	23	84	0.007	0.06	500

۸. مراجع

1. M. O. Buygi, “Transmission expansion planning in deregulated power systems,” Ph.D. Dissertation, Darmstadt University ofTechnology, Darmstadt, Germany, 2004
2. Lee, C. W., Ng, S. K. K., Zhong, J., Wu, F. F.: Transmission Expansion Planning From Past to Future. In: Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006, pp. 257-265. IEEE PES 2006.
3. A. R. Abdelaziz, “Genetic Algorithm Based Power Transmission Expansion Planning,” The 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, vol. 2, pp.642-645, Dec. 2000.
4. V. A. Levi, and M. S. Calovic, “Linear Programming Based Decomposition Method for Optimal Planning of Transmission Network Investments,” IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol 140, No. 6 pp. 516-522, Nov. 1993.
5. S. Binato; G. C. de Oliveira, and J. L. de Araujo, “A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning,” IEEE Transaction on Power System , vol. 16, No. 2, pp. 247- 253, May 2001.
6. I. D. J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, and C. A. Murari, “Transmission Expansion Network Planning Considering Uncertainness in Demand,” IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, pp. 1424-1429, June 2005.
7. [10] S. Binato, M. V. F. Periera, and S. Granville, “A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems,” IEEE Transaction on Power Systems, vol.16, Issue 2, pp. 235-240, May 2001.
8. R. Romero, and A. Monticelli, “A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning,” IEEE Trans on Power Systems., vol. 9, pp. 373-380, Feb. 1994
9. STY. Lee, K. L. Hocks, and H. Hnyilicza, “Transmission Expansion of Branch and Bound Integer Programming with Optimal Cost Capacity Curves,” IEEE, Trans. on PAS, vol. PAS-93, pp. 1390-1400, Aug. 1970.
10. R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, “Transmission system expansion planning by simulated annealing,” IEEE Trans. on Power Systems, vol. 11, pp. 364-369, Feb. 1996.
11. A. Gallego, R. Romero, and A. Monticelli, “Tabu search algorithm for network synthesis,” IEEE Trans. on Power System, vol. 15, pp. 490 -495, May 2000.
12. K. J. Kim, Y. M. Park, and K. Y. Lee, "Optimal long term transmission expansion planning based on maximum principle", IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, pp.1494 -1501 1988.
13. H. K. Youssef and R. Hackam, "New transmission planning model", IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp.9 -18 1989.
14. A. El-Abiad and Y. Dusonchet, "Discrete optimization and the planning of electric power networks," Circuit Theory, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 230-238, 1973.
15. X. Wang and Y. Mao, "Improved genetic algorithm for optimal multistage transmission system planning," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., 2001, pp. 1737-1742 vol. 3.
16. J. Fonseca and V. Miranda"A hybrid, meta-heuristic algorithm for transmission expansion planning", Int. J. Comput. Math. Elect. Electron. Eng., vol. 23, no. 1, pp.250 -262 2004.
17. D.J. Gotham and G.T. Heydt. “Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices”. Power Systems, IEEE Transactions on, 13(1):60–65, 1998.
18. Fuerte-Esquivel, C.R. ; Acha, E. ; Tan, S.G. ; Rico, J.J. “Efficient object oriented power systems software for the analysis of large-scale networks containing FACTS-controlled branches” Power Systems, IEEE Transactions on. ,Volume: 13 , Issue: 2, 1998.
19. R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, S.O. Faried, and S. Aboreshaid, “Impact of unified power flow controllers on power system reliability,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no.1, pp. 410 – 415, 2000.
20. C. Vasavi, T, Gowri Manohar, “Facts Placement For Maximum Power Transfer Capability Stability in a Transmission Line”, International Journal of Computational Research (ijceronline.com) Vol.2 Issue. 7.2012.
21. A. Farhangfar, S. Afsharnia, and S.J. Sajjadi, "Power Flow Control and Loss Minimization with Unified Power Flow Controller (UPFC)", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE), 2004.

22. Ghahremani, E.; Kamwa, I.,” Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface”, Power Systems, IEEE Transactions on Volume: 28, Issue: 2, 2013.
23. Ghahremani, E.; Kamwa, I.,” Maximizing transmission capacity through a minimum set of distributed multi-type FACTS”, Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE.
24. E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, IEEE Congress on Evolutionary Computation.
۲۵. آتش پز گرگری، «توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن»، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
26. Zhang, Fang & Hu, Zechun & Song, Yonghua. (2013). Mixed-integer linear model for transmission expansion planning with line losses and energy storage systems. Generation, Transmission & Distribution, IET. 7. 919-928. 10.1049/iet-gtd.2012.0666.

Pardis Int.

پردیس بین الملل توسعه ایده هزاره

بسمه تعالی

گواهی نامه

پژوهشگر گرامی جناب آقای / سرکار خانم **محمود مخدوم زاده توده**

کد رهگیری: ECIE20182014

بدین وسیله گواهی می شود که مقاله شما با عنوان

برنامه ریزی چند مرحله ای توسعه خطوط انتقال شبکه های الکتریکی در حضور منابع توان راکتیو

که به چهارمین کنفرانس ملی مهندسی برق کامپیوتر و فناوری اطلاعات . ارسال گردیده بود پس از ارزیابی توسط کمیته علمی داوران حائز شرایط لازم جهت ارائه و درج در مجموعه مقالات کنفرانس تشخیص داده شده است . ضمن تبریک پذیرش این مقاله ، سلامتی و توفیق روز افزون شما را از درگاه ایزد منان خواستاریم

دبیرخانه کنفرانس