

برنامه‌ریزی توسعه هم‌زمان سیستم‌های تولید و انتقال انرژی برای بار چندسطحی با در نظر گرفتن محدودیت سطح اتصال کوتاه

مهدی نجار^۱، دانشجوی دکتری؛ حمید فلقی^۲، دانشیار؛ سیدهادی حسینی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mehdinajjar@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - falaghi@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - hhosseini@znu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه هم‌زمان سیستم‌های تولید و انتقال انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن امنیت سیستم و با استفاده از برنامه‌ریزی خطی ترکیبی اعداد صحیح (MILP^۱) معرفی شده و هزینه تولید نیروگاه‌ها و سرمایه‌گذاری تجهیزات کاهش داده شده است. به این ترتیب که پخش بار بهینه برای بارهای مختلف به روابط اصلی اضافه می‌شود و محدودیت ظرفیت خطوط انتقال برای انجام پخش بار اقتصادی بین نیروگاه‌ها در بارهای مختلف برطرف می‌شود. در نتیجه هزینه تولید انرژی کاهش می‌یابد. همچنین محدودیت سطح اتصال کوتاه با استفاده از روش ابتکاری و بدون استفاده از تقریب و خطی‌سازی در نظر گرفته شده است. با کاهش سطح اتصال کوتاه، هزینه سرمایه‌گذاری پست‌ها و خطوط کاهش می‌یابد. امنیت N-1 نیز، در مسئله اصلی و در قالب روابط خطی ارزیابی شده است. روش ارائه شده برای شبکه ۶ شینه کارور و شبکه ۲۴ شینه IEEE با استفاده از نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ اجرا شده است. نتایج با سایر مقالات مقایسه شده و کارایی روش پیشنهادی نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی هم‌زمان، سیستم‌های تولید و انتقال، سطوح مختلف بار، سطح اتصال کوتاه، امنیت سیستم، برنامه‌ریزی خطی ترکیبی اعداد صحیح

Coordinated Generation and Transmission Expansion Planning with Short Circuit Level Constraint and Multi-Level Loads

M. Najjar¹, PhD Student; H. Falaghi², Associate Professor; S. H. Hosseini³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mehdinajjar@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: falaghi@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: hhosseini@znu.ac.ir

Abstract- This paper proposes a novel approach for coordinated generation, transmission expansion planning with MILP formulation considering security analysis and the cost of generation of the power plants and the investment cost of substations are reduced. Optimal power flow is considered for different load levels and the transmission lines do not limit the optimal power flow. Therefore, the cost of generations will be decreased. Accordingly, short circuit level constraint is considered by a hierarchical approach. Thus, the investment cost of substations is decreased. In addition, N-1 security is taken into account in the main problem with MILP formulation. The proposed approach is applied to Garver 6-bus and IEEE 24-bus test systems in MATLAB and the results are compared with the other papers and show good performance of the proposed approach.

Keywords: Coordinated GEP and TEP, multi-level load, short circuit level, security analysis, mixed integer linear programming (MILP).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۴

نام نویسنده مسئول: حمید فلقی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

فهرست علائم

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت شامل پیش‌بینی بار، جایابی پست، برنامه‌ریزی توسعه سیستم تولید (GEP^۲) و برنامه‌ریزی توسعه سیستم انتقال (TEP^۳) است. همه این مراحل را نمی‌توان در قالب یک مسئله حل نمود اما برنامه‌ریزی تولید و انتقال وابستگی زیادی به هم دارند و با توجه به سرمایه‌گذاری فراوان در بخش‌های تولید و انتقال، جهت رسیدن به پاسخ بهینه، باید برنامه‌ریزی تولید و انتقال انرژی الکتریکی هم‌زمان انجام شود. در برخی از مقالات، برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید و انتقال [۵-۱] و در برخی فقط برنامه‌ریزی انتقال انجام شده است [۶، ۷]. در [۱]، ابتدا GEP با استفاده از روش BD^۴ (تجزیه بندرز) حل شده است و سپس براساس پاسخ به‌دست‌آمده، TEP با روش BD حل شده و این فرآیند تا رسیدن به هماهنگی موردنظر تکرار شده است. در این مرجع، مکان و ظرفیت بهینه نیروگاه‌های بادی تعیین شده و سایر نیروگاه‌ها ثابت فرض شده‌اند. در [۲]، GEP و TEP به روش MILP حل شده است. در این مرجع، چندین متغیر باینری جهت خطی‌سازی تعریف شده و قابلیت اطمینان سیستم در مسئله جداگانه‌ای بررسی شده است. بررسی جداگانه قابلیت اطمینان، پاسخ را از حالت بهینه دور می‌کند. در [۳]، هماهنگی TEP، GEP و شبکه‌های کوچک محلی به روش BD انجام شده و قابلیت اطمینان سالانه در مسئله فرعی بررسی شده است. در [۴]، برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید و انتقال با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان با روش MILP انجام شده است. در این مرجع از خطی‌سازی و ساده‌سازی استفاده شده است و جهت لحاظ نمودن قابلیت اطمینان، جریمه امید ریاضی انرژی تامین‌نشده در تابع هدف در نظر گرفته شده است. در مرجع [۵]، برنامه‌ریزی انتقال و تولید به‌طور جداگانه انجام شده و تنها خروج خطوط انتقال در نظر گرفته شده است. در برخی مقالات [۹-۶]، هماهنگی تولید و انتقال در محیط رقابتی انجام می‌شود. در این مقالات، برنامه‌ریزی توسعه با در نظر گرفتن هماهنگی شرکت‌های تولید و انتقال و با لحاظ نمودن قیود ISO^۵ انجام می‌گیرد.

در حالت‌های کم‌باری و میان‌باری، نیروگاه‌های پرهزینه باید از مدار خارج می‌شوند و بیشتر نیروگاه‌های پایه و کم‌هزینه در مدار باقی بمانند. نیروگاه‌های بادی نیز ممکن است توان نامی را در حالت‌های میان‌باری و کم‌باری تولید کنند. اما در بیشتر مقالات، برنامه‌ریزی فقط برای بار پیک انجام شده است. در این شرایط، ممکن است که در حالت‌های کم‌باری و میان‌باری به علت اضافه بار خطوط انتقال نتوان نیروگاه‌های پرهزینه‌تر را خارج و پخش بار اقتصادی بین نیروگاه‌ها را اجرا نمود. به عبارت دیگر ممکن است که محدودیت ظرفیت خطوط انتقال، اجازه خروج واحدهای گران‌تر را ندهد، که باعث افزایش هزینه تولید می‌شود. این موضوع در روابط بار پیک مدنظر قرار نمی‌گیرد. بنابراین در نظر گرفتن پخش بار بهینه در سطوح مختلف بار، ممکن است باعث کاهش هزینه تولید شود و خطوط و واحدهای جدید طوری انتخاب شوند که هزینه بهره‌برداری واحدها برای حالت‌های میان‌باری و کم‌باری کمینه شود. در تحقیقات پیشین، پخش بار بهینه در برنامه‌ریزی توسعه و در فضای سنتی مطرح

CT_i	هزینه سرمایه‌گذاری واحد i (\$)
C_{gi}^k	ارزش حاضر هزینه بهره‌برداری نیروگاه i برای سطح بار k (\$/MWh)
C_{gi}^p	ارزش حاضر هزینه بهره‌برداری نیروگاه i برای بار پیک (\$/MWh)
c_{gi}^k	هزینه سالانه بهره‌برداری نیروگاه i برای سطح بار k (\$/MWh)
c_{gi}^p	هزینه سالانه بهره‌برداری نیروگاه i برای بار پیک (\$/MWh)
Cl_{ij}	هزینه سرمایه‌گذاری خط ij (\$)
Pg_i	توان تولیدی نیروگاه i (MW)
Pg_{imin}	حداقل تولید نیروگاه i (MW)
Pg_{imax}	حداکثر تولید نیروگاه i (MW)
M	عدد مثبت بزرگ
A^T	ماتریس اتصال خطوط و پست‌ها
f	توان اکتیو خطوط جدید (MW)
f^0	توان اکتیو خطوط موجود (MW)
\bar{f}_{ij}	حد تحمل توان اکتیو خط کاندیدا ij (MW)
\bar{f}^0_{ij}	حد تحمل توان اکتیو خط موجود ij (MW)
P_{di}^k	بار سطح k ام برای پست i (MW)
T_d^k	زمان تداوم سطح بار k در طول سال (ساعت)
δ_{ij}	اختلاف زاویه پست‌های i و j (rad)
PF	جریمه حذف بار (\$/MW)
m_i	متغیر صحیح نشان‌دهنده تعداد واحدها در شین i
n_{ij}	متغیر باینری نشان‌دهنده انتخاب شدن یا نشدن خط ij
re_i	قدرت رزرو (MW)
q	نرخ بهره
w	عمر در نظر گرفته‌شده برای نیروگاه (سال)
b_{ij}	سوسپتانس خط ij (p.u.)
Z_{Ti}	امپدانس تونن پست i (p.u.)
Z_{Bus}	ماتریس امپدانس شبکه (p.u.)
Y_{Bus}	ماتریس ادمیتانس شبکه (p.u.)
IsC_i	جریان اتصال کوتاه شین i (p.u.)
t	اندیس t جهت نمایش متغیرها برای حالت خروج t است
k	بالانویس k جهت نمایش متغیرها در سطح بار k است
T	مجموعه حالت‌های خروج خطوط و واحدها
K	مجموعه سطوح بار غیر از پیک
Γ	مجموعه خطوط
B	مجموعه واحدها

[۱۹]، حالت‌های مختلف مطالعه امنیت سیستم شامل خروج چند خط و واحد باهم با استفاده از روش ابتکاری بررسی شده است و امنیت سیستم در مسئله جداگانه‌ای ارزیابی شده است. در [۲۰]، امنیت بیشتر در زمینه بهره‌برداری و در محیط بازار صورت گرفته است. در [۲۱]، امنیت سیستم در الگوریتمی ابتکاری بررسی شده و میزان اهمیت خطوط کاندیدا تعیین شده است.

با توجه به تنوع تحقیقات در زمینه برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های تولید و انتقال، دیدگاه‌های مختلفی در مطالعات موردنظر بوده است و برنامه‌ریزی از جنبه‌های مختلف دسته‌بندی و بررسی شده است [۲۲]. از لحاظ روش حل، شیوه‌های ریاضی یا ابتکاری استفاده می‌شود. در روش ریاضی، پاسخ بهینه و واحد به دست می‌آید و زمان حل کم‌تر اما نوشتن روابط مشکل‌تر است. از جمله روش‌های ریاضی می‌توان به BD [۱۸، ۲۳] و MILP [۵، ۱۲] و از جمله روش‌های ابتکاری به GA^A ، SA^A و TS^A [۲۴، ۲۵] اشاره نمود. برنامه‌ریزی در محیط سنتی [۲، ۳، ۵] یا بازار [۹-۶] انجام می‌شود. در محیط سنتی تابع هدف، هزینه و در محیط بازار تابع هدف، سود شرکت‌کنندگان است.

در این مقاله، برنامه‌ریزی توسعه همزمان سیستم‌های تولید و انتقال به روشی نوین، ساده و سریع توسط روابط MILP انجام شده است. امنیت سیستم در مسئله اصلی و در قالب روابط MILP در نظر گرفته شده است و ظرفیت و مکان بهینه خطوط و واحدهای جدید تعیین شده است. پخش بار اقتصادی بین نیروگاه‌ها برای سطوح مختلف بار در مسئله اصلی لحاظ شده است. به این ترتیب، این امکان فراهم می‌شود که بدون محدودیت ظرفیت خطوط انتقال به‌ازای بارهای مختلف، نیروگاه‌های پرهزینه از مدار خارج شود و هزینه بهره‌برداری واحدها کاهش یابد. روش ابتکاری جدیدی برای کاهش سطح اتصال کوتاه معرفی شده است. به این ترتیب در شبکه آینده، سطح اتصال کوتاه محدود می‌شود و هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات کاهش می‌یابد. نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ جهت اجرای روش ارائه‌شده برای شبکه ۶ شینه گارور و شبکه ۲۴ شینه IEEE استفاده شده و نتایج به‌دست‌آمده از جنبه‌های مختلف بررسی و با سایر مراجع مقایسه شده است.

در بخش دوم مقاله، برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال انجام شده است در بخش سوم، امنیت سیستم ارزیابی شده است. در بخش چهارم، پخش بار بهینه برای سطوح مختلف بار به روابط اضافه شده است. کاهش سطح اتصال کوتاه در بخش پنجم بیان شده است. در بخش ششم نتایج مقاله برای موارد مطالعاتی بررسی شده و نتیجه‌گیری در بخش هفتم آورده شده است.

۲- برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال

همان‌طور که بیان شد در این مقاله برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال در قالب مدل MILP بیان شده است که پاسخ بهینه را نتیجه می‌دهد و از پخش بار DC^{AC} استفاده شده است. مدل‌سازی مسئله در روابط (۱) تا (۱۴) آورده شده است.

نشده است و در بهره‌برداری سیستم به‌منظور کاهش هزینه تولید مطرح بوده است. در [۱۰]، مشارکت بهینه نیروگاه‌ها در حضور تولیدات پراکنده بررسی می‌شود و هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها کاهش می‌یابد. در [۱۱]، پخش بار بهینه با در نظر گرفتن بار چند سطحی و قیود مختلف مانند رزرو چرخان و آلودگی بررسی می‌شود و سبب کاهش هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها می‌شود.

در مطالعات توسعه سیستم‌های تولید و انتقال، خطوط و واحدهای جدید پیشنهاد می‌شود. افزودن خطوط و واحدهای جدید سبب افزایش جریان اتصال کوتاه تجهیزات در شبکه آینده می‌شود. در نتیجه تجهیزات با سطح اتصال کوتاه بالاتر باید انتخاب شوند که هزینه سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد. در غیراین صورت احتمال بروز خسارات و خاموشی‌ها افزایش می‌یابد. تاکنون به این موضوع به‌طور جامع پرداخته نشده است. در [۱۲]، TEP با در نظر گرفتن اتصال کوتاه و امنیت سیستم با استفاده از روابط MILP انجام شده است. در این مرجع، تأثیر اتصال کوتاه هر خط جدید بر پستی که به آن وصل می‌شود در نظر گرفته شده است. در صورتی که ممکن است جریان اتصال کوتاه سایر پست‌ها را نیز افزایش دهد. همچنین در این روش از تقریب و خطی‌سازی استفاده شده است. در مرجع [۱۳]، TEP با در نظر گرفتن اتصال کوتاه انجام شده است. ابتدا برنامه‌ریزی انتقال با روش MILP انجام می‌شود. سپس جریان اتصال کوتاه پست‌ها بررسی می‌شود و در صورتی که از حد مجاز بیشتر باشد، شاخصی به روابط مسئله اضافه می‌شود و دوباره برنامه‌ریزی انجام می‌شود و این روند تا زمانی که سطح اتصال کوتاه پست‌ها در حد مجاز قرار گیرد، ادامه می‌یابد. این روش تقریبی است و مشخص نیست که پاسخ بهینه داشته باشد. با توجه به اینکه در مراجع [۱۲] و [۱۳]، فقط برنامه‌ریزی توسعه سیستم انتقال انجام شده، تأثیر نیروگاه‌ها در مطالعات اتصال کوتاه در نظر گرفته نشده است. در صورتی که در عمل، اهمیت نیروگاه‌ها در تعیین سطح اتصال کوتاه زیاد است و انتخاب‌شدن نیروگاه جدید و خطوط متصل به آن، در تعیین جریان اتصال کوتاه تأثیر بسزایی دارد.

جهت جلوگیری از بروز خسارات و خاموشی‌ها در شبکه آینده، باید خروج تجهیزات در برنامه‌ریزی توسعه در نظر گرفته شود. به این منظور مطالعات قابلیت اطمینان و امنیت انجام می‌شود. قابلیت اطمینان در قالب‌هایی مانند $EENS^Y$ ، $LOLE$ ، $LOLP^f$ و یا با بررسی عدم قطعیت مطرح می‌شود. در [۱۴]، شاخص‌های قابلیت اطمینان در حضور مزارع بادی ارزیابی می‌شود. در [۱۵]، عدم قطعیت سرعت باد در برنامه‌ریزی تولید بررسی می‌شود. امنیت سیستم در قالب معیارهای $N-2$ ، $N-1$ و ... در نظر گرفته می‌شود. در [۱۶]، [۱۷]، امنیت سیستم در توسعه سیستم انتقال در قالب روابط خطی در نظر گرفته شده است. در [۱۶]، امنیت سیستم با در نظر گرفتن خروج خطوط بررسی شده و خروج واحدها لحاظ نشده است. در [۱۷]، ابتدا مسئله اصلی حل شده و سپس امنیت سیستم در مسئله جداگانه‌ای ارزیابی شده است. در مرجع [۱۸]، امنیت سیستم با استفاده از BD و مونت کارلو در فضای احتمالی بررسی شده است. در

گرفته می‌شود. در برخی از تحقیقات، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال توسط معادلات خطی مدل‌سازی شده است [۵]. اما در این مقاله توسعه همزمان سیستم‌های تولید و انتقال مطرح شده است. بنابراین تعداد واحدهای موجود روی هر شین، قدرت رزرو و هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها به روابط اضافه شده‌اند. با اضافه نمودن این موارد مطابق روابط (۱) تا (۷)، برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال توسط روش MILP مدل‌سازی می‌شود. رابطه (۸) توان خطوط موجود و رابطه (۹) محدوده آن را مشخص می‌سازد. رابطه (۱۰) و (۱۱) به ترتیب توان خطوط جدید و محدوده آن‌ها را نشان می‌دهد. روابط (۱۲) و (۱۳) محدوده تعداد واحدها و بار تأمین نشده را مشخص می‌کنند. n متغیر باینری است که نشان‌دهنده انتخاب شدن یا نشدن خطوط کاندیدا در هر مسیر است و m متغیر صحیح است که تعداد واحدهای جدید را در هر شین نشان می‌دهد.

۳- در نظر گرفتن امنیت سیستم

در بسیاری از مقالات، امنیت سیستم در مسئله جداگانه‌ای بررسی شده است [۱۷، ۱۹، ۲۰]. این موضوع، پاسخ را از حالت بهینه دور می‌کند. در این مقاله، ارزیابی امنیت سیستم به‌طور خطی در مسئله اصلی آورده شده است. به این ترتیب پاسخ، برای حالت بدون پیشامد و همچنین برای حالت‌های خروج واحدها و خطوط بهینه است. در [۱۲]، امنیت سیستم به‌طور خطی در توسعه سیستم انتقال مدنظر بوده اما در این مقاله، امنیت N-1 به‌طور خطی در توسعه همزمان سیستم‌های تولید و انتقال در نظر گرفته شده است. بنابراین روابط، متناسب با این موضوع تغییر داده شده‌اند. امنیت سیستم با اضافه نمودن روابط (۱۵) تا (۲۲) به مسئله اصلی ارزیابی می‌شود. t حالت‌های خروج است و زیرمجموعه T است که مجموعه کل حالت‌های خروج خطوط و واحدها است. زیرنویس t متغیرها را در حالت خروج t نشان می‌دهد.

$$P_{gti} + \sum_{ij \in \Gamma} A^T f_{tij} + r_{ti} = P_{d_i} \quad \forall t \in T, \forall i \in B, i \notin t \quad (15)$$

$$f_{tij}^0 = -b_{ij}(\delta_{ti} - \delta_{tj}) \quad \forall t \in T, \forall ij \in \Gamma, ij \notin t \quad (16)$$

$$-\bar{f}_{ij}^0 \leq f_{tij}^0 \leq \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall t \in T, \forall ij \in \Gamma, ij \notin t \quad (17)$$

$$-M(1 - n_{ij}) \leq \frac{f_{tij}}{b_{ij}} + (\delta_{ti} - \delta_{tj}) \leq M(1 - n_{ij}) \quad \forall t \in T, \forall ij \in \Gamma, ij \notin t \quad (18)$$

$$-\bar{f}_{ij} n_{ij} \leq f_{tij} \leq \bar{f}_{ij} n_{ij} \quad \forall t \in T, \forall ij \in \Gamma, ij \notin t \quad (19)$$

$$m_i P_{gimin} \leq P_{gti} \leq m_i P_{gimax} \quad (20)$$

$$\text{Min} \left(\sum_{ij \in \Gamma} C l_{ij} n_{ij} + \sum_{i \in \Omega} C T_i \times m_i + \sum_{i \in K} \sum_{i \in \Omega} T_d^k C_{gi}^k P_{gi}^k + \sum_{i \in \Omega} T_d^p C_{gi}^p P_{gi}^p + \sum_{i \in \Omega} P F \times r_i \right) \quad (1)$$

$$P_{gi}^p + \sum_{ij \in \Gamma} \forall A^T f_{ij} + r_i - r e_i = P_{d_i} \quad \forall i \in B \quad (2)$$

$$P_{gi}^p = m_i P_{gimax} - r e_i \quad \forall i \in B \quad (3)$$

$$P_{gimin} \leq P_{gi}^p \leq P_{gimax} \quad \forall i \in B \quad (4)$$

$$0 \leq r e_i \leq m_i (P_{gimax} - P_{gimin}) \quad \forall i \in B \quad (5)$$

$$C_{gi,p}^c = a_i \times P_{gi}^p + b_i \quad \forall i \in B \quad (6)$$

$$C_{gi}^p = \frac{(1+q)^{w-1}}{q(1+q)^w} * C_{gi}^p \quad \forall i \in B \quad (7)$$

$$f_{ij}^0 = -b_{ij}(\delta_i - \delta_j) \quad \forall ij \in \Gamma \quad (8)$$

$$-\bar{f}_{ij}^0 \leq f_{ij}^0 \leq \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Gamma \quad (9)$$

$$-M(1 - n_{ij}) \leq \frac{f_{ij}}{b_{ij}} + (\delta_i - \delta_j) \leq M(1 - n_{ij}) \quad \forall ij \in \Gamma \quad (10)$$

$$-\bar{f}_{ij} n_{ij} \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij} n_{ij} \quad \forall ij \in \Gamma \quad (11)$$

$$0 \leq m_i \leq m_i^{max} \quad \forall i \in B \quad (12)$$

$$0 \leq r_i \leq P_{d_i} \quad \forall i \in B \quad (13)$$

$$n \text{ binary}, i \in B, ij \in \Gamma \quad (14)$$

رابطه (۱)، تابع هدف است که شامل هزینه خطوط و نیروگاه‌های جدید است. اولین و دومین بخش تابع هدف شامل هزینه سرمایه‌گذاری خطوط و نیروگاه‌های جدید است. بخش سوم هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها در سطوح بار مختلف غیر از پیک است که در بخش ۴ تشریح می‌گردد. بخش چهارم و پنجم به ترتیب هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها در پیک و جریمه بار تأمین نشده است. رابطه (۲) توازن تولید و مصرف را نشان می‌دهد. از آنجا که لزوماً مجموع ظرفیت نیروگاه‌های جدید با مجموع بار برابر نیست، نیاز به اضافه نمودن قدرت رزرو است که توازن تولید و مصرف را برقرار کند. بنابراین توان رزرو در رابطه (۲) در نظر گرفته شده و محدوده مجاز آن در رابطه (۵) مشخص شده است. تولید بهینه نیروگاه‌ها در پیک بار که برای محاسبه هزینه بهره‌برداری مورد نیاز است، در رابطه (۳) و محدوده مجاز آن در رابطه (۴) آورده شده است. هزینه بهره‌برداری واحدها، با تابع خطی درجه یک در رابطه (۶) مدل شده است. هزینه سرمایه‌گذاری در سال اول منظور می‌شود ولی هزینه بهره‌برداری سالیانه است و ارزش حاضر آن مطابق رابطه (۷) در نظر

افزایش می‌یابد. در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه، خطوط و نیروگاه‌های جدید اضافه می‌شوند. با اضافه شدن خطوط و واحدهای جدید، جریان اتصال کوتاه پست‌ها و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات افزایش می‌یابد. در صورتی که افزایش جریان اتصال کوتاه در نظر گرفته نشود، احتمال بروز خسارات و خاموشی‌های گسترده زیاد می‌شود. در این مقاله محدودیت سطح اتصال کوتاه تجهیزات در نظر گرفته شده است و در ادامه فرآیند کاهش جریان اتصال کوتاه بیان می‌شود.

امپدانس تونن پست‌ها با استفاده از ماتریس امپدانس که عکس ماتریس ادمیتانس است، مطابق روابط (۳۳) و (۳۴) به دست می‌آید.

$$Z_{bus} = 1/Y_{bus} \quad (33)$$

$$Z_{Ti} = Z_{bus}(i, i) \quad (34)$$

جریان اتصال کوتاه مربوط به هر شین با توجه به امپدانس تونن، مطابق رابطه (۳۵) محاسبه می‌شود.

$$I_{SCi} = 1/Z_{Ti} \quad (35)$$

در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه، وضعیت خطوط کاندیدا مشخص نیست. و ماتریس ادمیتانس نسبت به متغیر باینری خطوط جدید رابطه خطی دارد. ولی ماتریس امپدانس که معکوس آن است، غیرخطی است و محاسبه جریان اتصال کوتاه به این روش کاملاً غیرخطی است.

امپدانس تونن را می‌توان با تأثیر مستقیم اضافه شدن خطوط جدید بر ماتریس امپدانس نیز به دست آورد. روابط موردنظر در این زمینه در [۲۶] آورده شده است. این روابط غیرخطی هستند و خطی‌سازی آن‌ها بسیار مشکل است. در مرجع [۱۲]، جریان اتصال کوتاه به این روش محاسبه شده است، اما تأثیر اضافه شدن خط جدید بر تمام پست‌ها در نظر گرفته نشده و فقط برای پست متصل به خط جدید و به طور تقریبی منظور شده است. با توجه به موارد ذکر شده، بهتر است که بررسی محدودیت سطح اتصال کوتاه به روش ابتکاری انجام شود تا این که به طور مطمئن در حد مجاز قرار گیرد. در این مقاله روش ابتکاری جدیدی برای کاهش سطح اتصال کوتاه معرفی شده است. در این روش، خطوطی که سطح اتصال کوتاه را بیشتر افزایش می‌دهند، حذف و به جای آن‌ها خطوط دیگری جهت حفظ قیود سیستم اضافه می‌شوند. الگوریتم این روش، در مراحل (الف) تا (ه) تشریح شده است.

الف) پس از حل مسئله (روابط ۱ تا ۳۲)، سطح اتصال کوتاه تمامی پست‌ها محاسبه می‌شود.

ب) در صورتی که حداکثر سطح اتصال کوتاه پست‌ها در حد مجاز باشد الگوریتم پایان یافته است. در غیر این صورت خطوط کاندیدا یکی یکی حذف می‌شود. به این معنی که در هر حالت، یک خط از مجموعه خطوط کاندیدا حذف می‌شود. برای هر حالت بیشترین جریان اتصال کوتاه مربوط به شین‌ها تعیین و حالتی که کمترین مقدار را دارد انتخاب می‌شود. اگر این مقدار کمتر از حد مجاز باشد، مراحل (الف) تا (ه) در غیر این صورت مراحل (ج) ادامه می‌یابد.

ج) این مرحله مشابه مرحله (ب) است. با این تفاوت که خطوط کاندیدا به صورت دوتایی حذف می‌شوند یعنی در هر حالت، دو خط از

$$\forall t \in T, \forall i \in B, i \notin t$$

$$0 \leq r_{ti} \leq P_{di} \quad \forall t \in T, \forall i \in B, i \notin t \quad (21)$$

$$n \text{ binary}, i \in B, ij \in \Gamma, t \in T \quad (22)$$

۴- در نظر گرفتن پخش بار بهینه در سطوح بار مختلف

به علت محدودیت ظرفیت خطوط انتقال ممکن است که در برخی از ساعات نتوان پخش بار اقتصادی بین نیروگاه‌ها را اجرا نمود. بنابراین معادلات پخش بار بهینه به‌ازای سطوح بار مختلف مطابق روابط (۲۳) تا (۳۲) به معادلات اصلی سیستم اضافه می‌شود. به این ترتیب با حذف محدودیت خطوط انتقال، در بارهای مختلف همواره پخش بار بهینه اجرا می‌شود و هزینه تولید نیروگاه‌ها کاهش می‌یابد. در روابط (۱) تا (۲۲)، تعداد و ظرفیت واحدهای مورد نیاز جهت تأمین پیک بار مدنظر است و در روابط (۲۳) تا (۳۲) میزان تولید بهینه نیروگاه‌ها در سطوح دیگر بار در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها و هزینه انرژی تولیدی در بارهای مختلف کمیته می‌شود. بالانویس k ، متغیرها را در سطح بار k ام نشان می‌دهد.

$$P_{gi}^k + \sum_{ij \in \Gamma} A^T f_{ij}^k + r_i^k = P_{di}^k \quad (23)$$

$$\forall i \in B, \forall k \in K$$

$$c_{gi}^k = a_i \times P_{gi}^k + b_i \quad \forall i \in B, \forall k \in K \quad (24)$$

$$m_i \times P_{gimin} \leq P_{gi}^k \leq m_i \times P_{gimax} \quad \forall i \in B, \forall k \in K \quad (25)$$

$$C_{gi}^k = \frac{(1+q)^{w-1}}{q(1+q)^w} \times c_{gi}^k \quad \forall i \in B, \forall k \in K \quad (26)$$

$$f_{ij}^{0k} = -b_{ij}(\delta_{ki} - \delta_{kj}) \quad \forall ij \in \Gamma, \forall k \in K \quad (27)$$

$$-\bar{f}_{ij}^0 \leq f_{ij}^{0k} \leq \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Gamma, \forall k \in K \quad (28)$$

$$-M(1 - n_{ij}) \leq \frac{f_{ij}^k}{b_{ij}} + (\delta_{ki} - \delta_{kj}) \leq M(1 - n_{ij}) \quad (29)$$

$$\forall ij \in \Gamma, \forall k \in K$$

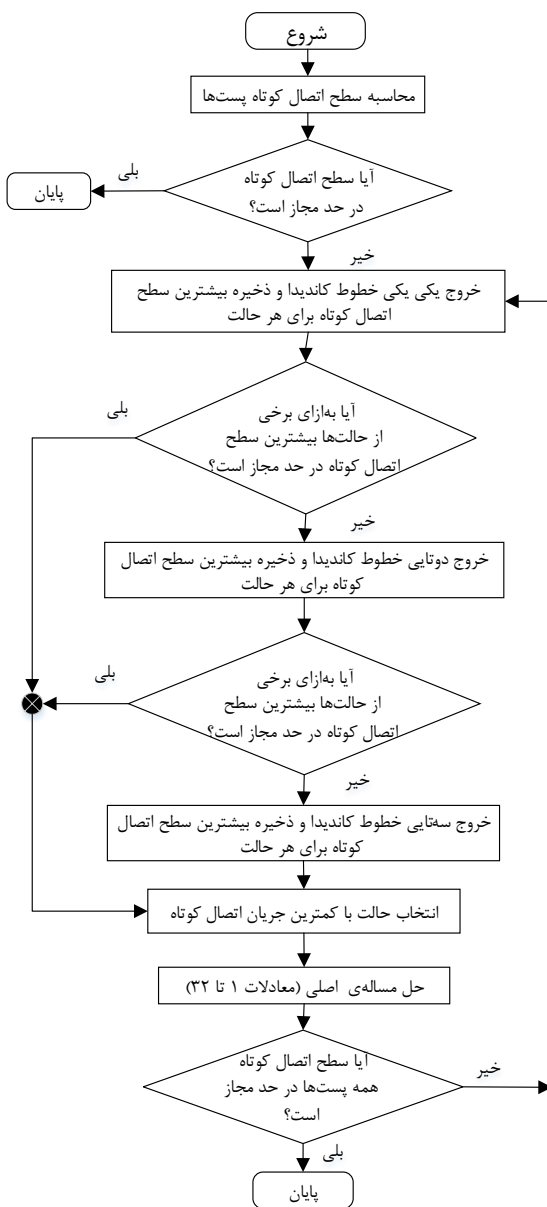
$$-\bar{f}_{ij}^0 n_{ij} \leq f_{ij}^k \leq \bar{f}_{ij}^0 n_{ij} \quad \forall ij \in \Gamma, \forall k \in K \quad (30)$$

$$0 \leq r_i^k \leq P_{di}^k \quad \forall i \in B, \forall k \in K \quad (31)$$

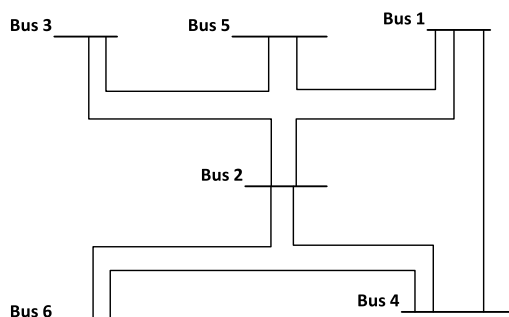
$$n \text{ binary}, i \in B, ij \in \Gamma, k \in K \quad (32)$$

۵- تأثیر سطح اتصال کوتاه در مطالعات برنامه‌ریزی

تجهیزات سیستم قدرت نظیر پست‌ها، خطوط و یراق آلات، سطح اتصال کوتاه نامی معینی دارند و با افزایش سطح اتصال کوتاه، قیمت تجهیزات



شکل ۱: فلوجارت کاهش سطح اتصال کوتاه



شکل ۲: دیاگرام شبکه گارور

خطوط و نیروگاه‌های جدید برای دو حالت در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن سه سطح بار،

خطوط کاندیدا حذف می‌شود. برای هر حالت، بیشترین جریان اتصال کوتاه مربوط به شین‌ها تعیین و حالتی که کمترین مقدار را دارد انتخاب می‌شود. اگر این مقدار کمتر از حد مجاز باشد، مراحل از (ه) در غیر این صورت مراحل از (د) ادامه می‌یابد.

(د) در این مرحله، خطوط کاندیدا به صورت سه تایی حذف می‌شوند و برای هر حالت بیشترین جریان اتصال کوتاه مربوط به شین‌ها تعیین و حالتی که کمترین مقدار را دارد، انتخاب می‌شود.

(ه) مسئله (روابط (۱) تا (۳۲)) حل می‌شود. در صورتی که سطح اتصال کوتاه همه پست‌ها در حد مجاز قرار داشته باشد، مسئله خاتمه یافته است. در غیر این صورت مراحل از (الف) ادامه می‌یابد.

در الگوریتم فوق می‌توان خطوط کاندیدا را به صورت چهار تایی و بیشتر نیز حذف نمود. اما معمولاً با حذف یک یا دو خط در یک تا چند تکرار الگوریتم خاتمه می‌یابد. این روش سرعت اجرا و دقت زیادی دارد و فلوجارت آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در بخش ۴، کارایی این روش نشان داده شده است.

۶- مطالعات عددی و تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج عددی حاصل از اعمال مدل پیشنهادی توسعه سیستم‌های انتقال و تولید برای شبکه گارور و نیز شبکه ۲۴ شینه IEEE ارائه شده است. سیستم کامپیوتری مورد استفاده در انجام شبیه‌سازی‌ها دارای ۲ گیگابایت رم و پردازشگر دو هسته‌ای ۱/۸۷ گیگاهرتز است. از بسته نرم‌افزاری متلب ۲۰۱۵ برای انجام شبیه‌سازی و مطالعات عددی استفاده شده است. پخش بار بهینه در سطوح مختلف بار و هماهنگی بین GEP و TEP برای شبکه گارور و محدودیت اتصال کوتاه و ارزیابی امنیت سیستم برای شبکه ۲۴ شینه ارزیابی شده و نتایج با سایر مراجع در زمینه‌های فوق مقایسه شده است. ضریب جریمه حذف بار ۱۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۶-۱- اجرای الگوریتم برای شبکه گارور

اطلاعات شبکه در مرجع [۲۷] و دیاگرام آن در شکل ۲ آورده شده است. قیمت خطوط ۱۳۰ هزار دلار به‌ازای هر کیلومتر در نظر گرفته شده و مشخصات نیروگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

۶-۱-۱- در نظر گرفتن تأثیر سطوح مختلف بار

در این بخش، تأثیر پخش بار اقتصادی بین نیروگاه‌ها در سطوح مختلف بار بررسی شده است. به این منظور سه سطح بار پیک، متوسط و کم در نظر گرفته شده است. بار پیک ۱۴۰۰ مگاوات، بار متوسط ۱۰۰۰ مگاوات و بار حداقل ۵۰۰ مگاوات فرض شده و دیاگرام بار سه سطحی مطابق شکل ۳ است. مسئله برای دو حالت حل شده است.

حالت اول: با در نظر گرفتن سه سطح بار

حالت دوم: با در نظر گرفتن بار پیک

هزینه خطوط جدید ۸ میلیون دلار بیشتر و هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها ۳۴ میلیون دلار کمتر شده است. برای این‌که علت کاهش هزینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن سه سطح بار مشخص‌تر شود، به‌ازای بار حداقل، پخش بار بهینه انجام‌شده و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. در حالت اول نیروگاه‌های ۱ و ۲ که هزینه بیشتری دارد، در بار حداقل خارج شده است ولی در حالت دوم نیروگاه ۲ در بار حداقل نیز در مدار است. بنابراین هرچند که هزینه خطوط جدید در حالت اول بیشتر شده ولی هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها به میزان بیشتری کم شده است. در این سناریو مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن پخش بار بهینه در سطوح مختلف بار، هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و پاسخ بهتر و با هزینه کمتری را نتیجه می‌دهد.

جدول ۴: پخش بار بهینه برای بار حداقل در شبکه گاور

حالت سه سطح بار		حالت یک سطح بار	
نیروگاه	ظرفیت (مگاوات)	نیروگاه	ظرفیت (مگاوات)
۱	۰	۱	۰
۲	۰	۲	۲۰۰
۳	۲۴۰	۳	۳۰۰
۶	۲۶۰	۶	۰

۱-۲-۶- در نظر گرفتن برنامه‌ریزی همزمان سیستم‌های تولید و انتقال

در این بخش، نتایج مطالعه همزمان سیستم‌های تولید و انتقال ارزیابی شده است. هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌ها برابر با ۰/۳۵ میلیون دلار به‌ازای هر مگاوات و هزینه بهره‌برداری برابر با ۱۰ دلار به‌ازای هر مگاوات ساعت فرض شده است. مجموع بار ۷۶۰ مگاوات در نظر گرفته می‌شود. در این بخش خروج نیروگاه‌ها در نظر گرفته نشده و فقط خروج خطوط منظور شده است. مسئله در دو حالت بررسی شده است. در حالت اول ظرفیت نیروگاه‌ها مطابق جدول ۵، ثابت فرض شده است و تنها برنامه‌ریزی توسعه انتقال انجام می‌شود و در حالت دوم برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال لحاظ می‌شود. نتایج در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در برنامه‌ریزی همزمان، هزینه کاهش یافته است. در این حالت با ترکیب بهینه خطوط و واحدها، پاسخ بهتر حاصل شده و ظرفیت تولید، بیشتر در مرکز بار انتخاب شده که منجر به انتخاب خطوط کمتر و کاهش هزینه شده است.



شکل ۳: منحنی بار سه سطحی

جدول ۱: مشخصات نیروگاه‌ها در شبکه گاور

نیروگاه	حداکثر ظرفیت (مگاوات)	هزینه سرمایه‌گذاری هر مگاوات (میلیون دلار)	هزینه بهره‌برداری هر مگاوات ساعت (دلار)
۱	۷۰۰	۰/۴	۱۵
۲	۳۰۰	۰/۴	۱۵
۳	۳۵۰	۰/۲۵	۱۰
۶	۲۵۰	۰/۲۵	۱۰

جدول ۲: ظرفیت بهینه نیروگاه‌ها در شبکه گاور

نیروگاه	ظرفیت بهینه (مگاوات)
۱	۶۰۰
۲	۲۰۰
۳	۳۵۰
۶	۲۵۰

جدول ۵: ظرفیت نیروگاه‌ها برای ارزیابی برنامه‌ریزی توسعه همزمان در شبکه گاور

برنامه‌ریزی انتقال		برنامه‌ریزی همزمان تولید و انتقال	
نیروگاه	ظرفیت (مگاوات)	نیروگاه	ظرفیت (مگاوات)
۱	۱۶۰	۱	۳۱۰
۳	۲۰۰	۳	۳۰۰
۶	۴۰۰	۶	۱۵۰
مجموع هزینه ۶۰۳ میلیون دلار		مجموع هزینه ۶۰۳ میلیون دلار	

جدول ۶: خطوط اضافه شده برای ارزیابی برنامه‌ریزی توسعه همزمان در شبکه گاور

برنامه‌ریزی انتقال		برنامه‌ریزی همزمان تولید و انتقال	
نیروگاه	ظرفیت (مگاوات)	نیروگاه	ظرفیت (مگاوات)
۳-۵، ۳-۵، ۲-۶، ۲-۶، ۲-۶، ۴-۶		۱-۵، ۱-۵، ۲-۳، ۲-۳، ۲-۳، ۴-۶	
۴-۶		۴-۶	
هزینه خطوط: (۴۵/۶) میلیون دلار		هزینه خطوط: (۲۲/۷) میلیون دلار	

۲-۶- اجرای الگوریتم برای شبکه ۲۴ شینه IEEE

در این بخش، ارزیابی امنیت و محدودیت سطح اتصال کوتاه برای شبکه

جدول ۳: خطوط جدید با و بدون در نظر گرفتن سه سطح بار در شبکه گاور

حالت سه سطح بار		حالت یک سطح بار	
نیروگاه	ظرفیت بهینه (مگاوات)	نیروگاه	ظرفیت بهینه (مگاوات)
۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴		۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴	
هزینه خطوط ۲۸ میلیون دلار		هزینه خطوط ۲۰ میلیون دلار	
هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها ۶۶۰ میلیون دلار		هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها ۶۹۴ میلیون دلار	

۲۶ کیلوآمپر ولی در حالت دوم حدود ۲۶ کیلوآمپر است و حد مجاز سطح اتصال کوتاه رعایت شده است.

۲۴ شینه IEEE در نظر گرفته شده است. دیگرام شبکه در شکل ۶ و مشخصات آن در مرجع [۲۸] آورده شده است.

۶-۲-۱- ارزیابی امنیت سیستم

در این مقاله خروج خطوط و واحدها در مسئله‌ی اصلی به صورت خطی در نظر گرفته شده و خطوط و واحدهای جدید بر این اساس تعیین شده‌اند. در بیشتر مقالات، امنیت سیستم در برنامه‌ریزی شبکه انتقال مطرح شده است و تنها خطوط جدید جهت حفظ امنیت سیستم اضافه شده‌اند. اما در این مقاله نیروگاه‌ها نیز در حفظ امنیت سیستم دخالت دارند و با هماهنگی در انتخاب خطوط و واحدهای جدید و صرف کمترین هزینه، امنیت N-1 رعایت می‌شود. در ادامه، نتایج روش ارائه شده با مرجع‌های [۵] و [۱۸] مقایسه شده است.

جهت مقایسه با مرجع [۵]، مجموع بار، مشخصات نیروگاه‌ها و خطوط مطابق با آن تغییر داده می‌شود. نتایج در جدول‌های ۷ و ۸ آورده شده است. در این مقاله با تعیین جریمه زیاد برای حذف بار، در اثر خروج خطوط و نیروگاه‌ها حذف بار رخ نمی‌دهد، اما در مرجع [۵]، جریمه انرژی تامین نشده در تابع هدف لحاظ شده است و با خروج واحد AEI، مجموع تولید از مصرف ۴ مگاوات کمتر می‌شود و حذف بار رخ می‌دهد. بنابراین در این مرجع امنیت N-1 رعایت نشده است. مشاهده می‌شود که در این مقاله هزینه خطوط و نیروگاه‌های اضافه شده بیشتر است ولی در عوض، امنیت N-1 رعایت شده است.

جهت مقایسه با مرجع [۱۸]، مجموع بار و تولید ۳ برابر (۸۵۵۰ مگاوات) فرض شده و خروج نیروگاه‌ها در نظر گرفته نشده است. نتایج این مقاله و مرجع [۱۸] در جدول‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در این مقاله هزینه خطوط و نیروگاه‌های جدید کمتر است. زیرا ارزیابی امنیت سیستم با روش ریاضی MILP انجام شده در صورتی که در مرجع [۱۸] از ترکیب مونت کارلو و BD استفاده شده است. بنابراین در نظر گرفتن امنیت سیستم به صورت خطی در مسئله اصلی باعث می‌شود که پاسخ بهتر و با هزینه کمتر به دست آید.

جدول ۷: خطوط اضافه شده در این مقاله مرجع [۵]

خطوط جدید در این مقاله [۵]	خطوط جدید در این مقاله
۲-۳، ۲-۳، ۱-۴، ۱-۴، ۵-۶، ۵-۶	۱-۲، ۲-۳، ۱-۴، ۱-۴، ۳-۴، ۲-۴، ۵-۶
۱-۲	۳-۴
هزینه خطوط ۲۰/۴ میلیون دلار	هزینه خطوط ۳۱/۸۷ میلیون دلار

۶-۲-۲- تأثیر قدرت اتصال کوتاه

در این بخش، در نظر گرفتن محدودیت سطح اتصال کوتاه ارزیابی شده است. راکتانس ژنراتورها ۰/۲ پریونیت، مجموع بار برابر با ۲۸۵۰ مگاوات و خطوط موجود مطابق جدول ۱۱ فرض شده‌اند. دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول محدودیتی برای سطح اتصال کوتاه لحاظ نشده و در حالت دوم محدودیت سطح اتصال کوتاه ۲۷ کیلوآمپر در نظر گرفته شده است. نتایج برای دو حالت در شکل ۴ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در حالت اول حداکثر جریان اتصال کوتاه پست‌ها، ۳۴

جدول ۸: نیروگاه‌های اضافه شده در این مقاله و مرجع [۵]

شماره نیروگاه	ظرفیت تولید در این مقاله (مگاوات)	ظرفیت تولید در مرجع [۵] (مگاوات)
۱	۲۲/۳	۲۷
۲	۱۷/۲	۱۳
۳	۱۰	۱۰
۴	۳	۸
۵	۸	۳
۶	۲۹/۵	۲۳
جمع	۹۰	۸۴
مجموع هزینه	۷۱/۲۹ میلیون دلار	۶۶/۸۶ میلیون دلار

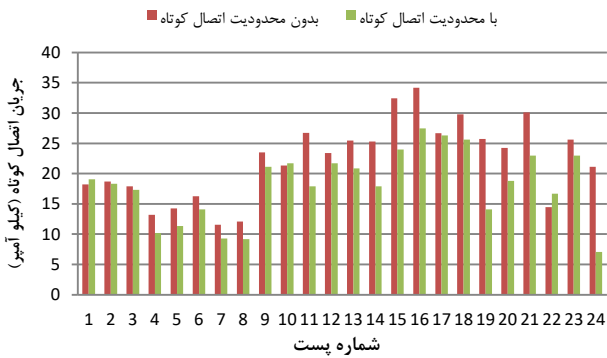
جدول ۹: خطوط اضافه شده در این مقاله و مرجع [۱۸]

خطوط جدید در این مقاله	خطوط جدید در مرجع [۱۸]
۵-۱، ۲۴-۳، ۹-۴، ۱۰-۶، ۸-۷	۵-۱، ۳-۳، ۹-۴، ۱۰-۶، ۱۰-۶
۱۲-۱۰، ۱۲-۱۲، ۱۳-۱۵، ۲۱-۱۵	۷-۸، ۹-۱۲، ۱۰-۱۲، ۱۲-۱۳
۲۴-۱۵، ۱۹-۱۶، ۲۳-۲۰، ۲۳-۱۴	۱۴-۱۶، ۲۰-۲۳، ۳-۹، ۶-۱۰، ۷-۸
۲۳-۱۴	
هزینه خطوط ۹/۷۷ میلیون دلار	هزینه خطوط ۱۳/۷۳ میلیون دلار

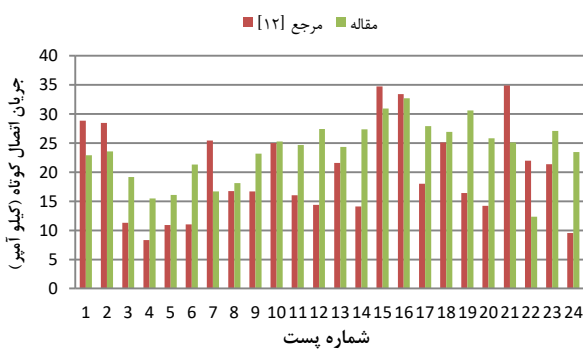
جدول ۱۰: نیروگاه‌های اضافه شده در این مقاله و مرجع [۱۸]

شماره نیروگاه	ظرفیت تولید در این مقاله (مگاوات)	ظرفیت تولید در مرجع [۱۸] (مگاوات)
۱	۵۷۶	۵۷۶
۲	۵۷۶	۵۷۶
۷	۹۰۰	۹۰۰
۱۳	۱۷۷۳	۱۷۷۳
۱۵	۶۴۵	۶۴۵
۱۶	۴۶۵	۴۶۵
۱۸	۱۱۶۰	۱۲۰۰
۲۱	۱۱۸۰	۱۲۰۰
۲۲	-	۹۰۰
۲۳	۱۸۳۰	۱۹۸۰
مجموع	۹۵۰۵	۱۰۲۵۰
مجموع هزینه (میلیون دلار)	۷۵۸۶	۸۱۷۴

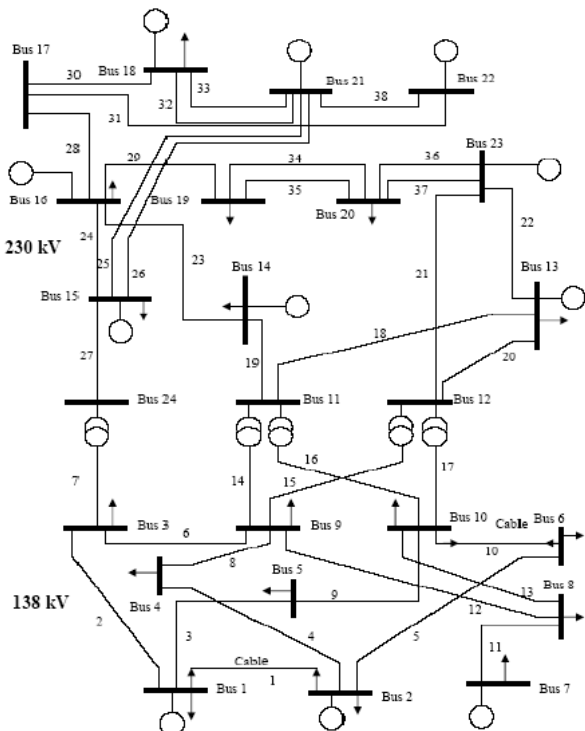
خطوط جدید در حالت‌های اول و دوم در جدول ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطوط ۱۵-۲۴، ۱۶-۱۹، ۱۶-۱۴ حذف و در عوض ۶ خط دیگر به سیستم اضافه شده‌اند. مقادیر نامی موجود برای جریان اتصال کوتاه ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ است. بنابراین در جدول ۱۳، مواردی که سطح اتصال کوتاه باید ارتقاء یابد و هزینه افزایش سطح اتصال کوتاه، آورده شده است. با توجه به جدول‌های ۱۲ و ۱۳ نتیجه می‌شود که با در نظر گرفتن محدودیت سطح اتصال کوتاه، هزینه خطوط



شکل ۴: جریان اتصال کوتاه پست‌ها با و بدون در نظر گرفتن محدودیت سطح اتصال کوتاه



شکل ۵: جریان اتصال کوتاه پست‌ها در این مقاله و مرجع [۱۲]



جدید افزایش می‌یابد، ولی کاهش هزینه مربوط به کاهش سطح اتصال کوتاه بیشتر است. بنابراین هزینه کل برای حالت دوم کمتر است. برای نشان دادن کارایی این روش، نتایج آن با مرجع [۱۲] مقایسه شده و به این منظور مجموع بار، ۸۵۵۰ مگاوات فرض شده است و مشخصات خطوط مطابق با این مرجع تغییر داده شده‌اند. مقادیر اتصال کوتاه و خطوط جدید به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۱۴ مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در این مقاله، هزینه کمتر شده است. در این روش از تقریب و خطی‌سازی استفاده نشده و با استفاده از روش ابتکاری نتایج بهتری حاصل شده است.

جدول ۱۱: خطوط موجود برای بررسی سطح اتصال کوتاه در شبکه ۲۴

شینه
خطوط موجود
۱-۲، ۲-۴، ۳-۹، ۴-۹، ۵-۱۰، ۶-۱۰، ۷-۸، ۸-۹، ۹-۱۱، ۱۰-۱۱، ۱۱-۱۳، ۱۲-۱۳، ۱۳-۲۳، ۱۶-۱۷، ۱۷-۱۸، ۱۸-۲۱، ۱۹-۲۰، ۲۰-۲۳، ۲۱-۲۲

جدول ۱۲: خطوط اضافه‌شده با و بدون در نظر گرفتن سطح اتصال کوتاه

خطوط جدید بدون در نظر گرفتن محدودیت سطح اتصال کوتاه	خطوط جدید با در نظر گرفتن محدودیت سطح اتصال کوتاه
۱-۲، ۲-۴، ۳-۹، ۴-۹، ۵-۱۰، ۶-۱۰، ۷-۸، ۸-۹، ۹-۱۱، ۱۰-۱۱، ۱۱-۱۳، ۱۲-۱۳، ۱۳-۲۳، ۱۶-۱۷، ۱۷-۱۸، ۱۸-۲۱، ۱۹-۲۰، ۲۰-۲۳، ۲۱-۲۲	۱-۲، ۲-۴، ۳-۹، ۴-۹، ۵-۱۰، ۶-۱۰، ۷-۸، ۸-۹، ۹-۱۱، ۱۰-۱۱، ۱۱-۱۳، ۱۲-۱۳، ۱۳-۲۳، ۱۶-۱۷، ۱۷-۱۸، ۱۸-۲۱، ۱۹-۲۰، ۲۰-۲۳، ۲۱-۲۲
هزینه (۲۷/۶۵) میلیون دلار	هزینه (۳۲/۵) میلیون دلار

جدول ۱۳: هزینه ارتقاء سطح اتصال کوتاه

شماره پست	سطح اتصال کوتاه (با) در نظر گرفتن محدودیت (کیلو آمپر)	سطح اتصال کوتاه (بدون) در نظر گرفتن محدودیت (کیلو آمپر)	هزینه ارتقاء (میلیون دلار)
۱۱	۲۰	۳۰	۲/۲
۱۳	۲۵	۳۰	۱/۷
۱۴	۲۰	۳۰	۲/۲
۱۵	۲۵	۳۵	۲
۱۶	۳۰	۳۵	۱/۸
۱۹	۲۰	۳۰	۲/۲
۲۰	۲۰	۲۵	۱/۳
۲۱	۲۵	۳۵	۲
۲۳	۲۵	۳۰	۱/۷
۲۴	۲۰	۲۵	۱/۳
مجموع هزینه ارتقاء			۱۸/۴ میلیون دلار

based probabilistic model”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 4, pp. 1592-1601, July 2014

- [5] H. M. D. Samarakoon, R. M. Shrestha and O. Fujiwarab, “A mixed integer linear programming model for transmission expansion planning with generation location selection”, Electrical Power and Energy Systems, vol. 23, pp. 285-293, 2001
- [6] J. Hyung Roh, M. Shahidepour, and L. Wu, “Market-based generation and transmission planning with uncertainties”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, August 2009
- [7] D. Pozo, E. Sauma and J. Contreras, “A three-level static MILP model for generation and transmission expansion planning”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 1, pp. 202-210, February 2013
- [8] S. Jin and S. M. Ryan, “A Tri-level model of centralized transmission and decentralized generation expansion planning for an electricity market—Part II”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 1, pp. 142-148, January 2014
- [9] A. Motamedi, H. Zareipour, M. Oloomi Buygi and William D. Rosehart, “A transmission planning framework considering future generation expansions in electricity markets”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 3, pp. 1070-1077, August 2003

[۱۰] حسین شکری و سجاد نجفی رودانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۴ شماره ۱، صفحات ۴۲-۲۹، ۱۳۹۴

[۱۱] فرید محمدی، حمدی عبدی و احسان دهنوی، «حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخگویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۲، شماره ۳، صفحات ۳۴۳-۳۵۶، ۱۳۹۶.

- [12] S. Teimourzadeh and F. Aminifar, “MILP formulation for transmission expansion planning with short-circuit level constraints”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 2, pp. 885-895, August, 2015.
- [13] J. Wang and H. Zhong, “Transmission network expansion planning with embedded constraints of short circuit currents and N-1 security”, J. Mod. Power Syst. Clean Energy., vol. 3, no. 3, pp. 312-320, 2015.
- [14] S. Dobakhshari and M. Fotuhi-Firuzabad, “A reliability model of large wind farms for power system adequacy studies”, IEEE Trans. Energy Conv., vol. 24, no. 3, pp. 792-801, September 2009.

[۱۵] محمدرضا کریمی، جمشید آقائی و امین رحیمی رضایی، «به‌کارگیری بهینه‌سازی استوار جهت مقابله با عدم قطعیت نیروگاه‌های بادی در برنامه‌ریزی توسعه تولید»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۲، صفحات ۶۶۵-۶۷۶، ۱۳۹۶.

- [16] J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, A.V. Garcia and C.A. Murari, “Transmission network expansion planning with security constraints”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 152, no. 6, November 2005
- [17] H. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, and J. Quintero, “A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 2, pp. 1125-1133, May 2012

جدول ۱۴: خطوط اضافه‌شده در این مقاله و مرجع [۱۰]

خطوط جدید این مقاله	خطوط جدید مرجع [۱۰]
۱-۵، ۲-۴، ۳-۴، ۲-۶، ۲-۶	۱-۵، ۲-۴، ۳-۴، ۲-۴، ۳-۲۴، ۶-۸
۳-۲۴، ۳-۲۴، ۳-۲۴، ۶-۱۰، ۷-۸، ۷-۸	۸-۱۰، ۹-۱۲، ۱۰-۱۱، ۱۰-۱۲، ۱۰-۱۲
۷-۸، ۷-۸، ۹-۱۲، ۹-۱۲، ۱۰-۱۲	۱۱-۱۳، ۱۲-۲۳، ۱۴-۱۶، ۱۴-۲۴، ۱۵-۲۴
۱۰-۱۲، ۱۲-۲۳، ۱۲-۲۳، ۱۴-۱۶	۸-۱۰، ۹-۱۲، ۱۰-۱۲، ۲۰-۲۳، ۱۶-۱۹
۱۲-۲۳، ۱۴-۱۶، ۱۵-۲۴	۱۰-۱۲، ۱۳-۲۳، ۱-۵، ۲-۴، ۲-۶
۱۵-۲۴، ۱۶-۱۹، ۱۶-۱۹	۳-۲۴، ۶-۱۰، ۷-۸، ۱۰-۱۱
۲۰-۲۳، ۲۰-۲۳	۱۴-۱۶، ۱۵-۲۴، ۲-۶
هزینه (۲۶/۶۲) میلیون دلار	هزینه (۳۵/۴۸) میلیون دلار

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید برای برنامه‌ریزی همزمان سیستم‌های تولید و انتقال با در نظر گرفتن امنیت سیستم ارائه شد. در تحقیقات پیشین، از خطی‌سازی و روش‌های ابتکاری استفاده شده است و در این مقاله با استفاده از روش MILP پاسخ بهتری حاصل گردید. بخش بار بهینه برای سطوح مختلف بار به روابط اضافه شد و خطوط جدید به صورتی تعیین شد که در سطوح بار کم‌تر بتوان نیروگاه‌های با هزینه بیشتر را از مدار خارج نمود و هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. محدودیت سطح اتصال کوتاه به روش ابتکاری در نظر گرفته شد و با استفاده از این روش، نتایج بهتری نسبت به استفاده از خطی‌سازی و روش‌های ریاضی به دست آمد. در نظر گرفتن محدودیت جریان اتصال کوتاه تاکنون فقط در برنامه‌ریزی شبکه انتقال لحاظ شده بود، ولی در این مقاله در برنامه‌ریزی همزمان تولید و انتقال در نظر گرفته شد. ارزیابی امنیت N-1 نیز در قالب روابط خطی در مسئله اصلی آورده شد و با کمترین هزینه، خطوط و واحدهای جدید برای تأمین امنیت سیستم تعیین گردید. اجرای این روش برای موارد مطالعاتی، جزئیات عملکرد مناسب آن را نشان داد. مقایسه نتایج مقاله با سایر مقالات نیز نشان‌گر هزینه کمتر و نتایج بهتر بود. با توجه به سرعت اجرای زیاد در این روش برای مسائل عملی و بزرگ نتایج مناسبی به همراه دارد.

مراجع

- [1] Y. Gu, J. D. McCalley, and M. Ni, “Coordinating large-scale wind integration and transmission planning”, IEEE Trans. Sustainable Energy, vol. 3, no. 4, pp. 652-659, October 2012
- [2] B. Alizadeh and S. Jadid, “Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming”, IET Gener. Transm. Distrib., vol. 5, pp. 948-960, 2011
- [3] A. Khodaei and M. Shahidepour “Microgrid-based co-optimization of generation and transmission planning in power systems”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1582-1590, May 2013
- [4] J. Aghaei, N. Amjady, A. Baharvandi and M. A. Akbari, “Generation and transmission expansion planning: MILP-

- IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 4, pp. 4558-4567, November 2013
- [24] P. Murugan, "Modified particle swarm optimization with a novel initialization for finding optimal solution to the transmission expansion planning problem", IET Gener. Transm. Distrib., vol. 6, no. 11, pp. 1132-1142, 2012
- [25] A. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, L. M. Honório and L.A.F. Manso, "Performance comparison of metaheuristics to solve the multi-stage transmission expansion planning problem", IET Gener. Transm. Distrib., vol. 5, pp. 360-367, 2011.
- [26] J. Grainger and W. Stevenson, "Power system analysis", McGraw Hill, New York, 1994.
- [27] R. Romero, and A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, "Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning", Proc. Inst. Electr. Eng.-Gener. Transm. Distrib., vol. 149, no. 1, pp.27-36, Jan. 2002.
- [28] APM Subcommittee, "IEEE reliability test system," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, pp. 2047-2054, 1979.
- [18] G. A. Orfanos, S. Pavlos. N. Georgilakis, and D. Hatziaargyriou, "Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration", IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1355-1362, May 2013
- [19] J. Choi, T.D. Mount, and R.J. Thomas, "Transmission expansion planning using contingency criteria", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 4, pp. 2249-2261, 2007
- [20] M. Shahidehpour, W. F. Tinney, and Y. Fu, "Impact of security on power systems operation," Proc. IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2013-2025, Dec. 2005.
- [21] V. S. K. Murthy Balijepalli, and S.A. Khaparde, "A holistic approach for transmission system expansion planning studies: an indian experience", IEEE Syst. Journal, vol. 5, no. 2, June 2011.
- [22] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, and A. Villegas, "Classification of publications and models on transmission expansion planning," IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 2, pp. 938-946, May 2003.
- [23] R. A. Jabr, "Robust Transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads",

^v Expected energy not served

[^] Genetic algorithm

[^] Simulated annealing

[^] Tabu search

[^] Direct current

[^] Mixed integer linear programming

^v Generation expansion planning

^v Transmission expansion planning

[€] Bender Decomposition

[°] Independent system operator

[^] Loss of load probability