

تجزیه ساختاری تولید جهت ارزیابی تحلیلی تلفات شبکه با در نظر گرفتن تراکم شبکه انتقال

علی غزنوی^۱، کارشناس ارشد؛ محمد ابراهیم حاجی آبادی^۲، استادیار؛ منصور خلیلیان^۳، کارشناس ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه حکیم سبزواری - سبزوار - ایران - a.ghaznavi@sun.hsu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه حکیم سبزواری - سبزوار - ایران - me.hajiabadi@hsu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه حکیم سبزواری - سبزوار - ایران - kh.mansour99@gmail.com

چکیده: هدف از این مقاله بررسی تحلیلی تلفات شبکه در سطوح مختلف بار می‌باشد. برای رسیدن به این هدف ابتدا در گام اول برنامه بازار اجرا شده و در لم ۱ و با کمک ضرایب لاگرانژ مولفه‌های ساختاری مؤثر بر تولید واحدها به دست آمده است. با کمک تجزیه ساختاری انجام شده، به صورت تحلیلی حساسیت تولید هر واحد بر تغییر بار هر باس به دست آمده است. در گام دوم، در لم ۲ رابطه‌ای تحلیلی بین تغییر توان انتقالی خطوط و تغییر بار به دست آورده شده است. در نهایت به کمک نتایج لم‌های یک و دو، شاخص تلفات برای هر باس LI_n و شبکه LI^{sys} به صورت تحلیلی ارائه شده است. LI_n بیانگر تغییر تلفات شبکه به ازاء تغییر بار باس n می‌باشد. انتظار می‌رود که LI_n همواره مثبت باشد، اما با توجه به برنامه بازار، مکان نقاط بار و تولید و نیز تراکم، مقدار LI_n می‌تواند بر خلاف انتظار منفی گردد. این موضوع برای شاخص LI^{sys} نیز صادق است. در این مقاله نقطه بحرانی بار برای هر باس و نیز کل شبکه از دیدگاه تلفات شبکه به عنوان میزانی از بار باس و یا شبکه که شاخص LI_n برای هر باس و یا LI^{sys} برای شبکه تغییر علامت می‌دهد، تعریف شده است. به علاوه ناحیه‌ای از بار که شبکه دارای بیشترین تلفات می‌باشد نیز به عنوان ناحیه بحرانی بار از دیدگاه تلفات تعریف می‌گردد. ناحیه‌های بحرانی بار از دیدگاه تلفات می‌تواند در تصمیم‌گیری جهت مکان‌های اعمال سیاست‌های مدیریت مصرف مفید باشد. در انتها مطالعات بر روی سه شبکه استاندارد IEEE انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: بازار برق، روش لاگرانژ، تجزیه ساختاری تولید، تغییر سطح بار، ناحیه بحرانی، شاخص تلفات.

Analytical Assessment of the Network Losses Using Structural Generation Decomposition, Considering the Congestion

Ali Ghaznavi¹, MSc; Mohammad Ebrahim Hajiabadi², assistant professor; Mansour Khalilayan³, MSc

1- Faculty of Electrical & Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: a.ghaznavi@sun.hsu.ac.ir

2- Faculty of Electrical & Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: me.hajiabadi@hsu.ac.ir

3- Faculty of Electrical & Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: kh.mansour99@gmail.com

Abstract: The main goal of this paper is to structural and mathematical analysis of the network losses in different load levels. In order to achieve this aim, at the first step, the market is dispatched and the structural generation decomposition is proposed in lemma 1. This analytical decomposition reveals the sensitivity factor of marginal unit's generation to each bus load variation. At second step, in Lemma 2, the analytical relationship between the change of lines flow and load changes has been obtained. Finally the Loss Index for each bus, LI_n and the network LI^{sys} analytically is defined, using lemmas 1&2. LI_n analytically indicates the variation of network losses by variation of load at bus n . It is expected that the LI_n be the positive value. But, according to the market problem, load and generation disperse and congestion LI_n may be the negative value, unexpectedly. In this paper, in view point of the losses, the critical load point of each bus and the network is defined as the bus load or the network load value that change the sign of the LI_n and LI^{sys} , respectively. Moreover, the critical area of the load in viewpoint of the losses is defined as the load area that leads the maximum network losses. These results can be useful to decision making on the location options of the DSM programs. Finally the three IEEE standard networks are analyzed.

Keywords: Electricity market, Lagrange method, generation decomposition, load variation, critical area, loss index.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۱

نام نویسنده مسئول: محمد ابراهیم حاجی آبادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سبزوار - شهرک توحید - دانشگاه حکیم سبزواری - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

فهرست نمادها

L, L_{cong}	تعداد خطوط انتقال، تعداد خطوط متراکم
N, G	تعداد باس‌ها و تعداد واحدهای تولیدی
P_n, P_N, P_D	بار باس n ، بردار بار و کل بار شبکه (MW)
$P_g, P_g^{min}, P_g^{max}$	توان تولیدی واحد g ، حداقل و حداکثر تولید آن (MW)
$P_{g,n}, P_G$	توان تولیدی باس n ، بردار تولید واحدها (MW)
P_g^0, P_g^{new}	توان تولیدی ژنراتور g قبل از تغییر تولید، توان جدید تولیدی واحد g
P_{ing}	توان تزریقی
$F_g (P_g)$	هزینه تولید واحد g بر حسب (\$/MWh)
a_g, b_g	عرض از مبدأ و تابع پیشنهاد قیمت واحد g
$\lambda, \mu_g^{max}, \mu_g^{min}$	ضرایب لاگرانژ قید برابری، حداقل و حداکثر محدوده تولید واحد g
$\Gamma^{min}, \Gamma^{max}$	ضرایب لاگرانژ قیود بالا و پایین فلووی خطوط انتقال
K_{min}, K_{max}	تعداد واحدهایی که به حداقل و حداکثر تولیدشان محدودند، در نقطه تعادل بازار
$a_{l,g}$	ضرایب حساسیت تغییر تولید واحد g روی خط l
f_l, f_l^{max}	توان انتقالی خط l و حداکثر توان انتقالی آن خط
f_l^0	توان عبوری از خط l قبل از تغییر بار یا تغییر تولید
Δf_l	تغییرات توان انتقالی خط l در اثر تغییرات بار و تولید
Δf_{l_g}	تغییر توان انتقالی خط l در اثر تغییر تولید واحد g
Δf_{l_n}	تغییر توان انتقالی خط l در اثر تغییر بار باس n
$\Delta P_g, \Delta P_n$	تغییرات تولید ژنراتور g ، تغییرات بار باس n
P_{loss}	کل تلفات شبکه (MW)
LI_n, LF^{sys}	شاخص تلفات باس n و شاخص تلفات شبکه
LC	ضریب بار (اعدادی که برای برای تغییر سطح بار در نظر گرفته شده‌اند)
$A_{n,g}'''$	ضرایب حساسیت تولید واحد g در اثر تغییر بار باس n

۱- مقدمه

ارزیابی تلفات شبکه قدرت و ارائه راه کارهای مناسب جهت کاهش آن همواره از دغدغه‌های طراحان و بهره‌برداران سیستم قدرت بوده است. از طرفی، با ظهور تجدید ساختار در صنعت برق و نیاز به تخصیص تلفات مرتبط با شرکت کنندگان مختلف در بازار برق، لزوم محاسبه دقیق تلفات اهمیت بیشتری یافته است.

مسلماً میزان انرژی تلف شده در شبکه فوق توزیع و انتقال به پارامترهای مختلف از جمله میزان مصرف انرژی سالانه، الگوی مصرف بار، میزان پراکندگی بار و تولید در شبکه، رفتار بازار برق، میزان تمرکز و یا پراکندگی اقتصادی واحدهای تولید در شبکه و ... وابسته است. به عبارتی اعمال هرگونه سیاست فنی، اقتصادی و یا اجتماعی در فضای برنامه‌ریزی و یا بهره‌برداری و نیز در سمت تولید، شبکه و یا تقاضا می‌تواند بر تلفات شبکه فوق توزیع و انتقال تأثیرگذار باشد. بنابراین سیاست‌های اعمالی از طرف سیاست‌گذاران در سمت تقاضا جهت اصلاح و تغییر الگوی مصرف در شبکه بر تلفات شبکه فوق توزیع و انتقال تأثیر به‌سزایی دارد.

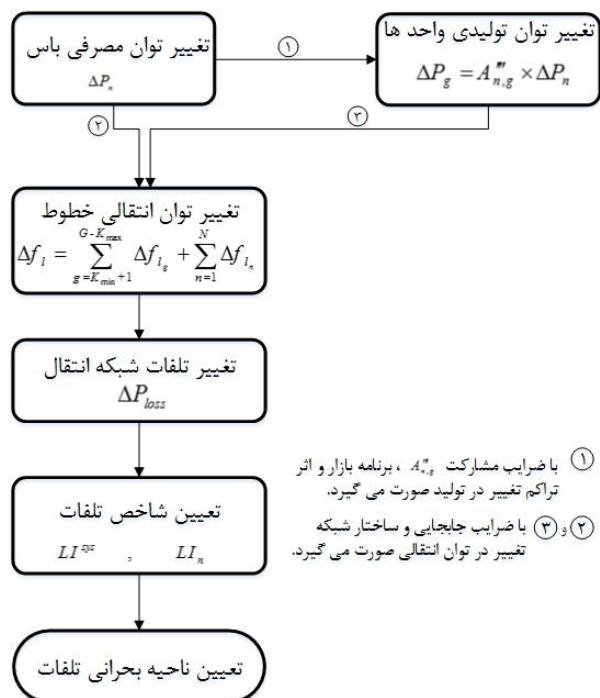
۱-۱- مروری بر ادبیات موضوع

مطالعات انجام شده را می‌توان به سه حوزه دسته‌بندی نمود. بخش وسیعی از مسائل مطرح شده به مدیریت بار از طریق سیاست‌های مدیریت مصرف و تأثیر تجهیزات ذخیره ساز بر تلفات پرداخته‌اند. بخش دیگری از مطالعات تلفات خطوط انتقال و اثر تراکم خطوط را بررسی کرده‌اند. بخش سوم از مطالعات انجام شده به تخصیص تلفات انتقال و توزیع پرداخته است.

مرجع [۱] به ارزیابی کاربرد منابع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی بر کاهش تلفات خطوط انتقال پرداخته است. همچنین مزایای سیستم‌های ذخیره انرژی که منجر به سودآوری اقتصادی در مدیریت مصرف می‌شود را بیان کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذخیره‌سازها تا یک نقطه بهینه، تلفات انتقال و توزیع کاهش می‌یابد. با عبور از این نقطه بهینه با افزایش مجدد اندازه ذخیره سازها تلفات دوباره افزایش می‌یابد. مرجع [۲] پتانسیل کاهش تلفات را در یک شبکه توزیع شعاعی با واحدهای خورشیدی از طریق تسطیح بار با استفاده از ذخیره انرژی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که فاصله بین منابع ذخیره انرژی و بارها نقش مهمی در کاهش تلفات انرژی دارد. بنابراین بیش‌ترین کاهش تلفات انرژی هنگامی که منابع ذخیره انرژی در نزدیکی بار واقع شده است به‌دست می‌آید. همچنین استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی به‌صورت توزیع‌شده در شبکه، تقریباً به میزان دو برابر نسبت به منابع ذخیره‌ساز انرژی متمرکز بهبود تلفات در شبکه را دارد. مرجع [۳] با انتقال بارهای خانگی به دوره‌های کم‌باری تلفات شبکه توزیع را به مقدار قابل توجهی کاهش داده است. مدل ارائه‌شده برای کاهش تلفات بدون کاهش انرژی می‌باشد. این مرجع انگیزه‌هایی برای کاهش، تعرفه‌ای شدن هزینه‌ها و منافع در سرتاسر قسمت‌های مختلف در نظر گرفته است.

مرجع [۴] به مدل‌سازی ریاضی پخش بار و حداقل کردن تلفات خط انتقال پرداخته است. در این مرجع یک مدل ریاضی برای تعیین تلفات خطوط انتقال، به‌عنوان اثر تلفات اهمی و تلفات کرونا با توجه به شناخت جریان و ولتاژ در طول خطوط پیشنهاد شده است. برای فرمول‌بندی روش ارائه‌شده، از بهینه‌سازی کلاسیک برای حداقل کردن تلفات خطوط انتقال استفاده شده است. مرجع [۵] اثرات تغییرات سرعت باد را روی کاهش تلفات خطوط انتقال در بازار برق بررسی می‌کند. در این مرجع از روش برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین موقعیت بهینه و تعداد ژنراتورها با توجه به حداقل کردن تلفات استفاده شده است. اثر تنوع سرعت باد در مدل بهینه‌سازی گنجانده شده است. به‌علاوه اثر تغییر سرعت باد روی توان خروجی مشخص شده و تأثیر آن بر تلفات انتقال به‌دست آمده است. با توجه به موقعیت بهینه تعیین‌شده برای ژنراتورهای بادی با افزایش سرعت باد و افزایش خروجی ژنراتورها تلفات سیستم به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. مرجع [۶] یک چهارچوب جدید برای مدیریت تراکم خطوط با استفاده از ضرایب خطوط انتقال پیشنهاد کرده است، به‌طوری‌که امنیت شبکه را در تابع هدف مسئله مدیریت تراکم در نظر گرفته است. مدیریت تراکم به‌عنوان یک فعالیت ضروری مطرح شده

لم‌های یک و دو، شاخص تلفات برای هر باس LI_n و شاخص تلفات شبکه LI^{sys} برای اولین بار و به صورت تحلیلی تعریف شده است. شاخص تحلیلی تلفات LI_n بیان‌گر تغییر تلفات شبکه به ازاء تغییر بار باس n می‌باشد. مسلماً انتظار می‌رود که شاخص LI_n همواره عددی مثبت باشد. بدان معنا که با کاهش بار شبکه، تلفات نیز کاهش یابد. اما با توجه به برنامه بازار، مکان نقاط بار و تولید و نیز تراکم شبکه مقدار LI_n می‌تواند بر خلاف انتظار، عددی منفی گردد. این موضوع برای شاخص LI^{sys} نیز صادق است. این شاخص‌ها می‌توانند مبنای مناسبی جهت تعیین نواحی بحرانی بار و شبکه از دیدگاه تلفات باشد. در این مقاله نقطه بحرانی بار از دیدگاه تلفات شبکه به عنوان میزانی از بار شبکه که شاخص LI^{sys} تغییر علامت می‌دهد، تعریف شده است. به علاوه ناحیه‌ای از بار که شبکه دارای بیش‌ترین تلفات می‌باشد نیز به عنوان ناحیه بحرانی بار از دیدگاه تلفات تعریف می‌گردد.



شکل ۱: مراحل طی شده در پژوهش

در گام سوم مطالعات عددی بر روی سه شبکه استاندارد IEEE انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تلفات شبکه را در سطوح مختلف بار بررسی می‌نماید. پس از بررسی و مقایسه نتایج در شبیه‌سازی دیده شده است که دو شبکه مطالعاتی دارای ناحیه بحرانی می‌باشند. در این شبکه‌ها اوج تلفات در اوج بار شبکه نمی‌باشد. بلکه در مقداری کمتر از حداکثر بار است (نقطه بحرانی). در نقطه بحرانی شبکه ۲۴ باسه با توجه به این‌که بار شبکه ۱۵٪ کاهش داشته است اما تلفات نسبت به حالت پایه ۳۳٪ افزایش یافته است. همچنین شبکه ۱۱۸ باسه در نقطه بحرانی ۱۰٪ کاهش بار داشته اما تلفات ۲٪ افزایش نسبت به حالت پایه را دارد. بنابراین در این شبکه‌ها پارامترهایی از قبیل بار، تولید، تلفات و شاخص تلفات در ناحیه بحرانی بررسی و مقایسه شده است.

که باید برای جلوگیری از تجاوز قیود انتقال و برای اجتناب از تراکم در سیستم قدرت انجام شود. ژنراتورها و بارها ممکن است تنظیم مناقصه خود را به منظور کمک به برنامه‌های مدیریت تراکم ارسال کنند. بیش‌ترین هدف مشترک در مدیریت تراکم برنامه‌ریزی مجدد تولید، تراکم و قطع بار با کم‌ترین هزینه است.

مرجع [۷] یک روش جدید برای تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع شعاعی با منابع تولید پراکنده و مدل‌های مختلف بار ارائه می‌دهد. در روش ارائه شده یک ارتباط مستقیم بین توان اکتیو و تلفات با در نظر گرفتن فرضیات و تقریب ایجاد شده است. مرجع [۸] اثبات می‌کند که روش‌های افزایشی به‌طور دقیق در تخصیص تلفات برای تعیین توزیع بار و راه‌برد تأمین تلفات به کار گرفته می‌شوند. در این مرجع نتایج اصلی اگرچه در ابتدا مقدار کمی رشد یافته ولی بعداً به تغییرات بزرگ افزایش یافته است. در نهایت یک الگوریتم تخصیص تلفات افزایشی کلی ارائه شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. مراجع [۹، ۱۰] به تخصیص تلفات و هزینه تلفات انتقال برای ژنراتورها و بارها در چهارچوب یک بازار برق پرداخته‌اند. در این مراجع الگوریتم‌های مختلف تخصیص تلفات مقایسه شده‌اند.

۱-۲- هدف، روش و نوآوری

تغییر در بار شبکه به دلیل تغییر در وضعیت تولید نیروگاه‌ها با توجه به برنامه بازار برق و در نتیجه تغییر در توان انتقالی خطوط با توجه به ساختار شبکه، باعث افزایش و یا کاهش تلفات در شبکه فوق توزیع و انتقال می‌شود. هدف از این مقاله بررسی ساختاری-تحلیلی تلفات شبکه فوق توزیع و انتقال در سطوح مختلف بار و تحلیل وضعیت تلفات در برابر تغییر بار می‌باشد. برای رسیدن به این هدف ۳ گام اساسی برداشته شده است. در گام اول به صورت تحلیلی اثر تغییر بار شبکه بر تغییر ساختار تولید با در نظر گرفتن تراکم شبکه به دست آمده است. به این منظور برنامه بازار اجرا شده و در لم ۱ مولفه‌های ساختاری مؤثر بر تولید واحدها به دست آمده است. در مدل تحلیلی ارائه شده تولید هر واحد به صورت ساختاری به ۵ قسمت تجزیه شده است. قسمت اول مقداری ثابت برای هر ژنراتور می‌باشد که به ساختار شبکه بستگی دارد. قسمت دوم جمع وزن‌دار راه‌برد راه‌برد واحدی حدی است. قسمت سوم و چهارم به ترتیب جمع وزن‌دار تولید واحدهایی است که با حد بالا و پایین خود مواجه شده‌اند. قسمت پنجم جمع وزن‌دار بار روی باس‌ها می‌باشد. با کمک تجزیه ساختاری انجام شده، به صورت تحلیلی حساسیت تولید هر واحد بر تغییر بار هر باس با در نظر گرفتن اثر تراکم به دست آمده است. هدف از گام دوم بررسی تحلیلی تغییر تلفات شبکه نسبت به تغییر بار باس‌ها می‌باشد. مسلماً تغییر بار شبکه، با توجه به برنامه بازار و مطابق با لم ۱ باعث تغییر در تولید واحدها می‌گردد.

در لم ۲ و با کمک ضرایب به دست آمده از لم ۱، رابطه‌ای تحلیلی بین تغییر توان انتقالی خطوط و تغییر بار به دست آورده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از آن‌جا که تغییر توان انتقالی خطوط متغیری از تغییر بار و تغییر تولید است، در نهایت به کمک نتایج

باید توجه نمود که رابطه (۴) بر مبنای پخش بار DC بوده و تلفات شبکه با توجه به توان انتقالی به دست آمده برای خطوط جای گذاری می شود. برای حل مسئله بهینه سازی رابطه (۴) می توان از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده نمود [۱۴-۱۵].

۳- تجزیه ساختاری تولید و بررسی تحلیلی اثر تغییر بار شبکه بر تغییر تولید با در نظر گرفتن اثر تراکم

تغییر بار شبکه متناسب با پیشنهاد قیمت نیروگاه ها و برنامه بازار، موجب تغییر برنامه ریزی تولید نیروگاه ها می شود. معادله (۵) رابطه لاگرانژ متناظر با تابع بهینه سازی (۴) را بیان می نماید.

$$L = \sum_{g=1}^G (a_g \times P_g + \frac{b_g}{2} \times P_g^2) + \lambda (\sum_{g=1}^G P_g - \sum_{n=1}^N P_n) + \sum_{g=1}^G (\mu_g^{\min} (P_g^{\min} - P_g)) + \sum_{g=1}^G (\mu_g^{\max} (P_g - P_g^{\max})) + \sum_{l=1}^L \left(\Gamma_l^{\min} \left(-f_l^{\max} - \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_{g,n} - P_n) \right) \right) + \sum_{l=1}^L \left(\Gamma_l^{\max} \left(\sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_{g,n} - P_n) - f_l^{\max} \right) \right) \quad (5)$$

توان تولیدی واحدها به کمک معادله لاگرانژ (۵) و محاسبه شرایط کان-تاکر به دست می آید.

لم ۱: برای شبکه های با ساختار T و بر اساس پخش بار DC، اگر واحد gام واحدی حدی باشد، آنگاه توان تولیدی واحد gام را می توان مطابق زیر بر اساس پارامترهای تاثیرگذار بازار تجزیه نمود:

$$P_g = A_{0,g} + \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} A_{j,g} \times a_j + \sum_{j=G-K_{\max}+1}^G A'_{j,g} \times P_j^{\max} - \sum_{j=1}^{K_{\min}} A''_{j,g} \times P_j^{\min} + \sum_{n=1}^N A'''_{n,g} \times P_n \quad (6)$$

اثبات: لم ۱ در دو مرحله اثبات می شود. در مرحله اول شرایط کان-تاکر برای معادله لاگرانژ (۵) در نقطه تعادل بازار بررسی می شود. سپس در مرحله دوم لم ۱ با استفاده از شرایط کان-تاکر اثبات می گردد.

مرحله اول: بدون از دست رفتن کلیت مسئله، در این مقاله فرض می شود که جهت انتخابی برای خطوط منطبق بر جهت واقعی توان انتقالی آن ها می باشد بنابراین قید پایین توان انتقالی خطوط آزاد می گردند. بنابراین ترم $\sum_{l=1}^L \Gamma_l^{\min} a_{l,g}$ در شرط اول کان-تاکر همواره برابر صفر بوده و در بقیه روابط ظاهر نخواهد شد. با استفاده از شرط اول کان-تاکر و مطابق با رابطه (۷) توان تولیدی واحدها به دست آورده می شود.

$$P_g = \frac{\lambda - a_g - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_l^{\min} a_{l,g}}{b_g} \quad g = K_{\min} + 1, \dots, G - K_{\max} \quad (7)$$

$$P_g = P_g^{\max} \quad g = G - K_{\max} + 1, \dots, G$$

$$P_g = P_g^{\min} \quad g = 1, \dots, K_{\min}$$

بسیاری از پدیده های سیستم قدرت همچون مدیریت مصرف باعث تغییر بار در شبکه می گردند، لذا نتایج به دست آمده از این مقاله می تواند مبنای تحلیلی مناسبی جهت ارزیابی اثر این پدیده ها بر تغییر تلفات شبکه باشد.

در ادامه در بخش دوم ابتدا فرمولاسیون مسئله تشریح می شود. در بخش سوم به کمک روش لاگرانژ توان تولیدی ژنراتورها با در نظر گرفتن اثر تراکم به صورت ساختاری تجزیه شده است. در بخش چهارم با تجزیه توان انتقالی خطوط شاخص تلفات به دست آمده است. در بخش پنجم اثر تغییر سطح بار بر روی سه شبکه مطالعاتی بررسی و نتایج تحلیل و شبیه سازی شده است. بخش پایانی شامل جمع بندی و نتیجه گیری می باشد.

۲- فرمول بندی مسئله

در این مقاله فرض بر ثابت بودن ساختار شبکه در سطوح مختلف بار می باشد. از طرفی تأمین بار شبکه از طریق بازار برق عمده فروشی با قیمت گذاری نقطه ای صورت می پذیرد. واحدهای تولیدی پیشنهاد قیمت توان تولیدی خود را مطابق با رابطه (۱) به بازار ارائه می دهند [۱۱].

$$F_g(P_g) = a_g + b_g \times P_g \quad (1)$$

$$st : P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max}$$

معادله (۲) نشان می دهد که با تلفیق دو قید پخش بار و محدودیت توان انتقالی خطوط و با کمک ضرایب جابجایی تولید این دو قید تبدیل به قید محدودیت روی جمع وزن دار تریق توان باس ها می گردد [۱۴-۱۲].

$$-f_l^{\max} \leq f_l \leq f_l^{\max} \quad \Leftrightarrow \quad -f_l^{\max} \leq \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_{g,n} - P_n) \leq f_l^{\max} \quad (2)$$

باید توجه نمود که $a_{l,n}$ در رابطه (۳) همان ضرایب جابجایی تریق توان در باس nام نسبت به خط lام می باشد. با کمک این ضرایب می توان اثر تغییر بار یا تولید را روی توان انتقالی خطوط مشاهده نمود. در این مقاله ضرایب جابجایی تولید واحد g واقع بر باس n بر خط l به صورت زیر تعریف می شود:

$$a_{l,g} = \frac{\Delta f_l}{\Delta P_g} = a_{l,n} \quad (3)$$

با اجرای برنامه بازار مطابق با رابطه (۴) قیمت نقطه ای برق، میزان توان تولیدی واحدها و میزان توان انتقالی خطوط به دست می آید.

$$\min \sum_{g=1}^G (a_g \times P_g + \frac{b_g}{2} \times P_g^2) \quad (4)$$

$$st : \sum_{g=1}^G P_g = \sum_{n=1}^N P_n \quad (\lambda)$$

$$-f_l^{\max} \leq \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_{g,n} - P_n) \leq f_l^{\max} \quad (\Gamma_l^{\min}, \Gamma_l^{\max}) \quad l = 1, \dots, L$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (\mu_g^{\min}, \mu_g^{\max}) \quad g = 1, \dots, G$$

رابطه (۸) بیان گر شرط دوم کان-تاکر می باشد.

$$\frac{\partial l}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \sum_{g=1}^G P_g = \sum_{n=1}^N P_n \Rightarrow \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{\lambda - a_g - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_l^{\max} a_{l,g}}{b_g} \right) = \sum_{n=1}^N P_n - \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G P_g^{\max} - \sum_{g=1}^{K_{\min}} P_g^{\min} \quad (8)$$

با کمی دست کاری در معادله (۸) می توان مقدار λ را در (۹) به دست آورد:

$$\lambda = \frac{\sum_{n=1}^N P_n - \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G P_g^{\max} - \sum_{g=1}^{K_{\min}} P_g^{\min} + \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_g}{b_g} \right)}{C_1} + \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_l^{\max} \left(\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{b_g} \right) / C_1 \right)$$

که در آن $C_1 = \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{1}{b_g}$ است. باید توجه شود که اگر شبکه دچار تراکم نشود ترم دوم در سمت راست معادله (۹) صفر خواهد شد. معادله (۱۰) بیان گر شرط چهارم کان-تاکر برای خطوط متراکم می باشد.

$$\left(\sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_{g,n} - P_n) \right) = f_l^{\max} \quad l = 1, \dots, L_{\text{cong}} \quad (10)$$

از آن جایی که $P_{g,n}$ توان تولیدی روی باس n ام می باشد، داریم:

$$\sum_{g=1}^G a_{l,g} \times P_g - \sum_{n=1}^N a_{l,n} \times P_n = f_l^{\max} \Rightarrow \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\frac{\lambda - a_g - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_k^{\max} a_{k,g}}{b_g} \right) + \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G a_{l,g} P_g^{\max} + \sum_{g=1}^{K_{\min}} a_{l,g} P_g^{\min} = \sum_{n=1}^N a_{l,n} P_n + f_l^{\max} \quad (11)$$

هدف محاسبه رابطه ای بین a_g ، $\Gamma_l^{\max}$ ، $P_j^{\min}$ ، $P_j^{\max}$ و P_n است. جهت رسیدن به این هدف λ در معادله (۱۰) با مقدار به دست آورده شده برای آن در رابطه (۹) جایگزین می گردد و داریم:

$$\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\frac{\sum_{n=1}^N P_n - \sum_{j=G-K_{\max}+1}^G P_j^{\max}}{-\sum_{j=1}^{K_{\min}} P_j^{\min} + \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{b_j} \right)} \right) / C_1 + \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_l^{\max} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,j}}{b_j} \right) / C_1 \right) - a_g - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_k^{\max} a_{k,g} \quad (12)$$

$$+ \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G a_{l,g} P_g^{\max} + \sum_{g=1}^{K_{\min}} a_{l,g} P_g^{\min} = \sum_{n=1}^N a_{l,n} P_n + f_l^{\max} \quad l = 1, \dots, L_{\text{cong}}$$

با کمی دست کاری در معادله (۱۲)، معادله (۱۳) را داریم:

$$\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{n=1}^N \frac{P_n}{C_1 b_g} \right) - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{j=G-K_{\max}+1}^G \frac{P_j^{\max}}{C_1 b_g} \right) - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{j=1}^{K_{\min}} \frac{P_j^{\min}}{C_1 b_g} \right) + \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_g}{b_g} \right) + \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_l^{\max} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_g} \right) - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_k^{\max} \frac{a_{k,g}}{b_g} \right) \right) + \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G a_{l,g} P_g^{\max} + \sum_{g=1}^{K_{\min}} a_{l,g} P_g^{\min} = \sum_{n=1}^N a_{l,n} P_n + f_l^{\max} \quad (13)$$

با تجميع متغيرها در معادله (۱۳)، معادله (۱۴) به دست می آید.

$$\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_g}{b_g} \right) + \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_k^{\max} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j}}{b_j} \right) / C_1 b_g \right) - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_k^{\max} \frac{a_{k,g}}{b_g} \right) + \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G \left(a_{l,g} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) P_g^{\max} + \sum_{g=1}^{K_{\min}} \left(a_{l,g} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) P_g^{\min} = \sum_{n=1}^N \left(a_{l,n} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) P_n + f_l^{\max} \quad (14)$$

عصر اول در سمت چپ معادله (۱۴) را می توان مطابق با رابطه (۱۵) بازنویسی نمود.

$$\alpha_1(l, g) = \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_{l,g}}{b_g}$$

$$\beta_1(l, k) = \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j} \right) / C_1 b_g - \frac{a_{l,g} a_{k,g}}{b_g} \right)$$

$$A_1 = [A_{1,g}] = \left[\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} - a_{l,g} \right]$$

$$B_1 = [B_{1,g}] = \left[\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} - a_{l,g} \right]$$

$$C_2(l, n) = a_{l,n} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g}$$

$$\Gamma^{\max} = [\Gamma_k^{\max}]$$

$$a = [a_g]$$

مرحله دوم (تجزیه P_g): هدف اصلی از این مرحله محاسبه P_g بر اساس تغییر بار باس‌ها می‌باشد. بر این مبنا λ در معادله (۱۹) با مقدار به‌دست آورده شده برای آن در رابطه (۹) جای‌گزینی می‌گردد و داریم:

$$P_g = \left(\lambda - a_g - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_l^{\max} a_{l,g} \right) / b_g =$$

$$\left(\frac{\sum_{n=1}^N P_n - \sum_{j=G-K_{\max}+1}^G P_j^{\max} - \sum_{j=1}^{K_{\min}} P_j^{\min} + \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{b_j} \right)}{C_1} + \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_l^{\max} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,j}}{b_j} \right) / C_1 \right) - a_g - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_l^{\max} a_{l,g} \right) / b_g \quad (19)$$

معادله (۲۰) با کمی دستکاری در معادله (۱۹) به‌دست می‌آید.

$$P_g = \sum_{n=1}^N \left(\frac{P_n}{C_1 b_g} \right) - \sum_{j=G-K_{\max}+1}^G \left(\frac{P_j^{\max}}{C_1 b_g} \right) - \sum_{j=1}^{K_{\min}} \left(\frac{P_j^{\min}}{C_1 b_g} \right) + \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_g}{b_g} + \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} - \frac{a_{l,g}}{b_g} \right) \Gamma_l^{\max}$$

$$g = K_{\min}+1 : G - K_{\max} \quad (20)$$

معادله (۲۱) بیان برداری معادله (۲۰) می‌باشد.

$$P_g = \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1 b_g} P_N - \frac{\text{Ones}(1, K_{\max})}{C_1 b_g} P^{\max} - \frac{\text{Ones}(1, K_{\min})}{C_1 b_g} P^{\min} + \alpha_2 a + \beta_2 \Gamma^{\max}$$

$$(21)$$

که در آن:

$$\alpha_2 = [\alpha_{lj}] = \begin{cases} \frac{1}{C_1 b_g b_j} & j \neq g \\ \frac{1}{C_1 b_g b_g} - \frac{1}{b_g} & j = g \end{cases}$$

$$\beta_2(g, l) = \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} - \frac{a_{l,g}}{b_g}$$

$$\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_g}{b_g} \right)$$

$$= \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_j}{C_1 b_g b_j} \right) - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \frac{a_g}{b_g}$$

$$= \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} \right) a_g - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \frac{a_g}{b_g} \right)$$

$$= \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_{l,g}}{b_g} \right) a_g$$

عنصر دوم در سمت چپ معادله (۱۴) را می‌توان مطابق با رابطه (۱۶) بازنویسی نمود.

$$\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \left(\sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_k^{\max} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j}}{b_j} \right) / C_1 b_g - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \Gamma_k^{\max} \frac{a_{k,g}}{b_g} \right) \right)$$

$$= \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} a_{l,g} \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_k^{\max} \left(\left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j}}{b_j} \right) / C_1 b_g - \frac{a_{k,g}}{b_g} \right) \right)$$

$$= \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\Gamma_k^{\max} \left(\left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j} \right) / C_1 b_g - \frac{a_{l,g} a_{k,g}}{b_g} \right) \right)$$

$$= \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j} \right) / C_1 b_g - \frac{a_{l,g} a_{k,g}}{b_g} \right) \right) \Gamma_k^{\max}$$

معادله (۱۴) را می‌توان با استفاده از معادلات (۱۵) و (۱۶) به‌صورت معادله (۱۷) بازنویسی نمود.

$$\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} \right) - \frac{a_{l,g}}{b_g} \right) a_g$$

$$+ \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \left(\sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \left(\left(\sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j} \right) / C_1 b_g - \frac{a_{l,g} a_{k,g}}{b_g} \right) \right) \Gamma_k^{\max}$$

$$+ \sum_{g=G-K_{\max}+1}^G \left(a_{l,g} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) P_g^{\max}$$

$$+ \sum_{g=1}^{K_{\min}} \left(a_{l,g} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) P_g^{\min}$$

$$= \sum_{n=1}^N \left(a_{l,n} - \sum_{g=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) P_n + f_l^{\max}$$

معادله (۱۸) بیان برداری معادله (۱۷) می‌باشد.

$$\alpha_1 a + \beta_1 \Gamma^{\max} = f_l^{\max} + A_1 P^{\max} + B_1 P^{\min} + C_2 P_N$$

$$\Rightarrow \Gamma^{\max} = \beta_1^{-1} f_l^{\max} - \beta_1^{-1} \alpha_1 a + \beta_1^{-1} A_1 P^{\max} + \beta_1^{-1} B_1 P^{\min} + \beta_1^{-1} C_2 P_N$$

$$(18)$$

رابطه (۱۸) بیان می‌نماید که در نقطه کار داده شده $\Gamma_l^{\max}$ رابطه خطی با a_g ها، $P_j^{\max}$ ، $P_j^{\min}$ و P_n دارد. که در آن:

$$\Delta P_g = A_{n,g}''' \times \Delta P_n \Rightarrow A_{n,g}''' = \frac{\Delta P_g}{\Delta P_n} \quad (25)$$

مقدار ضرائب $A_{n,g}'''$ با در نظر گرفتن اثر تراکم خطوط محاسبه شده‌اند. بزرگ بودن ضریب $A_{n,g}'''$ بدان معناست که تولید واحد g با تغییر بار در باس n بسیار حساس می‌باشد. باید توجه نمود که ضرائب $A_{n,g}'''$ می‌توانند مقادیری مثبت و یا منفی باشند.

۴- بررسی تحلیلی تغییر بار بر تلفات خطوط انتقال

۴-۱- بررسی تحلیلی تغییر بار بر تغییر توان انتقالی خطوط

همانطور که در لم ۱ اثبات شد، با تغییر بار شبکه و بر اساس پیشنهاد قیمت نیروگاه‌ها و اجرای برنامه بازار، تغییر در تولید صورت می‌گیرد. مطابق با رابطه (۲۵) تغییر در بار باس n باعث تغییر در تولید واحد g می‌شود و داریم:

$$P_g^{New} = P_g^0 + \Delta P_g = P_g^0 + A_{n,g}''' \times \Delta P_n \quad (26)$$

لم ۲: تجزیه توان انتقالی خطوط: برای شبکه‌ای با ساختار T و بر اساس پخش بار DC، توان عبوری از خط l به ازای تغییر در بار باس‌ها را داریم:

$$f_l = f_l^0 + \sum_{n=1}^N \left(\left(\sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \times A_{n,g}''' \right) - a_{l,n} \right) \times \Delta P_n \quad (27)$$

اثبات: اثر تغییر بار یا تغییر تولید بر تغییر توان انتقالی خطوط را می‌توان به کمک ضرائب جابه‌جایی شبکه به‌دست آورد. ضرائب تغییر در تولید در رابطه (۳) بیان شده است. تغییر در توان انتقالی خطوط را مطابق بار رابطه زیر داریم:

$$f_l = f_l^0 + \Delta f_l \quad (28)$$

از طرفی تغییر بار و تغییر تولید در باس‌ها با توجه به ضرائب جابه‌جایی باعث تغییر در توان انتقالی خطوط طبق معادله (۲۹) خواهد شد.

$$\Delta f_l = \Delta f_{l_g} + \Delta f_{l_n} \quad (29)$$

با استفاده از ضرائب جابه‌جایی تولید واحد g واقع بر باس n در (۳) تغییر توان انتقالی خط l را داریم:

$$\Delta f_l = \sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} \Delta f_{l_g} + \sum_{n=1}^N \Delta f_{l_n} = \quad (30)$$

$$\sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \times \Delta P_g - \sum_{n=1}^N a_{l,n} \times \Delta P_n$$

معادله (۳۰) را می‌توان با استفاده از (۲۵) به‌صورت زیر نوشت:

$$\Delta f_l = \sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \left(\sum_{n=1}^N A_{n,g}''' \times \Delta P_n \right) - \sum_{n=1}^N a_{l,n} \times \Delta P_n \quad (31)$$

با کمی دست‌کاری در معادله (۳۱) داریم:

$$\Delta f_l = \sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} \sum_{n=1}^N a_{l,g} \times A_{n,g}''' \times \Delta P_n - \sum_{n=1}^N a_{l,n} \times \Delta P_n = \quad (32)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} (a_{l,g} \times A_{n,g}''' \times \Delta P_n) - \sum_{n=1}^N (a_{l,n} \times \Delta P_n)$$

سپس رابطه (۲۲) با جای‌گذاری $\Gamma_l^{\max}$ در معادله (۲۱) با مقدار آن در رابطه (۱۸) به‌دست می‌آید.

$$P_g = \frac{Ones(1, N)}{C_1 b_g} P_N - \frac{Ones(1, K_{max})}{C_1 b_g} P^{\max} - \frac{Ones(1, K_{min})}{C_1 b_g} P^{\min} + \alpha_2 a + \beta_2 \beta_1^{-1} C - \beta_2 \beta_1^{-1} \alpha_1 a + \beta_2 \beta_1^{-1} A_1 P^{\max} + \beta_2 \beta_1^{-1} B_1 P^{\min} + \beta_2 \beta_1^{-1} C_2 P_N \quad (22)$$

با ساده‌سازی معادله (۲۲) نتیجه می‌شود.

$$P_g = \beta_2 \beta_1^{-1} C + (\alpha_2 - \beta_2 \beta_1^{-1} \alpha_1) \times a + \left(\frac{-Ones(1, K_{max})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} A_1 \right) \times P^{\max} + \left(\frac{-Ones(1, K_{min})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} B_1 \right) \times P^{\min} + \quad (23)$$

$$\left(\frac{Ones(1, N)}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} C_2 \right) \times P_N \Rightarrow$$

$$P_g = A_{0,g} + A_g \times a + A'_g \times P^{\max} + A''_g \times P^{\min} + A'''_g \times P_N$$

که در این‌جا:

$$A_{0,g} = \beta_2 \beta_1^{-1} C$$

$$A_g = \alpha_2 - \beta_2 \beta_1^{-1} \alpha_1$$

$$A'_g = \frac{-Ones(1, K_{max})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} A_1$$

$$A''_g = \frac{-Ones(1, K_{min})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} B_1$$

$$A'''_g = \frac{Ones(1, N)}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} C_2$$

رابطه (۲۴) بیانی دیگر از رابطه (۲۳) می‌باشد.

$$P_g = A_{0,g} + \sum_{j=K_{min}+1}^{G-K_{max}} A_{j,g} \times a_j + \sum_{j=G-K_{max}+1}^G A'_{j,g} \times P_j^{\max} - \sum_{j=1}^{K_{min}} A''_{j,g} \times P_j^{\min} + \sum_{n=1}^N A'''_{n,g} \times P_n \quad (24)$$

$$g = K_{min} + 1 : G - K_{max}$$

بنابراین لم ۱ اثبات گردید.

در لم ۱ واحدهای تولیدی به سه دسته تقسیم شده‌اند: دسته اول K_{min} واحدهای گرانی هستند که در بازار برنده نشده و در نتیجه به حد پایین خود محدود شده‌اند؛ دسته دوم $G - (K_{min} + K_{max})$ واحدهایی هستند که در نقطه تسویه بازار با قیود تولید مواجه نشده و در فرایند تولید ژنراتورها مشارکت دارند و تولید واحدها به‌طور مستقیم متأثر از تغییر بار باس‌ها و راه‌برد قیمت‌دهی این نیروگاه‌ها است و دسته سوم K_{max} واحدهایی هستند با حد بالای خود مواجه شده‌اند.

هدف از تجزیه توان ژنراتورها در لم ۱ به‌دست آوردن نسبت تغییر تولید به تغییرات بار با در نظر گرفتن اثر تراکم خطوط می‌باشد. رابطه (۶) در لم ۱ توان ژنراتورها را به عناصر سازنده آن تجزیه نموده به‌طوری‌که به‌طور مستقیم اثر تغییر بار هر باس بر تغییر تولید ژنراتورها مشخص می‌گردد.

$$LI_n = \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_n} = \sum_{l=1}^L \left(2k_l \times f_l^\circ \times \sum_{n=1}^N \left(\sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \times A_{n,g}''' - a_{l,n} \right) \right) \quad (39)$$

در معادله (۳۹) شاخص تلفات LI_n تعریف شده است. شاخص تلفات حساسیت تلفات شبکه نسبت به تغییر بار با n ام را بیان می‌کند. به‌طور مشابه می‌توان شاخص تلفات را مطابق رابطه (۴۰) برای کل سیستم بیان نمود:

$$LI^{sys} = \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_D} \quad (40)$$

که در آن ΔP_D تغییر بار شبکه و LI^{sys} شاخص تلفات سیستم می‌باشد. طبق معادله (۴۰) اگر با کاهش بار تلفات شبکه کاهش پیدا کند شاخص تلفات مقداری مثبت می‌باشد. اگر کاهش بار موجب افزایش تلفات شبکه شود شاخص تلفات منفی خواهد بود. شاخص تلفات، وضعیت تلفات شبکه را در هر سطح باری مشخص می‌کند. همانطور که قبلاً اشاره شد در برخی شبکه‌ها به دلیل ساختار شبکه، برنامه بازار و برنامه‌ریزی تولید واحدها ممکن است کاهش بار در محدوده‌ای خاص (ناحیه بحرانی) اثر معکوس بر تلفات شبکه داشته باشد، که در این شبکه‌ها منحنی تلفات در محدوده بحرانی‌شان دارای شیب منفی می‌باشد. از این‌رو شیب منفی در منحنی تلفات این شبکه‌ها ممکن است باعث شود بسیاری از برنامه‌های مدیریتی شبکه اثر معکوس داشته باشند یا تغییری در کاهش تلفات ایجاد نکنند.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حل مسئله بازار ارائه می‌گردد. سپس توان انتقالی خطوط در سطح بارهای مختلف بررسی شده است. مطالعات عددی بر روی سه شبکه استاندارد IEEE در سطوح بار مختلف انجام گرفته است. شبیه‌سازی با استفاده از محیط برنامه نویسی MatLab انجام شده است.

۵-۱- بررسی اثر کاهش بار بر تلفات شبکه ۹ باسه

شبکه ۹ باسه استاندارد IEEE دارای ۳ ژنراتور، ۳ ترانسفورماتور و ۶ خط انتقال می‌باشد. داده‌های این شبکه در مرجع [۱۶] آمده است. منحنی تلفات این شبکه وضعیت بحرانی ندارد و صرفاً به دلیل بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی آورده شده است. ابتدا اثر کاهش بار بر تلفات شبکه ۹ باسه بررسی می‌شود. ۸۱ ضریب بار بین ۰.۲ تا ۱ برای کاهش بار در نظر گرفته شده است. این ضرائب به بار شبکه اعمال و برنامه بازار مطابق با رابطه (۴) اجرا می‌گردد. سپس تلفات شبکه محاسبه می‌گردد. منحنی تلفات شبکه در اثر تغییر بار در شکل ۲ نشان داده شده است.

همانطور که انتظار می‌رود با توجه به نتایج به‌دست آمده، کاهش بار شبکه، کاهش توان انتقالی از خطوط و کاهش تلفات را داشته است. همچنین اثر کاهش بار باس بر تلفات این شبکه در ۱۶ نقطه بار بررسی شده است. این شبکه سه باس بار دارد که کاهش بار هر یک بررسی شده

با ساده‌سازی نتیجه می‌شود:

$$\Delta f_l = \sum_{n=1}^N \left(\left(\sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \times A_{n,g}''' - a_{l,n} \right) \times \Delta P_n \right) \quad (33)$$

با جای‌گذاری رابطه (۳۳) در معادله (۲۸) نتیجه می‌شود:

$$f_l = f_l^0 + \sum_{n=1}^N \left(\left(\sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \times A_{n,g}''' - a_{l,n} \right) \times \Delta P_n \right) \quad (34)$$

بنابراین لم ۲ اثبات گردید.

f_l در هر خط را می‌توان با محدوده مجاز آن مقایسه کرد و تغییر در توان انتقالی را مشاهده نمود. رابطه (۲۷) در لم ۲ توان انتقالی خطوط به عناصر سازنده آن تجزیه نموده است. به‌طوریکه اثر تغییر بار و تغییر تولید را در نظر گرفته است. باید توجه نمود ضرائب $a_{l,n}$ ، $a_{l,g}$ ، $A_{n,g}'''$ حول نقطه کار ثابت می‌باشد، از این‌رو تغییر توان انتقالی (ترم دوم معادله (۲۷)) در اثر تغییر بار با استفاده این ضرائب قابل پیش‌بینی خواهد بود. قابل پیش‌بینی بودن این تغییرات قبل از این که برنامه بازار اجرا شود یکی دیگر از نکات مهم این مقاله است.

۴-۲- بررسی اثر تغییر بار شبکه بر تلفات خطوط انتقال

با توجه به این که از تحلیل DC استفاده شده است تلفات شبکه با توجه به توان انتقالی خطوط به‌دست می‌آید. تلفات در شبکه انتقال با مجذور جریان خطوط متناسب است و داریم:

$$P_{loss} = R \times I^2 = R \times \left(\frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 = \begin{cases} \text{if } dc \text{ load flow } U=1 \text{ pu} \\ \cos \varphi = 1 \end{cases} \quad (35)$$

$$\Rightarrow P_{loss} = R \times f^2$$

از آن‌جائیکه جریان با توان انتقالی متناسب است، بنابراین تجزیه رابطه (۳۵) را داریم:

$$P_{loss} = \sum_{l=1}^L k_l \times f_l^2 \Rightarrow P_{loss}^\circ + \Delta P_{loss} = \sum_{l=1}^L k_l \times (f_l^\circ + \Delta f_l)^2 \Rightarrow \quad (36)$$

$$\Delta P_{loss} = \sum_{l=1}^L \left(2k_l \times f_l^\circ \times \Delta f_l + k_l \Delta f_l^2 \right) \quad \Delta f_l^2 = 0$$

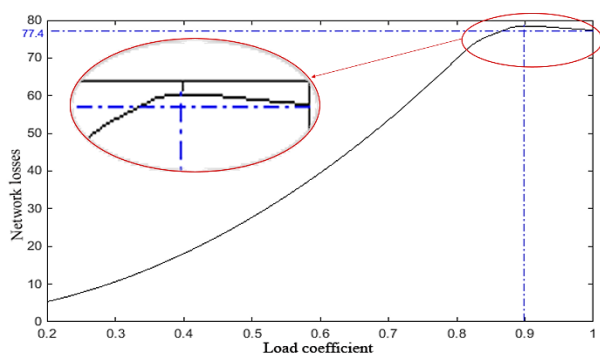
با ساده‌سازی (۳۶) تغییر تلفات شبکه را به‌صورت زیر داریم:

$$\Delta P_{loss} = \sum_{l=1}^L 2k_l \times f_l^\circ \times \Delta f_l \quad (37)$$

با استفاده از (۲۷) نتیجه می‌شود:

$$\Delta P_{loss} = \sum_{l=1}^L \left(2k_l \times f_l^\circ \times \sum_{n=1}^N \left(\sum_{g=K_{min}+1}^{G-K_{max}} a_{l,g} \times A_{n,g}''' - a_{l,n} \right) \times \Delta P_n \right) \quad (38)$$

از آن‌جا که هدف بررسی تغییر تلفات شبکه به ازای تغییر بار باس n ام می‌باشد، بنابراین تغییر بار در دیگر باس‌ها را صفر فرض نموده و داریم:



شکل ۳: اثر کاهش بار بر تلفات شبکه ۱۱۸ باسه

ناحیه بحرانی مشخص شده در شکل ۳ دارای شیب منفی و مثبت از دیدگاه تلفات شبکه می‌باشد. بنابراین در این ناحیه از ضریب بار پارامترهایی از قبیل بار کل، تلفات و شاخص تلفات در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: شاخص تلفات در اثر تغییر بار شبکه ۱۱۸ باسه

LC	P_D (MW)	P_{loss} (MW)	LF^{sys}
۱	۴۲۴۲	۷۷.۴	۰
۰.۹۹	۴۱۹۹	۷۷.۵۰	-۰.۰۰۲۴
۰.۹۸	۴۱۵۷	۷۷.۶۲	-۰.۰۰۲۷
۰.۹۷	۴۱۱۴	۷۷.۷۵	-۰.۰۰۳۰
۰.۹۶	۴۰۷۲	۷۷.۸۷	-۰.۰۰۳۲
۰.۹۵	۴۰۲۹	۷۸.۰۱	-۰.۰۰۳۳
۰.۹۴	۳۹۸۷	۷۸.۱۵	-۰.۰۰۳۱
۰.۹۳	۳۹۴۵	۷۸.۲۸	-۰.۰۰۳۰
۰.۹۲	۳۹۰۲	۷۸.۴۰	-۰.۰۰۲۹
۰.۹۱	۳۸۶۰	۷۸.۴۷	-۰.۰۰۱۵
۰.۹	۳۸۱۷	۷۸.۵۰	-۰.۰۰۰۶
۰.۸۹	۳۷۷۵	۷۸.۴۰	۰.۰۰۲۱
۰.۸۸	۳۷۳۳	۷۸.۱۲	۰.۰۰۶۷
۰.۸۷	۳۶۹۰	۷۷.۴۴	۰.۰۱۵۹
۰.۸۶	۳۶۴۸	۷۶.۷۵	۰.۰۱۶۲

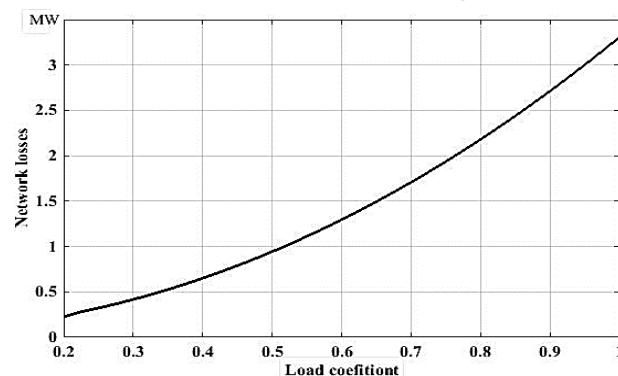
در ضریب بار ۱ تا ۰/۹ شیب منحنی تلفات منفی بوده لذا شاخص تلفات منفی شده است. همچنین ضریب بارهای کمتر از ۰/۸۹ دارای شیب مثبت و شاخص تلفات نیز مثبت می‌باشد.

۵-۳- بررسی اثر کاهش بار بر تلفات شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS

شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE-RTS به عنوان مورد مطالعاتی اصلی در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به این شبکه در مرجع [۱۸] آمده است. این شبکه شامل ۳۲ ژنراتور، ۳۸ خط انتقال و ۲۴ باس با ظرفیت کل ۳۴۰۵ مگاوات و بیشینه بار ۲۸۵۰ مگاوات می‌باشد. منحنی تلفات این شبکه در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که روی شکل مشخص شده است این شبکه دارای ناحیه بحرانی است. با توجه به شکل ۴، با کاهش بار تلفات ابتدا افزایش، و از یک ناحیه‌ای به بعد کاهش می‌یابد.

بیشترین تلفات در مقدار ضریب بار ۰/۸۵ با مقدار بار ۲۴۲۲ مگاوات و مجموع تلفات ۶۲/۳ مگاوات می‌باشد (نقطه بحرانی). وجود شیب منفی در این منحنی در ضریب بار ۰/۸۵ تا ۱ نکته کلیدی است که این مقاله به بررسی تحلیلی آن پرداخته است.

است. با توجه به نتایج به دست آمده کاهش سطح بار باس ۷ در تمام نقاط تأثیر منفی در کاهش تلفات شبکه را دارد بنابراین نتایج عددی حاصل از تحلیل ضرائب این باس در جدول ۱ آورده شده است. این جدول بار روی باس، تلفات شبکه و شاخص تلفات را در سطوح بار مختلف باس هفتم نشان می‌دهد.



شکل ۴: منحنی تلفات در اثر کاهش بار شبکه ۹ باسه

جدول ۱: کاهش بار باس هفتم شبکه ۹ باسه

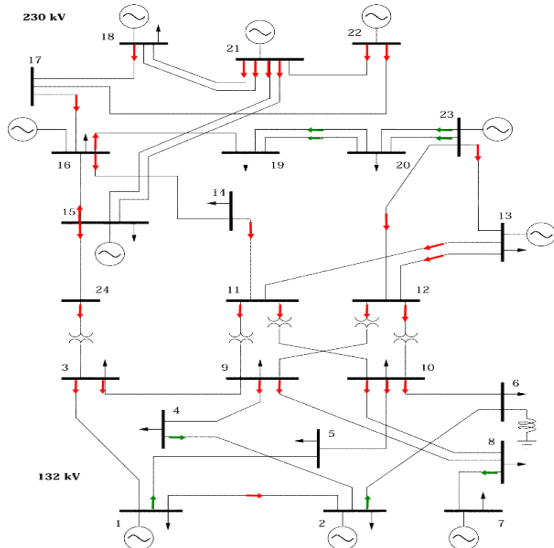
LC	بار باس (MW)	P_{loss} (MW)	LF^{sys}	LC	بار باس (MW)	P_{loss} (MW)	LF^{sys}
۱	۱۰۰	۳.۳۰۶	۰	۰.۸۴	۸۴	۳.۳۳۳	-۰.۰۰۲۵
۰.۹۸	۹۸	۳.۳۰۸	-۰.۰۰۰۷	۰.۸۲	۸۲	۳.۳۴	-۰.۰۰۲۸
۰.۹۶	۹۶	۳.۳۱۰	-۰.۰۰۰۱	۰.۸	۸۰	۳.۳۴۵	-۰.۰۰۳۰
۰.۹۴	۹۴	۳.۳۱۲	-۰.۰۰۱۲	۰.۷۸	۷۸	۳.۳۵۱	-۰.۰۰۳۳
۰.۹	۹۲	۳.۳۱۵	-۰.۰۰۱۵	۰.۷۶	۷۶	۳.۳۵۸	-۰.۰۰۳۵
۰.۸۸	۹۰	۳.۳۱۹	-۰.۰۰۱۷	۰.۷۴	۷۴	۳.۳۶۶	-۰.۰۰۳۸
۰.۸۷	۸۸	۳.۳۲۳	-۰.۰۰۲۰	۰.۷۲	۷۲	۳.۳۷۴	-۰.۰۰۴۱
۰.۸۶	۸۶	۳.۳۲۸	-۰.۰۰۲۳	۰.۷	۷۰	۳.۳۸۳	-۰.۰۰۴۳

با توجه به جدول ۱ شاخص تلفات سیستم منفی می‌باشد و با کاهش بار کوچک‌تر می‌شود. این بدین معنی است که با کاهش بار این باس تلفات شبکه افزایش پیدا می‌کند به نوعی منحنی تلفات در اثر تغییر بار این باس دارای شیب منفی می‌باشد.

۵-۲- بررسی اثر کاهش بار بر تلفات شبکه ۱۱۸ باسه IEEE

جهت بررسی عمیق این موضوع این تحلیل بر روی شبکه‌های بزرگ و واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این جا مدل مربوط بر روی شبکه ۱۱۸ باسه IEEE شبیه‌سازی شده است که اطلاعات مورد نیاز مربوط به این شبکه در مرجع [۱۷] می‌باشد. این شبکه شامل ۵۴ ژنراتور، ۱۸۶ خط انتقال و ۱۱۸ باس با ظرفیت کل ۹۹۶۶ مگاوات و ماکزیمم بار ۴۲۴۲ مگاوات می‌باشد. شکل ۳ اثر کاهش بار بر تلفات شبکه را نشان می‌دهد. همانطور که بر روی شکل مشخص شده است این شبکه دارای ناحیه بحرانی می‌باشد که با کاهش سطح بار مقدار تلفات کمی افزایش یافته است که نشان می‌دهد که بیشترین تلفات در ضریب باری کمتر از یک است. تلفات در ضریب بار یک برابر ۷۷/۴ مگاوات و در ضریب بار ۰/۹ مقدار تلفات ۷۸/۵ مگاوات می‌باشد. بنابراین بیشترین تلفات در ضریب بار ۰/۹ می‌باشد.

و به دنبال آن افزایش توان انتقالی خطوط و افزایش تلفات شده است. در جدول ۳ توان تولیدی روی باس، در دو حالت بار کامل و ۰/۸۵ بار آورده شده است. در ستون چهارم و پنجم این جدول به ترتیب حداکثر و حداقل تولید روی باسها قرار داده شده است.

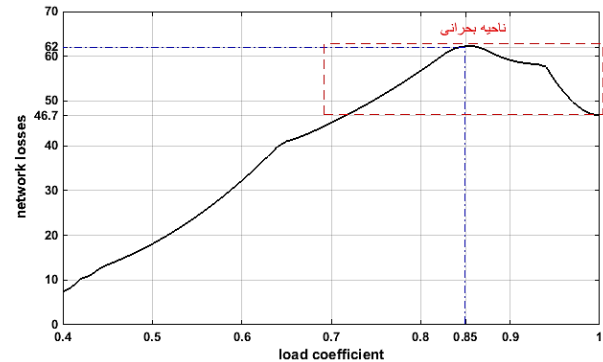


شکل ۵: دیاگرام تک خطی شبکه ۲۴ باسه

جدول ۳: مقادیر تولید در بار کامل و ۰/۸۵ بار

شماره باس تولید	$P_{g,n} (MW)$ $LC=1$	$P_{g,n} (MW)$ $LC=0.85$	$P_{g,n}^{max} (MW)$	$P_{g,n}^{min} (MW)$
۱	۱۸۴	۷۱	۱۹۲	۶۲.۴
۲	۱۸۴	۷۲	۱۹۲	۶۲
۷	۲۱۱	۷۵	۳۰۰	۷۵
۱۳	۲۳۵	۲۰۷	۵۹۱	۲۰۷
۱۵	۱۶۷	۱۶۷	۲۱۵	۶۶
۱۶	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵	۵۴
۱۸	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۰۰
۲۱	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۰۰
۲۲	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۶۰
۲۳	۶۶۰	۶۴۰	۶۶۰	۲۴۸

ستون سوم جدول ۳ توان تولیدی نیروگاهها را در نقطه بحرانی نشان می‌دهد. فقط باسهای ۱، ۲، ۷، ۱۳ و ۲۳ تغییرات تولید دارند. باسهای تولیدی دیگر که روی حداکثر تولید خود هستند در شمال شبکه قرار دارند. با توجه به ساختار بار و تولید در ناحیه بحرانی توان انتقالی خطوط به نحوی تغییر می‌کند که تلفات شبکه از حالت پایه بیشتر شود. شکل ۶ نمودار میله‌ای تلفات خطوط را در ضریب بارهای ۱ و ۰/۸۵ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ مشخص است با توجه به این که ضریب بار یک بزرگتر از ضریب بار ۰/۸۵ است اما تلفات در بیش‌تر خطوط در ضریب بار ۰/۸۵ بیش‌تر از یک است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود به ترتیب خطوط ۲۳، ۲۱، ۱۲ و ۲۷ بیش‌ترین تلفات را دارند. خط ۱۲ در ضریب بار ۰/۸۵، ۴ برابر افزایش تلفات را داشته است که بیش‌ترین تأثیر را در بین خطوط دارد.



شکل ۴: منحنی تلفات شبکه ۲۴ باسه IEEE

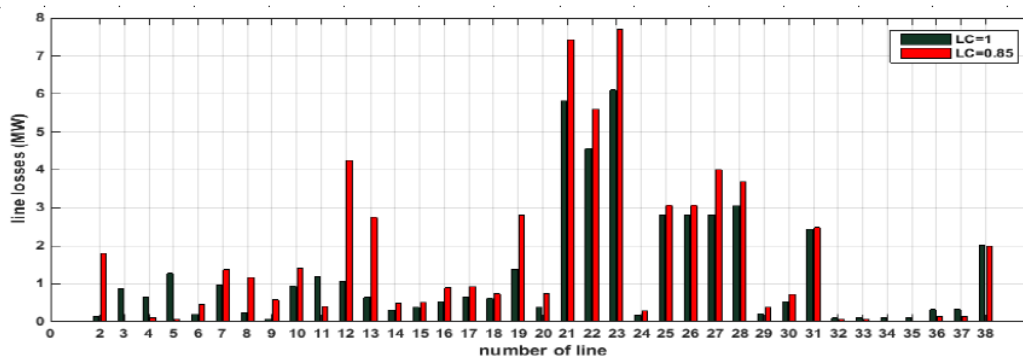
الف- بررسی رفتار تلفات بر اساس تحلیل آرایش تولید و توان عبوری خطوط

تغییر بار موجب تغییر برنامه بازار بر اساس راهبرد قیمت‌دهی نیروگاهها و تغییر آرایش تولید واحدها می‌شود. با توجه به ساختار بار، ساختار تولید و ساختار شبکه آرایش تولید و تغییر توان انتقالی می‌تواند به گونه‌ای باشد که در وضعیت تولید بهینه اقتصادی تلفات شبکه زیاد شود. به عنوان مثال در نقطه بحرانی بار شبکه ۱۵٪ کاهش داشته است، اما تلفات شبکه ۳۳٪ نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. علی‌رغم این که کاهش بار کاهش تولید را به همراه دارد انتظار می‌رود که کاهش تلفات را داشته باشیم. از طرف دیگر برنامه بازار و پیشنهاد قیمت واحدها برنامه‌های تولید را تحت قیودی خاص اجرا می‌کنند. لذا هر گونه تغییر بار در شبکه مستلزم بررسی برنامه بازار خواهد بود. از آنجایی که غالباً کاهش بار کاهش تلفات را به دنبال دارد لذا تا به امروز اثر سوء کاهش بار روی تلفات شبکه انتقال در مقالات مورد بررسی قرار نگرفته یا کم‌تر کار شده است. برای مشخص شدن وضعیت نقطه بحرانی، تلفات خطوط را در نقطه بحرانی نسبت به وضعیت عادی شبکه بررسی می‌کنیم. شکل ۵ تغییر تلفات خطوط در نقطه بحرانی را بر روی دیاگرام تک خطی شبکه ۲۴ باسه نشان می‌دهد. خطوط اضافه بار شده با رنگ قرمز مشخص شده است و خطوط انتقالی که تلفات آنها کاهش داشته است با رنگ سبز نیز مشخص است. پس از نتایج حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی و بررسی وضعیت تولید و راهبرد قیمت‌دهی نیروگاهها مشخص شده است که با کاهش بار تولید واحدهایی که تابع هزینه بالایی دارند کاهش می‌یابد که با توجه ساختار شبکه این واحدها در جنوب شبکه (از دیدگاه شکل) قرار دارند لذا بارهای جنوبی شبکه را، نیروگاههای شمال ملزم به تأمین می‌شوند. از اینرو تبادل شمال به جنوب توان در شبکه افزایش پیدا می‌کند.

این بدین معنا است که تغییر توان به نسبت یکسانی روی نیروگاهها پخش نشده، بلکه متأثر از هزینه تولید واحدها بوده است. تغییر تولید در نقطه بحرانی به گونه‌ای است که واحدهای روی باسهای ۱، ۲ و ۱۵ روی حداقل تولید خود کار می‌کنند و دیگر واحدها در محدوده حداکثر خود می‌باشند. این موضوع باعث تبادلات شمال به جنوب توان در شبکه

جدول ۴: شاخص تلفات سیستم و شاخص تلفات باس در ناحیه بحرانی شبکه ۲۴ باسه

LC	۱	۰٫۹۸	۰٫۹۶	۰٫۹۴	۰٫۹۲	۰٫۹	۰٫۸۸	۰٫۸۶	۰٫۸۴	۰٫۸۲	۰٫۸	۰٫۷۸	۰٫۷۶	۰٫۷۴	۰٫۷۲	۰٫۷
LI_{sys}	۰	-۰٫۰۲۵	-۰٫۰۶۶	-۰٫۱۰۰	-۰٫۰۱۲	-۰٫۰۱۴	-۰٫۰۲۶	-۰٫۰۲۷	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۴۱	-۰٫۰۴۹	-۰٫۰۴۶	-۰٫۰۴۳	-۰٫۰۴۱	-۰٫۰۳۸	-۰٫۰۳۶
LI_1	-۰٫۰۴۵	-۰٫۰۸۷	-۰٫۱۲۹	۰	۰	۰	۰	۰٫۱۰۲	۰٫۰۹۶	۰٫۰۹۰	۰٫۰۸۴	۰٫۰۸۸	۰٫۰۸۵	۰٫۰۸۱	۰٫۰۷۷	۰٫۰۷۳
LI_2	-۰٫۰۴۴	-۰٫۰۸۶	-۰٫۱۲۸	۰	۰	۰	۰	۰٫۱۰۳	۰٫۰۹۷	۰٫۰۹۱	۰٫۰۸۵	۰٫۰۹۰	۰٫۰۸۶	۰٫۰۸۲	۰٫۰۷۸	۰٫۰۷۴
LI_3	-۰٫۰۴۹	-۰٫۰۹۱	-۰٫۱۳۵	-۰٫۰۱۹	-۰٫۰۳۳	-۰٫۰۴۷	-۰٫۰۶۱	۰٫۰۳۷	۰٫۰۳۲	۰٫۰۲۸	۰٫۰۲۳	۰٫۰۳۰	۰٫۰۲۸	۰٫۰۲۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۴
LI_4	-۰٫۰۱۲	-۰٫۰۵۳	-۰٫۰۹۴	۰٫۰۲۷	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۲	۰٫۱۰۲	۰٫۰۹۶	۰٫۰۹۱	۰٫۰۸۶	۰٫۰۹۱	۰٫۰۸۷	۰٫۰۸۴	۰٫۰۸۱	۰٫۰۷۷
LI_5	-۰٫۰۱۶	-۰٫۰۵۷	-۰٫۰۹۸	۰٫۰۲۴	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۳	۰٫۱۰۳	۰٫۰۹۸	۰٫۰۹۳	۰٫۰۸۷	۰٫۰۹۲	۰٫۰۸۹	۰٫۰۸۵	۰٫۰۸۲	۰٫۰۷۸
LI_6	۰٫۰۰۵	-۰٫۰۳۴	-۰٫۰۷۵	۰٫۰۴۳	۰٫۰۳۲	۰٫۰۲۱	۰٫۰۱۰	۰٫۱۰۹	۰٫۱۰۳	۰٫۰۹۸	۰٫۰۹۳	۰٫۰۹۸	۰٫۰۹۸	۰٫۰۹۱	۰٫۰۸۸	۰٫۰۸۵
LI_7	۰	۰	۰	۰٫۱۱۵	۰٫۰۹۸	۰٫۰۸۱	۰٫۰۶۳	۰٫۱۵۹	۰٫۱۵۲	۰٫۱۴۴	۰٫۱۳۷	۰٫۱۳۹	۰٫۱۳۴	۰٫۱۲۸	۰٫۱۲۲	۰٫۱۱۷
LI_8	۰٫۰۲۲	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۳	۰٫۱۰۲	۰٫۰۸۵	۰٫۰۶۹	۰٫۰۵۲	۰٫۱۴۸	۰٫۱۴۲	۰٫۱۳۵	۰٫۱۲۹	۰٫۱۳۲	۰٫۱۲۷	۰٫۱۲۲	۰٫۱۱۸	۰٫۱۱۳
LI_9	-۰٫۰۲۶	-۰٫۰۶۵	-۰٫۱۰۵	۰٫۰۱۱	-۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۸	-۰٫۰۳۲	۰٫۰۶۶	۰٫۰۶۲	۰٫۰۵۹	۰٫۰۵۵	۰٫۰۶۰	۰٫۰۵۸	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۴	۰٫۰۵۲
LI_{10}	-۰٫۰۱۸	-۰٫۰۵۷	-۰٫۰۹۷	۰٫۰۱۹	۰٫۰۰۶	-۰٫۰۰۸	-۰٫۰۲۱	۰٫۰۷۷	۰٫۰۷۳	۰٫۰۶۹	۰٫۰۶۵	۰٫۰۷۱	۰٫۰۶۸	۰٫۰۶۶	۰٫۰۶۳	۰٫۰۶۱
LI_{13}	-۰٫۰۳۸	-۰٫۰۷۹	-۰٫۱۱۹	-۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۹	-۰٫۰۳۴	-۰٫۰۴۸	۰٫۰۵۱	۰٫۰۴۸	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۱	۰٫۰۴۷	۰٫۰۴۶	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۲	۰٫۰۴۰
LI_{14}	-۰٫۰۴۶	-۰٫۰۸۷	-۰٫۱۲۸	-۰٫۰۱۴	-۰٫۰۲۹	-۰٫۰۴۴	-۰٫۰۶۰	۰٫۰۳۹	۰٫۰۳۵	۰٫۰۳۱	۰٫۰۲۷	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۱	۰٫۰۲۹	۰٫۰۲۸
LI_{15}	-۰٫۰۸۶	-۰٫۱۳۰	-۰٫۱۷۱	-۰٫۰۵۷	-۰٫۰۷۳	-۰٫۰۸۹	-۰٫۱۰۵	-۰٫۰۰۷	-۰٫۰۱۱	-۰٫۰۱۵	-۰٫۰۱۹	-۰٫۰۱۱	-۰٫۰۱۲	-۰٫۰۱۲	-۰٫۰۱۳	-۰٫۰۱۳
LI_{16}	-۰٫۰۸۳	-۰٫۱۲۵	-۰٫۱۶۷	-۰٫۰۵۳	-۰٫۰۶۹	-۰٫۰۸۵	-۰٫۱۰۱	-۰٫۰۰۲	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۰۹	-۰٫۰۱۳	-۰٫۰۰۵	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۰۷
LI_{18}	-۰٫۱۱۱	-۰٫۱۵۳	-۰٫۱۹۶	-۰٫۰۸۲	-۰٫۰۹۹	-۰٫۱۱۵	-۰٫۱۳۱	-۰٫۰۳۳	-۰٫۰۳۷	-۰٫۰۴۱	-۰٫۰۴۵	-۰٫۰۳۸	-۰٫۰۳۹	-۰٫۰۴۰	-۰٫۰۴۰	-۰٫۰۴۱
LI_{19}	-۰٫۰۷۷	-۰٫۱۱۹	-۰٫۱۶۱	-۰٫۰۴۷	-۰٫۰۶۳	-۰٫۰۷۸	-۰٫۰۹۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۳	۰	-۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶
LI_{20}	-۰٫۰۸۱	-۰٫۱۲۲	-۰٫۱۶۴	-۰٫۰۵۰	-۰٫۰۶۶	-۰٫۰۸۱	-۰٫۰۹۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰



شکل ۶: نمودار میلای تلفات خط‌های شبکه ۲۴ باسه

ب) بررسی تحلیلی رفتار تلفات

در جدول ۴ شاخص تلفات سیستم و شاخص تلفات باس‌ها در اثر کاهش بار در محدوده ناحیه بحرانی آورده شده است. از آنجایی که این محدوده از ضریب بار دارای شیب منفی و مثبت از دیدگاه تلفات است، لذا تحلیل و محاسبه ضرائب در این ناحیه از بار انجام شده است.

از جدول ۴ چند نکته قابل استنتاج است:

۱- LI_{sys} که با کمک رابطه (۴۰) محاسبه شده است، بیان‌گر حساسیت تلفات شبکه به تغییر بار کل می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد شاخص تلفات می‌تواند مثبت و یا منفی باشند. به عبارت دیگر در ناحیه بحرانی کاهش بار همواره باعث کاهش تلفات در شبکه نمی‌شود. بلکه این کاهش بار می‌تواند باعث افزایش تلفات شبکه گردد. به عنوان مثال کاهش بار از حالت پایه تا ۰/۸۵ بار شبکه باعث افزایش تلفات شبکه و در نتیجه شاخص تلفات منفی می‌گردد. از طرفی شاخص تلفات سیستم در ضریب بار ۰/۹۴ حساسیت بالای تلفات شبکه را به این سطح بار نشان می‌دهد.

۲- LI_n که با کمک رابطه (۳۹) محاسبه شده است، بیان‌گر حساسیت تلفات شبکه به تغییر بار در باس n می‌باشد. به عنوان مثال شاخص تلفات

باس‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۸ به کاهش بار در این باس‌ها بسیار حساس بوده و موجب افزایش تلفات شبکه می‌گردد اما باس‌های ۷ و ۸ حساسیت کمتر و نیز معکوس دارند. از طرفی می‌توان بیان نمود که باس‌های ۱۵ تا ۱۸ باس‌های بحرانی از دیدگاه تلفات می‌باشند. به عبارتی اعمال سیاست‌های مدیریت بار در این باس‌ها می‌تواند منجر به افزایش تلفات شبکه گردد. از طرفی باس‌های ۷ و ۸ مناسب‌ترین باس‌ها جهت اعمال برنامه‌های مدیریتی از جمله مدیریت مصرف از دیدگاه تلفات می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله بررسی ساختاری-تحلیلی تلفات شبکه در سطوح مختلف بار برای هر باس از شبکه می‌باشد. بدین منظور بعد از بررسی عددی تلفات در سطوح مختلف بار ناحیه بحرانی بار از دیدگاه تلفات معرفی گردید. در ناحیه بحرانی بار نسبت به تلفات، منحنی بار-تلفات دارای حداکثر تلفات در نقطه‌ای غیر از حداکثر بار شبکه می‌باشد. سپس شاخص تلفات (LI_n) که بیان‌گر تغییر تلفات شبکه به ازاء تغییر بار باس n می‌باشد برای هر باس به صورت تحلیلی و با کمک لم‌های ۱ و ۲ به دست

- آورده شد. در لم ۱ فرآیند تولید ژنراتورها در قالب یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شد. با کمک تجزیه ساختاری انجام‌شده، به‌صورت تحلیلی حساسیت تولید هر واحد بر تغییر بار هر باس به‌دست آورده شد. در لم ۲ رابطه‌ای تحلیلی بین تغییر توان انتقالی خطوط و تغییر بار به‌دست آمد. در نهایت به‌کمک نتایج لم‌های یک و دو، شاخص تلفات برای هر باس LI_n و شبکه LI^{sys} به‌صورت تحلیلی ارائه گردید. مطالعه برای ۳ شبکه استاندارد ۹ باسه، ۱۱۸ باسه و ۲۴ باسه انجام شد. با تحلیل شاخص LI_n باس‌های مناسب در شبکه جهت اعمال سیاست‌های سمت تقاضا از دیدگاه شاخص تلفات مشخص گردید. به‌عنوان مثال باس‌های ۱۵ تا ۱۸ شبکه ۲۴ باسه جهت اعمال برنامه مدیریت مصرف مناسب نبودند. تحلیل ضرائب پیشنهادی این مقاله بسیار کارآمد است به‌گونه‌ای که می‌تواند پیش‌زمینه مطلوبی برای مطالعات تحلیلی آینده باشد.
- ### مراجع
- [1] A. Nourai, V. I. Kogan and Chris M. Schafer. "Load leveling reduces T&D line losses." IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, p.p. 2168-2173, 2008.
 - [2] S. Junainah, et al., "Load levelling and loss reduction by ES in a primary distribution system with PV units." Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), IEEE Innovative. IEEE, 2015.
 - [3] R. Shaw, et al., "The value of reducing distribution losses by domestic load-shifting: a network perspective." Energy Policy, vol. 37, no. 8, p.p. 3159-3167, 2009.
 - [4] O. M. Bamigbola, M. M. Ali and M. O. Oke, "Mathematical modeling of electric power flow and the minimization of power losses on transmission lines." Applied Mathematics and Computation, no. 241, p.p. 214-221, 2014.
 - [5] M. Kumar, K. S. Sandhu and A. Kumar. "Wind speed variation impact on transmission loss reduction in electricity market." Procedia Computer Science, vol. 70, p.p. 526-537, 2015.
 - [6] M. Hojjat and M. H. Javidi Dasht Bayaz. "Security based congestion management considering transmission network contingencies in a competitive environment." 28st International Power System Conference, 2013.
 - [7] K. M. Jagtap and K. Kh. Dheeraj, "Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models." International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 75, 173-186, 2016.
 - [8] F. D. Galiana, A. J. Conejo and I. Kockar. "Incremental transmission loss allocation under pool dispatch." IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 1, p.p. 26-33, 2002.
 - [9] A. J. Conejo, et al., "Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms." IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 3, p.p. 571-576, 2002.
 - [10] D. A. Lima, A. J. Conejo and J. Contreras. "Allocation of the cost of transmission losses in a multimarket framework." Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 153, no. 6, 2006.
 - [11] مریم رمضانیان لنگرودی، سیدمازیار میرحسینی مقدم «استفاده از روش یادگیری رقابتی برای قیمت‌دهی استراتژیک شرکت‌های تولید بر اساس LMP در بازار برق»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، پذیرفته‌شده، ۱۳۹۵.
 - [12] W. Ongsakul and N. Petcharakas, "Transmission constrained generation scheduling in a centralized electricity market by improved Lagrangian relaxation." Power Engineering Society General Meeting, pp. 1156-1163. 2004.
 - [13] C. Li. Tseng, et al., "A transmission-constrained unit commitment method in power system scheduling" Decision Support Systems, vol. 24, p.p. 297-310, 1999.
 - [14] M. E. Hajiabadi and H. Rajabi Mashhadi, "LMP decomposition: a novel approach for structural market power monitoring." Electr. Power Syst. Res, vol. 99, pp. 30-37, 2013.
 - [15] جابر ولی نژاد، تقی بارفروش "ارزیابی تأثیر مشوق‌های سرمایه‌گذاری تحت شرایط عدم قطعیت روی برنامه‌ریزی توسعه تولید در بازارهای رقابتی برق" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات: ۳۵۷-۳۶۸، بهار ۱۳۹۵.
 - [16] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, vol. 7. New York: McGraw-hill, 1994.
 - [17] L. Wu, M. Shahidehpour and T. Li. "Cost of reliability analysis based on stochastic unit commitment." IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, p.p. 1364-1374, 2008.
 - [18] R. T. Force, "The IEEE reliability test system-1996." IEEE Trans. on Power Syst, vol. 14, no. 3, p.p. 1010-1020, 1999.