دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد برق-قدرت

بررسی تأثیر قراردادهای چرخش توان بر قیمت‌های حاشیه‌ای محلی

Effects Of Wheeling Transactions On Local Marginal Prices

اساتید راهنما:

دکتر مجید علومی بایگی

دکتر مهدی بانــژاد

ارائه دهنده :

شهرام شادمانی

پاییــز ۱۳۸۵

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

تقدیم به مـــادر عزیزم که هر چه دارم از اوست.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می دانم از همه اساتید محترم و دوستانی که در مراحل مختلف تحصیلی از الطاف آنها بهره‌مند بوده‌ام تشکر و قدردانی نموده و برای آنها موفقیت و شادمانی آرزو نمایم.

خصوصاً از اساتید محترم راهنما کمال تشکر را دارم و توفیق جبران زحمات آنها و نیز موفقیت ایشان را از خداوند متعال خواستارم.

شهرام شادمانی

پاییـز۱۳۸۵

فهرست مطالب

خلاصه ۱

فصل اول: مقدمه ۲

فصل دوم: قیمت‌های حاشیه‌ای محلی ۵

۲-۱- تعریف قیمت حاشیه‌ای محلی ۵

۲-۲- فرآیند پیشنهاد قیمت ۶

۲-۳- مدل ریاضی برای محاسبهٔ قیمت حاشیه‌محل ۷

۲-۴- پخش بار بهینه ۸

۲-۵- نتایج عددی ۱۰

فصل سوم: تأثیر قراردادهای چرخش توان بر قیمت‌های حاشیه‌ای محلی ۱۳

۳-۱- تعریف قراردادهای چرخش توان ۱۳

۳-۲- نتایج عددی ۱۴

فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۴۸

٤-۱- نتیجه گیری ۴۸

٤-۲- پیشنهادات ۵۰

مراجع: ۵۱

فهرست شکل‌ها:

شکل ۲-۱	.....	۶
شکل ۲-۲	.....	۱۰
شکل ۳-۱	.....	۱۴
شکل ۳-۲	.....	۱۵
شکل ۳-۳	.....	۱۶
شکل ۳-۴	.....	۱۶
شکل ۳-۵	.....	۱۷
شکل ۳-۶	.....	۱۷
شکل ۳-۷	.....	۲۱
شکل ۳-۸	.....	۳۲
شکل ۳-۹	.....	۳۲
شکل ۳-۱۰	.....	۳۴
شکل ۳-۱۱	.....	۳۴
شکل ۳-۱۲	.....	۳۵
شکل ۳-۱۳	.....	۳۵
شکل ۳-۱۴	.....	۳۶
شکل ۳-۱۵	.....	۴۷
شکل ۳-۱۶	.....	۴۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱ ..... ۱۱
جدول ۲-۲ ..... ۱۱
جدول ۲-۳ ..... ۱۱
جدول ۴-۱ ..... ۴۹
جدول ۴-۲ ..... ۴۹

خلاصه

امـروزه یکـی از بحث‌های مشترک در اکثر صنایع، بحث اقتصادی آن می‌باشد. صنعت برق نیز به عنوان یکـی از پـر هزینه‌ترین صنایع هر کشور از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. بهسـازی صنعت برق در بهره‌برداری بهیـنه از مجمـوع تأسیـسات آن خلاصـه مـی‌گـردد و بهـره‌بردار بهینه نیز با آگاهی هر چه بیشتر از شرایط تقاضـا - تأمـین، نقـاط کار و پارامترهای ادوات منصوبه در شبکه و همچنین قدرت تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصـله، تحقـق مـی‌یابـد. قـراردادهای چـرخش تـوان بعـنوان یکـی از مؤثرتـرین دستآویزهای بهره‌بردار در بهـره‌برداری بهینه، به شمار می‌رود. می‌توان با عقد قراردادهای چرخش توان در جهت مناسب، توسعه شبکهٔ انتقال و احداث نیروگاه جدید را به تعویق انداخت.

در فصل اول تعاریفی کلی از قراردادهای چرخش توان مطرح و درخصوص ترانزیت بهینه و قوانین حاکم بـر ترانـزیت نیز مطالبی بیان می‌شود. در فصل دوم پس از بیان مفاهیم قیمت حاشیه‌ای محلی، با استفاده از بـرنامه نویـسی مطلـب و اسـتفاده از روش سـیمپلکس یـک تابع هزینهٔ بهره‌برداری کمینه می‌گردد. در این کمینه‌سازی و روابط ارائه شده، تلفات انتقال لحاظ نشده است. در فصل سوم بحث قراردادهای چرخش توان بطـور کامل مطرح می‌گردد و همچنین نشان داده می‌شود که به ازای تغییر باس‌های ورودی و خروجی توان عـبوری در یک شبکهٔ نوعی، چه تأثیری بر تراکم خطوط دارد. علاوه برآن روند تغییرات قیمت‌های حاشیه‌ای محلی باس‌ها نیز بررسی می‌شود. خلاصهٔ نتایج نیز در فصل آخر ارائه می‌گردد.

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

بهره‌وری پایین سیستم قدرت سنتی در تأمین انرژی الکتریکی باعث گردید تا همانند صنایع هوایی و مخابرات تجدید ساختار در صنعت برق مطرح گردد. رقابت و دسترسی آزاد به سیستم انتقال دو موضوع اساسی در تجدید ساختار صنعت برق می‌باشد[۴]. خصوصی‌سازی و تغییر ساختارهای موجود در جهت ایجاد رقابت بیشتر و دسترسی آزاد و بدون تبعیض تولیدکنندگان مختلف به سیستم انتقال می‌باشد. برای آنکه سیستم قدرت به اهداف مورد نظر برسد، اجزای مختلف آن از همدیگر تفکیک می‌گردد و نهاد جدیدی به نام ISO به وجود می‌آید تا رقابت، دسترسی آزاد کاربران به سیستم انتقال، و ایمنی سیستم انتقال در حضور اعضای مختلف بازار تضمین شود. ISO مسئولیت‌های مختلفی از قبیل بهره‌برداری از سیستم قدرت[۱۱]، مدیریت بازار انرژی، پیش‌بینی و تأمین تجهیزات سیستم انتقال و تجهیزات جانبی را بر عهده دارد. یکی از اطلاعات مهمی که ISO باید آنرا محاسبه و از طریق یک شبکه الکترونیکی متصل به اینترنت در اختیار عموم قرار دهد، قابلیت انتقال در دسترس می‌باشد. علاوه بر آن ISO بایستی با در اختیار داشتن تمام اطلاعات شبکه سعی نماید که هزینه بهره‌برداری کمینه گردد. مؤثرترین روش جهت کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری کاهش تراکم خطوط انتقال شبکه مورد نظر با عقد قراردادهای چرخش توان است [۱].

وقتی شبکه توزیع یا انتقال یک شرکت، برای انتقال انرژی الکتریکی بین دو قسمت بکار می‌رود از کلمه تـوان چرخشی یا توان عبوری و اکثراً ترانزیت (Wheeling) استفاده می‌شود[۵]. ترانزیت همان انتقال انرژی

از فروشـنده بـه خـریدار اسـت و ایـن کار از طریق خطوط انتقال و توزیع که مالکیت آن به بخش‌های دیگر مـربوط اسـت، انجـام می‌شود. ترانزیت تأثیرات اقتصادی بر روی مشترکین شبکه می‌گذارد. به منظور تحقق ترانزیت بهینه پیش از عقد قرارداد می‌بایست تأثیر ترانزیت در موارد زیر بررسی شود:

- تلفات خط [۱۲][۱۳]
- دیسپاچینگ مجدد تولیدکنندگان [۱۱]
- قیود جریانهای خط انتقال [۲][۳]
- ایمنی سیستم قدرت
- بازیافت هزینه‌های اولیه مانند جبران کمبود درآمد [۴]

امـروزه روش‌هـای متفاوتـی برای قیمت گذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترانزیت یک موضوع مهم و بحـث انگیـز مـی باشـد، بـه خصوص که لازم الاجرا شده و دسترسی آزاد به آن احتیاج باشد. بررسی مزایا و معایب تانزیت ضروری می باشد [۶][۷].

انواع مختلفی ترانزیت وجود دارد که عبارتست از:

- شـرکت بـرق به شرکت برق: شرکت برق خریدار، بخشی از انرژی را از شرکت برق فروشنده، از طریق خطوط شرکت برق ترانزیت می‌خرد (در این حالت چندین شرکت برق ترانزیت می‌تواند وجود داشته باشد).
- شـرکت بـرق بـه مشتری خصوصی: مشتری خصوصی ۱ که در محدودهٔ سرویس دهی شرکت برق ترانزیت قرار دارد، از شرکت برق ۲ انرژی را می‌خرد.
- تولیدکنـنده خـصوصی بـه شـرکت بـرق: تولـید کننده خصوصی ۱ در محدودهٔ سرویس دهی شرکت برق ترانزیت قرار دارد، انرژی را به شرکت برق می‌فروشد.
- تولیدکنـنده خصوصی به مشتری خصوصی: تولیدکننده خصوصی ۱ به مشتری خصوصی ۲ که هر دو در منطقه سرویس دهی یک شرکت برق ترانزیت قرار دارند، انرژی می‌فروشد.

ترانزیت باس به باس: ترانزیت باس به باس وقتی که یک فروشنده همهٔ انرژی را در باس ۱ تأمین کند و خریدار کل انرژی را از باس ۲ دریافت کند، اتفاق می‌افتد. به گونه‌ای که هر دو باس در منطقه سرویس دهی شرکت برق ترانزیت قرار دارند. این حالت مستقیماً برای تولیدکنندگان خصوصی و مصرف‌کنندگان خصوصی که نوعی از انواع ترانزیت است، اعمال می‌شود.

قراردادهای ترانزیت بر حسب نوع تعهدات خریدار و فروشنده به سه کلاس دسته بندی می‌شود.

- کلاس N: ترانزیت بین دو قسمتی که شرکت ترانزیت در آن دو ناحیه هیچ تعهدی برای سرویس دهی ندارد. همانند شرکت برق به شرکت برق.
- کلاس O: ترانزیت بین دو قسمتی که شرکت ترانزیت تعهد سرویس دهی به آنها دارد. همانند تولیدکننده خصوصی به مشتری خصوصی.
- کلاس ON: ترانزیت بین دو قسمتی که شرکت ترانزیت برای یک قسمت متعهد به سرویس دهی است و برای قسمت دیگر تعهدی ندارد. همانند تولیدکننده یا مشتری خصوصی به / از شرکت برق خارجی.

عقد قراردادهای چرخش توان در بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های برق، اهمیت فراوانی دارد. این بدان معنی است که بهره‌بردار مستقل سیستم می‌تواند احداث نیروگاه و یا توسعهٔ شبکهٔ انتقال را با عقد قراردادهای چرخش توان در جهت مناسب به تعویق اندازد. در برخی از شرایط ممکن است اقتصادی باشد که از برخی مناطق توان به قیمت گران خریداری شده و به قیمت ارزانتر به مناطق دیگر فروخته شود تا تراکم انتقال داخل شبکه مورد نظر کاهش یافته، ظرفیت خطوط آزاد شده و نهایتاً توسعهٔ انتقال به تعویق افتد. آشنایی هر چه بیشتر با تجهیزات صنعت برق و آگاهی از هزینه‌های بسیار زیاد احداث نیروگاه و یا توسعهٔ شبکهٔ انتقال، اهمیت قراردادهای چرخش توان را هر چه بیشتر نمایان می‌سازد. در حالت کلی یک قرارداد انتقال توان ممکن است برخی از خطوط را متراکم و تراکم برخی دیگر را کاهش دهد.

۲ قیمت‌های حاشیه‌ای محلی

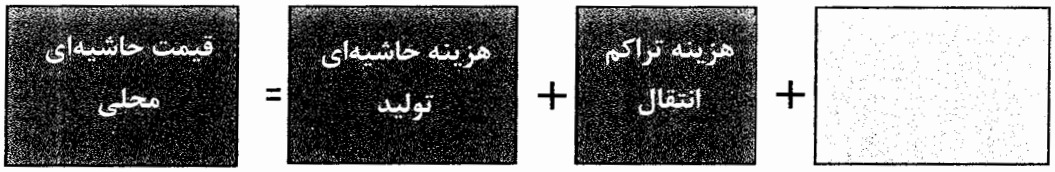
۲-۱ تعریف قیمت حاشیه‌ای محلی

قیمت‌گذاری گرهی[۱] یک روش قیمت‌گذاری برای خرید و فروش انرژی در سیستم‌های مقررات زدایی شده[۲] می‌باشد. در قیمت‌گذاری گرهی در هر گره انتقال (باس) یک قیمت برای معاملهٔ انرژی تعیین می‌گردد. در این سیستم قیمت‌گذاری، تمام مصرف‌کنندگان انرژی برق را به قیمت تعیین شده برای گرهی که بارشان در آن گره قرار دارد می‌خرند و تمام تولیدکنندگان انرژی را به قیمت تعیین شده برای گرهی که مولدشان در آن قرار دارد می‌فروشند. بنا به تعریف قیمت گرهی یا قیمت حاشیه‌ای محلی[۳] (LMP) در یک گره مشخص، برابر با هزینهٔ تغذیه یک مگاوات بعدی بار در این گره با در نظر گرفتن هزینهٔ حاشیه‌ای تولید، هزینهٔ تراکم[۴] انتقال و هزینهٔ تلفات انتقال می‌باشد. در حال حاضر هزینهٔ تلفات انتقال در محاسبهٔ قیمت‌های حاشیه‌ای محلی منظور نمی‌گردد. شکل ۲ـ۱ اجزای قیمت حاشیه‌ای محلی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر قیمت حاشیه‌ای محلی باس i برابر با هزینهٔ اضافی برای تهیهٔ یک مگاوات بار اضافی در این باس می‌باشد. هزینهٔ حاشیه‌ای تهیهٔ انرژی برق در یک گره مشخص به عوامل زیر بستگی دارد:

- هزینهٔ حاشیه‌ای تولید
- نقطهٔ کار سیستم
- شبکهٔ انتقال

با استفاده از قیمت‌گذاری گرهی، مشتریان انرژی برق را به هزینهٔ واقعی تحویل انرژی به گرهی که در آن قرار دارند معامله می‌کنند. این سیستم قیمت‌گذاری با محاسبهٔ قیمت بر اساس مسیر فیزیکی انرژی، مشوق استفادهٔ کارا از سیستم انتقال می‌باشد.

۱- nodal prices
۲- deregulated power systems
۳- locational marginal prices
۴- congestion cost



شکل ۲-۱ اجزای قیمت حاشیه‌ای محلی

۲ـ۲ فرآیند پیشنهاد قیمت

در محیط‌های مقررات زدایی شده، بهره‌بردار مستقل سیستم[۱] ژنراتورها را بگونه‌ای در مدار قرار می‌دهد که با حفظ امنیت شبکه و کیفیت خدمات برق، بارها با حداقل هزینه ممکن تغذیه شوند. بهره‌بردار مستقل سیستم قیمت‌های حاشیه‌ای محلی را با اجرای پخش بار بهینه محاسبه می‌نماید. فرآیند پیشنهاد قیمت توسط ژنراتورها و محاسبهٔ قیمت‌های حاشیه‌ای محلی برای دوره بهره‌برداری بعدی به صورت زیر است.

- هر تولید کننده مقادیر زیر را به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌کند:
  - حداقل و حداکثر توانی که می‌توانند به شبکه تزریق کند
  - پیشنهاد قیمت برای فروش واحد توان الکتریکی
- هر مصرف کننده مقادیر زیر را به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌کند:
  - حداقل و حداکثر توانی که مصرف می‌کند
  - پیشنهاد قیمت برای کاهش بار[۲] در شرایط اضطراری (اگر قیمت حاشیه‌ای محلی یک بار از قیمت پیشنهادی آن بیشتر شود آن بار به تدریج کاهش می‌یابد تا زمانی که قیمت حاشیه‌ای محلی آن به قیمت پیشنهادیش نزول کند)

۱- independent system operator

۲- load curtailment

- بهره‌بردار مستقل سیستم پخش بار بهینه را اجرا نموده و مقادیر زیر را محاسبه می‌نماید:
  - توانی که هر ژنراتور باید تولیدکند
  - توانی که هر بار باید مصرف کند
  - قیمت حاشیه‌ای محلی هر باس

مدل ریاضی محاسبه قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در بخش‌های بعدی تشریح می‌گردد.

۲ـ۳ مدل ریاضی برای محاسبه قیمت حاشیه‌ای محلی

یک سیستم قدرت مقررات زدایی شده را در نظر بگیرید و فرض کنید تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان توانها و قیمت‌های پیشنهادی خود را برای یک بازهٔ زمانی مشخص به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه نموده‌اند. بهره‌بردار مستقل سیستم ژنراتورها را براساس قیمت پیشنهادی آنها به صورت صعودی مرتب می‌کند. این فهرست، فهرست اولویت نامیده می‌شود. چنانچه هیچ محدودیتی در شبکه انتقال وجود نداشته باشد، ژنراتورها براساس فهرست اولویت در مدار قرار می‌گیرند تا هنگامی که مجموع تولید با مجموع بار و تلفات مساوی گردد. آخرین ژنراتوری که در مدار قرار گرفته و کسری از توان حداکثر خود را تولید می‌کند، ژنراتور حاشیه‌ای نامیده می‌شود. اگر به بار یک باس یک مگاوات اضافه شود، صرف‌نظر از محل آن در شبکه این یک مگاوات بار توسط ژنراتور حاشیه‌ای تغذیه خواهد شد. لذا بنا به تعریف قیمت حاشیه‌ای محلی، قیمت حاشیه‌ای محلی تمام باسها مساوی و برابر قیمت پیشنهادی ژنراتور حاشیه‌ای می‌باشد.

اگر شبکه انتقال دارای محدودیت باشد، ژنراتورها بر طبق فهرست اولویت در مدار قرار می‌گیرند تا هنگامی که به اولین محدودیت شبکه برسیم. در این موقعیت، آخرین ژنراتوری که در مدار قرار گرفته شده نمی‌تواند توان بیشتری تولید کند زیرا محدودیت شبکه نقض خواهد شد. از اینرو ژنراتورهای بعدی فهرست اولویت که توان خط به حد رسیده را افزایش نمی‌دهند، به ترتیب در مدار قرار می‌گیرند تا هنگامی که مجموع تولید مساوی مجموع بار و تلفات گردد یا به محدودیت بعدی برسیم. چنانچه ژنراتورهایی که پس از رسیدن به محدودیت در مدار قرار گرفته‌اند باعث کاهش توان خطوط به حد رسیده شوند، تولید ژنراتورهای

دارای اولویت بالاتر (قیمت پیشنهادی پایینتر) که بدلیل محدودیت شبکه انتقال مجاز به تولید حداکثر توان پیشنهادی خود نبوده‌اند افزایش می‌یابد تا مجدداً شبکه به محدودیت برسد. این فرآیند تا هنگامی که مجموع تولید با مجموع بار و تلفات مساوی شود ادامه می‌یابد. چنانچه محدودیت انتقال وجود داشته باشد چندین ژنراتور حاشیه‌ای خواهیم داشت. در این حالت اگر بار یک باس یک مگاوات افزایش یابد، این یک مگاوات بار بسته به مکانش در شبکه، توسط ژنراتورهای حاشیه‌ای که حد خطوط انتقال را نقض نمی‌کنند تغذیه می‌شود. بنابراین مقدار قیمت حاشیه‌ای محلی هر باس به مکان آن در شبکه بستگی دارد. لذا در حضور محدودیت انتقال مقدار قیمت حاشیه‌ای محلی باسها متفاوت خواهد بود. در عمل قیمت‌های حاشیه‌ای محلی توسط پخش بار بهینه محاسبه می‌شوند.

۲ـ۴ پخش بار بهینه

پخش بار بهینه یک مسئله بهینه‌سازی است. تابع هدف این مسئله، هزینهٔ کل بهره‌برداری می‌باشد. معادلات پخش بار، محدودیت‌های خطوط انتقال، محدودیت‌های ژنراتورها و محدودیت‌های بار، قیود این مسئله می‌باشند.

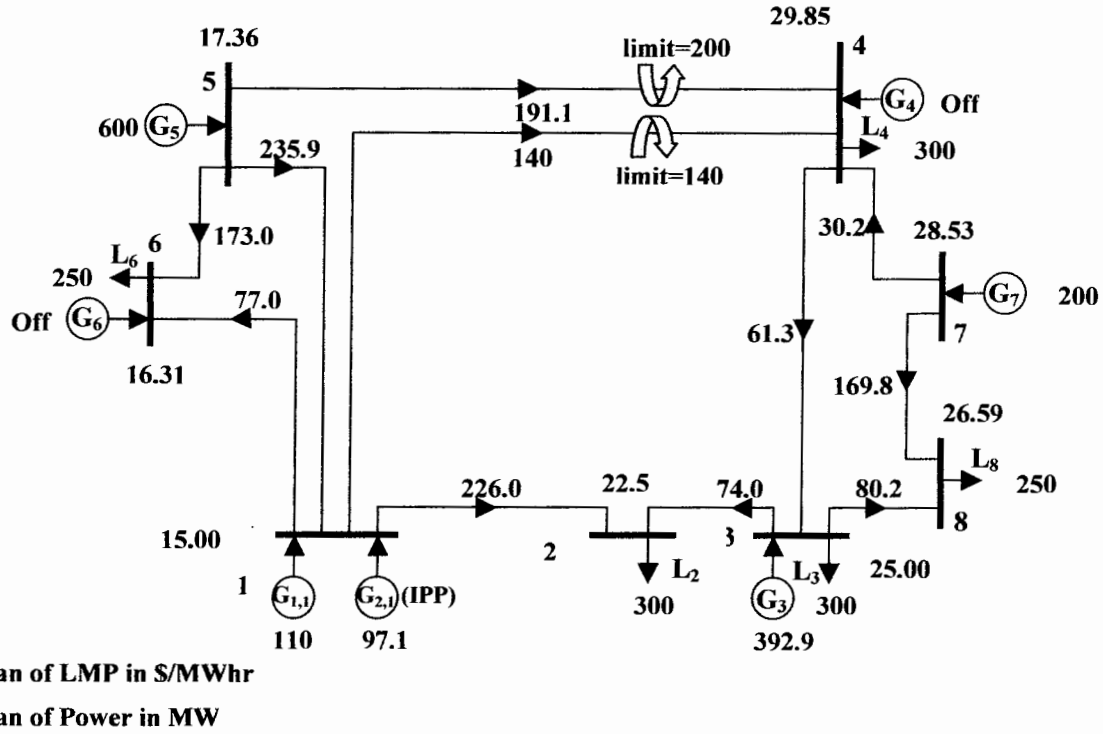
$$\text{Min} \qquad J(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D) = P_{Base}\left[\mathbf{C}_G{}^T \mathbf{P}_G + \mathbf{C}_D{}^T (\overset{\max}{\mathbf{P}}_D - \mathbf{P}_D)\right] \qquad (۱-۲)$$

$$\text{s.t. :} \qquad \mathbf{B}\delta = \mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D - \mathbf{P}_{tie} \qquad (۲-۲)$$

$$-\overset{\max}{\mathbf{P}}_L \le \mathbf{H}\,\delta \le \overset{\max}{\mathbf{P}}_L \qquad (۳-۲)$$

$$\overset{\min}{\mathbf{P}}_G \le \mathbf{P}_G \le \overset{\max}{\mathbf{P}}_G \qquad (۴-۲)$$

$$\overset{\min}{\mathbf{P}}_D \le \mathbf{P}_D \le \overset{\max}{\mathbf{P}}_D \qquad (۵-۲)$$



شکل ۲-۲ سیستم مورد آزمایش - شبکه هشت باسه

روشهای برنامه ریزی خطی نظیر روش سیمپلکس[۱] [۸][۹][۱۰] می‌توانند برای حل این مسئله بهینه سازی خطی بکار روند.

۲ـ۵ نتایج عددی

توسط روابط (۲-۲) الی (۲-۶) پارامترهای شبکه ۸ باسه نشان داده شده در شکل ۲ـ۲ محاسبه می‌شود. داده‌های تولید و بار در جداول ۲ـ۱ و۲ـ۲ داده شده است. پارامترهای خطوط انتقال در جدول ۲ـ۳ داده شده است. ژنراتور $G_{2,1}$ که در باس ۱ قرار دارد یک تولیدکننده توان مستقل می‌باشد. نتایج حاصل از پخش بار بهینه در شکل ۲-۲ آورده شده است. چنانچه هیچ محدودیتی در شبکهٔ انتقال وجود نداشته باشد، بر اساس فهرست اولویت جهت تأمین ۱۴۰۰ مگاوات توان درخواستی مصرف کنندگان ژنراتورهای ۵، ۱ و ۲ در بیشینه حد توان و ژنراتورهای ۶ و ۷ در ۹۸/۳۳٪ حد توان، تولید می‌نمایند. قیمت حاشیه‌ای محلی

[۱]- simplex method

جدول ۲-۱ داده‌های مولدهای شبکه ۸ باسه

Gen. No.	Name	Bus No.	Type	Min	Max (MW)	Bid ($/MWhr)	Unavailability
1	$G_{1,1}$	1	Gen	0	110	14	0.02
2	$G_{2,1}$	1	IPP	0	100	15	0.02
3	G_3	3	Gen	0	520	25	0.02
4	G_4	4	Gen	0	250	30	0.02
5	G_5	5	Gen	0	600	10	0.02
6	G_6	6	Gen	0	400	20	0.02
7	G_7	7	Gen	0	200	20	0.02

جدول ۲-۲ داده‌های بارهای شبکه ۸ باسه

Load No.	Name	Bus No.	Load (MW)	Bid ($/MWhr)	Unavailability
1	L_2	2	300	30	0.05
2	L_3	3	300	32	0.05
3	L_4	4	300	35	0.05
4	L_6	6	250	28	0.05
5	L_8	8	250	35	0.05

جدول ۲-۳ پارامترهای خطوط انتقال شبکه ۸ باسه

Line No.	From Bus No.	To Bus No.	Reactance (ohm)	Limit (MW)	Unavailability
1	1	2	0.03	280	0.01
2	1	4	0.03	140	0.01
3	1	5	0.0065	380	0.01
4	1	6	0.025	250	0.01
5	2	3	0.01	120	0.01
6	3	4	0.03	230	0.01
7	3	8	0.018	240	0.01
8	4	5	0.03	200	0.01
9	4	7	0.015	250	0.01
10	5	6	0.02	300	0.01
11	7	8	0.022	340	0.01

تمامی باسها برابر $20/MWhr می‌باشد. ژنراتورهای ۳ و ۴ طبق فهرست اولویت خاموش می‌باشند.

حال به ازای محدودیت‌های موجود در شبکهٔ مورد مطالعه، همانگونه که در شکل ۲-۲ دیده می‌شود ژنراتورهای ۴ و ۶ به علت بالاتر بودن قیمت پیشنهادیشان از قیمت حاشیه‌ای محلی تعیین شده در باسهای موردنظر خاموش می‌باشند. ژنراتور ۱، ۵ و ۷ در بیشینه حد توان، ژنراتور ۲ در ۹۷/۱٪ حد توان و ژنراتور ۳

در ۷۵/۵۶٪ حد توان، تولید می‌نمایند. مصرف‌کنندگان شبکه مورد مطالعه همگی بار درخواستی را بطور کامل دریافت می‌کنند. خط ۴-۱ در بیشینه حد توان و خط ۵-۴ در ۹۵/۵۵٪ حد توان انتقال قرار دارند.

با بررسی نتایج دو حالت ذکر شده آنکه؛ تراکم در خطوط ۴-۱ و ۵-۴ باعث شده است که از تولید ژنراتور ۶ با قیمت $20/MWhr جلوگیری و به ژنراتور ۳ با قیمت $25/MWhr اجازه تولید داده شود.

۳ تأثیر قراردادهای چرخش توان بر قیمت‌های حاشیه‌ای محلی

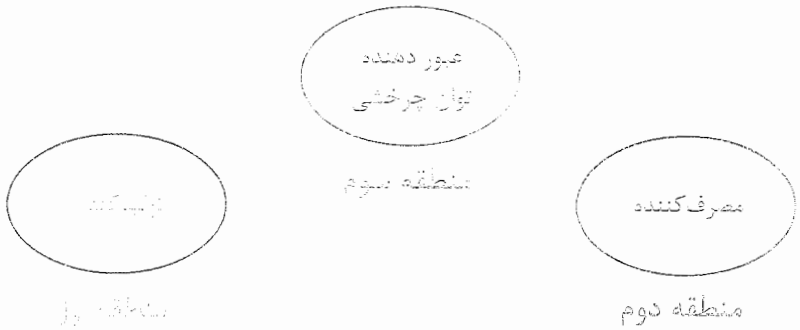
۳-۱ تعریف قراردادهای چرخش توان[۱]

هنگامی که ژنراتور و بار در مناطق متفاوتی قرار داشته باشند و برای انتقال توان لازم باشد که توان از منطقه سومی عبور نماید، آنگاه قرادادهای چرخش توان یا قراردادهای عبور توان جهت استفاده از شبکه انتقال منطقه سوم، منعقد می‌گردد. روند فرآیند در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. در این حالت منطقه سوم به ازای عایدات حاصل از قرارداد، تعهد می‌نماید که توان مورد نظر را بطور مثال از خطی بین منطقه‌ای بنام TL_2 در باس ۲ تحویل بگیرد و توانی معادل آن را در باس ۴ به خطی بین منطقه‌ای بنام TL_4 تحویل دهد .خط بین منطقه‌ای TL_2 مانند یک ژنراتور با قیمت پیشنهادی صفر رفتار می‌کند که حداکثر توان خود را تولید می‌کند. خط بین منطقه‌ای TL_4 مانند یک بار با قیمت پیشنهادی بی‌نهایت رفتار می‌کند که هرگز کاهش داده نمی‌شود. در نقاط کاری که بدلیل وجود تراکم انتقال، توان ورودی از خط بین منطقه‌ای TL_2 نمی‌تواند از شبکه عبور نماید، توان ورودی خط بین منطقه‌ای TL_2 که مانند یک ژنراتور با قیمت پیشنهادی صفر رفتار می‌کند، از در مدار قرار گرفتن ژنراتورهای ارزان قیمت نزدیک باس۲ جلوگیری می‌کند. اگر تراکم انتقال بین باسهای۲ و ۴ وجود داشته باشد، توان خروجی خط بین منطقه‌ای TL_4 توسط ژنراتورهای نزدیک به باس ۴ تأمین می‌شود حتی با وجود آنکه، این ژنراتورها دارای قیمت پیشنهادی بالا باشند. مشاهده می‌شود که قرارداد عبور توان، از تولید توان ارزان قیمت جلوگیری نموده و به توان گران قیمت اجازه تولید می‌دهد و لذا قیمت‌های حاشیه‌ای محلی شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در خصوص قراردادهای عبور توان، نقش بهره‌بردار مستقل سیستم بسیار مهم می‌باشد. قبل از عقد قرارداد، بهره‌بردار سیستم مستقل باید بطور کامل به وضعیت شبکه در نقطه کار و محدودیت‌های موجود در شبکه اشراف داشته باشد. سپس شرایط قرارداد پیشنهادی را بر شبکه اعمال نماید و در این حالت نیز

---

[۱]- Wheeling Transactions



شکل ۳-۱ نمایش انتقال توان از منطقه اول به منطقه دوم به ازای عبور توان از منطقه سوم

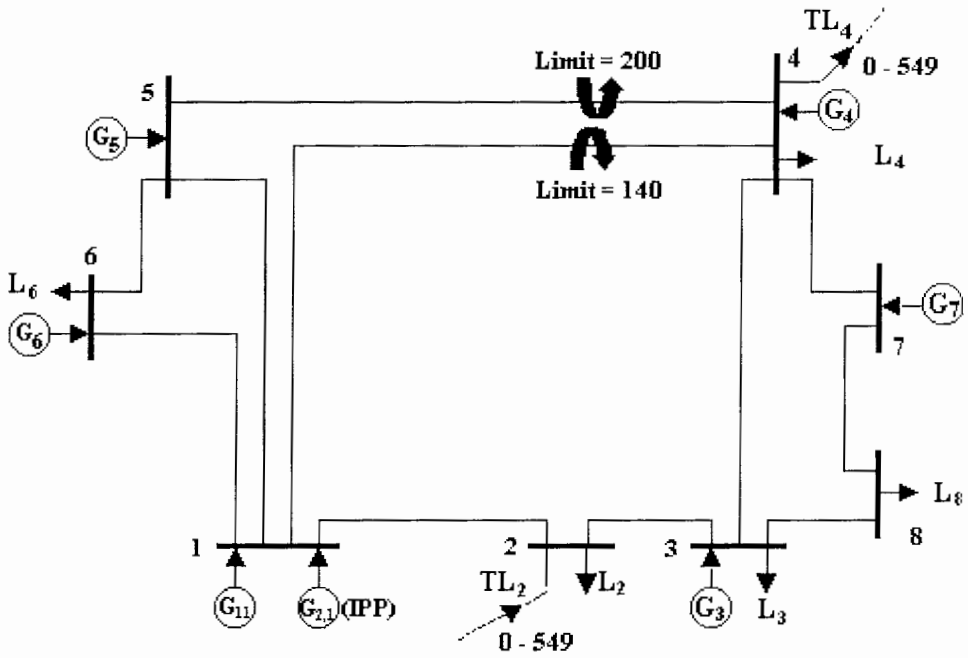
وضعیت شبکه را در نقطه کار به ازای محدودیت‌های جدید آن بررسی نماید. در اینصورت بهره‌بردار مستقل سیستم می‌تواند در خصوص پذیرش، تغییر یا رد قرارداد پیشنهادی تصمیم‌گیری نماید.

این بدان معنی است که بهره بردار مستقل سیستم می‌تواند توسعهٔ انتقال را با عقد قراردادهای چرخش توان در جهت مناسب به تعویق اندازد. در برخی از شرایط ممکن است اقتصادی باشد که از برخی مناطق توان به قیمت گران خریداری شده و به قیمت ارزانتر به مناطق دیگر فروخته شود تا تراکم انتقال داخل شبکه مورد نظر کاهش یافته، ظرفیت خطوط آزاد شده و نهایتاً توسعه انتقال به تعویق افتد. در حالت کلی یک قرارداد انتقال توان ممکن است، برخی از خطوط را متراکم و تراکم برخی دیگر را کاهش دهد.

در ادامه نشان خواهیم داد که چرخش توان بر حسب مسیر عبور توان گاهاً به کاهش یا افزایش محدودیت‌ها می‌انجامد.

۳-۲ نتایج عددی

شبکه ۸ باسه شکل ۲-۲ را به عنوان یک منطقه در نظر بگیرید که مطابق شکل ۳-۲ خط بین منطقه‌ای TL_2 حامل توان ورودی به باس ۲ و خط بین منطقه‌ای TL_4 حامل توان خروجی از باس ۴، جهت بررسی تأثیرات عبور توان، به آن اضافه شده است. اطلاعات مورد نیاز در خصوص تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و خطوط انتقال، همچون شبکه مورد مطالعه قبلی بر اساس جداول ۲-۱، ۲-۲ و ۲-۳ می‌باشد. بخاطر قراردادهای عبور توان، از طریق خطوط بین منطقه‌ای TL_2 و TL_4 توان از شبکه مورد

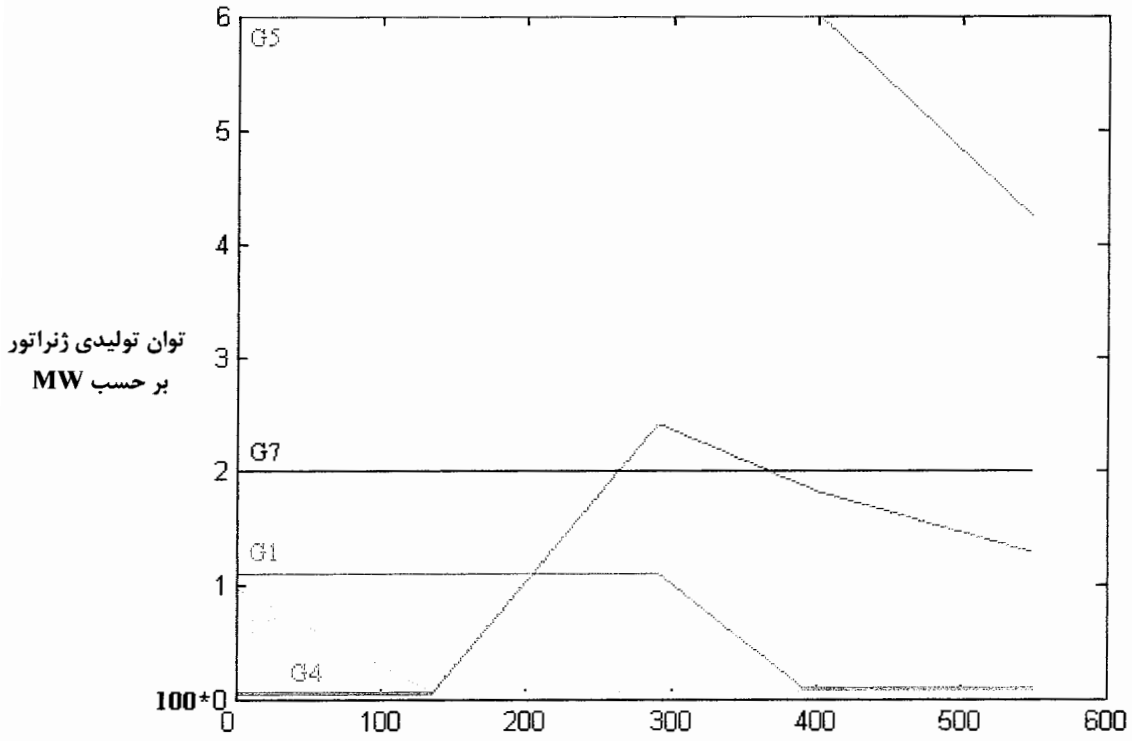


شکل ۳-۲ سیستم مورد آزمایش - شبکه هشت باسه (جهت قرارداد انتقال توان از شبکه از باس ۲ به ۴ می‌باشد)

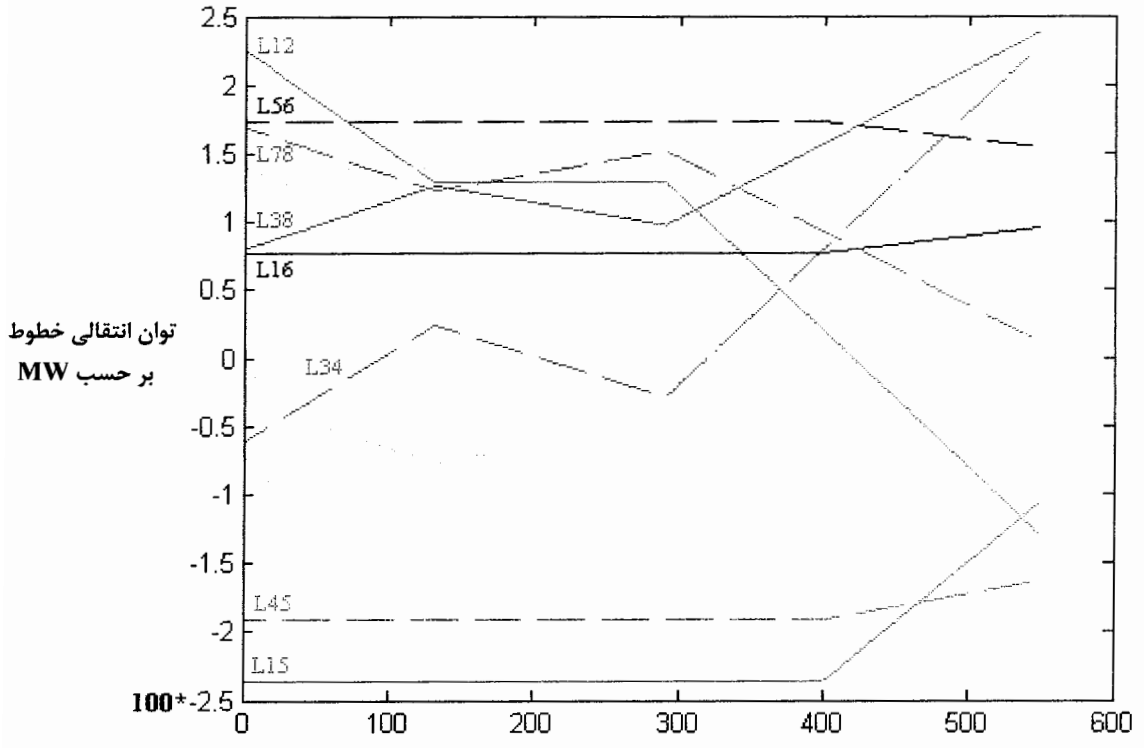
مطالعه عبور می‌کند. در این بررسی، به ازای عبور توان از باس ۲ به باس ۴، بازهٔ تغییرات توان عبوری از صفر الی ۵۴۹ مگاوات و به ازای عبور توان از باس ۴ به باس ۲ بازهٔ تغییرات توان عبوری از صفر الی ۴۰۰ مگاوات تغییر می‌یابد. نشان داده خواهد شد که عبور توانی بیش از این حدود امکان پذیر نبوده و شبکه ناپایدار می‌گردد. مقدار توان گذرنده از خط بین منطقه‌ای TL_2 مساوی مقدار توان گذرنده از خط بین منطقه‌ای TL_4 می‌باشد.

شکلهای ۳-۳، ۳-۴، ۳-۵ و ۳-۶ به ترتیب تغییرات توان تولیدی ژنراتورها، توان گذرنده از خطوط، قیمت حاشیه‌ای محلی در باسهای شبکه و توان تحویلی به بارها را به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۵۴۹ مگاوات و از باس ۲ به باس ۴ نشان می‌دهند.

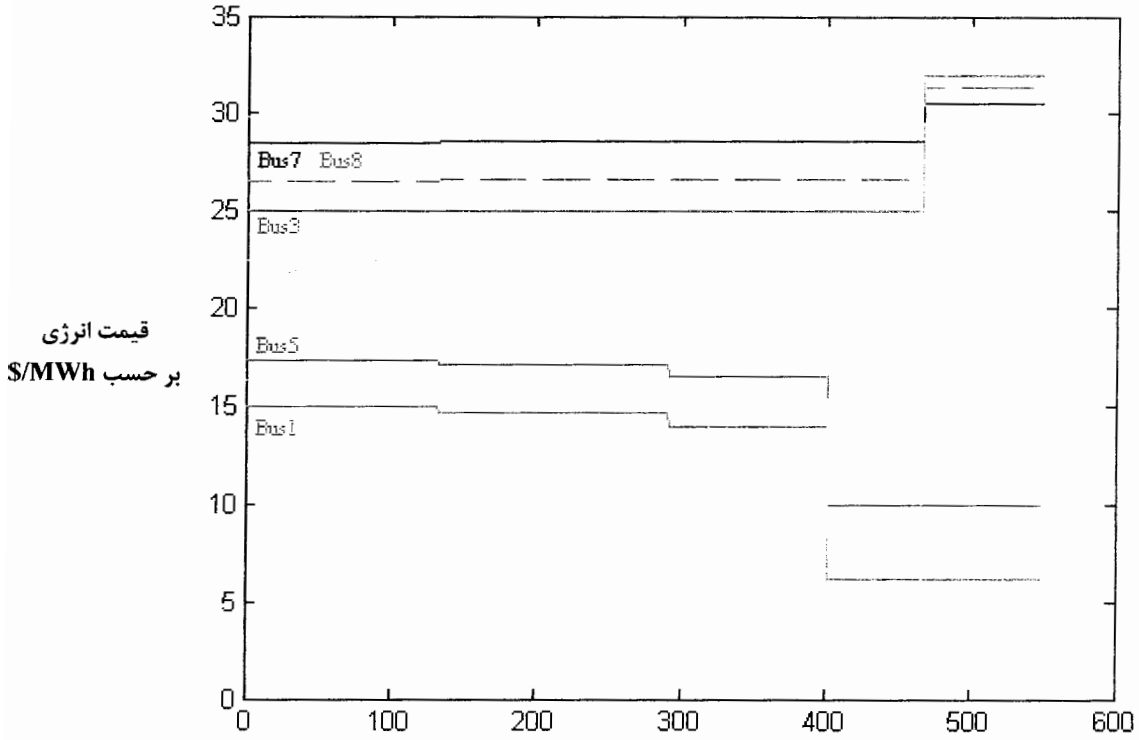
همانگونه که در شکل‌های ۳-۳، ۳-۴، ۳-۵ و ۳-۶ دیده می‌شود، به ازای افزایش توان عبوری از صفر تا ۵۴۹ مگاوات، ۵ بازه در نمودارها مشاهده می‌شود که در ذیل به دلایل این تغییرات پرداخته می‌شود.



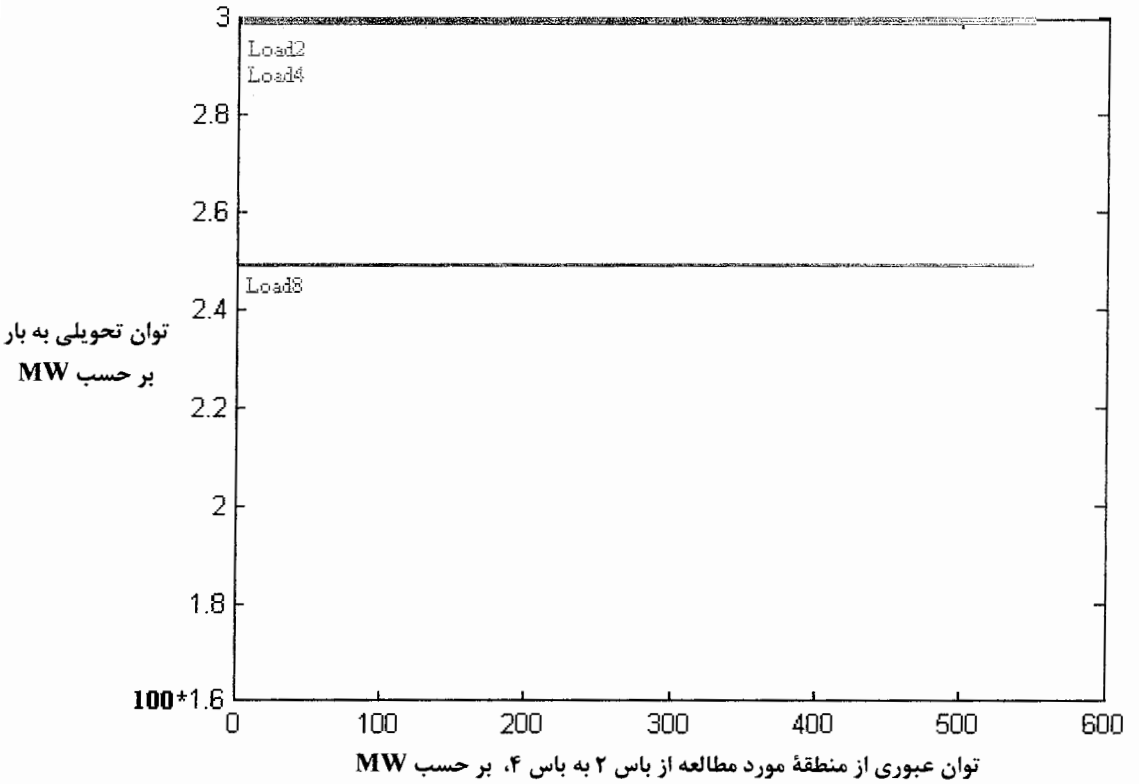
شکل ۳- ۳ نمودار تغییرات توان تولیدی ژنراتورها، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از باس ۲ به باس ۴



شکل ۳-٤ نمودار تغییرات توان عبوری از خطوط، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از باس ۲ به باس ۴



شکل ۳-۵ نمودار تغییرات قیمت در باسها، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از باس ۲ به باس ۴



شکل ۳- ٦ نمودار تغییرات توان تحویلی به بار، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از باس ۲ به باس ۴

بازه ۱: تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۱۳۲ مگاوات از باس ۲ به باس ۴

از نمودار ارائه شده در شکل ۳-۳ دیده می‌شود که ژنراتورهای ۴ و ۶ خاموش هستند و ژنراتورهای ۱، ۵ و ۷ در بیشینه حد تولید توان می‌باشند. در ژنراتور ۳ با یک نرخ ثابت، افزایش توان و در ژنراتور ۲ (IPP) با همان نرخ تغییرات، کاهش توان دیده می‌شود.

با افزایش توان عبوری از منطقه مورد مطالعه در قالب ورود توان به باس ۲ و خروج توان از باس ۴، تأمین توان خروجی در باس ۴ الزامی است. همانگونه که از شکل ۳-۲ بر می‌آید به ازای افزایش توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه، جهت تأمین توان خروجی از خط TL_4 می‌توان از خطوط ۴-۱ (خط بین باس‌های ۱ و ۴)، ۴-۳ (خط بین باس‌های ۳ و ۴)، ۵-۴ (خط بین باس‌های ۴ و ۵) و ۷-۴ (خط بین باس‌های ۴ و ۷) بهره برد. همانگونه که در شکل ۳-۴ دیده می‌شود، قبل از افزایش مقدار توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه، خط انتقال ۴-۱ به ۱۰۰٪ حد انتقال توان خود و خط ۵-۴ به ۹۵/۵۶-٪ [۱] حد انتقال توان خود رسیده‌اند که با این شرایط امکان انتقال توان بیشتر از ژنراتورهای ۱، ۲ و ۵ به باس ۴ ناممکن می‌گردد. ژنراتور خاموش ۶ نیز اگر روشن گردد بدلیل خطوط متراکم ۴-۱ و ۵-۴ تأثیر گذار نبوده و به همین علت همچنان خاموش می‌ماند. خطوط ۴-۳ و ۷-۴ به ترتیب در ۲۶/۶۶-٪ و ۱۲/۰۸-٪ حد انتقال توان می‌باشند. علی‌رغم ظرفیت آزاد خط ۷-۴، ظرفیت تولید ژنراتور ۷ در حد بیشینه است. حال به ازای افزایش توان خروجی از خط TL_4 دو راهکار میسر است: اول آنکه ژنراتور خاموش ۴ شروع به تولید نماید و دوم آنکه ژنراتور ۳ افزایش تولید دهد که با مراجعه به فهرست اولویت دیده می‌شود که افزایش تولید ژنراتور ۳ با قیمت پیشنهادی \$25/MWhr اقتصادی‌تر می‌باشد. لذا به ازای افزایش توان عبوری از منطقه مورد مطالعه، ژنراتور ۳ افزایش تولید می‌دهد که توسط خط ۴-۳ به باس ۴ منتقل می‌گردد.

بدلیل آنکه توان ورودی از خط TL_2 برابر توان خروجی از خط TL_4 می‌باشد و به عبارتی بار شبکهٔ مورد مطالعه ثابت است، در نتیجه برای تعادل بین تولید و بار به ازای افزایش تولید توان در ژنراتور ۳، می‌بایستی به همان میزان کاهش تولید توان داشته باشیم. برای انتخاب تولیدکننده‌ای در جهت کاهش تولید، از

---

[۱]- برای سهولت در پیگیری مطالب، اگر توان شارشی از خطوط، مطابق ترتیب نام خط منتقل شود مقادیر مثبت و لاغیر مقادیر منفی خواهند بود.

شکل ۳-۳، دیده می‌شود که ژنراتور ۷ بین باسهای ۴ و ۸ قرار دارد که باس ۸ اساساً فاقد تولید بوده و فقط شامل بار است و باس ۴ نیز دارای یک ژنراتور با ۲۵۰ مگاوات تولید و ۳۰۰ مگاوات بار ثابت می‌باشد که در مجموع به صورت یک باس بار دیده می‌شود و علاوه بر آن خط TL_4 نیز که در قالب یک بار متغییر است در این باس قرار دارد. در نتیجه به جهت وضعیت مشروحه و با احتساب محدودیت‌های خطوط، کاهش توان تولیدی ژنراتور ۷ به ازای تغییرات توان عبوری از صفر به ۱۳۲ مگاوات منتفی می‌باشد. ژنراتور ۶ قیمت $20/MWh$ را پیشنهاد نموده است که با تعیین قیمت $16.3/MWh$ در باس مذکور، ژنراتور ۶ خاموش می‌باشد. ژنراتور ۵ با پیشنهاد قیمت $10/MWh$ به عنوان ارزانترین قیمت و قرارگیری در صدر فهرست اولویت در بیشینه حد تولید توان قرار دارد. ژنراتور ۴ قیمت $30/MWh$ را پیشنهاد داده است که با تعیین قیمت $29.85/MWh$ در باس مذکور، ژنراتور ۴ خاموش می‌باشد. ژنراتورهای باقیمانده، ژنراتورهای منصوب در باس ۱ می‌باشند که برای کاهش میزان تولید مناسب به نظر می‌رسند. ژنراتور ۱ دارای قیمت پیشنهادی $14/MWh$ و ژنراتور ۲ (تولیدکننده توان مستقل) دارای قیمت پیشنهادی $15/MWh$ می‌باشد، که بدیهی است ژنراتور با قیمت بالاتر گزینه انتخابی خواهد بود.

هنگامیکه ورود توان عبوری توسط خط TL_2 به باس ۲ صفر است، خط ۲-۱ (خط بین باس‌های ۱ و ۲) به همراه خط ۳-۲ (خط بین باس‌های ۲ و ۳) بار L_2 را تأمین می‌نمایند. بدیهی است که با افزایش میزان توان ورودی به باس ۲ توسط خط TL_2، از میزان توان گذرنده از خطوط ۲-۱ و ۳-۲ کاسته می‌شود. از شکل ۳-۴ دیده می‌شود که خط ۲-۱ از ۸۰/۷۱٪ به ۴۶/۰۴٪ و خط ۳-۲ از ۶۱/۶۸-٪ به ۳۲/۵۷-٪ حد انتقال توان خود کاهش می‌یابند.

خط ۴-۱ هنگامیکه میزان توان ورودی به باس ۲ توسط خط انتقال TL_2 صفر است، طبق برنامهٔ پخش بار بهینه باید در ۱۰۰٪ حد انتقال توان باشد. حال با احتساب آنکه به ازای هر میزان تغییر توان ورودی به باس ۲، توان خروجی در باس ۴ خواهیم داشت، منطقی است که افزایش بار در باس ۴، بیشینه حد انتقال توان خط ۴-۱ را الزام می‌نماید.

خط ۵-۱ (خط بین باس‌های ۱ و ۵) در ۶۲/۰۸-٪ حد انتقال توان، مقدار ثابتی برابر ۲۳۵/۹۲ مگاوات توان را منتقل می‌سازد. در توجیه مقدار ثابت توان انتقالی از خط ۵-۱ می‌توان به این نکته اشاره داشت که خط ۵-۱ در بحث انتقال توان عبوری از باس ۲ به باس ۴، خطی ارتباطی بحساب نمی‌آید.

خط ۶-۱ (خط بین باس‌های ۱ و ۶) در ۳۰/۸۱٪ حد انتقال توان، مقدار ثابتی برابر ۷۷/۰۳ مگاوات توان را منتقل می‌سازد. در توجیه مقدار ثابت توان انتقالی از خط ۶-۱ می‌توان به این نکته اشاره داشت که خط ۶-۱ در بحث انتقال توان عبوری از باس ۲ به باس ۴، خطی ارتباطی بحساب نمی‌آید.

توضیح خط ۳-۲ هنگام توضیح خط ۲-۱ بیان شده است.

خط ۴-۳ هنگامیکه توان ورودی به باس ۲ توسط خط TL_2 صفر است، در ۲۶/۶۶-٪ حد انتقال توان خود قرار دارد. این خط هنگامیکه توان ورودی به باس ۲ توسط خط TL_2 به ۱۳۲ مگاوات افزایش می‌یابد، در ۱۰/۴۸٪ حد انتقال توان خود قرار می‌گیرد. به ازای افزایش توان خط TL_2 از صفر به ۱۳۲ مگاوات، ابتدا از شارش توان از باس ۴ به باس ۳ کاسته می‌شود تا به صفر برسد و سپس جهت شارش توان در خط تغییر یافته و با یک نرخ صعودی در شارش توان، از باس ۳ به باس ۴، میزان توان گذرنده از خط به ۲۴/۱ مگاوات می‌رسد. این تغییرات با احتساب ورود توان توسط خط TL_2، خروج توان توسط خط TL_4 و افزایش توان تولیدی ژنراتور ۳ قابل توجیه است.

خط ۸-۳ (خط بین باس‌های ۳ و ۸) به ازای افزایش توان ورودی به باس ۲، شارش توان عبوری در آن افزایش می‌یابد. در باس ۴ با افزایش توان خروجی توسط خط TL_4 توان بیشتری از ظرفیت تولید ژنراتور ۷ توسط خط انتقال ۷-۴ به باس ۴ اختصاص می‌یابد که نتیجه آن با احتساب بیشینه حد تولید توان ژنراتور ۷، کاهش شارش توان عبوری از خط ۸-۷ (خط بین باس‌های ۷ و ۸) می‌باشد. حال جهت تأمین بار L_8 بدیهی است که میزان توان عبوری از خط ۸-۳ افزایش می‌یابد. روند تغییرات در شارش توان خطوط ۴-۳، ۸-۳، ۷-۴ و ۸-۷ که توسط برنامه پخش بار بهینه لحاظ شده است، با احتساب رآکتانس‌های خطوط می‌باشد.

خط ۵-۴ هنگامیکه توان ورودی به باس ۲ توسط خط TL_2 صفر است، در ۹۵/۵۶-٪ حد انتقال توان خود قرار دارد. با لحاظ نمودن محدودیت این خط و نیم نگاهی به مسائل پایداری شبکه، منطقی است که به ازای افزایش توان عبوری از صفر به ۱۳۲ مگاوات، تغییری در میزان توان گذرنده از خط ۵-۴ رخ ندهد.

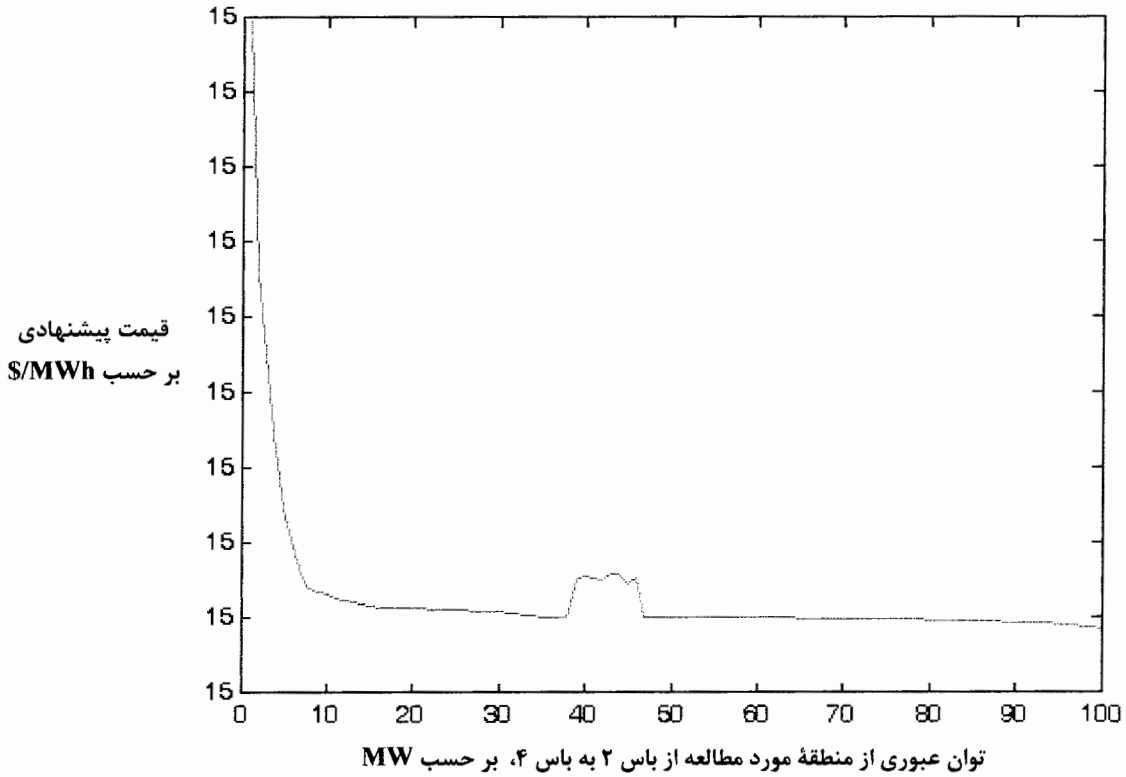
توضیح خط ۷-۴ به هنگام توضیح خط ۸-۳ بیان شده است.

در خصوص خط ۶-۵ (خط بین باس‌های ۵ و ۶) دیده می‌شود که ژنراتور ۶ خاموش است و خط ۶-۵ بدون تغییر به ازای تغییرات توان عبوری، مقداری ثابت را به بار ۶ می‌رساند.

توضیح خط ۸-۷ به هنگام توضیح خط ۸-۳ بیان شده است.

از شکل ۳-۵ دیده می‌شود که به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۱۳۲ مگاوات از باس ۲ به باس ۴، قیمت حاشیه‌ای محلی در تمامی باس‌های شبکه ثابت می‌ماند و این میزان توان عبوری تأثیری در قیمتهای حاشیه‌ای محلی باسها ندارد.

البته لازم به ذکر است به ازای افزایش توان عبوری، تغییرات قیمت در حد بسیار کم وجود دارد که در شکل ۳-۷ این تغییرات قیمت برای باس نوعی ۱ نشان داده شده است. همانگونه که از محور تغییرات قیمت دیده می‌شود این تغییرات بسیار جزئی بوده و در بررسی‌های انجامی لحاظ نمی‌گردد.



شکل ۳-۷ نمودار تغییرات قیمت در باس ۱، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از باس ۲ به باس ۴

بارهای شبکه مورد مطالعه نیز به ازای این میزان تغییرات در توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه تغییری را در توان دریافتی نشان نمی‌دهند و همگی بار درخواستی خود را بطور کامل دریافت می‌کنند.

بازه ۲: تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از ۱۳۲ تا ۲۹۱ مگاوات از باس ۲ به باس ۴

به ازای توان عبوری برابر ۱۳۲ مگاوات، توان تولیدی ژنراتور ۲ به صفر می‌رسد و خاموش می‌شود. از سویی دیگر ژنراتور ۳ با تولید ۴۹۰ مگاوات توان به ۹۴/۲۳٪ حد تولید خود می‌رسد. با افزایش توان عبوری به بیش از ۱۳۲ مگاوات دیده می‌شود که روند تولید توان ژنراتورها تغییر می‌کند. جهت تأمین بار L_4 و همچنین توان خروجی خط TL_4 دیده می‌شود که ظرفیت خط ۴-۱ بطور کامل اشغال است و خط ۵-۴ نیز در ۹۵/۵۶-٪ حد انتقال توان خود بوده و پاسخگوی افزایش توان عبوری نمی‌باشند. علی‌رغم آنکه خط ۷-۴ در ۳۰/۷۱٪ حد انتقال توان خود قرار دارد اما ژنراتور ۷ در بیشینه حد تولید قرار است. خط ۴-۳ در ۱۰/۴۸ ٪ حد انتقال توان خود قرار دارد، اما ژنراتور ۳ در ۹۴/۲۳٪ حد تولید قرار دارد و ژنراتورهای ۱ و ۶ نیز به علت محدودیت‌های خطوط انتقال قادر به مشارکت در تأمین توان خروجی TL_4 نمی‌باشند. ژنراتور ۵ علاوه بر محدودیت‌های حد انتقال، در بیشینه حد تولید نیز قرار دارد. لذا علارغم قیمت $30/MWh پیشنهادی توسط ژنراتور ۴ که بالاترین قیمت پیشنهادی می‌باشد و به عبارتی با قرار داشتن ژنراتور ۴ در انتهای فهرست اولویت، ژنراتور ۴ شروع به تولید می‌کند.

همانگونه که می‌دانیم به ازای تغییرات توان عبوری از شبکهٔ مورد مطالعه، بار شبکه ثابت است. حال جهت تعادل تولید و بار، بایستی در قبال تولید ژنراتور ۴ کاهش تولید در سایر مولدها را داشته باشیم.

بدلیل آنکه ژنراتور ۴ شروع به تولید نموده است و افزایش توان خروجی نیز در باس ۴ می‌باشد، بدیهی است که با کاهش تولید هر یک از ژنراتورهای موجود، به محدودیت خطوط انتقال افزوده نمی‌شود. از اینرو منطقی آن است که بر اساس فهرست اولویت اقدام شود. بر اساس جدول ۲-۱ دیده می‌شود که ژنراتور ۳ با قیمت $25/MWh بعد از ژنراتور ۴، بالاترین قیمت را پیشنهاد داده است. بنابر این از میزان تولید ژنراتور ۳ کاسته می‌شود. همانگونه که در شکل ۳-۳ دیده می‌شود قدر مطلق شیب تغییرات توان تولیدی ژنراتور ۳ با

ژنراتور ۴ برابر است، که مبین تثبیت تعادل تولید و بار می‌باشد. ژنراتورهای ۱، ۵ و ۷ به ازای تغییرات توان عبوری در بازهٔ ۱۳۲ تا ۲۹۱ مگاوات در بیشینه حد تولید خود کار می‌کنند و ژنراتورهای ۲ و ۶ نیز به دلیل بالاتر بودن قیمت پیشنهادیشان نسبت به قیمت حاشیه‌ای محلی تعیین شده در باس‌های مربوطه، خاموش می‌باشند.

بعد از خاموشی ژنراتور ۲ به ازای توان عبوری ۱۳۲ مگاواتی از باس ۲ به باس ۴ و تولید ثابت ژنراتور ۱ در حد بیشینهٔ تولید در این بازه، خط ۲-۱ نیز به ازای تغییرات توان عبوری از ۱۳۲ به ۲۹۱ مگاوات تغییر ظرفیت انتقال نداده و توان ثابت ۱۲۸/۹۲ مگاوات را از باس ۱ به باس ۲ منتقل می‌سازد.

خط ۵-۱ در حد ۶۲/۰۸-٪ حد انتقال توان خود بدون تغییر ۲۳۵/۹۲ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

خط ۶-۱ در حد ۳۰/۸۱٪ حد انتقال توان خود بدون تغییر ۷۷/۰۳ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

خط ۳-۲ به ازای توان عبوری ۱۳۲ مگاوات در ۳۲/۵۷-٪ حد انتقال توان خود قرار دارد، اما به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات این خط در ۹۹/۹٪ حد انتقال توان خود قرار می‌گیرد. علت این تغییر در شارش توان خط ۳-۲، کاهش ۲۴۰/۷۹ مگاواتی از تولید ژنراتور ۳ و ورود توان توسط خط TL_2 می‌باشد. از دیگر تغییرات شارش توان در خطوط انتقال که بواسطه کاهش تولید ژنراتور ۳ ناشی شده است، شارش توان در خط ۴-۳ است که در توان عبوری ۱۳۲ مگاوات در ۱۰/۴۸٪ حد انتقال توان خود و در توان عبوری ۲۹۱ مگاوات در ۱۲/۵۴-٪ حد انتقال توان خود قرار می‌گیرد. دیگر خط مرتبط با باس ۳، خط ۸-۳ می‌باشد که در توان عبوری ۱۳۲ مگاوات در ۵۲/۸۳٪ حد انتقال توان خود قرار دارد و به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات به۴۰/۷۹٪ حد انتقال توان خود کاهش شارش می‌یابد. همانگونه که دیده می‌شود میزان تغییرات شارش توان در خطوط متصل به باس ۳، تقریباً معادل کاهش توان ژنراتور ۳ می‌باشد.

خط ۵-۴ در ۹۵/۵۶-٪ حد انتقال توان خود بدون تغییر ۱۹۰ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

باس ۴ به علت روشن شدن ژنراتور ۴ و افزایش توان تولیدی در این باس، به تولید ژنراتور ۷ نیاز کمتری دارد و بدیهی است که در خط ۷-۴ کاهش شارش توان دیده شود. توان انتقالی خط ۷-۴ از ۳۰/۷۱-٪ به ۱۹/۱۶-٪ حد انتقال توان کاهش می‌یابد.

خط ۶-۵ در حد ۵۷/۶۶٪ حد انتقال توان خود بدون تغییر ۱۷۲/۹۷ مگاوات توان را منتقل می‌نماید.

بدلیل آنکه باس ۸ فقط شامل بار می‌باشد و توسط دو خط ۸-۳ و ۸-۷ تأمین می‌شود، بدیهی است که شارش توان در خط ۸-۷ دقیقاً به همان میزان شارش که در خط ۸-۳ کاسته شد، افزایش می‌یابد. از شکل ۳-۴ دیده می‌شود که هیچ یک از خطوط ۴-۳، ۸-۳، ۷-۴ و ۸-۷ در این بازه از تغییرات توان عبوری، حد انتقال توان بالایی نداشته‌اند. لذا می‌توان اظهار داشت که میزان تغییرات در شارش توان انتقالی این خطوط مرتبط با تراکم خطوط نبوده و توسط برنامهٔ پخش بار بهینه، بر حسب رآکتانس‌های خطوط، لحاظ شده است.

در خصوص قیمت‌های حاشیه‌ای محلی باس‌ها آنکه؛ بر اساس شکل ۳-۵، در باس‌های ۴، ۷ و ۸ اندکی افزایش قیمت و در باس‌های ۱، ۲، ۵ و ۶ اندکی کاهش قیمت دیده می‌شود. قیمت در باس ۳ نیز تغییر نمی‌یابد. بحث شد که تولید ژنراتور ۴ در این بازه از تغییرات توان عبوری، علارغم قیمت بالای $30/MWh اجباری بوده است. پس قیمت باس ۴ برای شروع به تولید ژنراتور ۴ اجباراً بایستی به $30/MWh برسد که در شکل ۳-۵ تحقق آن دیده می‌شود. اگر خواسته باشیم بر اساس تغییرات شارش توان انتقالی خطوط و تغییرات توان تولیدی ژنراتورها در بازهٔ فوق الذکر یک جمع‌بندی ساده داشته باشیم می‌توان اظهار داشت که بدلیل حد انتقال توان ۱۰۰٪ خط ۴-۱ و ۹۵/۵۶-٪ خط ۵-۴ و همچنین تغییرات شدید شارش توان در خط ۳-۲ در جهت نیل به بیشینه حد انتقال توان خود، شبکه هشت باسه مورد مطالعه را در دو قسمت می‌توان تصور نمود. قسمت اول شامل باس‌های ۳، ۴، ۷ و ۸ و قسمت دوم شامل باس‌های ۱، ۵ و ۶ می‌باشد. باس ۲ نیز فقط با یک خط به هر قسمت وصل می‌شود و در این بازه بعنوان باس ارتباط دو قسمت قلمداد شود. با این تقسیم‌بندی دیده می‌شود که هرگونه تغییر در یکی از باس‌های هر قسمت تغییرات مشهودی را در همان قسمت ایجاد می‌کند و تأثیر چندانی بر باس‌های قسمت دیگر ندارد. با این احتساب می‌توان گفت که؛ در باس ۲ خط TL_2 با قیمت $0/MWh توان به این باس وارد می‌کند. خطوط ارتباطی باس ۲، خط ۲-۱ با حد انتقال توان ۲۸۰ مگاوات و خط ۳-۲ با حد انتقال توان ۱۲۰ مگاوات می‌باشند. به علت حد توان پایین خط ۳-۲، قسمت اول تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد و باس‌های ۷ و ۸ به تبع

افزایش قیمت در باس ۴، در حدی مشابه افزایش قیمت می‌یابند. باس ۳ با سه روند تغییری مواجه است؛ اول افزایش قیمت در باس ۴، دوم کاهش شدید تولید ژنراتور ۳ و سوم افزایش شدید شارش توان با قیمت $0/MWh از باس ۲ به باس ۳، که دو تغییر اول در جهت افزایش قیمت و تغییر سوم در جهت کاهش قیمت می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود تعامل این سه تغییر، تثبیت قیمت را در باس ۳ رقم زده است. در باس‌های قسمت دوم کاهش قیمت حاشیه‌ای محلی دیده می‌شود که با وجود خط ۲-۱ با حد انتقال توان ۲۸۰ مگاواتی، در جهت ارتباط قسمت دوم با باس ۲ توجیه می‌شود.

بارهای شبکهٔ مورد مطالعه نیز به ازای این میزان تغییرات در توان عبوری از منطقه مورد مطالعه تغییری را در توان تحویلی نشان نمی‌دهند و همگی بار درخواستی خود را بطور کامل دریافت می‌کنند.

بازه ۳: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۲۹۱ تا ۴۰۱ مگاوات از باس ۲ به باس ۴

در این بازه از تغییرات توان عبوری، همانطور که از شکل۳-۴ دیده می‌شود به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات، خط ۴-۱ در ۱۰۰٪ حد انتقال توان با جهت شارش به باس ۴ (باس قسمت اول)، خط ۵-۴ در ۹۵/۵۶-٪ حد انتقال توان با جهت شارش به باس ۴ (باس قسمت اول) و خط ۳-۲ در ۱۰۰٪ حد انتقال توان با جهت شارش به باس ۳ (باس قسمت اول) می‌باشند. حال می‌توان بیان داشت که قسمت اول شامل باس‌های ۳، ۴، ۷ و ۸ عملاً بصورت مجزا عمل می‌نمایند و باقی باس‌ها نیز در قالب قسمت دوم با یکدیگر تعامل می‌کنند. البته این نکته پوشیده نماند که قسمت اول با افزایش توان خروجی (بار با قیمت بی‌نهایت) و قسمت دوم با افزایش توان ورودی (تولید با قیمت صفر) مواجه‌اند.

در قسمت اول به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات دیده می‌شود که ژنراتور ۳ در ۴۷/۹۲٪ حد تولید توان، ژنراتور ۴ در ۹۶/۳۳٪ حد تولید توان و ژنراتور ۷ در ۱۰۰٪ حد تولید توان، قرار دارند. با احتساب آنکه به ازای افزایش توان عبوری، افزایش توان خروجی از باس ۴ را خواهیم داشت، پر واضح است که این توان خروجی را ژنراتور ۳ باید تأمین نماید. همراه با افزایش توان خروجی از خط TL_4، کاهش تولید در ژنراتور ۴ نیز رخ می‌دهد که دلیل آن قیمت بالاتر ژنراتور ۴ نسبت به ژنراتور ۳ می‌باشد. کاهش تولید در ژنراتور ۴ طبق

محاسبات برنامهٔ پخش بار بهینه بوده و ارتباطی به تراکم خطوط ندارد. همانگونه که در شکل ۳-۳ دیده می‌شود به ازای تغییرات توان عبوری از ۲۹۱ به ۴۰۱ مگاوات، حد تولید توان ژنراتور ۳ با شیبی ثابت از ۴۷/۹۲٪ به ۷۶/۹۲٪ افزایش می‌یابد و تعادل بین تولید و بار را حفظ می‌کند.

در شکل ۳-۳ دیده می‌شود که به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات، خط ۳-۲ به ۱۰۰٪ حد انتقال توان می‌رسد و به ازای ورود بیش از ۲۹۱ مگاوات توان به باس ۲، این توان توسط خط ۲-۱ به قسمت دوم ارسال می‌گردد. بر این اساس قسمت دوم با اضافه توان مواجه می‌شود و بایستی یکی از ژنراتورها کاهش تولید دهد. ژنراتورهای ۲ و ۶ خاموش هستند و با این وصف خاموش می‌مانند و از بین ژنراتورهای ۱ و ۵، ژنراتور ۱ با قیمت $14/MWh گزینه انتخابی خواهد بود. در این بازه به ازای افزایش ۱۱۰ مگاواتی توان عبوری از ۲۹۱ به ۴۰۱ مگاوات، ژنراتور ۱۱۰ مگاواتی ۱ خاموش می‌گردد. ژنراتور ۵ در این بازه بدون تغییر در میزان تولید، به کار خود ادامه می‌دهد.

در ابتدای این بازه، خط ۲-۱ در ۴۶/۰۴٪ حد انتقال توان خود قرار دارد و بدیهی است که به ازای افزایش توان ورودی به باس ۲ و حد انتقال توان ۱۰۰٪ خط ۳-۲، از شارش توان در خط ۲-۱ کاسته شود. به عبارتی ملموس‌تر آنکه؛ به ازای افزایش توان عبوری به میزان ۱۱۰ مگاوات و کاهش توان تولیدی ژنراتور ۱ به میزان ۱۱۰ مگاوات، شارش توان در خط ۲-۱ نیز ۱۱۰ مگاوات کاهش می‌یابد.

خط ۴-۱ همچنان در ۱۰۰٪ حد انتقال توان خود قرار داشته و ۱۴۰ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

خط ۵-۱ همچنان در ۶۲/۰۸-٪ حد انتقال توان خود قرار داشته و ۲۳۵/۹۲ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

خط ۶-۱ همچنان در ۳۰/۸۱٪ حد انتقال توان خود قرار داشته و ۷۷/۰۳ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

خط ۳-۲ پس از رسیدن به حد انتقال توان ۱۰۰٪ به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات، بدون تغییر ۱۲۰ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

خط ۴-۳ با احتساب افزایش تولید ژنراتور ۳، افزایش توان خروجی TL_4 و کاهش تولید ژنراتور ۴

بدیهی است که افزایش شارش توان یابد. حد انتقال توان این خط در این بازه از ۱۲/۵۴-٪ به ۳۳/۴۹٪ تغییر می‌یابد. نکته جالب آنست که افزایش توان خروجی خط TL_4 و کاهش تولید ژنراتور ۴ هر دو توسط ژنراتور ۳ تأمین می‌شود ولی تمامی این توان توسط خط ۴-۳ منتقل نمی‌گردد و مقداری از توان تولیدی ژنراتور ۳ توسط خط ۸-۳ به باس ۸ منتقل می‌گردد و بعبارتی باعث افزایش حد انتقال توان خط ۸-۳ از ۴۰/۷۹٪ به ۶۴/۵۸٪ می‌شود. با احتساب بار ثابت در باس ۸، کاهش شارش توان در خط ۸-۷ مسجل است. به همین ترتیب، بعلت تولید ثابت ژنراتور ۷، افزایش شارش توان در خط ۷-۴ را خواهیم داشت. روند تغییرات شارش توان در خطوط ۴-۳، ۸-۳، ۷-۴ و ۸-۷ توسط برنامهٔ پخش بار بهینه و بر حسب رآکتانس‌های خطوط لحاظ شده است و ارتباطی با تراکم خطوط ندارند.

توضیح خط ۸-۳ به هنگام توضیح خط ۴-۳ بیان شده است.

خط ۵-۴ با حد انتقال توان ۹۵/۵۶-٪ به ازای توان عبوری ۲۹۱ مگاوات، در این بازه بدون تغییر ۱۹۱/۱۲ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

توضیح خط ۷-۴ به هنگام توضیح خط ۴-۳ بیان شده است.

خط ۶-۵ با حد توانی برابر ۵۷/۶۶٪ در قبال توان عبوری ۲۹۱ مگاوات، در این بازه بدون تغییر ۱۷۲/۹۷ مگاوات توان را منتقل می‌سازد.

توضیح خط ۸-۷ به هنگام توضیح خط ۴-۳ بیان شده است.

به ازای افزایش توان عبوری از ۲۹۱ به ۴۰۱ مگاوات و به عبارتی با افزایش توان ورودی با قیمت $0/MWh به باس ۲، بدلیل حد انتقال توان ۱۰۰٪ خط ۳-۲، این افزایش در توان عبوری تأثیری بر قسمت اول نمی‌گذارد و قیمت حاشیه‌ای محلی باس‌های ۳، ۴، ۷ و ۸ بدون تغییر باقی می‌مانند. اما تغییر حد انتقال توان خط ۲-۱ از ۴۶/۰۴٪ به ۶/۵۴٪ مبین تأثیر پذیری قسمت دوم از این افزایش توان است. نتیجهٔ بدیهی آن نیز، کاهش قیمت حاشیه‌ای محلی در تمامی باسهای قسمت ۲ می‌باشد. همانگونه که در شکل ۳-۵ دیده می‌شود قیمت در باس‌های ۱، ۲، ۵ و ۶ کاهش یافته است.

همانگونه که در شکل ۳-۶ دیده می‌شود، بارهای شبکه همچون گذشته توان درخواستی خود را بطور کامل دریافت می‌نمایند.

بازه ۴: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۴۰۱ تا ۴۶۶ مگاوات از باس ۲ به باس ۴

بر اساس تقسیم‌بندی انجام شده در بازهٔ قبل، قسمت اول شامل باس‌های ۳، ۴، ۷ و ۸ و قسمت دوم شامل باس‌های ۱، ۲، ۵ و ۶ می‌باشند. در قسمت دوم به ازای افزایش توان عبوری از ۴۰۱ به ۴۶۶ مگاوات، توان ورودی از خط TL_2 به باس ۲ نیز از ۴۰۱ به ۴۶۶ مگاوات افزایش می‌یابد. خط ۳-۲ در ۱۰۰٪ حد انتقال توان و خط ۲-۱ در ۶/۵۴٪ حد انتقال توان خود قرار دارند، در نتیجه شارش توان ورودی توسط خط ۲-۱ به سمت قسمت دوم افزایش می‌یابد. باس ۴ و خط خارج کننده توان عبوری TL_4، در قسمت اول قرار دارند. تبادل توان در بین دو قسمت به علت تراکم خطوط امکان پذیر نمی‌باشد. بدیهی است که به ازای افزایش توان ورودی به باس ۲ بایستی از میزان تولید در قسمت دوم کاسته شود. در قسمت دوم ژنراتورهای ۱، ۲ و ۶ خاموش می‌باشند و فقط ژنراتور ۵ روشن است. ژنراتور ۵ در ۱۰۰٪ حد تولید توان خود ۶۰۰ مگاوات توان تولید می‌نماید. به ازای افزایش توان عبوری به بیش از ۴۰۱ مگاوات، از تولید ژنراتور ۵ بعنوان تنها واحد تولیدکننده، کاسته می‌شود. ژنراتور ۵ علی‌رغم قرار داشتن در صدر فهرست اولویت، بعد از خاموشی تمام ژنراتورهای قسمت دوم، اجباراً کاهش تولید می‌دهد.

در قسمت اول به ازای افزایش توان عبوری از ۴۰۱ به ۴۶۶ مگاوات، توان خروجی از خط TL_4 نیز از ۴۰۱ به ۴۶۶ مگاوات افزایش می‌یابد. باس ۲ و خط وارد کنندهٔ توان عبوری TL_2، در قسمت دوم قرار دارند. تبادل توان در بین دو قسمت بعلت تراکم خطوط امکان پذیر نمی‌باشد. بدیهی است که به ازای افزایش توان خروجی از باس ۴ بایستی به میزان تولید در قسمت اول افزوده شود.

در قسمت اول، خطوط ارتباط داخلی تراکم ظرفیت انتقال ندارند و شارش توان از هر ژنراتور به هر بار امکان‌پذیر است. ژنراتورهای ۳، ۴ و ۷ بترتیب در ۷۹/۸٪، ۷۲/۴٪ و ۱۰۰٪ حد تولید توان خود قرار دارند. نتیجه آنکه هر یک از ژنراتورهای ۳ و ۴ قادر به تأمین توان خروجی از خط TL_4 می‌باشند. برنامه پخش بار بهینه با احتساب آنکه؛ ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور ۴ دارای قیمت پیشنهادی کمتری می‌باشد و با لحاظ نمودن رآکتانس‌های خطوط (امتیاز ژنراتور ۴ بجهت هم باس بودن با خط TL_4)، نتیجه را مطابق شکل ۳-۳

ارائه می‌نماید. از شکل ۳-۳ دیده می‌شود که ژنراتور ۳ مطابق بازهٔ قبل افزایش تولید می‌دهد و ژنراتور ۴ با نرخ کمتری نسبت به بازهٔ قبل، کاهش تولید می‌دهد.

خط ۲-۱ به همراه خط ۳-۲ دو خط متصل به باس ۲ می‌باشند. به ازای ۴۰۱ مگاوات توان عبوری، خط ۳-۲ در ۱۰۰٪ حد انتقال توان خود قرار دارد. خط ۲-۱ به ازای ۴۰۱ مگاوات توان عبوری در ۶/۵۴٪ و به ازای ۴۶۶ مگاوات توان عبوری در ۱۶/۴۳-٪ حد انتقال توان خود قرار می‌گیرد.

خط ۴-۱ بدون تغییر، در حد انتقال توان ۱۰۰٪ باقی می‌ماند.

خط ۵-۱ بواسطهٔ کاهش تولید ژنراتور ۵، در این بازه از ۶۲/۰۸-٪ به ۴۷/۱۶-٪ حد انتقال توان خود کاهش شارش می‌یابد.

خط ۶-۱ به ازای خاموشی ژنراتور ۶، به همراه خط ۶-۵ دو خط تغذیه کنندهٔ بار L_6 می‌باشند. بواسطهٔ کاهش تولید ژنراتور ۵، حد انتقال توان خط ۶-۵ از ۵۷/۶۶٪ به ۵۵/۳۳٪ کاهش می‌یابد. بدیهی است که خط ۶-۱ به همین میزان توان، افزایش در شارش بیابد. خط ۶-۱ در این بازه از ۳۰/۸۱٪ به ۳۴/۰۹٪ حد انتقال توان خود می‌رسد.

خط ۳-۲ بدون تغییر در ۱۰۰٪ حد انتقال توان خود باقی می‌ماند.

به ازای افزایش تولید ژنراتور ۳، ثابت بودن حد تولید ژنراتور ۷، کاهش تولید ژنراتور ۴ و افزایش توان خروجی از خط TL_4، برنامهٔ پخش بار بهینه، مطابق شکل ۳-۴، بر طبق رآکتانس‌های موجود اینگونه پخش بار نموده است که؛ نرخ شارش خط ۴-۳ در این بازه تغییر زیادی نماید و از ۳۳/۴۹٪ به ۶۳/۴۸٪ حد انتقال توان خود برسد. حد انتقال توان خط ۸-۳ افزایش یابد که لاجرم حد انتقال توان خط ۸-۷ کاهش می‌یابد. کاهش حد انتقال توان خط ۸-۷ نیز به ازای ثابت بودن تولید ژنراتور ۷، مستلزم افزایش حد انتقال توان خط ۷-۴ می‌باشد.

توضیح خط ۸-۳ به هنگام توضیح خط ۴-۳ بیان شده است.

در این بازه به ازای کاهش حد تولید توان ژنراتور ۵، حد انتقال توان خط ۵-۴ از ۹۵/۵۶-٪ به ۸۹/۴۲-٪ کاهش می‌یابد.

توضیح خط ۷-۴ به هنگام توضیح خط ۴-۳ آمده است.

خط ۶-۵ بواسطهٔ کاهش حد تولید ژنراتور ۵ از ۵۷/۶۶٪ به ۵۵/۳۳٪، کاهش شارش می‌یابد.

توضیح خط ۸-۷ به هنگام توضیح خط ۴-۳ آمده است.

همانگونه که از شکل ۳-۵ دیده می‌شود، قیمت انرژی در باس‌های قسمت اول تغییر نکرده است. این تثبیت قیمت به دلیل آنست که تراکم خطوط ۴-۱، ۳-۲ و ۵-۴ اجازهٔ افزایش ورود توان با قیمت $0/MWh را به این قسمت نمی‌دهد. در قیمت حاشیه‌ای محلی باس‌های قسمت دوم به ازای توان عبوری ۴۰۱ مگاوات، کاهش شدید دیده می‌شود. این کاهش بدلیل شارش توان عبوری با قیمت $0/MWh به قسمت دوم می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود، قیمت حاشیه‌ای محلی در باس ۲ از $21.73/MWh به $13.94/MWh، قیمت در باس ۱ از $14.00/MWh به $6.21/MWh، قیمت در باس ۵ از $16.55/MWh به $10.00/MW، و قیمت در باس ۶ از $15.42/MWh به $8.32/MWh کاهش یافته است.. دیده می‌شود که میزان کاهش قیمت حاشیه‌ای محلی باس‌ها به فاصله باس تا باس ۲ مرتبط است. در باس ۲ $7.79/MWh کاهش قیمت رخ داده است. قیمت در باس ۱ بعنوان باس مجاور باس ۲ نیز $7.79/MWh کاهش یافته است. باس ۶ در حد $7.10/MWh و باس ۵ در حد $6.55/MWh کاهش قیمت را نشان داده‌اند.

بازه ۵: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۴۶۶ تا ۵۴۹ مگاوات از باس ۲ به باس ۴

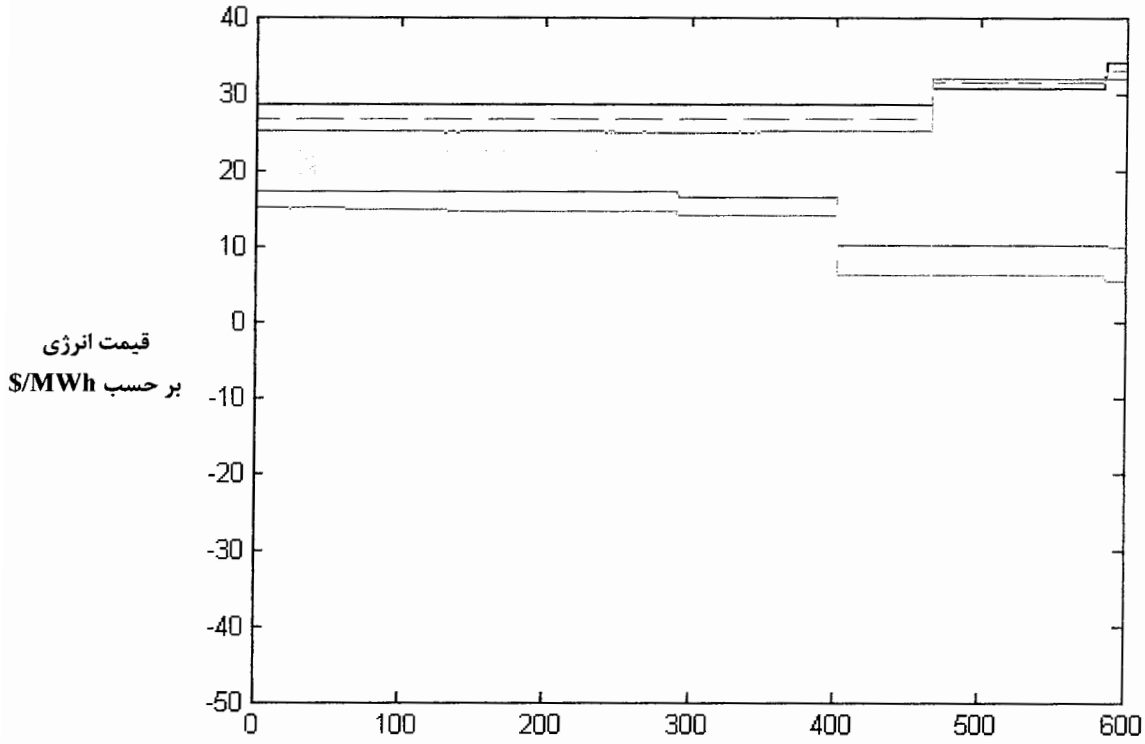
در این بازه ژنراتورهای ۱، ۴ و ۶ همچنان خاموش می‌مانند. ژنراتور ۷ بدون تغییر در حد بیشینهٔ تولید توان کار می‌کند. ژنراتورهای ۴ و ۵ همچون بازه قبل و با همان توجیهات، به کار خود ادامه می‌دهند. ژنراتور ۳ پس از رسیدن به ۱۰۰٪ حد تولید خود به ازای توان عبوری ۴۶۶ مگاوات، به کار در حد بیشینهٔ تولید ادامه می‌دهد. حال به ازای افزایش توان خروجی از خط TL_4 یا ژنراتور ۴ بایستی افزایش تولید دهد و یا یکی از بارهای قسمت اول باید ریزش یابد. با لحاظ نمودن مسئلهٔ پایداری شبکه دیده می‌شود که بار L_3 کاهش‌می‌یابد. (علت انتخاب بار L_3 توضیح داده خواهد شد)

در این بازه از تغییرات توان عبوری، در نرخ شارش هیچ یک از خطوط انتقال تغییری دیده نمی‌شود و به روال بازهٔ قبل تغییر شارش می‌یابند.

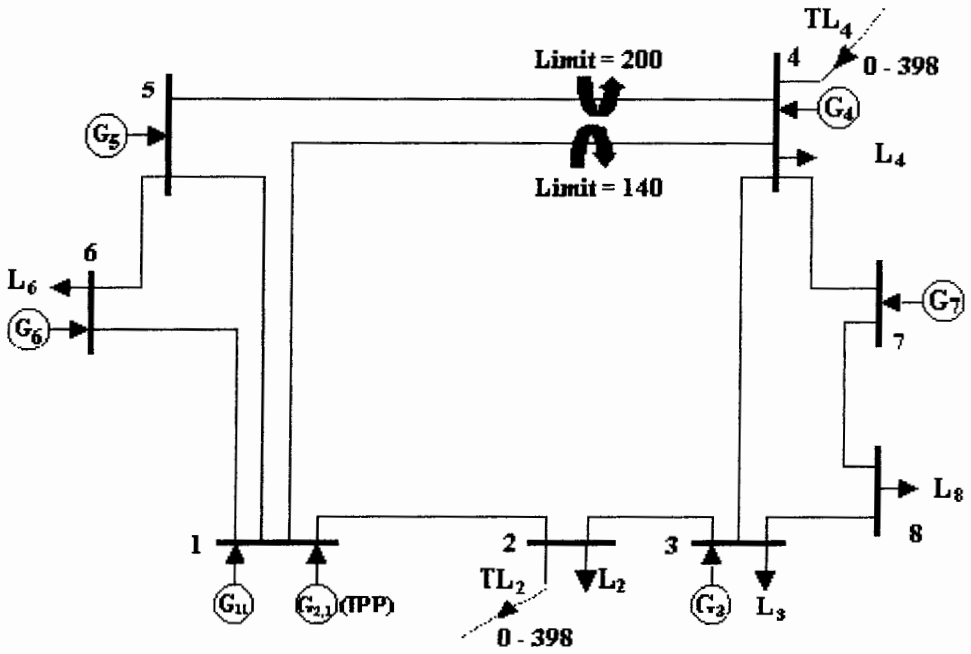
در این بازه از تغییرات عبوری، در قسمت اول اگر چه حضور خط TL_4 به عنوان باری با قیمت پیشنهادی بی‌نهایت، باید بر قیمت سایر باس‌های این قسمت تأثیر بگذارد، اما اولاً دیده شد که این شرایط در بازهٔ قبل نیز حاکم بوده و هیچگونه تأثیری بر قیمت حاشیه‌ای محلی باس‌ها اعمال ننمود. ثانیاً دیده می‌شود، که قیمت باس ۴ که خط TL_4 در آن قرار دارد افزایش نیافته است.

به ازای توان عبوری ۴۶۶ مگاوات، ژنراتور ۳ به حد بیشینهٔ تولید توان خود می‌رسد و از سوی دیگر ژنراتور ۷ در بیشینه حد تولید توان خود قرار دارد. تنها ژنراتور باقیمانده، ژنراتور ۴ با قیمت پیشنهادی $30/MWh می‌باشد که در ۶۵/۷۹٪ حد تولید توان خود قرار دارد. حال می‌توان بیان داشت که افزایش قیمت‌ها بدلیل کمبود تأمین می‌باشد. باس ۴ به علت آنکه ژنراتور ۴ با ۶۵/۷۹٪ حد تولید توان در آن قرار دارد و مسئلهٔ کمبود تأمین در آن منتفی است، همچنان در قیمت پیشنهادی ژنراتور ۴ تثبیت قیمت می‌گردد. قیمت باس ۳ از $25/MWh به $32/MWh (علت بیان خواهد شد)، قیمت باس ۷ از $28.64/MWh به $30.55/MWh و قیمت باس ۸ از $26.64/MWh به $31.35/MWh افزایش می‌یابد.

از شکل ۳-۶ دیده می‌شود، که تمامی بارها به غیر از بار L_3 توان درخواستی خود را بطور کامل دریافت می‌نمایند. در قسمت اول به علت کمبود تأمین، می‌بایست کاهش بار صورت پذیرد. با توجه به جدول ۲-۲ دیده می‌شود که بار L_3 دارای قیمت پیشنهادی $32/MWh و بارهای L_4 و L_8 دارای قیمت پیشنهادی $35/MWh می‌باشند. برای آنکه قطع بار به ازای کمترین افزایش قیمت تحقق یابد، قیمت باس ۳ به $32/MWh افزایش می‌یابد و بار L_3 کاهش می‌یابد (برای ریزش بار بایستی قیمت حاشیه‌ای محلی تعیین شده در باس بزرگتر یا مساوی قیمت پیشنهادی بار باشد. لذا برای ریزش بارهای L_3، L_4 و L_8 به ترتیب نیاز به افزایش ۷، ۶/۳۶ و ۸/۳۶ دلار بر مگاوات ساعت بر قیمت باس‌های مربوطه می‌باشد. از سویی دیگر بار L_3 به ازای $32/MWh و بارهای L_4 و L_8 به ازای $35/MWh کاهش می‌یابند. خلاصه آنکه بار L_3 نسبت به بار L_4، ۶۴ سنت بر مگاوات ساعت افزایش قیمت مازاد دارد و از طرفی بار L_3 در ۳۲ و بار L_4 در ۳۵ دلار بر مگاوات ساعت کاهش می‌یابند و نتیجه کاهش بار L_3 می‌باشد). افزایش قیمت در باسهای ۷ و ۸ به تبع افزایش قیمت اجباری در باس ۳ است.



شکل ۳-۸ نمودار تغییرات قیمت در باسها، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از باس ۲ به باس ۴



شکل ۳-۹ سیستم مورد آزمایش - شبکه هشت باسه (جهت قرار داد انتقال توان از شبکه از باس ۴ به ۲ می‌باشد)

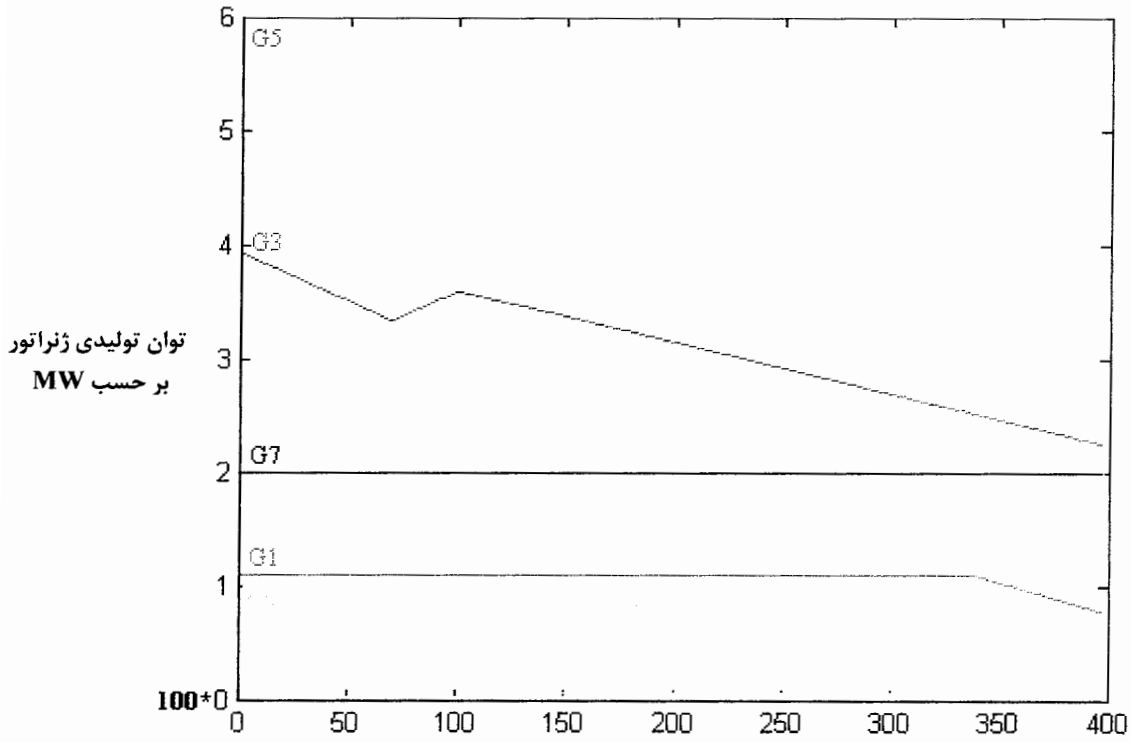
شاید این سوال مطرح شود که به ازای افزایش توان عبوری به بیش از ۵۴۹ مگاوات، چه اتفاقی رخ می‌دهد. جواب این سوال در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود به ازای توان عبوری بیش از ۵۴۹ مگاوات، قیمت حاشیه‌ای محلی تعیین شده در باس ۲ منفی می‌گردد که به عبارتی حکایت بر ناپایداری شبکه دارد.

در ادامه به ازای تغییر جهت شارش توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه، شبکه را بررسی می‌نماییم. در شکل ۳-۹ دیده می‌شود که توان عبوری از خط بین منطقه‌ای TL_4 به باس ۴، وارد می‌شود و در باس ۲ از خط TL_2 خارج می‌گردد. همانگونه که دیده می‌شود باس ۲، شامل بار L_2 با توان درخواستی ۳۰۰ مگاوات می‌باشد که در این بررسی خط TL_2 نیز به عنوان یک بار به آن اضافه شده است. از جدول ۲-۳ دیده می‌شود که مجموع ظرفیت انتقالی خطوط ۲-۱ و ۳-۲ برابر ۴۰۰ مگاوات می‌باشد. لذا اگر بار L_2 هیچ توانی دریافت ننماید، در نهایت می‌توان حدود ۴۰۰ مگاوات توان عبوری را از شبکه مورد مطالعه انتقال داد.

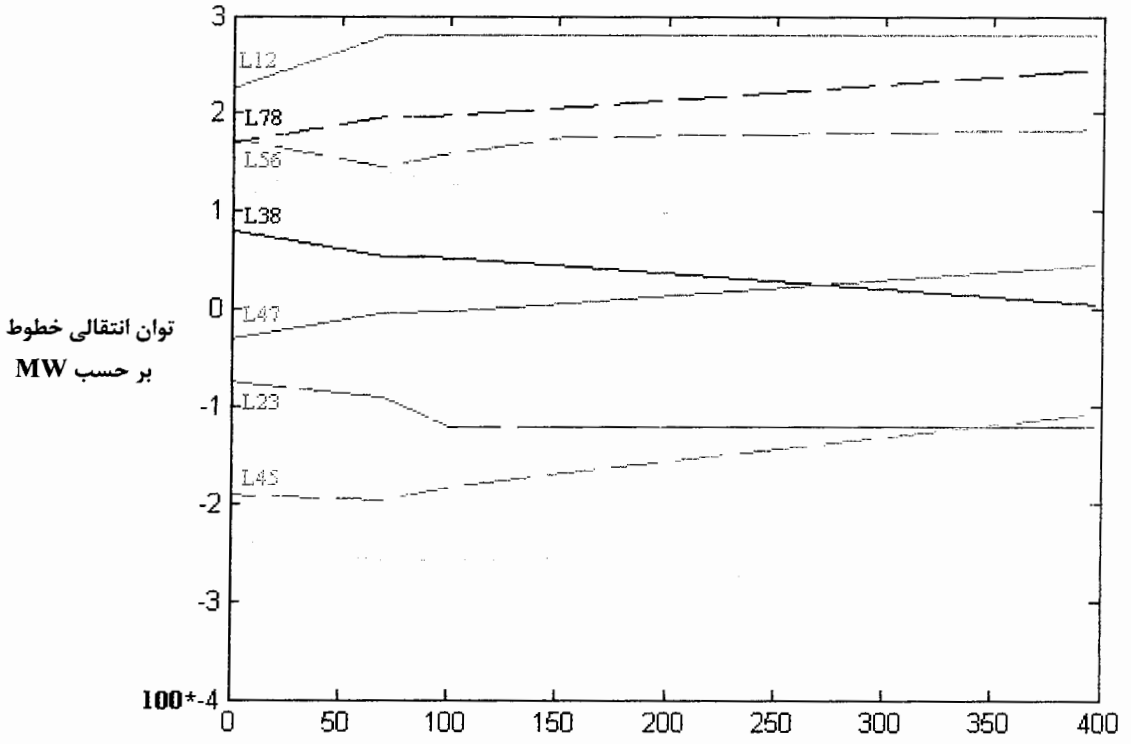
شکلهای ۳-۱۰، ۳-۱۱، ۳-۱۲ و ۳-۱۳ به ترتیب تغییرات توان تولیدی ژنراتورها، توان گذرنده از خطوط، قیمت حاشیه‌ای محلی در باس‌های شبکه و توان تحویلی به بارها را به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۳۹۹ مگاوات و از باس ۴ به باس ۲ نشان می‌دهند.

همانگونه که توضیح داده شد می‌توان ۴۰۰ مگاوات توان عبوری را از شبکهٔ مورد مطالعه انتقال داد. اما به علت آنکه قیمت باس ۲ به ازای افزایش توان عبوری از ۳۹۹ به ۴۰۰ مگاوات به یکباره چندین برابر افزایش می‌یابد، لذا نمودار تغییرات قیمت به شکل نامطلوبی تغییر می‌نماید. بنابراین، نظر بر آن است که ابتدا تغییرات توان عبوری از صفر تا ۳۹۹ مگاوات بررسی شود و سپس نمودار تغییرات قیمت به ازای تغییرات توان عبوری از صفر تا ۴۰۰ مگاوات ارائه شود. لازم به ذکر است سایر نمودارها به ازای تغییرات توان عبوری از ۳۹۹ به ۴۰۰ مگاوات هیچگونه تغییر خاصی را نشان نمی‌دهند.

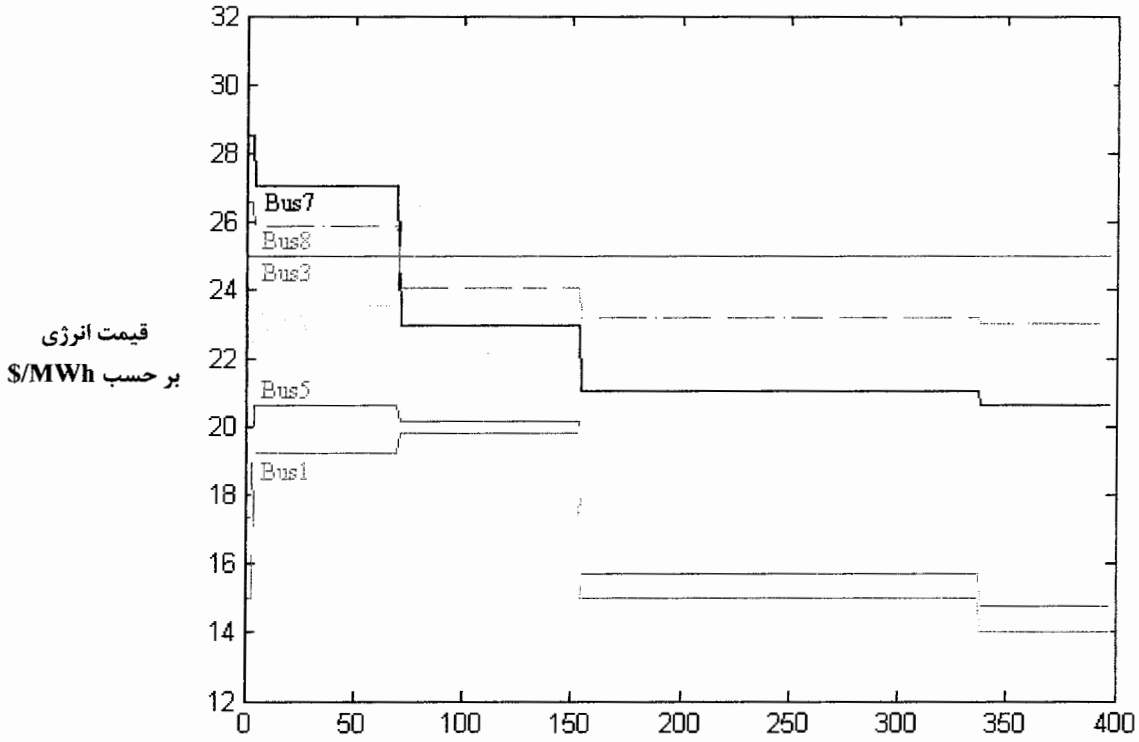
همانگونه که در شکل‌های ۳-۱۰، ۳-۱۱، ۳-۱۲ و ۳-۱۳ دیده می‌شود، به ازای افزایش توان عبوری از صفر تا ۳۹۹ مگاوات، ۶ بازه در نمودارها مشاهده می‌شود که در ذیل به دلایل این تغییرات پرداخته می‌شود.



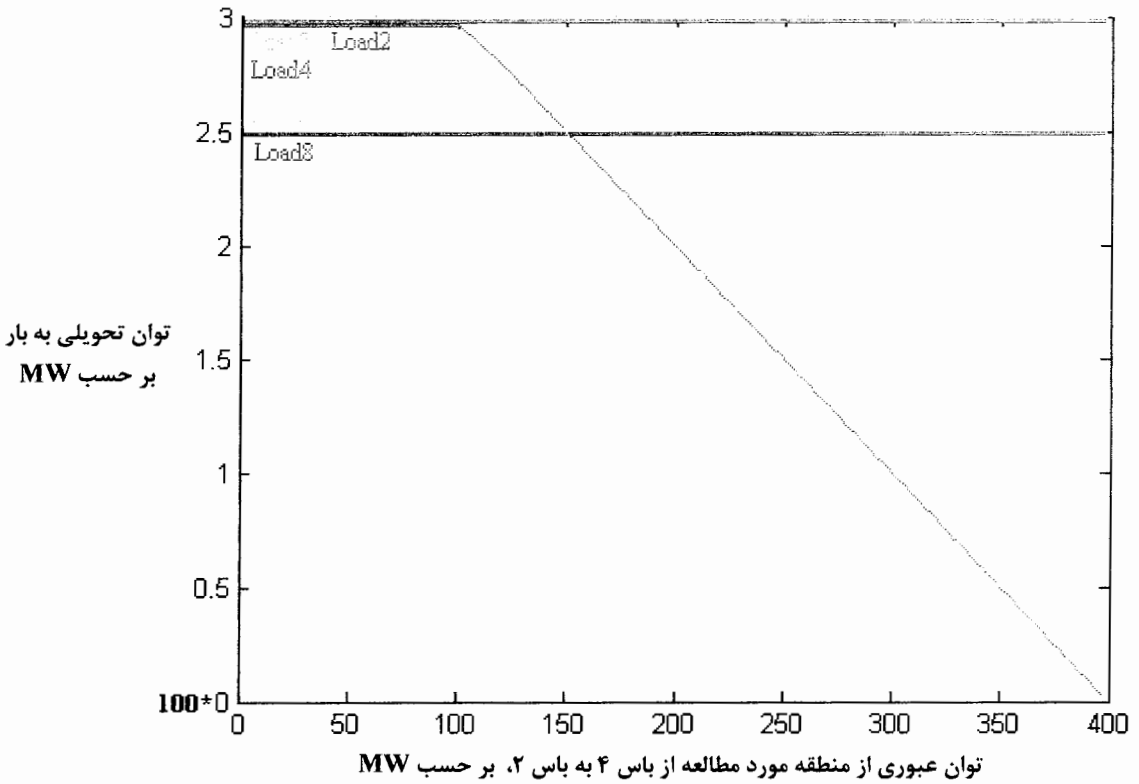
شکل ۳- ۱۰ نمودار تغییرات توان تولیدی ژنراتورها، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از باس ۴ به باس ۲



شکل ۳-۱۱ نمودار تغییرات توان عبوری از خطوط، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از باس ۴ به باس ۲



شکل ۳-۱۲ نمودار تغییرات قیمت در باسها، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از باس ۴ به باس ۲

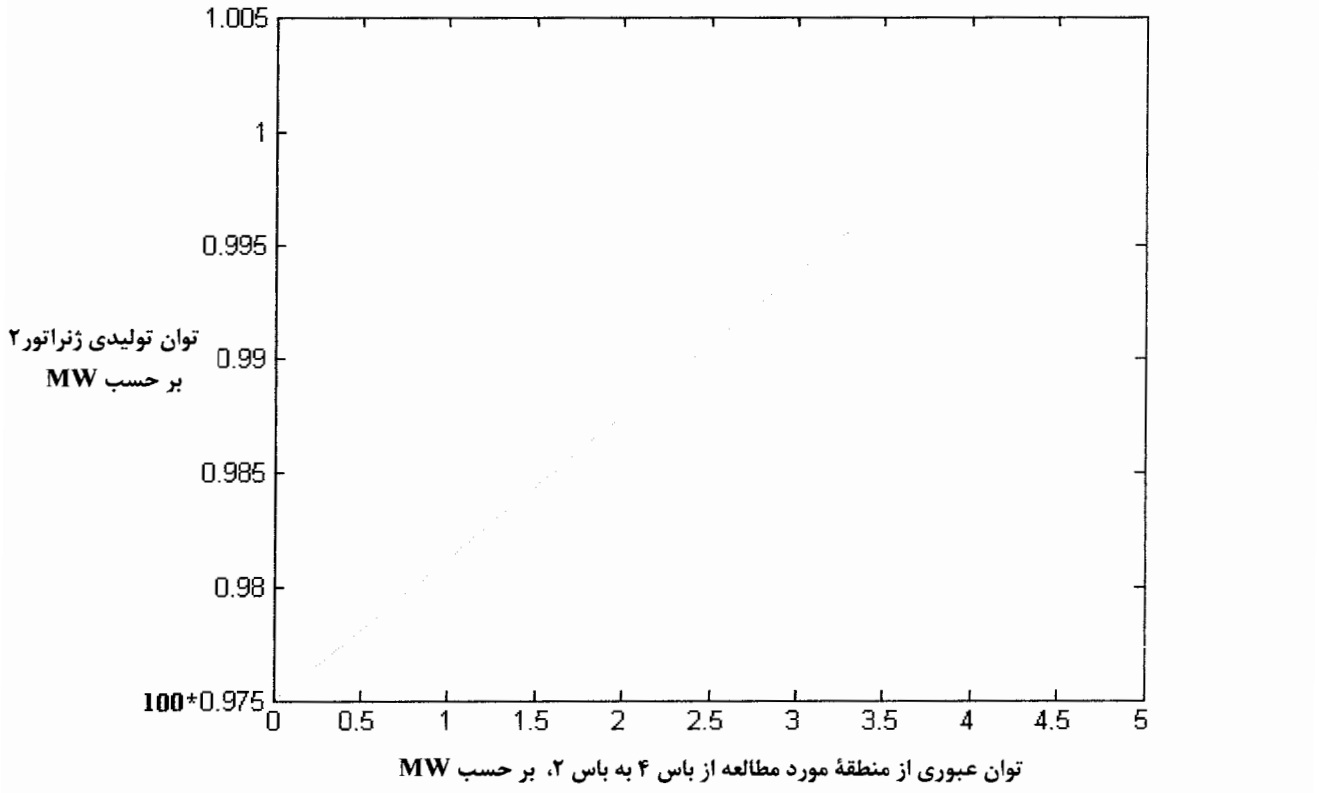


شکل ۳- ۱۳ نمودار تغییرات توان تحویلی به بار، به ازای تغییرات توان عبوری از منطقه مورد مطالعه از باس ۴ به باس ۲

بازه ۱: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از صفر تا ۴ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

از شکل ۳-۱۱ دیده می‌شود که قبل از عبور توان از شبکهٔ مورد مطالعه، حد انتقال توان خطوط ۴-۱ و ۵-۴ برابر ۱۰۰٪ و ۹۵/۵۶-٪ می‌باشد. علت تراکم این خطوط، نحوهٔ قرارگیری ژنراتورها و بارها در شبکه است. اگر مجموع باس‌های ۳، ۴، ۷ و ۸ را در قالب قسمت اول و مجموع باس‌های ۱، ۲، ۵ و ۶ را در قالب قسمت دوم نامگذاری کنیم، به علت قرارگیری ۳ دستگاه ژنراتور انتهایی فهرست اولویت در قسمت اول، می‌توان گفت که تجمع بار در قسمت اول و تجمع تولید در قسمت دوم وجود دارد که این وضعیت باعث تراکم خطوط ۴-۱ و ۵-۴ شده است. در این بررسی به ازای ورود توان از خط TL_4 به باس ۴ و خروج توان در باس ۲ از خط TL_2، می‌توان پیش‌بینی نمود که از تراکم خطوط ۴-۱ و ۵-۴ کاسته خواهد شد.

در ابتدای بازه، ژنراتورهای ۱، ۵ و ۷ در بیشینهٔ حد تولید خود قرار دارند و ژنراتورهای ۴ و ۶ خاموش هستند. ژنراتور ۲ در ۹۷/۵۰٪ و ژنراتور ۳ در ۷۵/۴۸٪ حد تولید خود به ترتیب ۹۷/۵۰ و ۳۹۲/۵۰ مگاوات



شکل ۳- ۱۴ نمودار تغییرات توان تولیدی ژنراتور۲، به ازای تغییرات توان عبوری از صفر تا ۴ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

توان تولید می‌کنند (به شکل ۳-۱۴ توجه کنید). به ازای افزایش توان عبوری از شبکهٔ مورد مطالعه از صفر به ۴ مگاوات، ژنراتور ۲ در ۱۰۰٪ و ژنراتور ۳ در ۷۵٪ حد تولید خود به ترتیب ۱۰۰ و ۳۹۰ مگاوات توان تولید می‌کنند. ژنراتور ۲، ۲/۵ مگاوات افزایش تولید و ژنراتور ۳ نیز، ۲/۵ مگاوات کاهش تولید یافته است که مبین ثابت بودن بار به ازای عبور توان از شبکه مورد مطالعه می‌باشد.

ژنراتورهای ۱ و ۵ به ترتیب با قرارگیری در سطرهای اول و دوم فهرست اولویت در ۱۰۰٪ حد تولید خود کار می‌کنند و از آنسو ژنراتور ۴ به علت قرارگیری در سطر انتهایی فهرست اولویت خاموش می‌باشد. تولید باقی ژنراتورها نیز براساس تراکم خطوط و رآکتانس‌های خطوط تعیین شده است.

افزایش توان عبوری به صورت ورود توان به قسمت اول (قسمت دارای تجمع بار) و خروج توان از قسمت دوم (قسمت دارای تجمع تولید)، از تراکم خطوط کاسته و باعث کاهش تولید در ژنراتور ۳ (با قیمت پیشنهادی $25/MWh) و افزایش تولید در ژنراتور ۲ (با قیمت پیشنهادی $15/MWh) می‌گردد.

همانگونه که در شکل ۳-۱۱ دیده می‌شود، توان گذرنده از خطوط تا قبل از ۷۰ مگاوات توان عبوری تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. از اینرو بررسی خطوط در این بازه انجام نمی‌شود.

قیمت حاشیه‌ای محلی باسها به ازای تغییرات توان عبوری از صفر به ۴ مگاوات تغییر نمی‌یابد.

همهٔ مصرف‌کنندگان در این بازه از تغییرات توان عبوری، توان درخواستی خود را به طور کامل دریافت می‌کنند.

بازه ۲: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۴ تا ۷۰ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

در این بازه از تغییرات توان عبوری، ژنراتورهای ۱، ۲، ۵ و ۷ در حد بیشینهٔ تولید خود قرار دارند و ژنراتورهای ۴ و ۶ خاموش می‌باشند. از شکل ۳-۱۰ دیده می‌شود که ژنراتور ۳ با قیمت پیشنهادی $25/MWh در حال تولید است در حالیکه ژنراتور ۶ با قیمت $20/MWh خاموش می‌باشد. بنا به علل مطروحه در بازهٔ قبل، تراکم خطوط رو به کاهش نهاده و دلیل موجهی برای تولید ژنراتور ۳ باقی نمی‌ماند. زمانیکه ژنراتور ۲ به ۱۰۰٪ حد تولید خود می‌رسد (به ازای ۴ مگاوات توان عبوری) بر طبق فهرست اولویت،

ژنراتور ۶ شروع به تولید می‌نماید و به جهت ثابت بودن بار شبکه، ژنراتور ۳ همچون بازهٔ قبل نرخ کاهشی تولید خود را حفظ می‌کند. ژنراتور ۴ با قیمت $30/MWh خاموش بوده است و حال به ازای ورود توان عبوری با قیمت $0/MWh به باس ۴، بدیهی است که خاموش می‌ماند.

خطوط ۲-۱ و ۳-۲، دو خط تغذیه کنندهٔ بار L_2 و توان خروجی از خط TL_2، می‌باشند. حال به ازای افزایش توان خروجی از خط TL_2، توان گذرنده از این دو خط افزایش می‌یابد. حد انتقال توان خطوط ۲-۱ و ۳-۲ به ترتیب از ۸۰/۹۷٪ و ۶۱/۹-٪ به ۱۰۰٪ و ۷۵/۱۳-٪ افزایش می‌یابد.

حد انتقال توان خط ۴-۱ در این بازه تغییر نمی‌یابد و در ۱۰۰٪ حد انتقال توان باقی می‌ماند.

خطوط ۵-۱، ۵-۴ و ۶-۵ خطوطی هستند که ۶۰۰ مگاوات توان تولیدی ژنراتور ۵ را انتقال می‌دهند. به ازای روشن شدن ژنراتور ۶، حد انتقال توان خط ۶-۵ از ۵۷/۶۶٪ به ۴۸/۴ کاهش می‌یابد. بدیهی است که حد انتقال توان خطوط ۵-۱ و ۵-۴ افزایش یابد. حد انتقال توان خطوط ۵-۱ و ۵-۴ به ترتیب از ۶۷/۴۱ و ۹۵/۵۶-٪ به ۷۳/۹۳٪ و ۹۸/۰۳-٪ افزایش می‌یابد.

حد انتقال توان خط ۶-۱ از ۳۰/۸۱٪ به ۱۹/۵۶٪ کاهش می‌یابد که به علت روشن شدن ژنراتور ۶ می‌باشد.

توضیح خط ۳-۲ به هنگام توضیح خط ۲-۱ بیان شده است.

حد انتقال توان خط ۴-۳ از ۲۶/۹۴-٪ به ۴۷/۷۴-٪ افزایش می‌یابد که علل اصلی آن ورود توان عبوری از خط TL_4 به باس ۴ و همچنین کاهش تولید ژنراتور ۳ می‌باشد.

حد انتقال توان خط ۸-۳ از ۴۴/۲۷٪ به ۲۲/۳۹٪ کاهش می‌یابد که علت آن کاهش تولید ژنراتور ۳ می‌باشد.

توضیح خط ۵-۴ به هنگام توضیح خط ۵-۱ بیان شده است.

حد انتقال توان خط ۷-۴ از ۱۱/۹۴-٪ به ۱/۵-٪ کاهش یافته است که علت آن ورود توان از خط TL_4 به باس ۴ می‌باشد.

توضیح خط ۶-۵ به هنگام توضیح خط ۵-۱ بیان شده است.

حد انتقال توان خط ۸-۷ از ۵۰/۰۵٪ به ۵۷/۷۲٪ افزایش یافته است. خطوط ۷-۴ و ۸-۷ خطوطی هستند که ۲۰۰ مگاوات توان تولیدی ژنراتور ۷ را انتقال می‌دهند. به ازای کاهش حد انتقال توان خط ۷-۴، بدیهی است که حد انتقال توان خط ۸-۷ افزایش می‌یابد.

از شکل ۳-۱۲ دیده می‌شود که به ازای ۴ مگاوات توان عبوری، تغییرات زیادی در قیمت‌های حاشیه‌ای محلی باس‌ها رخ می‌دهد و سپس قیمت تا انتهای بازه ثابت می‌ماند.

به ازای انتقال ۴ مگاوات توان عبوری، ژنراتور ۶ شروع به تولید می‌نماید. برای روشن شدن ژنراتور ۶، لزوماً باید قیمت حاشیه‌ای محلی در باس ۶ بیشتر یا برابر قیمت پیشنهادی ژنراتور ۶ باشد. از اینرو قیمت باس ۶ به $20/MWh افزایش می‌یابد. قیمت باس‌های ۵ و ۶ نیز به تبع تغییر قیمت در باس ۶، تغییر نموده است که علت آن ارتباط مستقیم بین باس‌های ۱ و ۵ با باس ۶ می‌باشد.

همانگونه که بیان شد در قسمت اول تجمع بار وجود دارد و لذا با ورود توان عبوری با قیمت $0/MWh به باس ۴، قیمت در باس‌های قسمت اول سیر نزولی می‌یابد و دیده می‌شود که قیمت باس‌های ۴، ۷ و ۸ به ترتیب به میزان ۲/۰۶، ۱/۵ و ۰/۶۵ دلار بر مگاوات ساعت، کاهش می‌یابد. در باس ۳ به علت روشن بودن ژنراتور ۳ امکان کاهش قیمت به کمتر از $25/MWh امکان پذیر نمی‌باشد زیرا به خاموشی این ژنراتور می‌انجامد. در باس ۲ عللی همچون افزایش بار و تراکم خطوط ۲-۱ و ۳-۲، منجر به افزایش قیمت در باس ۲ می‌گردند.

در این بازه از تغییرات توان عبوری، همهٔ مصرف‌کنندگان توان درخواستی را بطور کامل دریافت می‌کنند.

بازه ۳: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۷۰ تا ۹۹ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

به ازای توان عبوری برابر ۷۰ مگاوات، خط ۲-۱ به ۱۰۰٪ حد انتقال توان خود می‌رسد و از این پس باس ۲ جزء قسمت دوم به حساب نمی‌آید و در بررسی‌ها به عنوان قسمت سوم مطرح می‌گردد. با وضعیت خط ۲-۱، ژنراتور ۶ قادر به تولید نمی‌باشد و نرخ تولید ژنراتور ۶ سیر نزولی می‌یابد. به لحاظ ثابت بودن بار و بر اساس فهرست اولویت، تولید ژنراتور ۳ افزایش می‌یابد. نرخ تولید سایر ژنراتورها اعم از روشن و خاموش بدون تغییر باقی می‌ماند.

با احتساب افزایش بار در باس ۲، خط ۲-۱ در ۱۰۰٪ حد انتقال خود باقی می‌ماند.

حد انتقال توان خط ۴-۱ از ۱۰۰٪ به ۹۱/۲۶٪ کاهش می‌یابد که علت آن ورود توان عبوری از خط TL_4 به باس ۴ می‌باشد.

در این بازه، تولید ژنراتور ۵ ثابت است و در باس ۴ افزایش ورود توان عبوری و در باس ۶ کاهش تولید ژنراتور ۶ رخ می‌دهد. در نتیجه حد انتقال توان خط ۵-۴ از ۹۸/۰۳-٪ به ۹۱/۸-٪ کاهش می‌یابد و حد انتقال توان خط ۶-۵ از ۴۸/۴٪ به ۵۲/۹٪ افزایش می‌یابد و سرانجام حد انتقال توان خط ۵-۱ از ۷۳/۹۳-٪ به ۷۳/۶۱-٪ کاهش می‌یابد (با کمی اغماض ثابت می‌ماند).

حد انتقال توان خط ۶-۱ از ۱۹/۵۶٪ به ۲۳/۹۸٪ افزایش می‌یابد که علت آن کاهش تولید ژنراتور ۶ می‌باشد.

حد انتقال توان خط ۳-۲ از ۷۵/۱۳-٪ به ۹۹/۱۷-٪ افزایش می‌یابد که علت آن افزایش توان خروجی از خط TL_2 می‌باشد.

حد انتقال توان خط ۴-۳ از ۴۷/۷۴-٪ به ۴۸/۵۹-٪ افزایش می‌یابد که علت آن تعامل افزایش ورود توان عبوری به باس ۴ و افزایش تولید ژنراتور ۳ می‌باشد.

در این بازه بیشتر مابه‌التفاوت افزایش تولید ژنراتور ۳ توسط خط ۳-۲ به باس ۲ منتقل می‌شود و همچنین مابه‌التفاوت افزایش توان ورودی به باس ۴، توسط خطوط ۴-۱ و ۵-۴، جبران کاهش تولید ژنراتور ۶ را می‌نماید. در نتیجه حد انتقال توان خطوط متصل به باس‌های ۷ و ۸ تغییر چندانی نمی‌کنند.

حد انتقال توان خطوط ۸-۳، ۷-۴ و ۸-۷ به ترتیب از ۲۲/۳۹٪، ۱/۵-٪ و ۵۷/۷۲٪ به ۲۱/۷۶٪، ۰/۸۹-٪ و ۵۸/۱۷٪ در حد جزئی تغییر می‌یابند.

توضیح خط ۷-۴ به هنگام توضیح خط ۸-۳ بیان شده است.

توضیح خط ۵-۴ به هنگام توضیح خط ۵-۱ بیان شده است.

توضیح خط ۶-۵ به هنگام توضیح خط ۵-۱ بیان شده است.

توضیح خط ۸-۷ به هنگام توضیح خط ۸-۳ بیان شده است.

در خصوص تغییرات قیمت باید توجه داشت که اگر یک باس به دلیل خاصی تغییر قیمت یابد، باس‌های مجاور آن نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند و به عبارتی دیگر قیمت هرباس بر/از قیمت باس‌های مجاور تأثیر می‌گذارد/می‌پذیرد.

افزایش ورود توان عبوری به باس ۴ باعث کاهش شدید قیمت در باس ۴ می‌گردد. کاهش قیمت در باس ۴ مستقیماً در باس ۷ مؤثر بوده و قیمت باس ۷ را کاهش می‌دهد.

قیمت در باس ۲ به علت افزایش بار و تراکم خطوط ۲-۱ و ۳-۲، افزایش می‌یابد.

قیمت در باس ۳ به علت روشن بودن ژنراتور ۳ با قیمت پیشنهادی $20/MWh امکان کاهش قیمت ندارد و با وجود ورود توان عبوری با قیمت $0/MWh به قسمت اول دلیلی هم برای افزایش قیمت ندارد، لذا بدون تغییر باقی می‌ماند.

باس ۸ از یک سو با باس ۳ و از سوی دیگر با باس ۷ در ارتباط است که تعامل آن، کاهش جزئی قیمت در باس ۸ می‌باشد.

قیمت باس ۱ به علت تراکم خطوط ۲-۱ و ۴-۱ تأثیری نمی‌پذیرد ولی به لحاظ کاهش تولید ژنراتور ۶، در حد جزئی افزایش می‌یابد.

باس ۵ بطور مستقیم با باس ۴ در ارتباط است ولی به جهت آنکه خط ۵-۴ در ۹۱/۸-٪ حد انتقال توان خود قرار دارد، قیمت باس ۵ در حدی جزئی کاهش می‌یابد.

باس ۶ نیز در تعاملات موجود، اعم از کاهش تولید ژنراتور ۶، کاهش قیمت در باس ۵ و افزایش قیمت در باس ۱، بدون تغییر در قیمت باقی می‌ماند.

در این بازه از تغییرات توان عبوری، همهٔ مصرف‌کنندگان توان درخواستی خود را بطور کامل دریافت می‌کنند.

بازه ۴: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۹۹ تا ۱۵۴ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

در ابتدای این بازه، حد انتقال توان خطوط ۲-۱ و ۳-۲ به ترتیب به ۱۰۰٪ و ۱۰۰-٪ رسیده است که با این وجود امکان تأمین بار L_2 و توان خروجی از خط TL_2 توامان میسر نمی‌باشد. توان خروجی از خط TL_2 طبق قرارداد چرخش توان بایستی تأمین گردد و بدیهی است که بار L_2 کاهش می‌یابد. به ازای کاهش بار L_2، باید از میزان تولید نیز به همان مقدار کاسته شود تا تعادل تولید و بار حفظ گردد.

در ابتدای بازهٔ قبل، به ازای ۷۰ مگاوات توان عبوری و رسیدن خط ۲-۱ به ۱۰۰٪ حد انتقال توان خود، تولید ژنراتور ۶ کاهش یافته بود که این روند کاهشی به ازای کاهش بار L_2 همچنان ادامه می‌یابد.

برای حفظ هر چه بیشتر پایداری شبکه همانگونه که در شکل ۳-۱۰ دیده می‌شود تقریباً نیمی از کاهش تولید توسط ژنراتور قسمت اول و نیمه دیگر توسط ژنراتور قسمت دوم تحقق می‌پذیرد. در این بازه از تغییرات به ازای کاهش بار L_2، ژنراتور ۳ از قسمت اول و ژنراتور ۶ از قسمت دوم کاهش تولید می‌یابند. باقی ژنراتورها اعم از روشن و خاموش بدون تغییر در حد تولید خود، باقی می‌مانند.

حد انتقال توان خطوط ۲-۱ و ۳-۲ به ترتیب در ۱۰۰٪ و ۱۰۰-٪ قرار دارند که با وجود افزایش خروجی توان عبوری از خط TL_2، بدون تغییر باقی می‌مانند.

حد انتقال توان خط ۴-۱ از ۱۰۰٪ به ۹۱/۲۶٪ کاهش می‌یابد که علت آن افزایش ورود توان از خط TL_4 به باس ۴ می‌باشد.

خطوط ۵-۱، ۵-۴ و ۶-۵ متصل به باس ۵ به ازای تولید ثابت ژنراتور ۵، بدین گونه تعامل می‌کنند که به ازای افزایش توان ورودی به باس ۲، حد انتقال توان خط ۵-۴ از ۹۱/۸-٪ به ۸۳/۸۶-٪ کاهش می یابد و به ازای کاهش تولید ژنراتور ۶، حد انتقال توان خط ۶-۵ از ۵۲/۹٪ به ۵۸/۶۴٪ افزایش می‌یابد و سرانجام دیده می‌شود که حد انتقال توان خط ۵-۱ از ۷۳/۶۱-٪ به ۷۳/۲۵-٪ کاهش می‌یابد (با کمی اغماض تغییر نمی‌یابد).

توضیح خط ۳-۲ به هنگام توضیح خط ۲-۱ بیان شده است.

حد انتقال توان خط ۴-۳ از ۴۸/۵۹-٪ به ۵۵/۵۷-٪ افزایش یافت که علت آن کاهش تولید ژنراتور ۳ و افزایش ورود توان عبوری به باس ۴ می‌باشد.

حد انتقال توان خط ۸-۳ از ۲۱/۷۶٪ به ۱۸/۳٪ کاهش یافت که علت آن کاهش تولید ژنراتور ۳ می‌باشد.

توضیح خط ۵-۴ به هنگام توضیح خط ۵-۱ آمده است.

حد انتقال توان خط ۷-۴ از ۰/۸۹-٪ به ۲/۴۳٪ رسیده است که علت آن افزایش ورود توان عبوری به باس ۴ می‌باشد.

توضیح خط ۶-۵ به هنگام توضیح خط ۵-۱ بیان شده است.

حد انتقال توان خط ۸-۷ از ۵۸/۱۷٪ به ۶۰/۶۱٪ افزایش می‌یابد که علت آن در نحوه تغییرات شارش خطوط ۸-۳ و ۷-۴ مستتر است.

در ابتدای این بازه هر دو خط ارتباطی باس ۲ به بیشینه حد انتقال توان خود می‌رسند و لذا جهت تأمین توان خروجی از خط TL_2، بایستی از بار L_2 کاسته شود. بر طبق جدول ۲-۲، قیمت پیشنهادی مصرف کنندهٔ بار L_2 برابر \$30/MWh می‌باشد، لذا برای کاهش بار L_2 می‌بایست قیمت حاشیه‌ای محلی باس ۲ به \$30/MWh افزایش یابد که این امر در شکل ۳-۱۲ دیده می‌شود. افزایش قیمت در باس ۲ به عنوان قسمت سوم شبکه، هیچگونه تأثیری بر باس‌های قسمت اول و دوم ندارد و قیمت سایر باس‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند.

مصرف‌کنندگان بارهای TL_3، TL_4، TL_6 و TL_8 بطور کامل توان درخواستی خود را دریافت می‌کنند و مصرف‌کنندهٔ بار L_2، بنا به دلایل مطروحه، بطور کامل تأمین انرژی نمی‌گردد.

بازه ۵: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۱۵۴ تا ۳۳۸ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

در ابتدای این بازه از تغییرات توان عبوری ژنراتور ۶ خاموش می‌گردد. نظر بر آن است که به جهت حفظ پایداری شبکه هر یک از قسمت‌های اول و دوم نیمی از کاهش تولید را تحقق بخشند. در قسمت اول

همچنان از تولید ژنراتور ۳ کاسته می‌شود و در قسمت دوم هم بعد از خاموشی ژنراتور ۶، با مراجعه به فهرست اولویت، از تولید ژنراتور ۲ کاسته می‌شود. در وضعیت باقی ژنراتورها هیچگونه تغییری ایجاد نمی‌شود.

در خصوص خطوط ارتباطی شبکه، همانگونه که از شکل ۳-۱۱ دیده می‌شود به ازای توان عبوری ۹۹ مگاوات، حد انتقالی خطوط و به عبارتی شیب خطوط شکل ۳-۱۱، تغییر نموده است ولی این تغییر تا عبور ۳۹۸ مگاوات توان عبوری از شبکه مورد مطالعه حفظ می‌شود. لذا بررسی وضعیت شارش توان در خطوط در این بازه و بازه بعد به عهده خوانندگان محترم محول می‌گردد.

در این بازه از تغییرات به ازای افزایش توان عبوری از ۱۵۴ به ۱۵۵ مگاوات دیده می‌شود که قیمت در باس ۶ کاهش یافته است. در تغییر توان عبوری از ۳ به ۴ مگاوات و روشن شدن ژنراتور ۶ دیده شد که قیمت باس ۶ از $16.31/MWh به $20/MWh افزایش یافت و حال بدیهی است که به لحاظ خاموش شدن ژنراتور ۶ با کاهش قیمت مواجه شویم. باس‌های ۱ و ۵ نیز به لحاظ ارتباط با باس ۶، تقریباً با همان نسبت تفاضل، کاهش قیمت می‌یابند.

قیمت باس ۳ برای روشن ماندن ژنراتور ۳ بدون تغییر در حد$25/MWh ثابت می‌ماند و از آن سو قیمت باس ۲ برای تحقق کاهش بار L_2 بدون تغییر در حد $30/MWh ثابت می‌ماند.

در قسمت اول ورود توان عبوری بطور پیوسته ادامه دارد و هیچگونه تغییری نیز رخ نداده است که باعث تغییر قیمت شود، ولی بجهت آنکه به ازای توان عبوری ۱۵۴مگاوات، حد انتقال توان خطوط ۴-۱ و ۴-۵ به ترتیب به ۸۰/۱۳٪ و ۸۳/۸۶٪ رسیده است و به عبارتی قسمت‌های اول و دوم تا حدی مرتبط شده‌اند. لذا کاهش قیمت در باس‌های قسمت اول را می‌توان تأثیر خاموش شدن ژنراتور ۶ در قسمت دوم دانست.

مصرف‌کنندگان بارهای TL_3، TL_4، TL_6 و TL_8 بطور کامل توان درخواستی خود را دریافت می‌کنند و کاهش در بار L_2 نیز همچنان ادامه دارد.

بازه ۶: تغییرات توان عبوری از منطقهٔ مورد مطالعه از ۳۳۸ تا ۳۹۸ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

به ازای این بازه از تغییرات، حد انتقال خطوط ۴-۱ و ۵-۴ به ترتیب به ۵۷/۸۴٪ و ۶۱/۲-٪ رسیده است که این وضعیت به معنای تلفیق دو قسمت اول و دوم می‌باشد. با مراجعه به جدول ۴-۱، دیده می‌شود که به غیر از خطوط ۲-۱ و ۳-۲ در هیچ خط دیگری تراکم ظرفیت انتقال وجود ندارد و به عبارتی به غیر از باس ۲، سایر باس‌ها قادر به تبادل توان با یکدیگر می‌باشند. با این حال از شکل ۳-۱۰ دیده می‌شود که بعد از خاموش شدن ژنراتور ۲، ژنراتور ۱ شروع به کاهش تولید نموده است. شاید این سؤال مطرح شود که با وجود وضعیت حاکم بر ظرفیت خطوط (غیر متراکم)، دلیل کاهش تولید ژنراتور ۱ با قیمت $14/MWh و روشن ماندن ژنراتور ۷ با $20/MWh و ژنراتور ۳ با قیمت $25/MWh چیست؟ با کمی توجه به ساختار شبکه دیده می‌شود که با کاهش یکسان تولید، در دو سمت خطوط ۲-۱ و ۳-۲ کمترین حد اشغال ظرفیت خطوط رخ می‌دهد. بطور خلاصه اپراتور مستقل سیستم با هدف حفظ هر چه بیشتر پایداری شبکه با آزادسازی هر چه بیشتر ظرفیت خطوط و لحاظ نمودن رآکتانس‌های خطوط، دستور به کاهش تولید ژنراتور ۱ داده است.

تولید ژنراتور ۳ نیز همچون دو بازهٔ قبل کاهش می‌یابد و حد تولید سایر ژنراتورها اعم از روشن و خاموش بدون تغییر باقی می‌مانند.

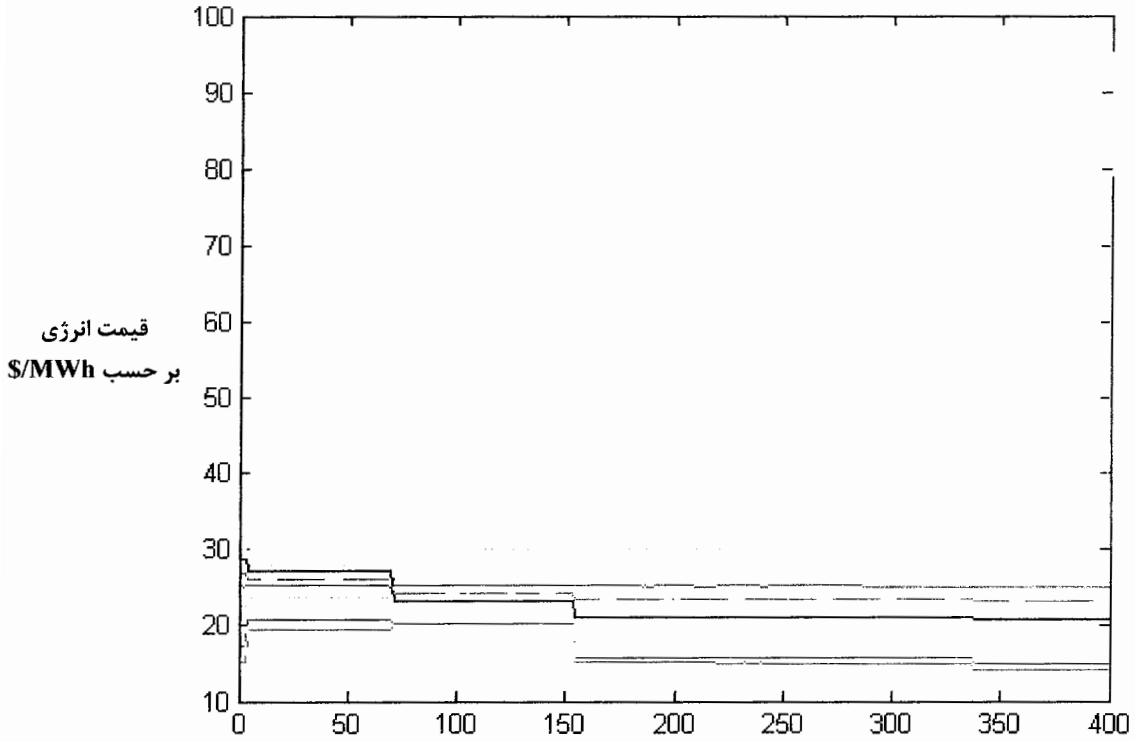
در این بازه از تغییرات به ازای خاموش شدن ژنراتور ۲ با قیمت $15/MWh و تولید ژنراتور ۱ با قیمت $14/MWh، قیمت حاشیه‌ای محلی باس ۱ نیز از $15/MWh به $14/MWh کاهش یافت. سایر باس‌های شبکه بخصوص باس‌های مرتبط با باس ۱ از این کاهش قیمت تأثیر می‌پذیرند و با توجه به ورود ۳۹۹ مگاوات توان با قیمت $0/MWh از خط TL_4 به شبکه مورد مطالعه، کاهش قیمت در باس‌ها توجیه می‌شود.

در این بازه از تغییرات توان عبوری همچون دو بازهٔ قبل، مصرف‌کنندگان بارهای TL_3، TL_4، TL_6 و TL_8 بطور کامل توان درخواستی خود را دریافت می‌کنند و کاهش بار L_2 نیز همچنان ادامه می‌یابد.

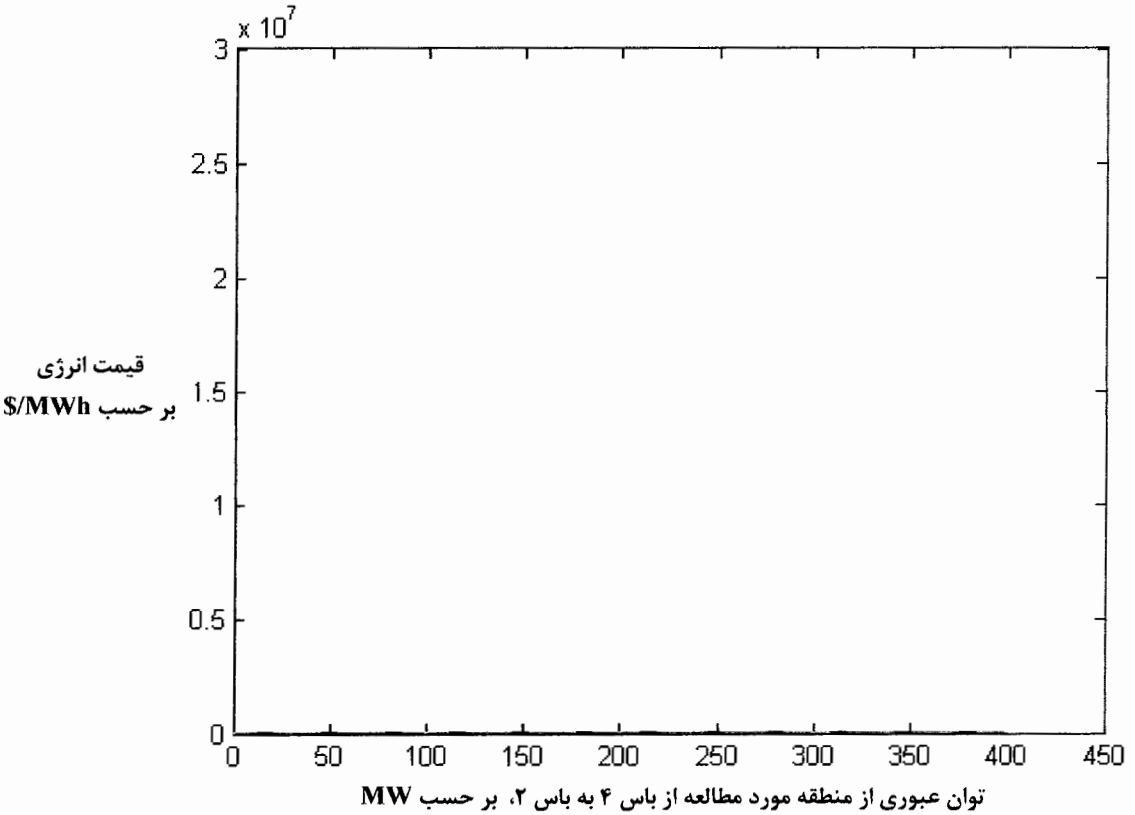
به ازای افزایش توان عبوری از ۳۹۹ به ۴۰۰ مگاوات، بدلیل آنکه مقدار توان تولیدی ژنراتورها، مقدار توان گذرنده از خطوط و مقدار توان مصرفی بارها جزء پارامترهای ادوات مکانیکی لخت به شمار می‌آیند لذا

تغییرات آنی در آنها رخ نمی‌دهد و در نتیجه به ازای افزایش توان عبوری از ۳۹۹ به ۴۰۰ مگاوات هیچگونه تغییر خاصی در نمودارهای ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۳ دیده نمی‌شود، که با این وجود نیازی هم به ارائه آنها نمی‌باشد. اما قیمت باس‌ها بدلیل آنکه پارامتری تئوری می‌باشد قادر است به ازای تغییرات جزئی یک پارامتر، تغییرات شگرفی را از خود نشان دهد که در شکل ۳-۱۵ دیده می‌شود.

همانگونه که در شکل ۳-۱۶ دیده می‌شود شبکه به ازای انتقال ۴۰۱ مگاوات توان عبوری ناپایدار می‌گردد.



شکل ۳-۱۵ نمودار تغییرات قیمت در باسها، به ازای تغییرات توان عبوری از صفر تا ۴۰۰ مگاوات از باس ۴ به باس ۲



شکل ۳-۱۶ نمودار تغییرات قیمت در باسها، به ازای تغییرات توان عبوری از صفر تا ۴۰۱ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۴-۱- نتیجه‌گیری

در انتهای بررسی شبکه ۸ باسهٔ مورد مطالعه، بر آن شدیم که تمام اطلاعات مربوط به توان انتقالی خطوط را بطور خلاصه در جداول ۴-۱ و ۴-۲ وارد نماییم و به بررسی آنها به پردازیم.

در جداول ۴-۱ و ۴-۲ اگر حد انتقال توان خطی بین ۹۰ الی ۱۰۰ درصد باشد توسط رنگ زرد و اگر حد انتقال توان خطی بین ۸۵ الی ۹۰ درصد باشد توسط رنگ آبی مشخص می‌شود.

با این توضیحات از جدول ۴-۱ دیده می‌شود که خط ۴-۱ در تمام بازه‌ها متراکم است و همچنین دیده می‌شود که به ازای افزایش توان عبوری به تراکم خطوط شبکه نیز افزوده می‌گردد. با این اوصاف نظر بر آن است که به ازای توان عبوری از باس ۲ به باس ۴، مقدار توان عبوری از حد ۲۵۰ مگاوات تجاوز ننماید.

از شکل ۴-۲ دیده می‌شود که حتی به ازای افزایش توان عبوری از صفر به ۷۰ مگاوات نیز، به تراکم خطوط اضافه می‌شود و خط ۲-۱ نیز به بیشینه حد انتقال توان خود می‌رسد. هر چند به نظر آید که به ازای ۱۵۴ الی ۳۳۸ مگاوات توان عبوری، مجدداً از تراکم خطوط کاسته می‌شود، اما به یاد داشته باشیم که در این شبکه به ازای افزایش توان عبوری به بیش از ۱۰۰ مگاوات بار L_2 در باس ۲ با کاهش تأمین مواجه می‌شود. با این شرایط نظر بر آن است که مقدار توان عبوری آن هم به ازای تعهد یا شرایط اضطراری، به بیش از ۵۰ مگاوات افزایش نیابد.

در این بخش سعی شد که با جمع‌بندی مطالب، هدف پایان نامه هر چه شفاف‌تر نشان داده شود. در قالب یک جمله می‌توان بیان داشت که؛ سعی بر آن است که بهره‌بردار مستقل سیستم با بهره‌گیری از جداولی مشابه ۴-۱ و ۴-۲، بصورت بهینه از شبکهٔ تحت کنترل خود بهره‌برداری نماید.

خط ۷ ۸ ظرفیت: ۳۴۰		خط ۴-۷ ظرفیت: ۲۵۰	خط ۵ ۴ ظرفیت: ۲۰۰	خط ۸-۳ ظرفیت: ۲۴۰	خط ۴ ۳ ظرفیت: ۲۳۰		خط ۶-۱ ظرفیت: ۲۵۰	خط ۴-۱ ظرفیت: ۱۴۰	خط ۲-۱ ظرفیت: ۲۸۰	توان عبوری برحسب MW
٪۴۹/۹۴		٪-۱۲/۰۸	٪-۹۵/۵۶	٪۲۳/۴۱	٪ ۲۶/۶۶		٪۳۰/۸۱	٪۱۰۰	٪۸۰/۷۱	۰
٪۳۶/۲۴		٪-۳۰/۷۱	٪-۹۵/۵۶	٪۵۲/۸۳	٪۱۰/۴۸		٪۳۰/۸۱	٪۱۰۰	٪۴۶/۰۴	۱۳۲
٪۴۴/۷۳		٪-۱۹/۱۶	٪-۹۵/۵۶	٪۴۰/۷۹	٪-۱۲/۵۲		٪۳۰/۸۱	٪۱۰۰	٪۴۶/۰۴	۲۹۱
٪۲۷/۹۴		٪-۴۲	٪-۹۵/۵۶	٪۶۴/۵۸	٪۳۳/۴۹		٪۳۰/۸۱	٪۱۰۰	٪۶/۵۴	۴۰۱
٪۱۶/۶۹		٪-۵۷/۳۱	٪-۸۹/۴۲	٪۸۰/۵۳	٪۶۳/۴۸		٪۳۴/۰۹	٪۱۰۰	٪-۱۶/۴۳	۴۶۶
٪۳/۲۷		٪-۷۵/۴۲	٪-۸۱/۵۶	٪۹۹/۲۴	٪۹۹/۵۷		٪۳۸/۲۸	٪۱۰۰	٪-۴۶/۰۷	۵۴۹

جدول ۴-۱: خلاصه‌ای از تغییرات توان انتقالی خطوط به ازای تغییرات توان عبوری از صفر الی ۵۴۹ مگاوات از باس ۲ به باس ۴

خط ۷ ۸ ظرفیت: ۳۴۰		خط ۴-۷ ظرفیت: ۲۵۰	خط ۵-۴ ظرفیت: ۲۰۰	خط ۸-۳ ظرفیت: ۲۴۰	خط ۴ ۳ ظرفیت: ۲۳۰		خط ۶-۱ ظرفیت: ۲۵۰	خط ۴-۱ ظرفیت: ۱۴۰	خط ۳-۱ ظرفیت: ۲۸۰	توان عبوری برحسب MW
		٪-۱۱/۹۴		٪۲۲/۲۷	٪-۲۶/۹۴		٪۳۰/۸۱	٪۱۰۰	٪۸۰/۹۸	۰
		٪-۱/۵۰		٪۲۲/۲۹	٪-۴۷/۷۲		٪۱۹/۵۶	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۷۰
		٪-۰/۹۸		٪۲۱/۷۶	٪-۴۸/۵۹		٪۲۳/۹۸	٪۹۱/۲۶	٪۱۰۰	۹۹
		٪۲/۴۳		٪۱۸/۳۰	٪-۵۵/۵۷		٪۲۹/۶۳	٪۸۰/۱۲	٪۱۰۰	۱۵۴
		٪۱۴/۲۹		٪۵/۵۹	٪-۷۹/۲۰		٪۲۷/۳۳	٪۴۱/۲۱	٪۱۰۰	۳۳۸
		٪۱۸/۱۶		٪۱/۹۲	٪-۸۶/۹۰		٪۲۶/۵۷	٪۲۸/۶۶	٪۱۰۰	۳۹۹

جدول ۴-۲: خلاصه‌ای از تغییرات توان انتقالی خطوط به ازای تغییرات توان عبوری از صفر الی ۳۹۹ مگاوات از باس ۴ به باس ۲

۴-۲- پیشنهادات:

- برای ادامه کار بسیار جالب خواهد بود که شبکه‌هایی با چندین ورودی و چندین خروجی[۱۵] (شبکه مورد مطالعه پایان‌نامه دارای قرارداد ترانزیت باس به باس بوده است) و با لحاظ نمودن تلفات و قابلیت اطمینان شبکه بررسی گردد.
- استفاده از اطلاعات واقعی شبکه‌ها و بررسی شبکه به منظور آگاهی از اندیشهٔ بهره‌بردار شبکه و کسب تجربه‌های عملی.

مراجع

۱- آقـای دکتـر مجـید علومـی بایگـی - پایان نامه دکتری دانشگاه فردوسی مشهد – توسعهٔ بازارهای محوری شبکه‌های انتقال قدرت – بهمن ماه ۱۳۸۳.

2. M. I. Alo Moush, Auctionable Fixed Transmission - Ph. D. Thesis, Illinois Iustitute of Technology - May 2000.

3. PJM and FTR Refresher Course - March 1999.

۴- فـرد سـی شـوپی، مایکـل سی کارامانیس، ریچارد دی تابورز، راجرای بوهن، قیمت‌گذاری لحظه‌ای برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ اول، ۱۳۸۳.

5. F. C. Schweppe, "Marginal Cost Pricing for Mandatory Wheeling", unpublished manuscrip, 1988.

6. M. C. Caramanis, N. Roukos, and F. C. Schweppe, "A Tool for Evaluation the Marginal Cost of Wheeling".

7. Bazaraa. M. S., J. J. Jarvis and H. D. Shervali, "Linear Programming and Network Flows", John Wiley and Sons, Second Edition, 1990.

۸- دکتـر عـادل آذر – تحقیق در عملیات و مفاهیم کاربردهای برنامه‌ریزی خطی – مؤسسه نشر علوم نوین – چاپ سوم – بهار ۱۳۸۳.

۹- اصغرپور، محمد جواد، برنامه ریزی خطی، چاپ دوم، دانشگاه الزهراء، ۱۳۶۳.

۱۰-هیلیر، فردریک س. و جرالد ج. لیبرمن، تحقیق در عملیات – برنامه ریزی خطی، جلد اول، ترجمه محمد مدرس اردوآن آصف وزیری، نشر تندر، چاپ پنجم، ۱۳۷۱.

۱۱- پرفسور آلن. ج. وود، پرفسور بوریس. اف. ولن برگ – تولید، بهره‌برداری و کنترل.

12. Ward, J. B., Hale, H. W., "Digital Computer Solution of Power-Flow Problems", AIEE Transactions, Part III Power Apparatus and Systems, Vol. 75, June 1956, pp 398 - 404.

13. Van Ness, J. E., "Iteration Methods for Digital Load Flow Studies", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 78, August 1959, pp 583 - 588.

14. Happ, H.H. "Cost of Wheeling Methodologies, "IEEE transactions on Power System, Vol. 9, No. 1, pp.147-156, February 1994.

15. Nakashima, T.N., Okada, K., Yokoyama,R. and Okada, N, "Multiple Impact Assessment of Wheeling and Independent Power Producers in a De-Regulated Power System", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, pp.89-92, 1998.

16. Alomoush, M.I. and Shahidehpour, S.M., "Impact of Wheeling Transactions on Zonal Congestion with FTR", Proceedings of the 1999 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Nova Scotia, Canada, June 1999, pp.231-236.

17. Matthew C. Hoffman, The Future Of Electricity Provisions.

18. Houston, Douglas in "User-Ownership of Electric Transmission Grids: Toward Resolving the Access issue," Regulation, Winter 1992.

19. Richard Green, "Electricity Transmission Pricing: How much does it cost to get it wrong? ", University of Hull Business School, September 2004.

20. Tovar-Hernandez H. Member IEEE, Gutierrez-Alcaraz G. Member IEEE, Moreno-Goytia E., Member, IEEE, "Transmission Allocation Cost Methodologies: Experiences in Latin".

21. Taiyou Yong, Student Member, IEEE, Robert Lasseter, Fellow, IEEE, "Optimal Power Flow Formulation in Market of Retail Wheeling", University of Wisconsin at Madison, Madison, Wisconsin, USA.