دانشکدهٔ برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

پخش بار بهینه در بازار های رقابتی برق با در نظر گرفتن مدل سازی کامل انتقال و رفتار مصرف کنندگان

Optimal power flow in competitive electricity markets associated with full transmission Modelling and consumers behaviours

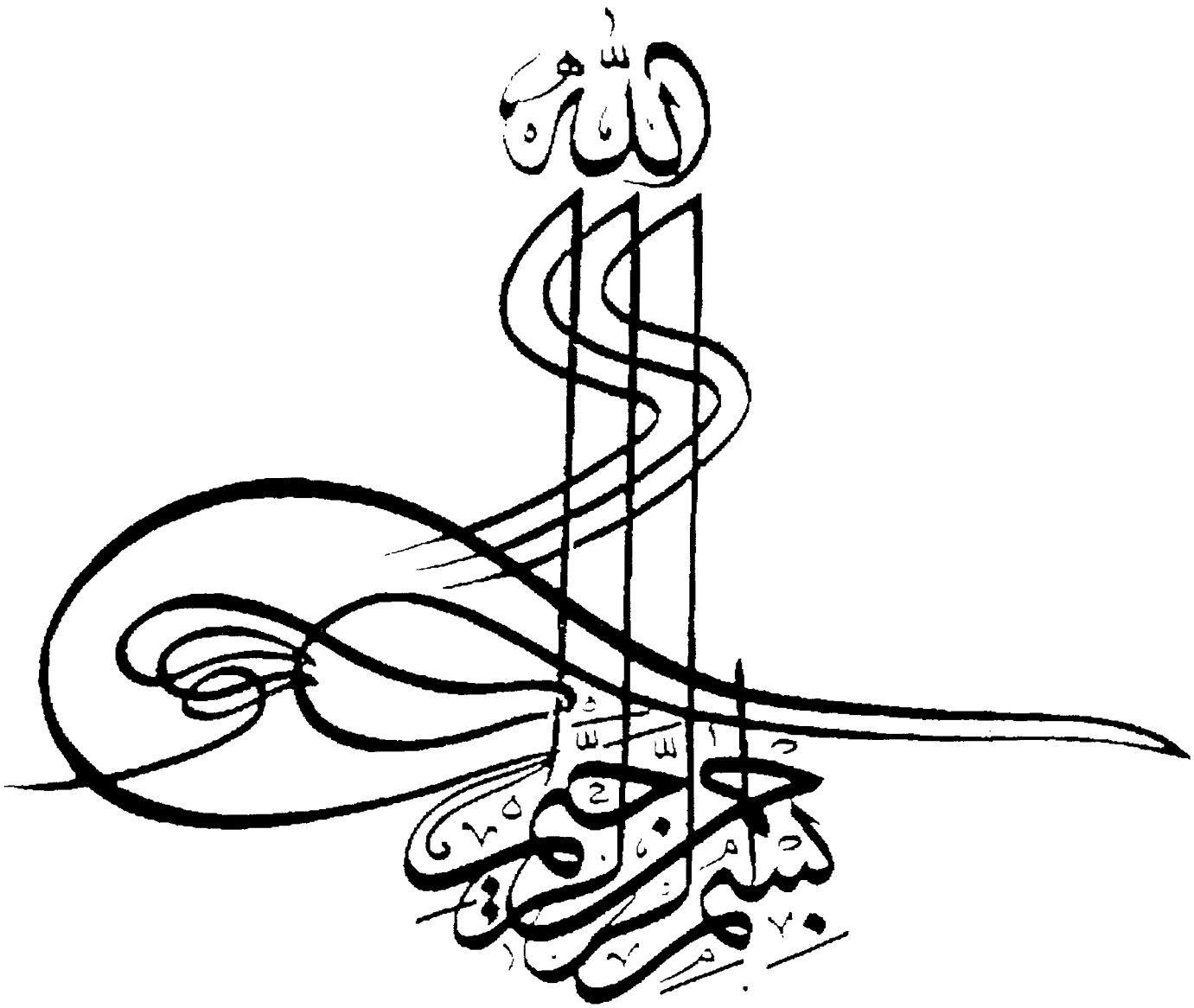
اساتید راهنما:

دکتر علیرضا صداقتی

دانشجو :

افشین کادری

دی ۱۳۸۳


الله
بسم الله الرحمن الرحيم

تشکر و قدردانی

خداوند را شاکرم که بر بنده حقیر منت نهاد تا اینکه بتوانم این دوره را با موفقیت بپایان برسانم. در اینجا فرصت را غنیمت شمرده تا از آقای دکتر صداقتی که در انجام این پایان نامه مرا یاری نمودند، سپاسگزاری نموده و موفقیت ایشان را در کلیه امور زندگی آرزومندم.

به امید رونق تجدید ساختار برق
در کشور عزیزمان
افشین کادری

تقدیم به:

پدر و مادرم، که هرچه دارم بعد از خداوند مدیون این دو عزیز می‌باشم.

فهرست مطالب

چکیده

فصل اول ــ ساختارهای بازار برق..... ۱

مقدمه..... ۱

۱-۱ ساختارهای بازار برق..... ۲

۱-۲ تاریخ صنعت برق در ایالات متحده..... ۶

۱-۳ تاریخچه صنعت برق تغییر شکل داده شده در سراسر دنیا..... ۸

۱-۳-۱ انگلستان..... ۸

۱-۳-۲ آمریکای جنوبی..... ۱۰

۱-۳-۳ استرالیا..... ۱۰

۱-۴ نیاز به ابزار شبیه سازی..... ۱۱

۱-۵ کلیات..... ۱۳

۱-۵-۱ مدل بازار لحظه‌ای..... ۱۳

۱-۵-۲ ماکزیمم کردن رفاه فردی در یک بازار لحظه‌ای..... ۱۵

فصل دوم ــ مدل پیشنهاد دادن در بازار برق پول..... ۱۶

۲-۱ ساختار بازار برق پول..... ۱۶

۲-۲ پخش بار بهینه..... ۱۷

۲-۳ یک مدل بازار OPF..... ۱۸

۲-۴ نمونه‌های بازار..... ۲۰

۲-۴-۱ مدل یک بازار برای سیستم چهار تولید کننده بدون اتلاف..... ۲۰

۲-۴-۲ بررسی قدرت بازار در یک بازار با ۵۴ تولید کننده..... ۲۶

۲-۴-۳ اثر قیود انتقال روی مدل بازار..... ۳۰

فصل سوم ــ وارد کردن مدلهای مصرف کننده بداخل OPF..... ۳۳

۳-۱ حداکثر کردن رفاه اجتماعی با استفاده کردن از OPF..... ۳۴

فهرست اشکال

شکل ۱-۱- مدل بازار دو طرفه ۲

شکل ۱-۲- مدل مخبره آخرین پیشنهاد شده ۵

شکل ۲-۱- فلوی اطلاعات پول برق ۱۸

شکل ۲-۲- پیشنهادات تولید وابسته به قیمت گذاری خطی ۱۹

شکل ۲-۳- سیستم ۶ باسه با ۴ ژنراتور ۲۰

شکل ۲-۴- پیشنهاد k برابر بزرگتر از هزینه نهایی ۲۲

شکل ۲-۵- مورد ۱۱۸ باسه IEEE ۲۶

شکل ۲-۶- سیستم ۶ باسه با محدودیت ۱۰۰MVA روی هر خط ۳۰

شکل ۲-۷- حل OPF ۶- باسه با قیود اعمال شده روی هر خط ۳۱

شکل ۳-۱- سود مصرف کننده و مشق سود ۳۹

شکل ۳-۲- تقاضا مصرف کنده برای توان اکتیو ۴۰

شکل ۳-۳- از یک هزینه درجه دو تا یک منحنی تولید خط ۴۱

شکل ۳-۴- $k(x)$ همگرا ۴۲

شکل ۳-۵- یک مدل بار با کنترل راکتیو ۴۳

شکل ۴-۱- تغییر پیشنهاد برای عرضه و تقاضا ۵۱

شکل ۴-۲- تغییر نابرابر اجباری در یک بعد ۵۷

شکل ۴-۳- سیستم ۲- باسه ـ دو تولید کننده و یک مصرف کننده ۶۲

شکل ۴-۴- پیشرفت دو تولید کننده با هیچ محدودیت ۶۳

شکل ۴-۵- پاسخهای بهینه تولید کنندگان..... ۶۳
شکل ۴-۶- پیشرفت پیشنهادی دو تولید کننده با محدودیت ۸۰MVA..... ۶۴
شکل ۴-۷- پاسخهای بهینه دو تولید کننده با محدودیت ۸۰MVA..... ۶۵
شکل ۴-۸- سود تولید کننده ۲ برحسب پیشنهادات..... ۶۵
شکل ۴-۹- پیشنهادات بهینه برای تولید کننده ۱ در پاسخ به الگوریتم ترکیبی تولید کننده ۲..... ۶۷
شکل ۴-۱۰- پیشرفت پیشهاد تولید کننده و مصرف کننده بدون محدودیت..... ۶۸
شکل ۴-۱۱- پاسخهای بهینه تولید کننده و مصرف کننده بدون محدودیت..... ۶۹
شکل ۴-۱۲- پیشرفت پیشنهاد کننده و مصرف کننده با محدودیت ۸۰MVA..... ۷۰
شکل ۴-۱۳- پاسخهای بهینه تولید کننده و مصرف کننده بهینه با محدودیت ۸۰MVA ۷۱
شکل ۴-۱۴- سود تولید کننده و مازاد مصرف کننده در طول تعادل پیوسته..... ۷۳
شکل ۴-۱۵- منحنی‌های بهینه برای چندین شیب..... ۷۵
شکل ۴-۱۶- بازار برق ۹- باسه..... ۷۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱- سود هر تولید کننده در بازار چهار تولید کننده..... ۲۳

جدول ۲-۲- اثر پیشنهاد تولید کننده در افزایش قیمت پول..... ۲۵

جدول ۲-۳- منحنی‌های هزینه درست و منحنی‌های پیشنهادی نهایی درست..... ۲۷

جدول ۲-۴- سود تولید کنندگان در ۱۱۸ باسه و ۵۴ تولید کننده..... ۲۷

جدول ۲-۵- سود تولید کنندگان در باسهای ۶۹-۸۹ زمانیکه پیشنهاداتشان واحد است ۲۹

جدول ۲-۶- تغییرات در مخابره و سودها بخاطر قیود خط..... ۳۲

جدول ۴-۱- تغییر راه حل بازار مربوط به تعادل پیوسته..... ۷۲

جدول ۴-۲- ضرایب معادله سود و هزینه..... ۷۷

جدول ۴-۳- نتایج اقتصادی وقتی تمام پیشنهادات با هزینه نهایی درست..... ۷۸

جدول ۴-۴- نتایج الگوریتم تعادل زمانیکه تولید کنندگان ۷و۸ قیمتهایشان را افزایش می‌دهند..... ۷۹

جدول ۴-۵- نتایج نقطه تعادل وقتی تولید کنندگان ۷ و ۸ سعی به اضافه بار کردن یک خط دارند..... ۸۰

چکیده

ایـن پایـان نامه یک الگوریتم را بررسی می‌کند که به شرکت کننده در بازار اجازه می‌دهد با یک پخش بار بهینه سود هر فرد را در بازار برق لحظه‌ای ماکزیمم کند. استفاده از این قبیل الگوریتم در تعیین کردن نقاط تعادل بازاربه کار می‌رود.

در ایـن الگوریـتم یک مدل بازار لحظه‌ای وجود دارد که پخش بار بهینه (OPF) در آن استفاده مـی‌شـود که از یک مدل کامل سیستم انتقال استفاده می‌کند. OPF برای عملکرد مدل مصرف کننده بسط داده می‌شود و یک توجیه ریاضی برای شامل شدن مدل مصرف کننده بداخل OPF نشـان داده مـی‌شـود. ایـن الگوریـتم حساسـیتهای مخابـره و قیمـت را در نظر می‌گیرد و نقطه ماکزیمم محلی را نشان می دهد.

بـا فـرض کـردن ایـنکه در این بازار تمام شرکت کنندگان سود فردیشان را ماکزیمم کنند نقاط تـوازن اقتصـادی، بررسی می‌شوند. این عمل با حل کردن تکرارپذیری الگوریتم ماکزیمم سازی فـردی بـرای هر شرکت کننده انجام می‌شود تا تمام شرکت کنندگان با اصلاح پیشنهاداتشان به یـک نقطه برسند و با توجه به این الگوریتم نشان داده می‌شود که این نقطه تعادل همیشه یگانه نمی‌باشد.

فصل اول

ساختارهای بازار برق

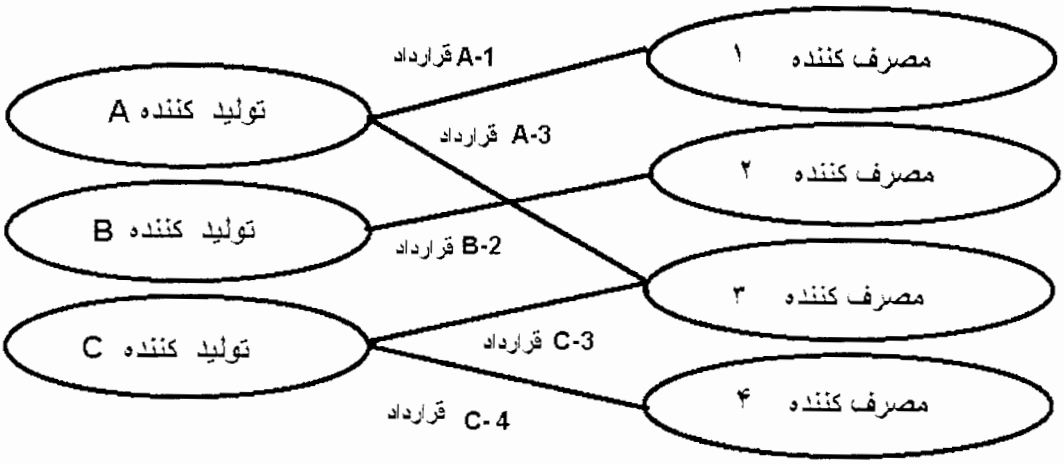
ساختارهای بازار برق

مقدمه

بازارهـای برق سراسر دنیا به افزایش نیروهای رقابتی تمایل دارند و هدف اصلی از گسترش رقابت در ایـن بازارهـا ، کـارآمد سـاختن بیشـتر در عملکـرد مـی‌باشـد. آن یـک مفهـوم کلی از ایدئولوژی سـرمایه‌گـذاری اسـت بـر اینکه ساختار بازار به صورت منصفانه و مناسب بوجود آورده شوند بطوریکه تمـام شـرکت کنـندگان در بازار، برای ماکزیمم کردن رفاه فردی خودشان انگیزه داشته باشند. در این روش بـازار طـوری رفـتار مـی‌کند که رفاه را برای هر شخص ماکزیمم کند. برای اینکه به این هدف برسـیم، صـنعت برق به الگوریتمهای جدید برای کمک به شرکت کنندگان بازار برای اینکه طبق یک روش مناسـب رفتار کنند نیاز دارد. این الگوریتمها موارد اقتصادی مربوط به بازار برق را مدل می‌کنند. در ایـنجا یـک الگوریتم جدید بررسی می‌گردد، برای اینکه شرکت کننده بازار رفاه فردیش را با درنظر گرفتـن مـدل کامل سیستم انتقال در داخل محاسبات ماکزیمم سازد. قبل از شروع بحث، ساختار بازار برق و تاریخچه صنعت برق برای تمایل به تجدید ساختار را شرح می‌دهیم.

۱-۱ ساختارهای بازار برق

در بیشتر صنایع، ساختار بازار رقابتی موجب می‌شود که تولید کنندگان بطور مستقیم به مصرف کنندگان مطابق شکل ۱-۱ دسترسی پیدا کنند.



شکل ۱-۱ مدل بازار دوطرفه

بعنوان مثال کالای خدماتی ـ تلفن راه دور، در این صنعت، تولید کنندگان از قبیل،MCI ، Sprint AT&T کالاهایشان را مستقیماً به مصرف کننده خرده فروش می‌فروشند.

تولید کننده و مصرف کننده به صورت دو طرفه با یکدیگر قرارداد می‌بندند به طوریکه، تولید کننده موظف به فراهم کردن خدمات تلفن راه دور می‌شود و مصرف کننده نیز موظف به یک برنامه پرداخت هزینه برای این سرویس می‌شود. مزایای این مدل بازار قرارداد دو طرفه این است که هیچ شرطی روی ساختار قرارداد، قرار داده نمی‌شود. این عمل، انعطاف پذیری را به همراه دارد و به تمام شرکت کنندگان در بازار این فرصت را می‌دهد که فرصت پیدا کردن نوع دقیق سرویس که مطلوب آنها هستند و در قیمتی که آنها می‌خواهند، داشته باشند.

با توجه به این که این مدل برای بیشتر بازارها، اختصاص داده می‌شود بازار برق دارای دو مشخصه بارز است که مشکلاتی را در این نوع مدل بازار ارائه می‌دهد: ۱ـ ناتوانی در ذخیره کردن انرژی الکتریکی برق بطور عملی ۲ـ توزیع بین مصرف کنندگان، ضرورتاً غیرقابل کنترل بودن، شبکه انتقال. ناتوانی در ذخیره کردن انرژی الکتریکی در عمل می‌تواند نتیجه در ناپایداری قیمت بخاطر کمبودها در طول دوره‌های پیک تقاضا داشته باشد. بازارهای با این نوع ناپایداری در قیمت‌گذاری مشکلاتی را در رسیدن به حالت تعادل ایجاد خواهد کرد. [۱]

اگرچه شبکه بازار برق مشخص است، اما فلوهای شبکه غیرقابل کنترل هستند. در شبکه‌های تلفن، فلوی اطلاعات از طریق نرم‌افزار کامپیوتر قابل کنترل است که روتینگ تلفن را انجام می‌دهد. روترها دقیقاً مسیر فیزیکی مکالمه تلفن را تعیین می‌کنند که اپراتور سیستم را به کنترل دقیق فلوی شبکه قادر می‌سازد. اما در بازار برق هیچ کنترلر دقیقی وجود ندارد. [۲]

بدلیل اینکه فلوهای شبکه قابل کنترل نمی‌باشند. عملکرد یک بازیگر در بازار مستقیماً روی تواناییهای بازیگران دیگر برای شرکت در بازار اثر می‌گذارد. اما در بازار تلفن راه دور این عمل دیده نمی‌شود. اگر AT&A خدماتی را به همسایه شما بفروشد، این باعث نمی‌شود که شرکت MCI از فروختن خدمات به شما امتناع بورزد. [۳] به همراه صنعت برق خدمات کمکی فراوانی وجود دارند که باید تولید شوند و محدودیتهایی که برای تحویل محصول برای سیستم انتقال برق وجود دارند. یکی از این مثالها مطمئن ساختن از اینکه محدودیتهای خط انتقال در تمام زمانها وفق داده می‌شوند. [۳]

در سیستمهایی که با تراکم انتقال مواجه می‌شوند، عملکرد بازیگران مستقیماً تأثیر می‌گذارد. برای اینکه تعیین شود چه کسی می‌تواند برق را به بازار محلی برساند. این امر باعث می‌شود که شرایطی را به صورت بالقوه برای مشارکت چندین ژنراتور و بار بوجود آورد که این امر رقابت را در یک منطقه

محلـی از سیسـتم محـدود خواهد کرد. در مجموع، عملکردهای فردی یک بازیگر روی تلفات سیستم انـتقال تأثـیر مـی‌گذارد و محاسبه تلفات بخاطر ماهیت غیرخطی سیستم می‌تواند خیلی مشکل باشد. بخاطـر ایـن مشخصـات، ایجاد ساختارهای جدید بازار در صنعت برق سراسر جهان بصورت پول برق ترجیح داده شده است.

در ایـن مدل بازار، یک اپراتور پول پیشنهادات تولید کنندگان و مصرف کنندگان را می‌گیرد و تولید و مقدار بار را با استفاده از یک روش اقتصادی برمبنای پیشنهادات مخابره می‌کند. این روش اقتصادی بطـور کوتـاه شرح داده می‌شوند. تولید کنندگان و مصرف کنندگان در این روش مستقیماً وارد قرارداد نمـی‌شـوند بلکـه اپـراتور پول بین تولید کنندگان و مصرف کنندگان واسطه قرار می‌گیرد. مزایای این ترتیـب ایـن اسـت کـه اپـراتور پول می‌تواند از داخل، مسائل مدیریت تراکم، تخصیص تلفات و دیگر خدمـات فرعـی را بررسـی کـند. اپـراتور پـول، در ایـن مـدل در پـیدایش اقتصادی، پذیرش و تعیین پیشنهادات، بخوبی پیدایش سیستم مهندسی نگهداری سیستم انتقال، مسئول می‌باشد. [۴]

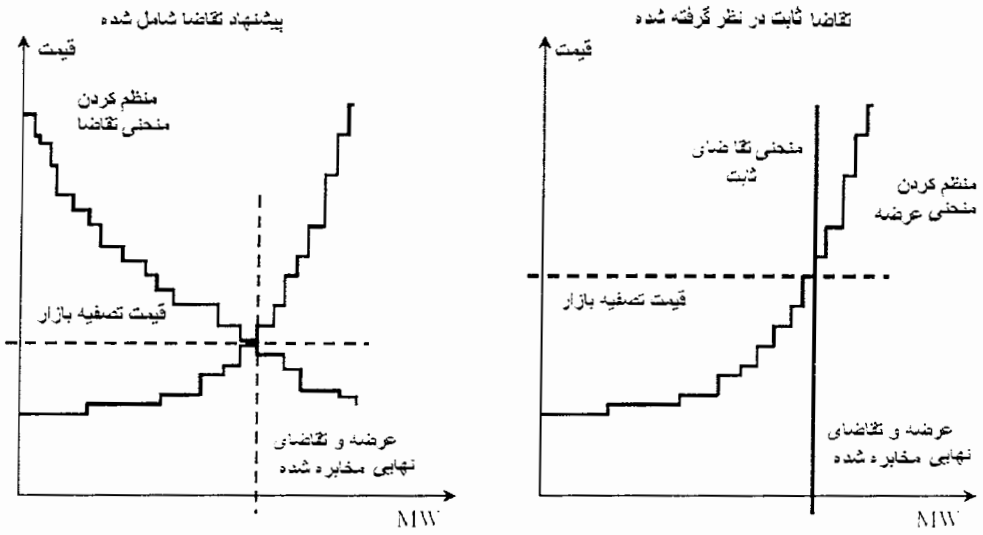
در تعـدادی از بازارهـا از قبـیل کالیفرنـیا، ایـن دو وظیفه برای سازمانهای جداگانه تعیین می‌شوند. سـازمان اقتصـادی، پـول بـرق یا تبادل برق (PX) نامیده می‌شود و سازمان مهندسی، اپراتور مستقل سیسـتم (ISO) نامـیده می‌شود. روشهایی که برای مخابره بار و تولید استفاده شده‌اند برمبنای یکی از دو روش زیر می‌باشند:

تئوری آخرین پیشنهاد پذیرفته شده و قیمت‌گذاری لحظه‌ای.

در روش آخریـن پیشـنهاد پذیرفـته شده، شرکت کنندگان بازار بلوکهایی از تولید و بار را به همراه قیمتهایشـان ارائـه مـی‌دهـند، تمـام پیشنهادات تولید جمع‌آوری می‌شوند و برحسب قیمتها به صورت نزولـی مرتب می‌شوند تا منحنی تقاضا بوجود آیند. سپس منحنیها در خلاف یکدیگر رسم می‌گردند تا

اینکه به نقطه‌ای می‌رسند که قیمت مشخص بازار نامیده می‌شود (MCP) تمام پیشنهادات سمت چپ این منطقه پذیرفته می‌شوند و به تمامی تولید کنندگان برطبق بلوکهایی از تولید که پیشنهاد داده بودند، MCP پرداخت می‌شود و تمام مصرف کنندگان باید MCP را برطبق بلوکهای تقاضا بپردازند. در شکل ۱-۲ نشان داده می‌شود.

به عنوان مثال، بازارهایی که از روشهای آخرین پیشنهاد پذیرفته شده استفاده کردند: انگلستان، ولز، نیوزلند و ایالت کالیفرنیا در ایالت متحده غرب می‌باشند.



شکل ۱-۲ مدل مخابره آخرین پیشنهاد شده

از روشهای دیگر که برای مخابره تولید و بار استفاده می‌شود، استفاده از تئوری قیمت‌گذاری لحظه‌ای می‌باشد. این روشی است که به طور کامل بررسی خواهد شد.

در این روش تولید کنندگان و مصرف کنندگان منحنی‌های پیشنهادیشان را به اپراتور پول ارائه می‌دهند و از یک روش بهینه سازی مشخص برای تعیین نتایج مخابره استفاده می‌کنند. به تولید کنندگان یک قیمت برطبق پشنهادشان پرداخت می‌شود و مصرف کنندگان یک قیمت برحسب

PURPA برای رسیدن به این اهداف یک کلاس جدید از تولید برق را بوجود آورد که نیروگاههای Qualifying , Facility نامیده می‌شدند.

Qf ها نیروگاههای تولید برق کوچک بودند که از منابع سوختی آلترناتیو از قبیل باد و خورشید و مواد زائد و ژئوترمال استفاده می‌کردند. تحت قانون PURPA شرکتهای برق مجبور به خرید برق از Qf ها شدند. PURPA تعرفه‌ها را برای این قبیل خرید تعیین می‌کند ۱-باید برای مصرف کنندگان برق از شرکت برق منطقی باشد و سود عمومی را شامل شود. ۲-نباید بین Qf ها یا تولید کنندگان برق کوچک جهت مصرف فرقی گذاشته شود.

Qf ها آغاز رقابت در ایالات متحده بودند. بطور مرسوم، شرکتهای برق بصورت عمودی ادغام شده و انحصاری بود. این شرکت، ژنراتورها را برای اینکه برق تولید کنند، و شبکه را برای انتقال برق به هر منطقه و هر مصرف کننده بوجود آورد و مستقیماً برای مصرف کننده صورت حساب صادر می‌کرد بطوریکه Qf ها یک تهدید برای طرف تولید این انحصارگرایی محسوب می‌شدند. تا اینکه در ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ دولت ایالات متحده شروع کرده به مقررات زدایی در خیلی صنایع شامل:

مخابرات (۱۹۶۹) ، راه و ترابری (۱۹۷۷)، هواپیمایی (۱۹۷۸) و گاز طبیعی (بعد از ۱۹۸۰) با این تغییر در سیاست دولت حرکت به سمت یک بازار رقابتی در صنعت برق آغاز شد. دسترسی به کانال توزیع محصول، نیاز داشت که آزاد گردد. اولین قدم به سمت این هدف ایجاد قوانین دیگر می‌باشد.

این عمل در ۱۹۹۶ به سفارش کمیته تنظیم انرژی فدرال (FERC) دنبال شد. FERC order 888 و FERC order 889 .

هـدف FERC ۸۸۸ توسـعه "رقابـت عمـده فروشـی از طـریق دسترسی آزاد و غیر تبعیض آمیز از خدمـات انـتقال بوسـیله شرکت‌های برق دولتی" دنبال شد. تا اینکه سه بازار در ایالات متحده بوجود آمد. کالیفرنیا، PJM و نیوانگلند. [۶]

۱-۳ تاریخچه صنعت برق تغییر شکل داده شده در سراسر دنیا:

نگـه‌داری انـرژی و خودکفایی انرژی از اهداف ایالات متحده بود، بطوریکه صنعت برق تغییر یافته در قسـمتهای دیگـر دنیا بطور وسیع دلایل متفاوت داشت. در خیلی از قسمتهای دنیا صنعت برق یک مالکیـت انحصـاری داشـت. مسـائل مـربوط بـه انحصـاری بـودن مالکیـت، یکی از انگیزه‌های تمام اصـلاحات در صـنعت بـرق تمـام کشورها بود. این مسائل نتیجه فقر خدمات برق از لحاظ کمبودهای مالی در سرمایه‌گذاری خواهد داشت.

۱-۳-۱ انگلستان

صـنعت بـرق انگلسـتان سـابقاً یـک صـنعت مالکیتـی بود. در ۱۹۷۴ ، خیلی از صنایع مهم سراسر انگلسـتان توسـط دولـت مالکیت داشت و تحت بهره‌برداری دولت بود، که صنعت برق هم یکی از آن صنایع بود. در ۱۹۵۷، کنترل دولت بوسیله هیئت مدیره مرکزی تولید برق[1] (CEGB) توسعه داده شد، کـه به دولت اختیار کنترل روی سیستم‌های تولید، انتقال و تصمیم‌گیری‌های مربوط به سرمایه‌گذاری را داد. چندیـن دهـه بعـد بدلیل نامؤثر بودن صنعت به عنوان یک بار سنگین برای دولت تلقی می‌شد. یکـی از مـثالهای مهـم در ناکـار آمد بودن سیاست دولت، تقویت صنعت زغال ملی بواسطه خریداری کـردن صـنعت بـرق ملـی از سال ۱۹۵۷ تا ۱۹۸۰ بود. در تمام این مدت، صنعت برق تحت فشار قرار

[1] Central Electricity Generation Board

گرفته بود و نیاز داشت به خرید زغال انگلستان اما در قیمتهای بالاتر از قیمتهای جهانی و شرکت‌های بـرق را مجـبور به پرداخت هزینه‌های بالا می‌کرد، این عمل قیمتهای برق را بصورت افراطی افزایش مـی‌داد و صـنعت زغـال انگلسـتان بـرای بـرپا مـاندن بـه صـنعت برق وابسته می‌شد. عاقبت بخاطر ناکارآمدیهـای شـبیه بـه ایـنها، بریتانـیا صـنایعی را که دولت مالک بود بررسی کرد. در ۱۹۷۹، تحت رهبری مارگارت تاچر، یک محافظه‌کار دولتی برای رهبری بریتانیا انتخاب شد و آغاز خصوصی سازی صنایع دولتی بودند. [۷]

در ایـن زمـان چندیـن کمپانـی تشکیل داده شدند. از قبیل: هوا و فضای انگلیس (۱۹۸۱)، کابل و بی‌سیم (۱۹۸۱)، ارتباطات انگلستان (۱۹۸۴)، خطوط هوایی (۱۹۸۷)، فولاد انگلستان (۱۹۸۸) و آخرین صنعت مهم برای مقررات زدایی شدن ، صنعت برق بود. تجدید ساختار کردن کامل، قانون‌گذاری برق در سـال ۱۹۸۹ صـورت گرفت و یک ساختار صنعتی جدید در طی این چند سال ایجاد شد. در سیستم انـتقال تجدیـد سـاختار شده، تمامی کمپانیها در شبکه انتقال برق مالکیت داشتند و یک کمپانی جدید تجـاری ـ ملـی بـنام کمپانـی شبکه ملی[1] (NGC) ، برای مدیریت این شبکه بوجود آمد. برای تولید، تولـید غیرهسته‌ای به دو کمپانی تخصیص داده شد، National Power ، Power Gen که به ٪۴۶ و ٪۲۸ از تولـید تقسـیم شـده انـد. و بـرای توزیـع، دوازده هیئـت اولـیه مـنطقه‌ای بـرای بوجود آوردن کمپانـیهای بـرق مـنطقه‌ای[2] (REC) ، خصوصی سازی شدند. سپس پول برق UK توسعه داده شد و کمپانی شبکه ملی به عنوان مجری اپراتور پول درنظر گرفته شد.

تولـید کنـندگان، پیشنهاداتشان را هر نیم ساعت واگذار می‌کنند و NGC با استفاده کردن از روش آخریـن پیشـنهاد پذیرفـته شـده تعییـن می‌کند. ساختار بازار جدید موفقیت‌آمیز بوده است اما مقداری

[1] National Grid Company
[2] Regional Electricity Company

دولـتهای ایالتـی مسـئول کنترل بهره‌برداری و طراحی بودند. دولت ملی تنها بصورت حاشیه‌ای در تنظـیم مقـررات بواسـطه نـیازهای قانونی از قبیل محدودیتهای مالی و مالکیت خارجی حضور داشت. بدلـیل ناکـارآمد بـودن صـنایع دولتـی در نتـیجه اسـترالیا نیم نگاهی به تجدید ساختار صنعت برقش انداخـت. تلاش برای اصلاحات از سال ۱۹۹۱، با بحث‌هایی بین صنعت و دولت نتایج در بوجود آوردن کـد بـرق ملـی گشـت کـه در دسامبر ۱۹۹۶ کامل گشت. کد برق ملی، قوانین و فرآیندهایی را برای بهـره‌برداری در بازار برق ملی[1] (NEM) وضع کرد. شبکه برق در استرالیا تحت مقررات ایالتی تا سال ۲۰۰۰ باقـی مـاند. در ایـن زمان کمیته رقابت و مصرف کننده استرالیا[2] (Accc) مسئولیت شبکه را به عهـده گرفـت. بازار استرالیا، یک ترکیب از قراردادهای بلند مدت و کوتاه مدت (روزی) و قیمت‌گذاری لحظه‌ای برای بازارهای نیم ساعتی برای تعدیل عرضه و تقاضا استفاده می‌کند. تمام تولید کنندگان با خروجـیهای شـبکه بیشتر از ۳۰ مگاوات باید در بازار شرکت کنند در صورتیکه تولید کنندگان کوچکتر آزاد هسـتند و نهایـتاً تمـام مصـرف کنندگان در این بازار شرکت داده می‌شوند و رقابت کامل از سال ۲۰۰۱ شروع شد. [۸]

۱-٤- نیاز به ابزار شبیه سازی

صـرفنظر از ایـنکه چـه سـاختار بـازاری سـازماندهی شـود نـیاز بـه خیلی از ابزار جدید برای آنالیز اقتصـادی و مهندسی وجود دارد. در آنالیز مهندسی، ابزاری از قبیل قابلیت دسترسی به سیستم انتقال[3] (ATC) محاسبه‌گرهایی، برای تعیین فاصله مصرف کننده از محل خرید برق می‌باشند.

در آنالـیز اقتصـادی، ابـزار پـیش‌بینـی قیمـت آیـنده، برای اینکه یک بازار پایدار داشته باشیم، نیاز مـی‌شـوند. و نـیز ابزارهای دیگری که جهت ایجاد یک پل بین آنالیز مهندسی و آنالیز اقتصادی برای

---

[1] National Electricity Market
[2] Oustralia Comption and Consumer Commission
[3] Available Transfer Capability

آنالیز فشار اساسی قیود مهندسی روی بازار، نیاز می‌شوند. این قبیل ابزار که به عنوان پلی قرار می‌گیرند، در حقیقت یک الگوریتم جهت ماکزیمم کردن رفاه فردی می‌باشند که شامل یک مدل سیستم انتقال کامل نیز می‌شود. این ابزار به یک فرد برای تعیین رفتار پیشنهاد دادن بهینه در یک پول برق را اجازه خواهد داد. کاربردهای ابزار ماکزیمم سازی رفاه متفاوت خواهند بود. برای مثال، تراکم سیستم انتقال می‌تواند یک بازار را به داخل چندین منطقه با قیمتهای با اختلاف زیاد تقسیم کند. با درنظر گرفتن یک مدل کامل از سیستم انتقال، موقعیتهای بازار مشابه با آنچه ذکر شد را می‌توان نمایش داد. برای شرکت کنندگان بازار، وجود تراکم انتقال می‌توانست فرصتهایی را برای فروش تولید ارائه دهد بطوریکه در داخل یک بازار تقسیم بندی شده به نواحی مختلف ممکن بود که تقاضا بالا باشد و تعداد فروشندگان بالقوه پایین باشد. [۲۰]

ابزار برای کمک به شرکت کنندگان بازار برای پیشنهاد دادن استراتژیهای بهینه نیاز می‌شوند. مهندسین در یک ISO یا آژانسهای طراحی دیگر این قبیل ابزار را برای کمک به فشارهای بلندمدت سیستم می‌توانستند استفاده کنند و آنها را قادر می‌سازد که موارد مورد نیاز جهت بهبودی سیستم انتقال را بهتر تعیین کنند و برعکس این یک نیاز برای رگولاتورهایی از قبیل: FERC ، گروه قضایی[1] (DOJ) و کمیسیون تنظیم انرژی برق ایالتی برای مراقبت در مقابل عملیاتهای غیر رقابتی توسط شرکت کنندگان بازار می‌باشد. برای مثال، اگر یک شرکت بخصوص بتواند به اندازه کافی تولید داشته باشد، امکان در اختیار گرفتن بازار وجود دارد و این بطور عمدی بخاطر قیمت‌گذاری بالا موجب تراکم می‌شود. موج اخیر ادغام شرکتها در ایالات متحده نیاز می‌شود که رگولاتورها برای تشخیص بالقوه این نوع از کاربری دسترسی داشته باشند. نیاز FERC به این قبیل ابزار در order 592 "دستورات قانونی برای ادغام شرکتها" در دسامبر ۱۹۹۶ شرح داده می‌شود. DOJ و FERC در قانونگذاری ارائه

شـده اخـیر، صـریحاً بـه مدلهـای کامپـیوتری تمـایل نشـان دادنـد. استفاده از مدلهای کامپیوتری و بـرنامه‌هـای کامپـیوتری بـرای شـبیه سازی بازار برق افزایش داده شده است. DOJ استفاده کردن از شـبیه سازیهای کامپیوتری را برای طراحی بازارها توصیه کرده است و همچنین توصیه کرده است که این شبیه سازیها می‌توانند در اندازه‌گیری توان بازار شرکتهای ادغام شده مفید باشند.

۱-۵- کلیات

در ایـنجا یک الگوریتم جدید را نشان می‌دهد که یک شرکت کننده بازار بتواند با پیش گرفتن یک استراتژی در پیشنهاد دادن، عملکرد فردیش را در بازار لحظه‌ای ماکزیمم کند. این الگوریتم باید موارد اقتصـادی بـازار لحظـه‌ای برق را مدل کند طوریکه مدل سیستم انتقال کامل را دربربگیرد. بدون مدل کـردن سیسـتم انتقال ،الگوریتم ناپایداری قیمت را که هم اکنون در سیستمهای برق تحت فشار دیده می‌شود را نمی‌توان بررسی کند.

۱-۵-۱- مدل بازار لحظه‌ای

نقطـه آغـاز یک الگوریتم ماکزیمم سازی رفاه فردی ایجاد یک مدل از بازار برق می‌باشد. در اینجا عملکـرد پـول بـرق را کـه در قیمـت گذاری بازار لحظه‌ای استفاده می‌شود را مطالعه می‌کنیم. مسئله oPF در سال ۱۹۶۲ به صورت فرمول در آمده است و یکی از موارد مهم در بحث‌ها می‌باشد.

بدلـیل ایـنکه oPF مـی‌توانـد خیلـی بـزرگ باشـد و یـک مسئله غیرخطی ریاضی است، خیلی از الگوریتم‌ها و تکنیکها را می‌توان برای حل آن استفاده نمود. [۲۲]

---

[1] Department of Justice

بـا اسـتفاده از یـک OPF، یک بازار لحظه‌ای با تمام قیود مهندسی اعمالی را می‌توان شبیه سازی کـرد. در این روش، فشار قیود انتقال روی قیمت‌گذاری لحظه‌ای را می‌توان به صورت مستقیم بدست آورد. استفاده کردن از OPF به عنوان یک موتور نرم افزاری برای شبیه سازی یک بازار لحظه‌ای یک قسـمت مهـم از بحـث مـی‌باشـد. قیمـت گـذاری لحظـه‌ای در سیسـتمهای قـدرت را می‌توان برای قیمـت‌گذاری توان راکتیو نیز درنظر گرفت. قیمت برق توان راکتیو با توجه به اینکه می‌تواند بی‌نهایت ناپـایدار باشد خیلی کمتر از قیمتهای برق حقیقی است. برای مثال، قیمت‌گذاری لحظه‌ای توان راکتیو برای تغییر اندازه وقتی که با محدودیتهای ولتاژ در سیستم قدرت مواجه می‌شویم نشان داده می شوند و همچنیـن سـرمایه‌گـذاری بـرای وسـایل تـوان راکتـیو از قبیل بانکهای خازنی بیشتر از هزینه‌های بهره‌برداری تمام می‌شوند که باید به داخل محاسبات این سرمایه‌گذاریها برده شوند.

بازارهـای امـروز هـنوز قیمـت گذاری توان راکتیو را شامل نمی‌شوند و در اینجا نیز بر روی قیمت گـذاری توان راکتیو بحث نخواهیم کرد. قیمت‌گذاری لحظه‌ای، بهره‌برداری کارآمد از سیستم انتقال را بوسیله فراهم کردن قیمتهای متفاوت، بیمه می‌کند. [۲۳]

اخـتلاف قیمـت در طول تقاضای بالای سیستم می‌تواند خیلی زیاد باشد و نتیجه در قیمت گذاری نجومـی در مـناطق بـا کمـبود تولـید دارد. بـرای دهـه‌های متمادی تلاشهای زیادی برای مدیریت و مینـیمم کـردن هزیـنه‌هـای تولید صورت گرفته‌اند و در یک بازار آزاد پیشنهادات تولید کنندگان را به عـنوان شرکت کنندگان بازار داخل oPF منظور می‌کنند. هرچند که اخیراً، برای ایجاد یک بازار واقعی رفتار مصرف کنندگان نیز داخل oPF منظور شده‌اند.

بـا اسـتفاده از یـک OPF، یک بازار لحظه‌ای با تمام قیود مهندسی اعمالی را می‌توان شبیه سازی کـرد. در این روش، فشار قیود انتقال روی قیمت‌گذاری لحظه‌ای را می‌توان به صورت مستقیم بدست آورد. استفاده کردن از OPF به عنوان یک موتور نرم افزاری برای شبیه سازی یک بازار لحظه‌ای یک قسـمت مهـم از بحـث مـی‌باشـد. قیمـت گـذاری لحظـه‌ای در سیسـتمهای قـدرت را می‌توان برای قیمـت‌گذاری توان راکتیو نیز درنظر گرفت. قیمت برق توان راکتیو با توجه به اینکه می‌تواند بی‌نهایت ناپـایدار باشد خیلی کمتر از قیمتهای برق حقیقی است. برای مثال، قیمت‌گذاری لحظه‌ای توان راکتیو برای تغییر اندازه وقتی که با محدودیتهای ولتاژ در سیستم قدرت مواجه می‌شویم نشان داده می شوند و همچنیـن سـرمایه‌گـذاری بـرای وسـایل تـوان راکتـیو از قبیل بانکهای خازنی بیشتر از هزینه‌های بهره‌برداری تمام می‌شوند که باید به داخل محاسبات این سرمایه‌گذاریها برده شوند.

بازارهـای امـروز هـنوز قیمـت گذاری توان راکتیو را شامل نمی‌شوند و در اینجا نیز بر روی قیمت گـذاری توان راکتیو بحث نخواهیم کرد. قیمت‌گذاری لحظه‌ای، بهره‌برداری کارآمد از سیستم انتقال را بوسیله فراهم کردن قیمتهای متفاوت، بیمه می‌کند. [۲۳]

اخـتلاف قیمـت در طول تقاضای بالای سیستم می‌تواند خیلی زیاد باشد و نتیجه در قیمت گذاری نجومـی در مـناطق بـا کمـبود تولـید دارد. بـرای دهـه‌های متمادی تلاشهای زیادی برای مدیریت و مینـیمم کـردن هزیـنه‌هـای تولید صورت گرفته‌اند و در یک بازار آزاد پیشنهادات تولید کنندگان را به عـنوان شرکت کنندگان بازار داخل oPF منظور می‌کنند. هرچند که اخیراً، برای ایجاد یک بازار واقعی رفتار مصرف کنندگان نیز داخل oPF منظور شده‌اند.

۱-۵-۲- ماکزیمم کردن رفاه فردی در یک بازار لحظه‌ای:

با یک مدل کامل بازار، توجه همگان معطوف به این می‌شود که چطور یک فرد می‌تواند ، نتیجه خودش را بهینه کند. کار انجام شده در [۳۰] و [۳۱] روی استراتژیهای پیشنهادی بهینه در بازارها در نظر گرفته شده‌اند که روش آخرین پیشنهاد پذیرفته شده برای تعیین مخابره و قیمت‌گذاری را استفاده می‌کند.

پیشنهادات بالقوه بوسیله هر شرکت کننده بازار به سه قسمت محدود می‌شود. پیشنهاد پایین، متوسط و بالا و یک مدل بازار کلی تر در [۲۸] نشان داده می‌شود. که مصرف کنندگان و تولید کنندگان بازار را به ارائه یک منحنی پیشنهادی اجازه می دهد. در این قبیل بازار، پیدا کردن ماکزیمم رفاه فردی یک پیچیدگی در کار را می‌طلبد و توسعه الگوریتم نشان داده شده در (۲۸) برای سیستمهای بزرگتر خوب به نظر نمی‌رسند. از جمله الگوریتمهای دیگری که برای ماکزیمم کردن رفاه و درنظر گرفته شده استفاده از روش نیوتن می‌باشد. با مدل کردن رفتار شرکت کنندگان بازار می‌توان مفاهیم تئوری بازی را بررسی کرد که با این روش می‌توان نقاط توازن بازار را بررسی نمود. نقاط توازن بازار در (۳۲) با حل کردن تکرار پذیری مسئله ماکزیمم کردن رفاه فردی برای هر شرکت کننده بازار صورت می‌گیرد تا اینکه پیشنهادات ثابت گردد. تکنیک ماکزیمم سازی رفاه فردی یک مبنای محاسبه بهینه سازی می‌باشد و قابل ذکر است که با توجه به نتایج به دست آمده ماکزیمم کردن رفاه یک فرد یک تابع به شدت غیر همگراست که با تعداد زیادی از موقعیتهای بهینه همراه است. این بهینه محلی با توانایی یک شرکت کننده بازار برای بدست آوردن یک استراتژی پیشنهاد دادن با توجه به قیود مهندسی مطابقت می‌کند. هیچ روش مبنایی قادر به حل کلی برای ماکزیمم سازی نخواهد بود.

فصل دوم

مدل پیشنهاد دادن در

بازار برق پول

مدل پیشنهاد دادن در بازار برق پول

در این فصل ساختار برق پول استفاده شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مدل کردن این ساختار با استفاده از پخش بار بهینه (OPF) با درنظر گرفتن چند مثال از پیشنهاد دادن تولید کننده صورت می‌گیرد.

۲-۱- ساختار بازار برق پول

ساختار برق پول به عنوان مجموعه‌ای از پیشنهادات تولید کنندگان برق تعریف می‌شود. سپس تولید کنندگان برطبق مخابره تعیین شده توسط اپراتور پول در قیمت گذاری لحظه‌ای انرژی هزینه‌شان را دریافت می‌کنند. مخابره قیمتهای لحظه‌ای به تقاضای سیستم، ساختار سیستم انتقال، پیشنهادات دریافت شده از تولید کنندگان وابسته‌اند. برای اینکه مثالهای اولیه این فصل با تاریخ آنالیز سیستم قدرت سازگار باشند، بازار در ابتدا محدود به پیشنهادات تولید کنندگان می‌شود و با بررسی این بازار نیاز به پیشنهادات مصرف کنندگان نیز اثبات می‌شوند. [۹]

۲-۲- پخش بار بهینه

بیشتر از ۳۰ سال است که الگوریتم پخش بار بهینه بحث روز می‌باشد. OPF به عنوان یک مسئله استاتیکی و بهینه سازی غیرخطی برای اینکه متغیرهای کنترلی در یک زمان قابل قبول و شرایط بهره‌برداری مناسب تابع هدف را بهینه کنند. تابع هدف می‌تواند هزینه تولید یا تلفات سیستم را می‌نیمم کند. کنترلرهای در دسترس معمولاً ابزار سیستم قدرت می‌باشند از قبیل: خروجیهای توان حقیقی و راکتیو ژنراتور، معاملات توان حقیقی بین مناطق بهره‌برداری، موقعیتهای فاز یا تپ چنجر ترانسفروماتورها و وسایل سوئیچینگ شنت. برای فراهم کردن مقداری پیش زمینه، OPF مرسوم با هدف می‌نیمم کردن هزینه‌های تولید نهایی برای یک سیستم شرح داده می‌شود. [۱۰]

برای اینکه این معادلات با توسعه روشهای آینده هماهنگی داشته باشد ماکزیمم کردن منفی هزینه‌ها را بجای می‌نیمم کردن هزینه‌ها درنظر می‌گیریم:

$$\underset{s,x}{MAX} \quad -C(s)$$

مشروط به

$$h(x,s,d)=\begin{bmatrix} h(x)-s+d \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix}=0 \qquad (۱-۲)$$

$$g(x,s,d)=\begin{bmatrix} S_{\min}-S \\ S-S_{\max} \\ \bar{g}(x) \end{bmatrix}\le 0$$

برای حل این برنامه غیرخطی، از تابع لاگرانژ برای آن استفاده می‌کنیم:

$$\bar{L}=-C(S)+\lambda_h^T h(x,s,d)+\lambda_g^T g(x,s,d)$$

$$=\begin{bmatrix} -C(s)+\lambda_h^T\left[h(x)-S+d\right]+\lambda_{\bar{h}}^T\left[\bar{h}(x)\right] \\ +\lambda_{gs\min}^T\left[S_{\min}-S\right]+\lambda_{gs\max}^T\left[S-S_{\max}\right] \\ +\lambda_{\bar{g}}^T\bar{g}(x) \end{bmatrix} \qquad (۲-۲)$$

این مسئله می‌تواند سپس با حل کردن شرایط کان ـ تاکر تعیین شوند.

شرایط ایستا

$$\frac{\partial \overline{L}}{\partial x} = \lambda_h^T \frac{\partial h(x,s,d)}{\partial x} + \lambda_g^T \frac{\partial g(x,s,d)}{\partial x} = 0$$
$$\frac{\partial \overline{L}}{\partial s} = -\frac{\partial C(s)}{\partial s} - \tilde{\lambda} h_s - \lambda_{gs}\min + \lambda_{gs}\max = 0 \qquad (۳-۲)$$
$$\frac{\partial \overline{L}}{\partial \lambda_h} = h(x,s,d) = 0$$

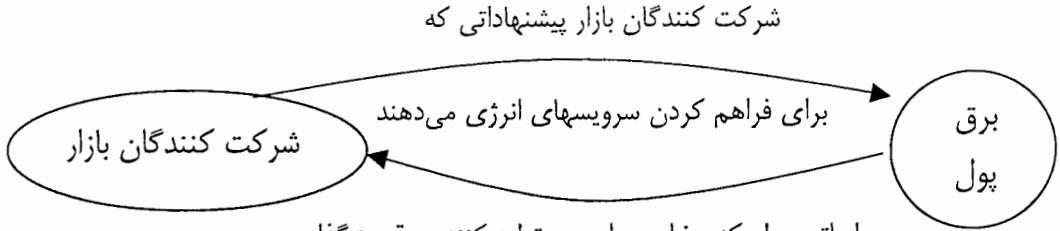
شرایط مکمل غیرایستا

$$\lambda_g^T g(x,s,d) = 0$$

$$\lambda_g \geq 0 \qquad ; \qquad g(x,s,d) \leq 0$$

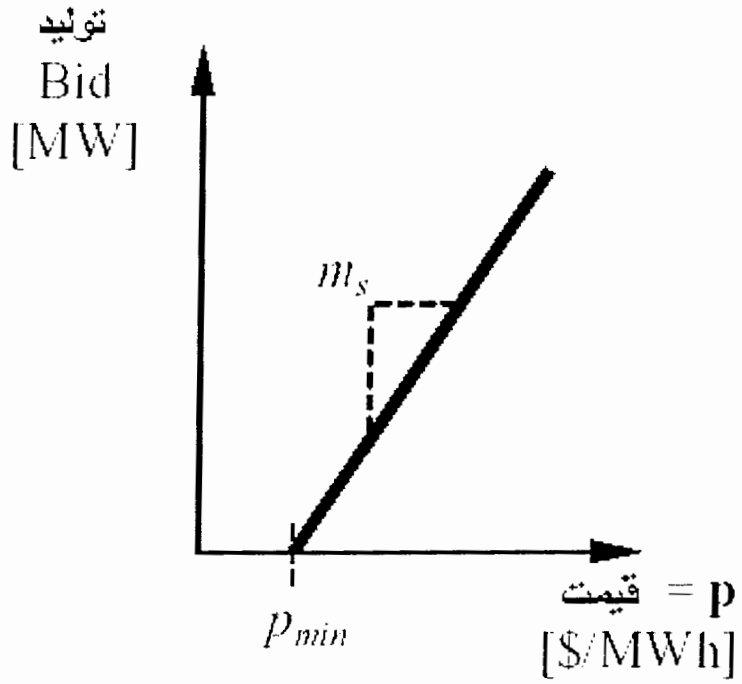
۲-۳- یک مدل بازار OPF

ضرایب لاگرانژ تعیین شده از OPF اطلاعات اقتصادی مهم مربوط به سیستم قدرت را فراهم می‌کند. یک ضریب لاگرانژ به عنوان مشتق تابع هدف با اعمال قیود می‌تواند درنظر گرفته شود. بنابراین ضرایب لاگرانژ به همراه معادلات پخش توان (OPF) می‌توانند به عنوان هزینه نهایی فراهم کردن سرویس انرژی ($/MWh) برای یک باس سیستم قدرت درنظر گرفته شوند. این موردی است که در قلب تئوری قیمت گذاری لحظه‌ای واقع می‌شود و OPF را اجازه می‌دهد که برق پول را مدل کند. [۲۱]



شکل ۲-۱ فلوی اطلاعات پول برق

آنچـه در شـکل ۲-۱ نشـان داده شـده اسـت، ایـن اسـت که یک پول برق را می‌توان به صورت منحنـی‌هـای پیشـنهادی تولـید کنـندگان درنظـر گرفـت کـه مقادیر برق (MW) را به همراه قیمتها ($/MWh) تعـریف مـی‌کنـند. اپـراتور پـول فـرض می‌کند پیشنهادات ارائه شده هزینه نهایی درست مـی‌باشـند و سپس OPF می‌نیمم سازی هزینه‌های تولید نهایی ژنراتورها را برای تعیین مخابره تولید بـه همـراه قیمـت لحظه‌ای برای هر نقطه از سیستم را حل می‌کنند و هر تولید کننده مقداری از برق مشخص شده بوسیله اپراتور برق را تولید و دستمزدش را دریافت می‌کند. در شکل ۲-۲ یک بازار برق طـوری سـاخته شـده که تولید کنندگان منحنی‌های پیشنهادی خطی را ارائه می‌دهند. هر تولید کننده یـک مـی‌نـیمم قیمت $\rho_{\min}$ با شیب m_S ارائه می‌دهد، با استفاده کردن این پیشنهادات، اپراتور برق OPF را حـل مـی‌کند تحت این فرض که شرکت کنندگان بازار هزینه نهایی درست را ارائه می‌دهند. مقدار مخابره دریافت شده سپس مطابق با حل OPF ارائه می‌گردد. [۲۲]



شکل ۲-۲ پیشنهادات تولید وابسته به قیمت گذاری خطی

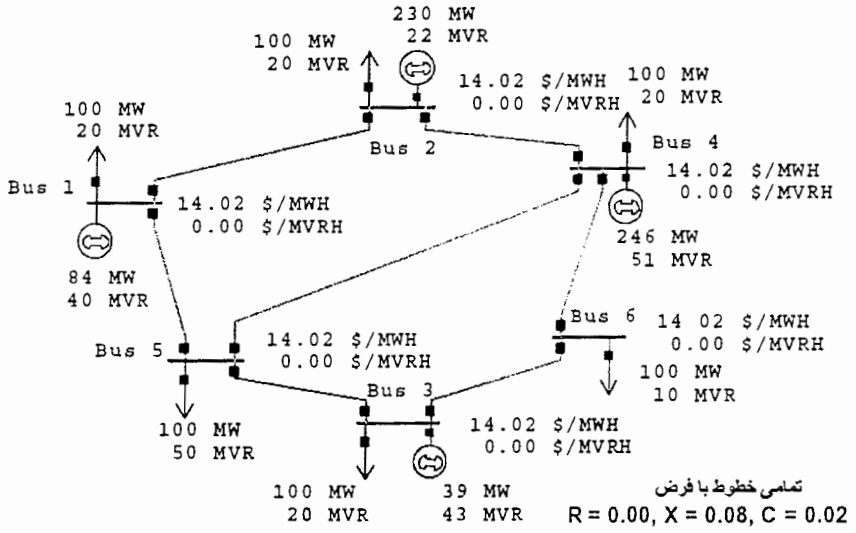
۲-٤- نمونه‌های بازار

در زمـان انجـام آنالیز بازار در یک سیستم، یک شرکت کننده بازار علاقمند است که بداند سودش بـرای اسـتراتژیهای پیشنهاد دادن متفاوت چه می‌شود. این سود تنها به پیشنهاد خودش وابسته نیست بلکـه بـه پیشـنهاد شـرکت کنندگان دیگر در بازار نیز وابسته است. برای آنالیز بازار برق، فرد باید یک ارزیابـی از پیشنهادات هر تولید کننده که تحت کنترل نیست داشته باشد و سپس باید یک مجموعه از پیشـنهادات را بـرای تولـید کنـندگان تعییـن کـند تا تحت کنترل درآورد بطوریکه یک پاسخ بهینه به پینشهاد رقبا باشد.

۲-٤-۱- مدل یک بازار نمونه برای سیستم چهار تولید کننده بدون اتلاف

بـرای مـدل کـردن بازار، سیستم ۶ باسه، ۴ ژنراتور در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. حل OPF بـرای پول زمانیکه تمام ژنراتورها پیشنهاد هزینه نهایی درسشان را می دهند در شکل ۲-۳ نشان داده می‌شود.

توجـه شـود کـه ایـن یـک سیستم بدون تلفات است. به عنوان نتیجه دیده می‌شود، زمانیکه قیود سیستم انتقال درنظر گرفته نمی‌شوند قیمت گذاری لحظه‌ای سیستم برابرند.



شکل ۲-۳ سیستم ۶- باسه با ۴ ژنراتور

منحنی‌های هزینه برای ژنراتورها در شکل ۲-۳ نشان داده می‌شوند:

$$C(P_{G_1}) = 12PG1 + 0/012P_{G_1}^2$$
$$C(PG2) = 9/6PG2 + 0/0096P_{G_2}^2$$
$$C(PG3) = 13P_{G_3} + 0/013P^2G_2$$
$$C(PG4) = 9/4P_{G4} + 0/0094P^2G4$$

واحدهـا دلار بـر سـاعت می‌باشند. با تعریف منحنی‌های هزینه به فرم $C(p) = bp + cp^2$ پیشنهاد هزینه نهایی درست برای یک ژنراتور به فرم:

$$S(P) = \frac{1}{2c}(P-b) = m_S(P - P_{\min}) \ [MW] \qquad (۴-۲)$$

کـه P قیمـت لحظه‌ای تولید کننده است که در بازار دریافت می‌کند و S مخابره تولید می‌باشد. در نتیجه پیشنهادات هزینه نهایی درست برای هر ژنراتور بصورت زیر می‌باشند:

$$S_1(P) = \frac{1}{2(0.012)}(P-12) = 41.67(P-12)$$
$$S_2(P) = \frac{1}{2(0.0096)}(P-9.6) = 52.08(P-9.6)$$
$$S_3(p) = \frac{1}{2(0.013)}(9-13) = 38.46(P-13)$$
$$S_4(P) = \frac{1}{2(0.0094)}(P-9.4) = 53.19(P-9.4)$$

بـا این پیشنهادات به عنوان مبنا، برای تست مدل بازار، پیشنهادات به عنوان چند درصدی بالاتر یا پایین‌تر از هزینه نهایی درست انتخاب می‌شوند. [۲۲]

بخاطـر ایـنکه پیشنهاد داده شده K دفعه بزرگتر از هزینه نهایی درست باشد، تولید کننده باید یک پیشنهاد جدید بدهد $(\overline{m}_S, \overline{P}_{\min})$ که برابر است با:

$$\overline{P}_{\min} = K \times P_{\min}, \overline{m}_S = \frac{m_S}{K}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial S} = P + \frac{\partial P}{\partial S} S - \frac{\partial C(S)}{\partial S} = 0$$

در ایـن فـرمول، چـون تولید کننده نمی‌تواند روی قیمتهای بازار اثر بگذارد بدلیل اینکه بازار کاملاً رقابتی است بنابراین $\frac{\partial P}{\partial S} = 0$

بنابرایـن شـرایط لازم برای ماکزیمم کردن سود برابر است با $P = \frac{\partial C(S)}{\partial S}$. این بدین معنی است کـه تولـید کنـنده باید یک پیشنهاد بدهد که با هزینه نهایی‌اش مطابقت داشته باشد. این امر آزمایش شده و در جدول ۱-۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲-۱ سود هر تولید کننده در بازار چهار ـ تولید کننده

درصد پیشنهادی بیشتر از هزینه نهایی	سود باس ۱	سود باس ۲	سود باس ۳	سود باس ٤
0٪ (K=۱)	۸۴/۴۲	۵۱۹/۲۴	۲۱/۲۵	۵۶۵/۵۴
۱٪ (K=۱/۰۱)	۸۸/۵۵	۵۲۸/۱۵	۲۱/۸۳	۵۷۹/۸۹
۲٪ (K=۱/۰۲)	۸۸/۹۴	۵۳۵/۳۴	۲۲/۳۶	۵۵۰/۲۵
۳٪ (K=۱/۰۳)	۸۹/۶۵	۵۳۳/۲۶	۲۰/۴۹	۵۹۱/۴۰
۴٪ (K =۱/۰۴)	۸۹/۹۴	۵۳۶/۷۴	۱۸/۱۵۰	۵۹۸/۷۵
۵٪ (K=۱/۰۵)	۸۸/۹۷	۵۴۳/۲۵	۱۷/۳۵	۶۱۵/۲۱
۶٪ (K=۱/۰۶)	۸۷/۶۵	۵۴۵/۲۷	۱۴/۵۴	۶۱۹/۵۶
۷٪ (K=۱/۰۷)	۸۴/۳۸	۵۴۸/۲۰	۱۲/۹۳	۶۲۴/۲۵
۸٪ (K=۱/۰۸)	۸۴/۳۴	۵۵۲/۳۳	۵/۲۵	۶۱۶/۹۲
۹٪ (K=۱/۰۹)	۸۱/۲۳	۵۵۳/۵	۲/۳۲	۶۲۷/۵
۱۰٪ (k=۱/۱)	۷۵/۳۶	۵۵۳/۷۵	۰	۶۱۸
۱۱٪ (K=۱/۱۱)	۷۳/۲۵	۵۵۲/۴۵	۰	۶۲۹/۹۷
۱۲٪ (K=۱/۱۲)	۶۷/۵۸	۵۵۲/۲۵	۰	۶۱۷/۳۰
۱۳ ٪ (K=۱/۱۳)	۶۳/۹۴	۵۵۱/۵۱	۰	۶۱۷/۰۵
۱۴٪ (K=۱/۱۴)	۵۶/۸۲	۵۴۵/۵۹	۰	۶۱۴/۳۰
۱۵ ٪ (K=۱/۱۵)	۵۱/۶۸	۵۵۱/۹۸۵	۰	۶۱۴/۱۵
۱۶ ٪ (K=۱/۱۶)	۴۴/۲۵	۵۴۳/۶۵	۰	۶۱۲/۶۲
۱۷٪ (K=۱/۱۷)	۴۷/۴۵	۵۳۵/۸۷	۰	۶۰۵/۳۲
۱۸ ٪ (K=۱/۱۸)	۳۳/۳۳	۵۳۴/۴۸	۰	۶۰۲/۳۵
۱۹ ٪ (K=۱/۱۹)	۳۳/۶۲	۵۳۹/۴۵	۰	۵۵۹/۰۲

توجـه کنـید هر ستون از جدول ۲-۱ تنها در پیشنهاد یکی از تولید کننده‌ها را نشان می‌دهد. برای نمونـه، ستون سود باس ۲ در سطر هزینه نهایی بالای ۶٪ بدین معنی است که تولید کننده در باس ۲ در حـال پیشنهاد دادن هزینه نهایی بالای ۶٪ می‌باشد بطوریکه تولید کنندگان در باسهای ۱ و ۳ و ۴ در حـال پیشـنهاد دادن در هزیـنه نهایـی هسـتند. مقادیـر نشـان داده شده سود برای هر تولید کننده برحسب $\$/h$ می‌باشد. سود اختلاف بین درآمد و هزینه است. درآمد با ضرب کردن MW خروجی تولید کنـنده در قیمـت لحظه‌ای بدست می‌آید و هزینه با ارزیابی کردن تابع هزینه درست در سطح خروجی MW محاسـبه مـی‌شـود. از مقادیر جدول ۲-۱ بهترین پاسخ برای هر تولید کننده با فرض اینکه دیگر تولید کنندگان هزینه نهایی درستشان را بدهند. داریم:

باس ۱ : پیشنهاد با هزینه نهایی درست بالای ۴٪

باس ۲ : پیشنهاد با هزینه نهایی بالای ٪ ۱۰

باس ۳ : پیشنهاد با هزینه نهایی بالای ٪ ۲

باس ۴ : پیشنهاد با هزینه نهایی بالای ٪ ۱۱

تـئوری اقتصادی عنوان می‌کند که بهترین پاسخ پیشنهاد دادن در هزینه نهایی درست می‌باشد اما جـدول ۲-۱ این را نشان نمی‌دهد. این بدین معنی است که تولید کنندگان فردی در این بازار مقداری از قـدرت بازار را بدست دارند و این خلاف فرض یک بازار رقابتی است. هر پیشنهاد تولید کننده، روی قیمت بازار اثر می‌گذارد بدلیل اینکه تولید کنندگان کمی در دسترس میباشند.

نـتایج در جـدول ۲-۲ ایـن اثـر را بـرای تولـید کننده در باس ۴ نشان می‌دهد، بدین صورت که با افزایش پیشنهادش، قیمت پول افزایش می‌یابد.

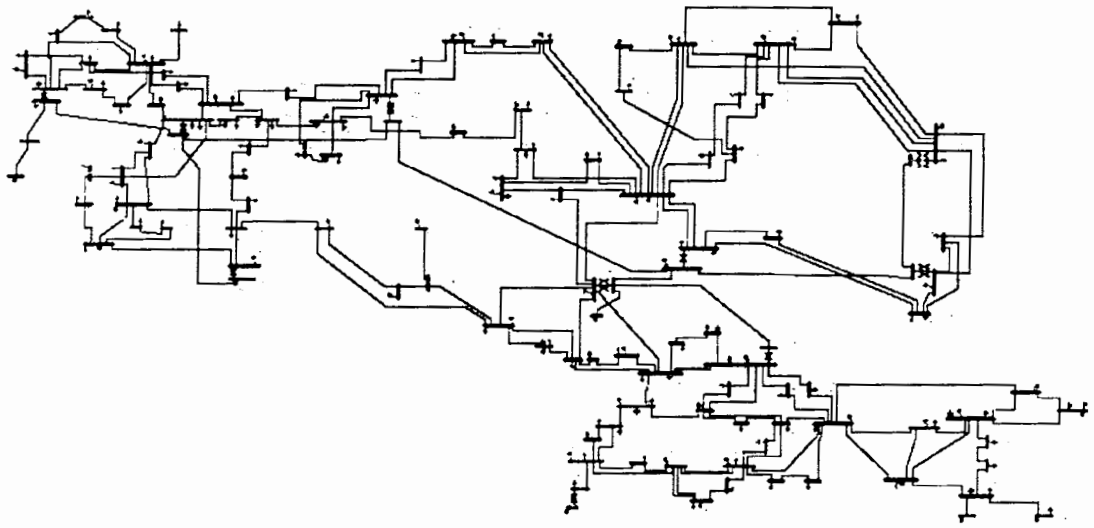
جدول ۲-۲ اثر پیشنهاد تولید کننده در افزایش قیمت پول

سود باس ٤	قیمت پول	درصد پیشنهادی بیشتر از هزینه نهایی
۵۶۵/۵۴	۱۴/۰۲	0٪ (K=۱)
۵۷۹/۸۹	۱۴/۰۹	۱٪ (K=۱/۰۱)
۵۵۰/۲۵	۱۵/۰۸	۲٪ (K=۱/۰۲)
۵۹۱/۴۰	۱۵/۸۳	۳٪ (K=۱/۰۳)
۵۹۸/۷۵	۱۵/۹۵	۴٪ (K =۱/۰۴)
۶۱۵/۲۱	۱۵/۹۷	۵٪ (K=۱/۰۵)
۶۱۹/۵۶	۱۶/۰۴	۶٪ (K=۱/۰۶)
۶۲۴/۲۵	۱۶/۱۲	۷٪ (K=۱/۰۷)
۶۱۶/۹۲	۱۶/۲۳	۸٪ (K=۱/۰۸)
۶۲۷/۵	۱۶/۳۵	۹٪ (K=۱/۰۹)
۶۱۸	۱۶/۴۱	۱۰٪ (k=۱/۱)
۶۱۹/۹۱	۱۶/۴۷	۱۱٪ (K=۱/۱۱)
۶۱۷/۳۰	۱۶/۵۳	۱۲٪ (K=۱/۱۲)
۶۱۷/۰۵	۱۶/۵۷	۱۳ ٪ (K=۱/۱۳)
۶۱۴/۳	۱۶/۵۹	۱۴٪ (K=۱/۱۴)
۶۱۴/۱۵	۱۶/۶۱	۱۵ ٪ (K=۱/۱۵)
۶۱۲/۶۴	۱۶/۶۷	۱۶ ٪ (K=۱/۱۶)
۶۰۵/۳۲	۱۶/۸۳	۱۷٪ (K=۱/۱۷)
۶۰۲/۳۵	۱۶/۸۷	۱۸ ٪ (K=۱/۱۸)

ایـن توانایـی در اثر مستقیم روی قیمت گذاری پول باعث می‌شود که تولید کنندگان قدرت بازار را بدست گیرند و آنها را تشویق کند به اینکه پیشنهاد بالاتر از هزینه نهایی درست بدهند.

۲-٤-۲- بررسی قدرت بازار در یک بازار با ٥٤- تولید کننده

برای مطالعه روی یک سیستم بزرگتر، ۱۱۸ باسه IEEE ، در این سیستم ۵۴ ژنراتور به منحنی‌های هزینه تولید اضافه می‌گردد. شکل ۲-۵ را درنظر بگیرید با بار کل ۳۶۶۸MW در اینجا، تعداد زیاد ژنراتورها باید بطور احتمالی توانایی هر ژنراتور را برای اعمال قدرت بازار نفی می‌کنند. تمام ژنراتورها منحنی‌های هزینه تعریف شده طبق $C(P) = bp + cp^2$ را خواهند داشت. [۲۸]



شکل ۲-۵ مورد ۱۱۸ باسه IEEE

و پیشنهادات هزینه نهایی درست بوسیله $S(P) = \frac{1}{2C} \times (P - b)$ تعریف می‌شود چند تا از

$= M_S (P - P_{\min})$

ژنراتورها در جدول ۲-۳ مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

جدول ۲-۳ منحنی‌های هزینه درست و منحنی‌های پیشنهادی نهایی درست

خروجی MW اگر همه پیشنهادات نهایی باشند	m_S (C/۵) (/۰)	$P_{\min}$ (b)	C	B	باس تولید کننده
۱۸۵/۹۲	۵۸/۸۲	۸/۵	۰/۰۰۸۵	۸/۵	۲۵
۳۰/۰۲	۴۵/۴۵	۱۱	۰/۰۱۱	۱۱	۳۲
۸۳/۰۳	۵۰	۱۰	۱/۰۱	۱۰	۴۹
۳۹۶/۹۸	۷۶/۹۲	۶/۵	۰/۰۰۶۵	۶/۵	۶۹
۱۴۷/۸۱	۵۵/۵۶	۹	۰/۰۰۹	۹	۷۷
۳۳۲/۹	۷۱/۴۳	۷	۰/۰۰۷	۷	۸۹

ستون آخر در جدول ۲-۳ مقدار برق مخابره شده بوسیله الگوریتم OPF زمانیکه تمام ۵۴ ژنراتور هزینه نهایی‌شان را پیشنهاد می‌دهند. [۲۹]

قابل ذکر است که ژنراتور در باس ۶۹ بیشترین MW خروجی را دارد. آزمایشات مطابق بخش ۲-۴-۱ برای اینکه بهترین پاسخ هر تولید کننده را تعیین کند انجام می‌شوند، با فرض اینکه تمام تولید کنندگان در حال پیشنهاد دادن در هزینه نهایی درستشان می‌باشند. نتایج این شبیه سازی در جدول ۲-۴ نشان داده شده است.

جدول ۲-٤ سود تولید کنندگان در ۱۱۸ باسه و ٥٤ تولید کننده

MW پایه	۳۹۷	۳۳۲/۹	۱۸۵/۹	۱٤۷/۸	۸۳	۳۰
درصد پیشنهاد بیشتر از هزینه نهایی	سود باس ۶۹	سود باس ۸۹	سود باس ۲۵	سود باس ۷۷	سود باس ۴۹	سود باس ۳۲
-۲٪ (K=۰/۹۸)	۱۰۱۷/۷	۷۷۰/۳	۱۹۳/۹	۲۹۰/۶	۶۶/۹۳	۸/۴۴
-۱٪ (K=۰/۹۹)	۱۰۲۱/۶	۷۷۳/۶	۱۹۵/۷	۲۹۲/۶	۶۸/۳	۹/۵۱
۰ ٪ (K=۱)	۱۰۲۴/۳	۷۷۵/۸	۱۹۶/۶	۶۸/۹۴	۶۸/۹۴	۹/۹۲
۱ ٪ (K=۱/۰۱)	۱۰۲۶	۷۷۷	۱۹۶/۹	۲۹۴/۲	۶۸/۹۲	۹/۷۱
۲ ٪ (K=۱/۰۲)	۱۰۲۶/۶	۷۷۷/۲	۱۹۶/۳	۲۹۳/۸	۶۸/۲۲	۸/۹۲
۳ ٪ (K=۱/۰۳)	۱۰۲۶/۲	۷۷۶/۶	۱۹۵/۱	۲۹۲/۷	۶۶/۹۲	۷/۵۸

۴٪ (K=۱/۰۴)	۱۰۲۴/۹	۷۷۵/۱	۱۹۳/۳	۲۹۰/۹	۶۵/۰۵	۵/۷۲
۵٪ (K=۱/۰۵)	۱۰۲۲/۸	۷۷۲/۸	۱۹۰/۸	۲۸۸/۴	۶۲/۶۳	۳/۳۶
۶٪ (K =۱/۰۶)	۱۰۱۹/۸	۷۶۹/۷	۱۸۷/۸	۲۸۵/۴	۵۹/۷	۰/۵۵
۷٪ (K=۱/۰۷)	۱۰۱۶/۱	۷۶۶	۱۸۴/۳	۲۸۱/۸	۵۶/۲۷	۰
۸٪ (K=۱/۰۸)	۱۰۱۱/۶	۷۶۱/۵	۱۸۰/۱	۲۷۷/۵	۵۲/۴۱	۰
۹٪ (K=۱/۰۹)	۱۰۰۶/۴	۷۵۶/۵	۱۷۵/۶	۲۷۲/۹	۴۸/۱۱	۰
۱۰٪ (K=۱/۱)	۱۰۰۰/۶	۷۵۰/۸	۱۷۰/۶	۲۶۷/۷	۴۳/۴	۰

آنچه از جدول ۲-۴ برمی‌آید این است که هیچ تولید کننده‌ای انگیزه‌ای برای پیشنهاد بیشتر از هزینه نهایی درست ندارد و ژنراتورهای در بازارهای بزرگتر انگیزه کمی دارند تنها در ٪۲ بیشتر از هزینه نهایی. این نشان می‌دهد که هرچه تعداد رقبا بیشتر باشند قدرت بازار کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج مشهود نشان می‌دهد که این مدل بازار در مدل کردن عملکرد بازار باارزش می‌باشد. در اینجا هر تولید کننده به عنوان جداگانه رفتار کرده است. هرچند که یک کمپانی به صورت فردی بیشتر از یک ژنراتور را کنترل می‌کند. زمانیکه تمام پیشنهاد دهندگان منحنی‌های هزینه نهایی‌شان را ارائه می‌دهند، تولید کنندگان در باس ۶۹ و ۸۹ به ترتیب ۳۹۷ MW و ۳۳۲/۹MW تولید می‌کنند، طبق جدول ۲-۴ هر دو سودشان را با پیشنهاد دادن ۲٪ بیشتر از هزینه نهایی درست ماکزیمم می‌کنند. حال اگر آنها را باهم به عنوان یک کمپانی واحد ادغام شوند با راه‌اندازی شبیه سازی نتایج طبق جدول ۲-۵ نشان داده شده اند. طبق این جدول بهترین پاسخ فردی برای تولید کنندگان باس ۶۹ و تولید کننده باس ۸۹ برای پیشنهاد در هزینه نهایی درست بالای ۴٪ می‌باشد. با مقایسه کردن این آنالیز با زمانیکه دو تولید کننده همکاری نمی‌کنند دیده می‌شود که سود باس ۶۹ از ۱۰۲۶/۶ به ۱۰۳۲۷ و سود تولید کننده باس ۸۹ از ۷۷۷/۲ به ۷۸۲/۱ افزایش می‌یابد. این آنالیز اثبات می‌کند که براستی ترکیب باس ۶۹ و باس ۸۹ به داخل یک مجموعه قدرت بازار را برای آنها افزایش می‌دهد. [۲۸]

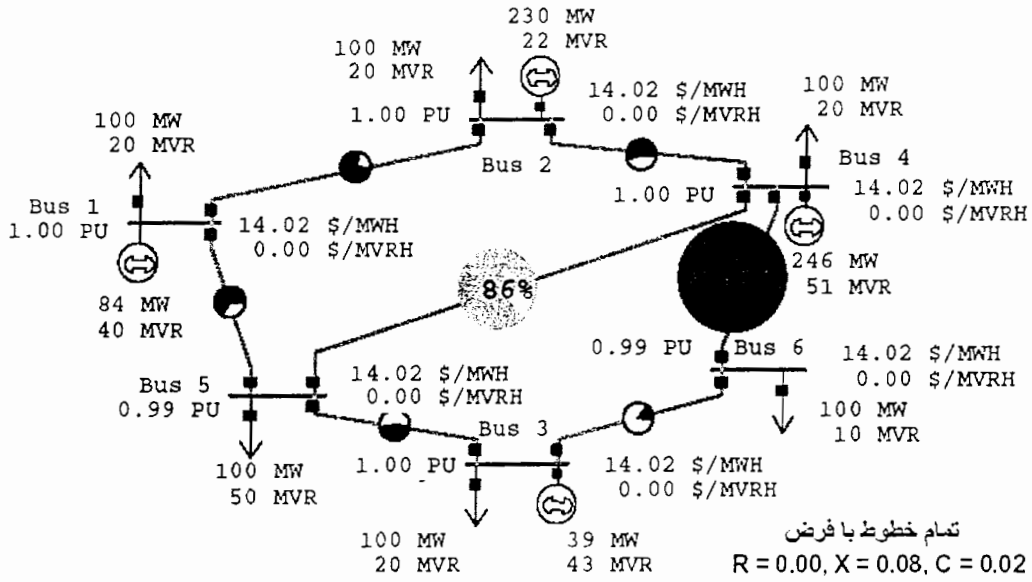
جدول ۲-۵ سود تولید کنندگان در باسهای ۶۹ و ۸۹ زمانیکه پیشنهاداتشان واحد است

درصد پیشنهادی هزینه نهایی	باس ۸۹ بیشتر از ۵ ٪	باس ۸۹ بیشتر از ۱ ٪	باس ۸۹ بیشتر از ۲ ٪	باس ۸۹ بیشتر از ۳ ٪	باس ۸۹ بیشتر از ٤٪	باس ۸۹ بیشتر از ۵ ٪	باس ۸۹ بیشتر از ٦ ٪
باس ۶۹	۱۰۲۴/۳	۱۰۲۶/۳	۱۰۲۸/۳	۱۰۳۰/۲	۱۰۳۲/۱	۱۰۳۳/۹	۱۰۳۵/۸
بیشتر از ۰٪	+۷۷۵/۸	+۷۷۷	+۷۷۷/۲	+۷۷۶/۶	+۷۷۵/۱	+۷۷۲/۸	+۷۶۹/۷
	۱۸۰۰/۱	۱۸۰۳/۳	۱۸۰۵/۵	۱۸۰۶/۸	۱۸۰۷/۲	۱۸۰۶/۷	۱۸۰۵/۵
باس ۶۹	۱۰۲۴/۳	۱۰۲۷/۹	۱۰۲۹/۹	۱۰۳۱/۸	۱۰۳۳/۷	۱۰۳۵/۷	۱۰۳۷/۴
بیشتر از ۱٪	+۷۷۵/۸	+۷۷۸/۸	+۷۷۹	+۷۷۸/۴	+۷۷۶/۹	+۷۷۴/۷	+۷۷۱/۵
	۱۸۰۰/۱	۱۸۰۶/۷	۱۸۰۹	۱۸۱۰/۲	۱۸۱۰/۶	۱۸۱۰/۳	۱۸۰۹
باس ۶۹	۱۰۲۶/۶	۱۰۲۸/۶	۱۰۳۰/۵	۱۰۳۲/۵	۱۰۳۴/۴	۱۰۳۶/۲	۱۰۳۸
بیشتر از ۲٪	+۷۷۹/۴	+۷۸۰/۶	+۷۸۰/۸	+۷۸۰/۲	+۷۷۸/۷	+۷۷۶/۴	+۷۷۳/۳
	۱۸۰۵/۹	۱۸۰۹/۱	۱۸۱۱/۳	۱۸۱۲/۶	۱۸۱۳	۱۸۱۲/۶	۱۸۱۱/۴
باس ۶۹	۱۰۲۶/۶	۱۰۲۸/۲	۱۰۳۰/۲	۱۰۳۲/۱	۱۰۳۴	۱۰۳۵/۹	۱۰۳۷/۷
بیشتر از ۳٪	+۷۸۱/۱	+۷۸۲/۳	+۷۸۲/۵	+۷۸۱/۹	+۷۸۰/۴	+۷۷۸/۱	+۷۵۵/۱
	۱۸۰۷/۳	۱۸۱۰/۵	۱۸۱۲/۷	۱۸۱۴/۱	۱۸۱۴/۴	۱۸۱۴	۱۸۱۲/۷
باس ۶۹	۱۰۲۴/۹	۱۰۲۶/۹	۱۰۲۸/۹	۱۰۳۰/۹	۱۰۳۲/۷	۱۰۳۴/۶	۱۰۳۶/۴
بیشتر از ۴٪	+۷۸۲/۸	+۷۸۴	+۷۸۴/۳	+۷۸۳/۷	+۷۸۲/۱	+۷۷۹/۸	+۷۷۶/۸
	۱۸۰۷/۷	۱۸۱۰/۹	۱۸۱۳/۱	۱۸۱۴/۶	۱۸۱۴/۸	۱۸۱۴/۴	۱۸۱۳/۲
باس ۶۹	۱۰۲۲/۸	۱۰۲۴/۸	۱۰۲۶/۸	۱۰۲۸/۷	۱۰۳۰/۶	۱۰۳۲/۴	۱۰۳۴/۳
بیشتر از ۵٪	+۷۸۴/۵	+۷۸۵/۷	+۷۸۵/۹	+۷۸۵/۳	+۷۸۳/۸	+۷۸۱/۵	+۷۷۸/۵
	۱۸۰۷/۲	۱۸۱۰/۵	۱۸۱۲/۷	۱۸۱۴	۱۸۱۴/۴	۱۸۱۳/۹	۱۸۱۲/۷
باس ۶۹	۱۰۱۹/۸	۱۰۲۱/۸	۱۰۲۳/۸	۱۰۲۵/۷	۱۰۲۷/۶	۱۰۲۹/۵	۱۰۳۱/۳
بیشتر از ۶٪	+۷۸۶/۱	+۷۸۷/۳	+۷۸۷/۶	+۷۸۶/۹	+۷۸۵/۵	+۷۸۳/۲	+۷۸۰/۱
	۱۸۰۵/۹	۱۸۰۹/۱	۱۸۱۱/۴	۱۸۱۲/۷	۱۸۱۳/۱	۱۸۱۲/۶	۱۸۱۱/۴

هـر خانـه از جـدول بـالا شامل سه عدد می‌باشند. عدد اول سود باس ۶۹ و دومی سود باس ۸۹ و سومی مجموع دو سود می‌باشد.

۲-٤-۳- اثر قیود انتقال روی مدل بازار:

تـا ایـنجا اعمال قیود خط انتقال در مثالهای بازار درنظر گرفته نشده است. با شامل شدن این قیود معـاملات بـازار تغیـیر خواهـند کـرد. بـرای بررسی این مسئله، سیستم ۶ باسه، ۴ تولید کننده قبلی را بررسـی مـی‌کنیم با این نکته که خطوط دارای محدودیت حرارتی ۱۰۰MVA می‌باشند. مطابق شکل ۲-۶

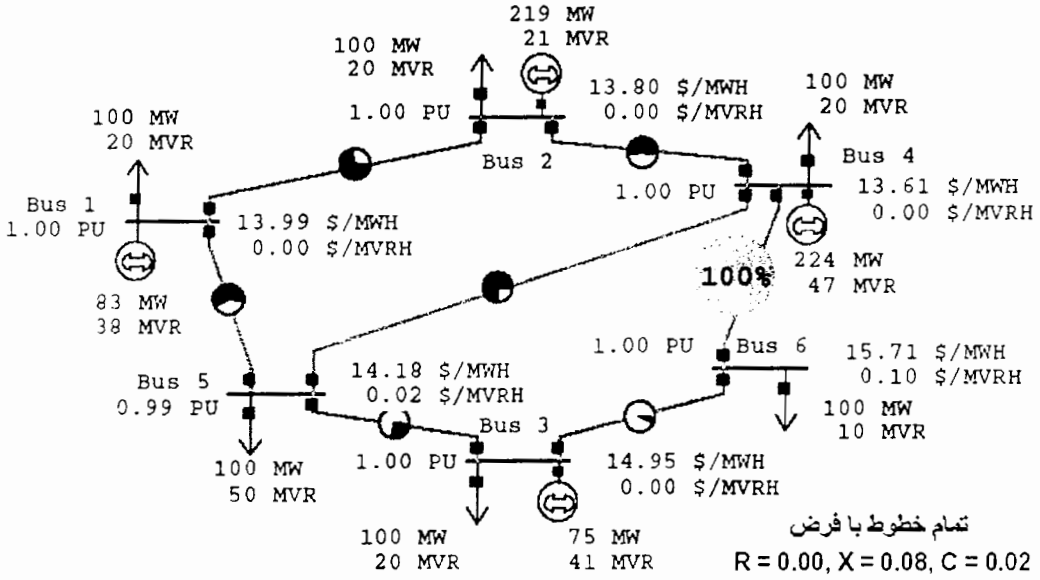


شکل ۲-۶ سیستم ۶ باسه با محدودیت ۱۰۰MVA روی هر خط

شـکل ۲-۶ همـان شکل ۲-۳ می‌باشد نقطه پلاتهایی در شکل ۲-۶ اضافه شده است. این پلاتها درصـد بارگیری هر خط را نشان می‌دهد. شکل ۲-۶ تعدادی از خطوط را نشان می دهد که به سختی بارگیری می‌شود و خط ۴ به ۶ اضافه بار در ۱۱۵٪ محدودیتش را نشان می‌دهد. [۳۱]

ایـن طـرح نشـان مـی‌دهـد که اعمال این محدودیتها مخابره پول و سپس استراتژی‌های پیشنهاد دادن تمام شرکت کنندگان را تغییر خواهد داد.

بـا حل OPF و اعمال قیود خطوط بطوریکه تمام تولید کنندگان هزینه نهایی درستشان را پیشنهاد دهند در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷ حل OPF ۶- باسه با قیود اعمال شده روی هر خط

اعمـال قـیود خـط انـتقال نتیجه در این دارد که دوباره تولید در سیستم مخابره شود. برای برطرف کـردن تـراکم، هزیـنه‌های نهایی باس را تغییر داده است. قابل ذکر است که هزینه های نهایی باس، قیمـتهای نهایـی ناحـیه‌ای یـا LMP نامـیده مـی‌شـود. [۳۲] مقایسه شکل ۲-۶ و شکل ۲-۷ نشان می‌دهد که تولید کننده باس ۳ در مقدار برق بیشتر مخابره شده در صورتیکه تولید کنندگان باسهای ۲ و ۴ مقـدار کمـتر تعییـن شده‌اند. بدلیل اینکه مخابره و قیمتهای لحظه‌ای تغییر داده شده‌اند سودهای دریافـت شـده بوسـیله پیشـنهاد دهـندگان تغییر داده می‌شوند. با جمع‌بندی این نتایج در جدول ۲-۶ داریم.

جدول ۲-٦ تغییرات در مخابره و سودها بخاطر قیود خط

	پیشنهادات نهایی درست بدون اعمال محدودیتها		پیشنهادات نهایی درست با اعمال محدودیتها	
	مخابره MW	**سود**	**مخابره MW**	**سود**
باس ۱	۸۴	۸۵/۳۱	۸۳	۸۲/۳۳
باس ۲	۲۳۰	۵۰۹/۵۷	۲۱۹	۴۵۸/۵۳
باس ۳	۳۹	۲۰/۱۵	۷۵	۷۳/۱۰
باس ۴	۲۴۶	۵۶۸/۵۳	۲۲۴	۴۷۰/۳
	مجموع =۱۱۸۳/۵۶		مجموع=۱۰۸۴/۲۶	

بهترین پاسخ هر تولید کننده به یک پیشنهاد هزینه نهایی درست بوسیله دیگر تولید کنندگان برحسب افزایش درصد پیشنهادات خواهیم دید که سود تولید کننده باس ۳ بدون اینکه پیشنهاد قیمتش را اضافه کند، افزایش می‌یابد و این به دلیل این است که خط انتقال باس ۴ به ۶ در این سیستم دارای بارگیری سنگین است. تولید کننده باس ۳ مقداری از تقاضای باس ۶ را برای کاهش بارگیری خط جبران می‌کند. این باعث می‌شود که تولید کننده در باس ۳ روی مقداری از تقاضای باس ۶ بطور کامل قدرت بازار را در اختیار داشته باشد.

فصل سوم

وارد کردن مدلهای مصرف کننده

به داخل OPF

وارد کردن مدلهای مصرف کننده بداخل یک OPF

OPF در فصل ۲ بدون درنظر گرفتن بار مصرف کننده به عنوان متغیر کنترل توضیح داده شد. مباحث بررسی شده در فصل ۲ نیاز به شامل شدن بار مصرف کننده در OPF را اثبات می‌کند. درنظر نگرفتن مصرف کننده می‌تواند نتیجه در سود فراوان ژنراتورهایی که متقاضی زیاد دارند داشته باشد. در گذشته، بار مصرف کننده به عنوان یک وسیله کنترلی درنظر گرفته نمی‌شد. مگر در مواردی از "قطع بار" که بار به صورت غیرعمدی قطع می‌شود. [۱۸]

برای بیشتر قسمتها درنظر نگرفتن بار به عنوان پارامتر کنترل در OPF بخاطر ناتوانی شرکت برق در کنترل مستقیم و غیرمستقیم بار می‌باشد. ساختارهای تعرفه یکنواخت و تعرفه زمان استفاده هیچ فرصتی را برای کنترل قیمت بارها فراهم نکرده‌اند. از حدود ۱۰ تا ۱۵ سال گذشته یک رشد حرکتی به سمت درنظر گرفتن مصرف کنندگان به مانند تولید کنندگان به عنوان فیدبک قیمت گذاری بازار لحظه‌ای برق داشته اند. یک قیمت لحظه‌ای در حقیقت برای این است که مصرف کنندگان هزینه نهایی برق فراهم شده‌شان را در مناطقشان (منطقه یا باس) بپردازند. در این قبیل بازار، فرض می‌شود بار مصرف کننده و مقدار تولید کننده در پاسخ به تغییرات قیمتها، مطابق با منحنی تقاضا متغیر

باشند. یعنی اینکه، تولید و بار به قیمت گذاری وابسته می‌شوند و به عنوان کنترلهای بالقوه در OPF می‌باشند.

شامل شدن تولید، تولید کنندگان به عنوان کنترل OPF از ابتدای OPF درنظر گرفته شدند. در اینجا مدل مصرف کننده به عنوان پارامتری از بار وابسته به قیمت گذاری در OPF درنظر گرفته می‌شود. در مدل گذشته مرسوم بود که OPF هزینه‌های نهایی تولید کننده را می‌نیمم کند.

۳-۱- حداکثر کردن رفاه اجتماعی با استفاده کردن از OPF

OPF که در فصول قبل بررسی کردیم، تنها هزینه‌های تولید کننده را در بازار درنظر می‌گیرد. برای شامل شدن مصرف کننده در OPF باید مفهوم سود توضیح داده شود. سود مصرف کننده در حقیقت استفاده‌ای است که مصرف کننده از یک محصول می‌برد. از لحاظ ریاضی سود مصرف کننده به عنوان تابع تقاضا با B(d) نوشته می‌شوند، و آن با هزینه تولید کننده قابل مقایسه است. [۱۹]

داریم: $B(d) - C(s)$. برای بهینه سازی رفاه اجتماعی با یک سیستم قدرت تابع هدف برای OPF مطابق فصل ۲-۲ می‌باشد و تنها نیاز به اصلاح برای لحاظ کردن B(d) می‌باشد. این تابع سود مصرف کننده را که با توان اکتیو و راکتیو دریافت می‌کنند، تقویت می‌شود.

$$\underset{x,s,d}{MAX} \quad B(d) - C(S)$$

مشروط به اینکه $h(x,s,d) = \begin{bmatrix} h(x) - S + d \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix} = 0$

$$g(x,s,d)=\begin{bmatrix} S_{\min}-S \\ S-S_{\max} \\ d_{\min}-d \\ d-d_{\max} \\ \overline{g}(x) \end{bmatrix} \le 0 \qquad (۱-۳)$$

برای حل، تابع لاگرانژ را تشکیل می‌دهیم:

$$L=B(d)-C(s)+\lambda_h^T h(x,s,d)+\lambda_h^T g(x,s,d)$$

$$=\begin{bmatrix} B(d)-C(s)+\lambda_h^T(h(x)-S+d)+\lambda_{\overline{h}}^T\left[\overline{h}(x)\right] \\ +\lambda_{gs\min}^T(S_{\min}-S)+\lambda_{gs}^T(S-S_{\max}) \\ +\lambda_{gd\min}^T(d_{\min}-d)+\lambda_{gd\max}^T(d-d_{\max})+\lambda_g^T\overline{g}(x) \end{bmatrix} \qquad (۲-۳)$$

با ماکزیمم کردن مسئله سپس با حل کردن شرایط کان ـ تاکر خواهیم داشت:

$$\frac{\partial L}{\partial X}=\lambda_h^T\frac{\partial h(x,s,d)}{\partial x}+\lambda_g^T\frac{\partial g(x,s,d)}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial S}=-\frac{\partial C(s)}{\partial S}-\tilde{\lambda}_{hs}-\lambda_{gs\min}+\lambda_{gsMAX}=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial d}=\frac{\partial B(d)}{\partial d}+\tilde{\lambda}_{hd}-\lambda_{gd\min}+\lambda_{gd\max}=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda h}=h(x,s,d)=0$$

$$\lambda_g^T g(x,s,d)=0 \qquad (۳-۳)$$

$$g(x,s,d)\le 0 \;\; ;\lambda g\ge 0$$

حل معادلات (۳-۳) به ماکزیمم سازی رفاه اجتماعی برای یک بازار برق می‌پردازد.

۳-۲- مدل کردن مصرف کننده‌ها به عنوان بارهای وابسته به قیمت گذاری

بدلیل اینکه خیلی از افراد با هدف می‌نیمم کردن هزینه‌های تولید در سیستم نیاز به یک الگوریتم پخش بار بهینه دارند، این امر از علاقه‌مندی‌های به ماکزیمم کردن رفاه جامعه بداخل این OPF به ساده‌ترین راه ممکن می‌باشد. برای این منظور اختلاف بین شرایط ضروری در معادله (۳-۲) و معادله (۳-۳) شرح داده می‌شوند. تنها فرق این شرایط:

$$\frac{\partial B(d)}{\partial d} = -\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max} \qquad (۳-۴)$$

بجای اعمال این شرایط، با تعریف تابع D (PD) به عنوان معکوس تابع $\frac{\partial B(d)}{\partial d}$ بدین معنی است که برای تمام P_d و d خواهیم داشت:

$$\frac{\partial B(D(P_d))}{\partial d} = P_d \qquad \text{و} \qquad D(\frac{\partial B(d)}{\partial d}) = d \qquad (۳-۵)$$

بعد از مطالعه معادله (۳-۵) می‌فهمیم که اعمال شرط معادله (۳-۶) معادل با اعمال شرط زیر می‌باشد:

$$d = (\frac{\partial B(d)}{\partial d})^{-1} = D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max}) \qquad (۳-۶)$$

معادله (۳-۶) مدل بار وابسته به قیمت گذاری نامیده می‌شود.

بنابراین، برای حل ماکزیمم کردن رفاه جامعه، به سادگی OPF که در قبل داشتیم انجام می‌گردد، که شرایط می‌نیمم کردن هزینه‌های معادله ۲-۳ به همراه شرط ۳-۶ می‌باشد. برای سادگی بیشتر، هر جا که d ظاهر می‌گردد. داریم:

$$\left[\begin{array}{l} \lambda_h^T \dfrac{\partial h(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max}))}{\partial X} \\ + \lambda_g^T \dfrac{\partial g(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max}))}{\partial X} \end{array}\right] = 0$$

$$
\begin{aligned}
&-\frac{\partial C(s)}{\partial s}-\tilde{\lambda}_{hs}-\lambda_{gs}\min+\lambda_{gs}\max=0\\
&h(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))=0\\
&\lambda_g^T g(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))=0\\
&g(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))\le 0\\
&\lambda g\ge 0
\end{aligned}
\qquad (۷-۳)
$$

۳-۳- مدل کردن تولید کنندگان به عنوان تولید وابسته به قیمت

درنظر گرفتن معادلات ضروری در معادله (۳-۷) نشان داده شده است. S(P) به عنوان معکوس تابع $\frac{\partial C(s)}{\partial S}$ درنظر می‌گیریم.

به عبارت دیگر، $P_S-\frac{\partial C}{\partial S}(S(P_S))=0$

به ازای هر P_S

سپس اعمال شرط $-\frac{\partial C(s)}{\partial_s}-\tilde{\lambda}_{hs}-\lambda_{gs}\min+\lambda_{gs}\max=0$

که همان اعمال شرط $S=S(\tilde{\lambda}_{hs}+\lambda_{gs}\min-\lambda_{gs}\max)$

بنابراین شرایط ضروری نوشته می‌شود به صورت:

$$
\begin{pmatrix}
\lambda_h^T\dfrac{\partial h(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))}{\partial X}\\
+\lambda_g^T\partial(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))\\
\dfrac{\partial X}{}
\end{pmatrix}=0
$$

$$
\begin{aligned}
&S-S(\tilde{\lambda}_{hs}+\lambda_{gs}\min-\lambda_{gs}\max)=0\\
&h(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))=0\\
&\lambda_g^T(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda_{gd}\min-\lambda_{gd}\max))=0\\
&g(x,s,D(-\tilde{\lambda}_{hd}+\lambda gd\,\min-\lambda_{gd}\max))\le 0\\
&\lambda g\ge 0
\end{aligned}
\qquad (۸-۳)
$$

به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \lambda_h^T \dfrac{\partial h(x, S(\tilde{\lambda}_{hs} + \lambda_{gs\min} - \lambda_{gs\max}), D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max}))}{\partial X} \\ + \lambda_g^T \dfrac{\partial g(x, S(\tilde{\lambda}_{hs} + \lambda_{gs\min} - \lambda_{gs\max}), D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max})}{\partial X} \end{pmatrix} = 0$$

$$h(x, S(\tilde{\lambda}_{hs} + \lambda_{gs\min} - \lambda_{gs\max}), D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max})) = 0$$

$$\lambda_g^T g(X, S(\tilde{\lambda}_{hs} + \lambda_{gs\min} - \lambda_{gs\max}), D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max})) = 0$$

$$g(X, S(\tilde{\lambda}_{hs} + \lambda_{gs\min} - \lambda_{gs\max}), D(-\tilde{\lambda}_{hd} + \lambda_{gd\min} - \lambda_{gd\max})) \le 0$$

در این فرمول بهینه سازی رفاه برای یک بازار با پذیرش منحنی‌های تولید و بار وابسته به قیمت از طرف مصرف کنندگان و تولید کنندگان تعیین می‌شوند. نوعاً به منحنی‌های پیشنهادی وابسته به قیمت معروف هستند.

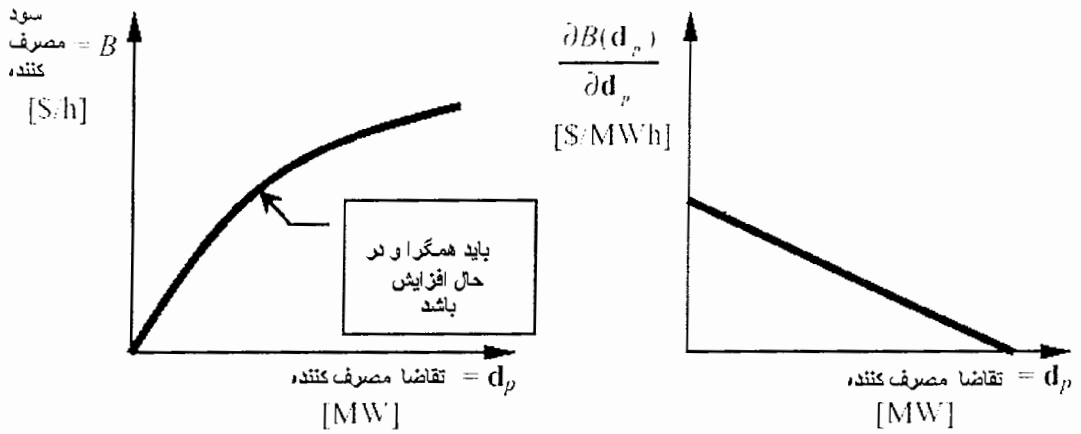
۳-٤- مثالهایی از مدلهای بازیگران (عوامل بازار)

آنچه در بخشهای قبل نشان داده شده‌اند. مدل بار وابسته به قیمت گذاری بخاطر وجود تابع سود مصرف کننده B(d) درنظر گرفته می‌شوند که d شامل توان اکتیو و راکتیو می‌باشد.

$d = \left[d_p^T d_q^T \right] T$ و بطور مشابه ، مدل تولید وابسته به قیمت به عنوان تابع هزینه تولید کننده $C(s)$ درنظر گرفته می‌شود، که (S) هم شامل توان اکتیو و شامل توان راکتیو می‌شود. در این بخش توابع سود و هزینه با توجه به مدلهای تولید و بار وابسته به قیمت گذاری بررسی می‌شوند.

۳-٤-۱- یک بار با توان اکتیو وابسته به قیمت به عنوان مدل یک مصرف کننده

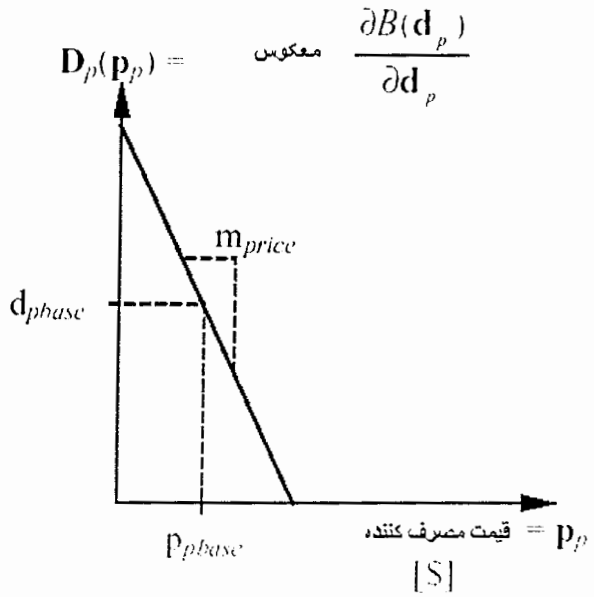
تقاضای مصرف کننده یک تابع از قیمت پرداختی در ناحیه d=D(p) می‌باشد. این تابع تقاضا، معکوس $\frac{\partial\beta(d)}{\partial d}$ مـی‌باشد. برای درک بهتر یک طرح ساده از سود مصرف کننده برای توان حقیقی و مشتقش مطابق شکل (۳-۱) را درنظر می‌گیریم:



شکل ۳-۱ سود مصرف کننده و مشتق سود

در ایـنجا لازم بـه تذکـر مـی‌باشـد کـه تـابع سـود مصرف کننده B، همگراست و فقط به اطمینان از ماکـزیمم کـردن رفاه اجتماعی کمک می‌کند. (بدون درنظر گرفتن واگرایی قیود). اینها فرضیات خوب مـی‌باشـند، و از قرار معلوم، مصرف کننده همیشه با مصرف بیشتر مقدار سود را تقویت می‌کند و حتی اگر مصرف کننده خودش برق را مصرف نکند می‌تواند دوباره برق را در بازار برق بفروشد. [۲۵]

در حـل بهیـنه سـازی از جنـبه رفـاه جامعـه، $\frac{\partial\beta(d)}{\partial d}$ قیمت هر مصرف کننده خواهد بود. بنابراین با معکـوس گرفتـن $\frac{\partial\beta(d)}{\partial d}$ ، تـابع تقاضـا مصـرف کنـنده برای توان حقیقی در شکل ۳-۲ نشان داده خواهند شد.



شکل ۳-۲ تقاضا مصرف کننده برای توان اکتیو.

این تابع تقاضا مصرف کننده در معادله (۳-۶) است که برای ماکزیمم کردن رفاه اجتماعی قبلاً استفاده شده‌اند. نقطه (P_{base}, d_{base}) و شیب m_{price} خط را مشخص خواهند کرد. بنابراین تابع تقاضای مصرف کننده به صورت زیر خواهد شد.

$$D_p(P_p) = (d_{pbase} + M_{price} P_{pbase}) - M_{price} P_p \qquad (۱۰-۳)$$

که M_{price} یک ماتریس قطری با ورودیهای m_{price} می‌باشد. با چشم‌پوشی کردن از توان راکتیو به طور کامل، تابع تقاضا با یک تابع سود مصرف کننده درجه دو برای توان اکتیو مطابقت داده می‌شود:

$$\beta_P(d_p) = d_p^T (M^{-1}{}_{price} d_{pbase} + P_{pbase}) - \frac{1}{2} d_p^T M^{-1}{}_{price} d_p \qquad (۱۱-۳)$$

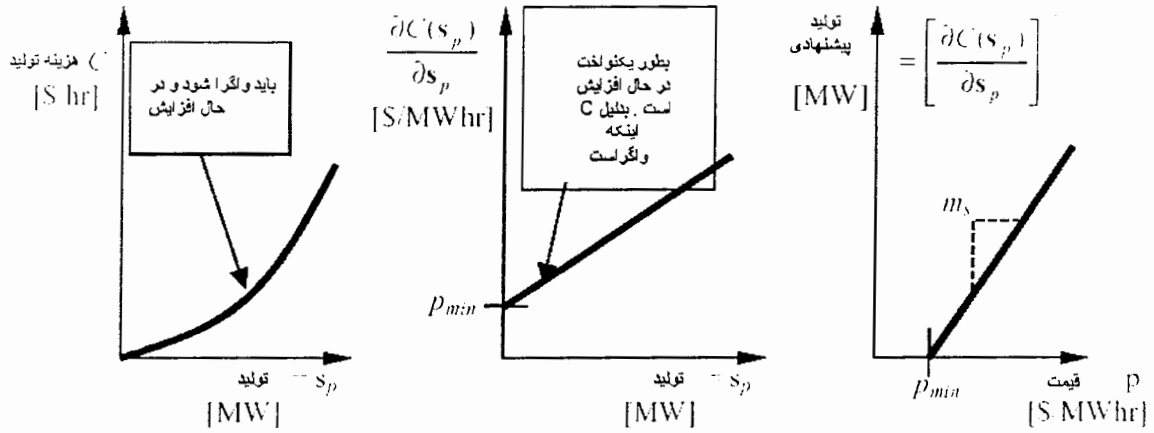
بـرای مـدل کردن، فقط یک بازار برق توان اکتیو بدو بازار برق توان راکتیو را درنظر می‌گیریم و بر سـادگی قیمـت‌گـذاری وابسته به تقاضا برق راکتیو چشم‌پوشی می‌شود و برای بار همیشه یک ضریب توان ثابت درنظر گرفته می‌شوند. در نتیجه برای مدل مصرف کننده در هر ناحیه داریم:

$$d_p = (d_{pbase} + m_{pbase}) - m_p P_p$$

$$d_q = \gamma d_p \qquad (۱۲-۳)$$

۳-٤-۲- یک تولید توان اکتیو وابسته به قیمت به عنوان مدل تولید کننده

برای مدل کردن هزینه‌های تولید کننده، یک تابع درجه دو از تولید برق اکتیو استفاده می‌شود. این یـک روش کلـی در آنالـیز سیستم برق می‌باشد. که به مانند یک مدل درجه دو برای سود نشان داده شـده در معادـله (۳-۱۱) مطابق با بار وابسته به قیمت خطی یک مدل درجه دو برای هزینه مطابق با یک تولید وابسته به قیمت خطی وجود دارد. [۲۰] در شکل ۳-۳ خواهیم داشت:



شکل ۳-۳ از یک هزینه درجه دو تا یک منحنی تولید خطی

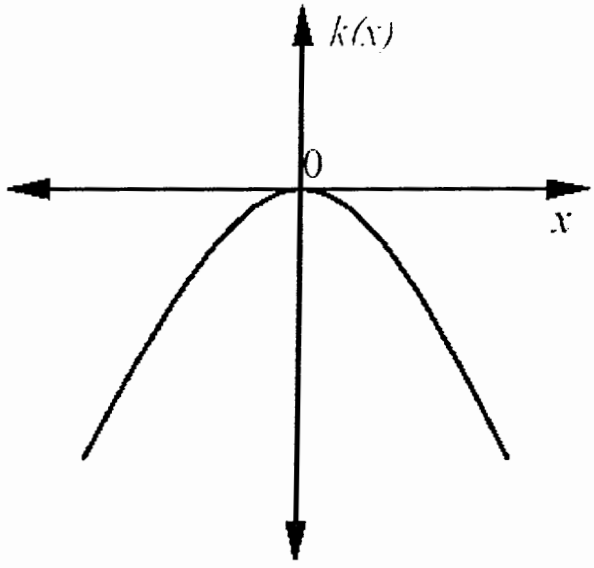
۳-٤-۳- وارد کردن مزایای توان راکتیو به داخل مدل مصرف کننده

تا زمانیکه، خیلی‌ها به یک بازار لحظه‌ای فقط برای توان اکتیو معتقد می‌باشند، اعتقاد به وجود یک بازار لحظه‌ای بـرای تـوان راکتیـو کمـی مشکل مـی‌باشد. امـا قابـل ذکـر مـی‌باشد، وجـود این بازار

لحظه‌ای برای بوجود آمدن یک بازار کارآمد برای تخصیص هزینه‌های بهره‌برداری توان راکتیو تولید، کمک می‌کند، اما آن بر دو تا از پیامدهای موجود در بازار برق راکتیو غلبه نمی‌کند: هزینه سرمایه‌گذاری وسایل توان راکتیو (از قبیل بانکهای خازنی و LTC) در مقایسه با هزینه‌های بهره‌برداری خیلی زیاد هستند و قیمت‌گذاری‌های لحظه‌ای توان راکتیو، بی‌نهایت ناپایدار هستند. برای غلبه بر این پیامدها، تمهیداتی جهت قیمت گذاری صورت گرفته است که به داخل محاسبه سرمایه گذاری برده شده است.

برای تعیین یک بار وابسته به قیمت توان راکتیو منطقی، لزوماً یک تابع سود باید تعیین گردد. تابع سود توان راکتیو نباید از چهارچوب سود توان اکتیو پیروی کند. بدلیل اینکه توان راکتیو بیشتر به عنوان استفاده بهینه از توان اکتیو در اختیار آن می‌باشد. تقاضای توان راکتیو به صورت تابعی از تقاضای برق اکتیو تعریف می‌شود. $d_{qdesired} = f(dp)$

این تقاضای توان راکتیو، تقاضایی است که در سطح بار داده شده بطور طبیعی نیاز خواهد شد و فرض بر این است که اندازه تابع با dp افزایش می‌یابند. اکنون یک تابع همگرا K(x) را درنظر می‌گیریم، که مقدر ماکزیمم در صفر و برابر صفر دارد همانند آنچه در شکل ۳-۴ نشان داده شده‌اند. [۲۲]

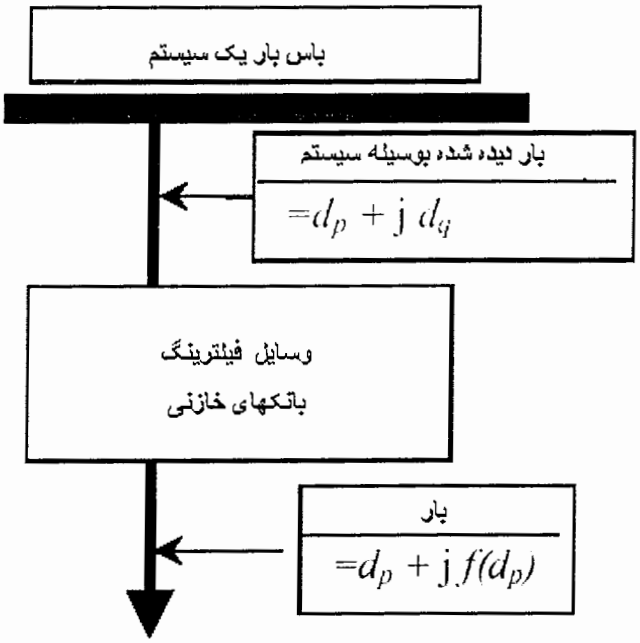


شکل ۳-۴ k(x) همگرا

سپس با استفاده کردن $d_{qdesired} = f(dp)$ به همراه تابع k(x) و ثابت β_{qo} تابع سود توان راکتیو برای یک بار فردی به صورت زیر سازماندهی می‌شوند:

$$\beta_q(d_p, d_q) = \beta_{qo} K(d_q - f(dp)) \qquad (۱۳-۳)$$

به دلیل خصوصیات ویژه k(x) سود یک ماکزیمم مقدار در صفر دارد که زمانیکه تقاضای برق راکتیو با تقاضای برق راکتیو مورد نظر f(dp) معادل باشد به این مقدار می‌رسد و روی دو طرف این مقدار بدلیل اینکه مصرف کننده‌ها باید با وسایل حمایتی الکترونیکی و قدرتی و بانکهای خانی و سلفی خودشان این مقدار را فراهم کنند، سود کاهش می‌یابد. به طور نمونه یک مدل بار کنترل راکتیو همراه با فیلترینگ در شکل ۳-۵ نشان داده شده است:



شکل ۳-۵ یک مدل بار با کنترل راکتیو

در اینجا فرض می‌شود که هزینه‌های بهره‌برداری این وسایل فیلترینگ برابر صفر هستند. در مقایسه با زمانیکه هیچ فیلترینگ صورت نمی‌گیرند.

بـا وارد کـردن معادـله (۳-۱۳) به داخل سود مصرف کننده نهایی نتیجه در یک تابع کلی از هر دو تقاضا، هم اکتیو و هم راکتیو خواهد داشت:

$$B(d_p, d_q) = \sum_{\text{تمام مصرف کنندگان}} (B_p(d_p) + B_q(d_p, d_q)) \qquad (۱۴-۳)$$

تـابع تقاضا مصرف کننده سپس از معادله (۳-۱۴) محاسبه می‌شوند به عنوان مثال، برای تابع سود تـوان اکتیو برای هر مصرف کننده از معادله درجه دوم، $B_p(d_p) = ad_p - bd_p^2$ استفاده می‌شود، ایـن همـان معادله (۳-۱۱) می‌باشد و برای تابع سود توان راکتیو، از $d_{qdesired} = f(d_p) = \gamma d_p$ و $K(x) = -x^2$ اسـتفاده مـی‌شود، این با یک ضریب توان بار ثابت برای $\gamma = \sqrt{1-pf^2}/Pf$ مطابقت دارد و هزیـنه جـبران سـازی تـوان راکتـیو تحـت یک ضریب توان ثابت به صورت درجه دو افزایش می‌یابد، بنابراین تابع سود مصرف کننده برابر است با:

$$\begin{aligned} B(d_p, d_q) &= ad_p - bd_p^2 - \beta_{qo}\left[d_q - \gamma d_p\right]^2 \\ &= ad_p + (-b - \beta_{qo}\gamma^2)d_p^2 - \beta_{qo}d_q^2 + 2\beta_{qo}\gamma d_p d_q \end{aligned} \qquad (۱۵-۳)$$

قـابل توجـه مـی‌باشد که معادله (۳-۱۵) به طور ساده مجموع دو تابع همگرا می‌باشد بنابراین خود معادـله نـیز همگراسـت. در ایـنجا، تعییـن توابع تقاضا مصرف کننده مورد نظر می‌باشد که با محاسبه کـردن معکـوس مشتق تابع تقاضای مصرف کننده بدست می‌آیند. مشتق بر حسب تقاضای برق اکتیو برابر است با:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta(d_p, d_q)}{\partial d_p} &= \frac{\partial \beta_p(d_p)}{\partial d_p} + \frac{\partial \beta_q(d_p, d_q)}{\partial d_p} \\ &= \left[\alpha - 2bd_p\right] + \left[2\beta_{qo}\gamma(-\gamma d_p + d_q\right] \end{aligned} \qquad (۱۶-۳)$$

بـا درنظـر گرفتـن مشتق تابع سود مصرف کننده برحسب توان اکتیو، انتظار می‌رود که این مشتق همیشـه مثبـت باشـد، بدلیل اینکه مقدار سود نهایی از افزایش مصرف پیروی می‌کنند، اما بدلیل مدل

نشـان داده شـده ایـن امر برای همیشه درست نخواهد بود. اگر $\frac{\partial \beta_p(d_p)}{\partial d_p}$ منفی باشد سپس ممکن است $\frac{\partial \beta(d_p,d_q)}{\partial d_p}$ منفی باشد. که این موارد موضوع بحث ما نمی‌باشد. مدل سود برای توان راکتیو بـاید همگـرا و در حـال افـزایش باشد. تابع درجه دو همگرا است اما شروع به کاهش می‌کند وقتی در یـک نقطـه به ماکزیمم رسیده است. بنابراین بار توان اکتیو برای یک مصرف کننده به رنجی که تابع $\alpha - 2bd_p$ مثبـت مـی‌باشـد بـاید محدود گردد. در غیر اینصورت مصرف کننده بوسیله کاهش دادن مصرف برق بدون هیچ هزینه دیگری سود بیشتری می‌گیرد و این مصرف کننده را حساس نمی‌کند تا اینکه برقش را دوباره بفروشد و سود بگیرد.

حال مشتق برحسب تقاضا توان راکتیو را درنظر می‌گیریم:

$$\frac{\partial \beta(d_p,d_q)}{\partial d_q} = 2\beta_{q0}(-d_q + \gamma d_p) \qquad (۱۷-۳)$$

معادلـه (۳-۱۷) نشـان مـی‌دهد که برای افزایش سود، تقاضای توان راکتیو همیشه به سمت سطح مورد نظر از γd_p میل داده می‌شود. برای تعیین تابع تقاضای مصرف کننده، معادلات (۳-۱۶) و (۳-۱۷) را برای قیمت گذاری توان اکتیو و راکتیو مساوی قرار می‌دهیم.

$$\frac{\partial B(d_p,d_q)}{\partial d} = \begin{bmatrix}\alpha \\ 0\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-2b - 2\beta_{qo}\gamma^2 & 2\beta_{qo}\gamma \\ 2\beta_{qo}\gamma & -2\beta_{qo}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d_p \\ d_q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}P_p \\ P_q\end{bmatrix} \qquad (۱۸-۳)$$

برای حل تقاضای اکتیو و راکتیو در دوره‌هایی از قیمت گذاری معکوس تابع تعیین می‌شود:

$$D(P) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2b}(P_p + \gamma P_q) + \frac{\alpha}{2b} \\ \gamma(-\frac{1}{2b}(P_p + \gamma P_q) + \frac{\alpha}{2b}) - \frac{1}{2\beta_{qo}} P_q \end{bmatrix} \qquad (۱۹-۳)$$

توجه : $d_q = \gamma_q \gamma d_p - \frac{1}{2\beta_{qo}} P_q$

بـرای ایـنکه معادله مرسوم طور دیگری نوشته شود (به روش پرمعنی‌تر) معادله (۱۹-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$D(P)=\begin{bmatrix} d_{pbase}+m_p P_{pbase} \\ d_{qbase}+\gamma m_p P_{base} \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} m_p & \gamma_{mp} \\ \gamma_{mp} & (\gamma^2_{mp}+\frac{d_{qbase}}{2\beta_{qo}}) \end{bmatrix}\begin{pmatrix} P_p \\ P_q \end{pmatrix} \qquad (۲۰-۳)$$

برای تعاریف زیر داریم:

$$m_p=\frac{1}{2b} \quad \gamma-\frac{d_{qbase}}{d_{pbase}} \quad \beta_{qo}=\frac{\overline{\beta}_{qo}}{d_{qbase}}$$

اگر یک نقطه تقاضا $d_p=d_{pbase}$ و $d_q=d_{qbase}$ در قیمتهای $P_p=P_{pbase}$ و $P_q=0$ داده شود. معادله (۲۰-۳) به فرم زیر می‌تواند نوشته شود:

$$d_p=(d_{pbase}+m_p P_{pbase})-m_p(P_p+\gamma P_q)$$

$$d_q=\gamma d_p=\frac{d_{qbase}}{2\beta_{qo}P_q} \qquad (۲۱-۳)$$

حال، در هر باس تقاضا یک مقداری از m_p و P_{pbase} و $\overline{B}_{qo}$ و d_{qase} را مشخص می‌کند و

$$D_{busk}\left(\begin{bmatrix} \lambda_{hdp}+\lambda_{gdp}\min-\lambda_{gdp}\max \\ \lambda_{hfq}+\lambda_{gdq}\min-\lambda_{gdq}\max \end{bmatrix}\right)=\begin{bmatrix} d_{pbase}+m_p P_{base} \\ d_{qbase}+\gamma m_p P_{pbase} \end{bmatrix}$$

$$-\begin{bmatrix} m_p & \gamma_{mp} \\ \gamma_{mp} & (\gamma^2_{mp}+\frac{d_{qbase}}{2\overline{\beta}_{qo}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \lambda_{hdp}+\lambda_{gdp}\min-\lambda_{gdp}\max \\ \lambda_{hdq}+\lambda_{gdq}\min-\lambda_{gdq}\max \end{bmatrix} \qquad (۲۲-۳)$$

به داخل شرایط ضروری opf نشان داده شده در معادله (۷-۳) جایگزین می‌شود و این نتیجه در ماکزیمم کردن رفاه اجتماعی برای مدل اقتصادی مصرف کننده دارد.

۳-۵- سازماندهی بارهای توان اکتیو و راکتیو وابسته به قیمت به داخل OPF

در ایـن بخـش بررسـی خواهـیم کرد که چطور تقاضا وابسته به قیمت به داخل شرایط (۳-۷) وارد می‌گردد و در محاسبات الگوریتم روش نیوتن اثر می‌گذارد. اولین نکته‌ای که باید توجه شود این است که بعد از گرفتن مشتق از h و g برحسب X ، هیچ وابستگی به s و d پیدا نمی‌شود (s و d توابعی از x نیستند) تـابع تقاضـا مصـرف کننده فقط تابع تقاضا را از یک مقدار ثابت به مقادیر وابسته به ضرایب لاگرانژ $\lambda_{gd\min}, \lambda_{gd\max}, \tilde{\lambda}_{hd}$ تغییر داده است.

در اسـتفاده کـردن از روش نیوتـن بـرای حل این معادلات غیرخطی، مشتقات معادلات باید برای محاسبه یک ماتریس هسین محاسبه شوند.

بـرای ایـنکه ببینـیم در این ارزیابی چطور تابع تقاضا مصرف کننده در این معادلات اثر می‌گذارند، مشتقات سوم و چهارم معادلات برحسب $\tilde{\lambda}_{hd}, \lambda_{gd\min}, \lambda_{gd\max}$ محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial h(x,s,D)}{\partial \tilde{h}_{hd}} = \frac{\partial \begin{bmatrix} h(x)-s+d \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix}}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \tilde{h}_{hd}} = -\begin{bmatrix} I_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{pQprice} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial h(x,s.,D)}{\partial \lambda_{gd\min}} = \frac{\partial \begin{bmatrix} h(x)-S+d \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix}}{\partial d} \frac{\partial D}{\partial \lambda_{gd\min}} = +\begin{bmatrix} I_{pQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_{pQprice} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial h(x,s.,D)}{\partial \lambda_{gd\max}} = \frac{\partial \begin{bmatrix} h(x)-S+d \\ \bar{h}(x) \end{bmatrix}}{\partial d} \frac{\partial D}{\partial \lambda_{gd\max}} = +\begin{bmatrix} I_{pQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_{pQprice} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial h(x,s.,D)}{\partial \tilde{\lambda}_{hd}} = \frac{\partial \begin{bmatrix} S_{\min}-S \\ S-S_{\max} \\ d_{\min}-d \\ d\bar{g}(x)-d_{\max} \end{bmatrix}}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial \tilde{\lambda}_{hd}} = +\begin{bmatrix} \tilde{I}_{pQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{pQprice} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial g(x,s,D)}{\partial \lambda_{gd\min}} = +\begin{bmatrix} \tilde{I}_{pQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_{pQprice} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial g(x,s,D)}{\partial \lambda_{gd\max}} = +\begin{bmatrix} \tilde{I}_{pQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_{pQprice} \end{bmatrix}$$

بطوریکه متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

ماتریس با ورودیهای قطری (۱) مطابق با متغیرهای تقاضای = I_{po}

مصرف کننده d

ماتریس با ورودیهای قطری (۱) مطابق با متغیرهای تقاضای مصرف کننده d در یک = $\tilde{I}_{pq}$

محدوده یک ماتریس قطری با ورودیهای ۲×۲

مطابق با متغیرهای d

$$M_{paprice} = \begin{bmatrix} m_p & \gamma_{mp} \\ \gamma_{mp} & (\gamma^2_{mp} + \frac{d_{qbase}}{2\bar{\beta}_{qo}} \end{bmatrix}$$

یک ماتریس قطری با ورودیهای ۲×۲

مطابق با متغیرهای $\lambda_{gd\min}$ مرتبط با d

$$M_{pqprice} = \begin{bmatrix} m_p & \gamma_{mp} \\ \gamma_{mp} & (\gamma^2_{mp} + \frac{d_{qbase}}{2\bar{\beta}_{qo}} \end{bmatrix}$$

یک ماتریس قطری با ورودیهای ۲×۲

مطابق با متغیرهای $\lambda_{gd\max}$ مرتبط با d

$$\overline{M}_{pqprice} = \begin{bmatrix} m_p & \gamma_{mp} \\ \gamma_{mp} & (\gamma^2_{mp} + \frac{d_{qbase}}{2\beta_{qo}} \end{bmatrix}$$

نکته کلیدی که دیده می‌شود این است که اثر معادلات وابسته به قیمت اضافی روی ماتریس هسین به ورودیهای قطری ۲×۲ محدود می‌شوند.

ماتریس هسین برای فرمول opf کوپل شده نشان داده شده که باید ساختار زیر را داشته باشند:

$$W = \begin{bmatrix} H & -J^T \\ -J & O \end{bmatrix} \qquad (۳-۲۳)$$

ورودیهـای قطـری کـه بـه هسـین بوسـیله بارهای وابسته به قیمت اضافه می‌شوند ماتریس صفر خواهـد بـود در سـمت راسـت و پاییـن پارتیشـن بدلـیل اینکه تعدادی از ورودیهای غیرقطری در این ماتـریس صـفر اضـافه مـی‌شـوند، ممکـن است پراکندگی خفیفی رخ دهد، هرچند که آن مقدار کمی خواهـد بـود. اگـر فقط شبیه سازی بازار اکتیو را در نظر بگیریم با استفاده کردن بار وابسته به قیمت از معادـله (۳-۱۲) ماتـریس‌های قطری با عناصر قطری جانشین می‌شوند. اگرچه مقدار پراکندگی ممکن اسـت وجـود داشـته باشد اما انتظار می‌رود که بار وابسته به قیمت همگرایی OPF کمک خواهد کرد. [۳۰]

ایـن بدلـیل ایـن اسـت که بارها در سیستم به کاهش خود تمایل خواهند داشت بخاطر افزایش در قیمتهای سیستم.

فصل چهارم

بهینه سازی هر یک از بازیگران در بازار

بهینه سازی هریک از بازیگران در بازار

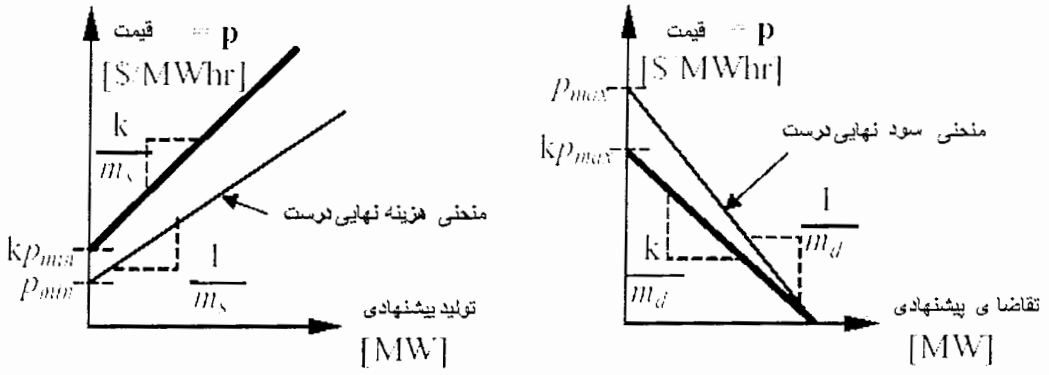
در فصلهای قبل مدل بازار برای یک برق پول کاملاً پوشش داده شد. در مسائل فصل ۲، یک پیشنهاد بهینه انفرادی با حل کردن مدل بازار برای چندین پیشنهاد مختلف بررسی شد و سپس مقایسه نتایج برای تعیین بهترین پیشنهاد بین آنها مورد آزمایش قرار گرفت. این فصل به حل کردن ماکزیمم سازی سود بازیگر تحت مسئله بهینه سازی واحد می‌پردازد.

آن نیاز خواهد داشت به حل کردن ماکزیمم سازی سود با قیودی که در OPF وارد می‌شود. این مسئله بهینه سازی را نشان می‌دهد بطوریکه بازیگران سعی دارند سودشان را تحت قیودی که بوسیله OPF تعیین می‌شوند به حداکثر برسانند. در این فصل یک تکنیک عددی کارآمد رانشان می‌دهد برای اینکه تعیین کند که یک بازیگر چطور باید پیشنهادش را تغییر دهد. در این فصل تعیین تعادل را وقتی تمام بازیگران سعی به ماکزیمم کردن سودشان هستند، اثبات خواهد شد.

٤-١- مسئله ماکزیمم کردن رفاه فردی

بازار بنا شده از فصل ۲، قوانین بازار را برای لیستها تعریف می‌کند تغییر در پیشنهاد دادن به تغییر پارامتر k برای هر مصرف کننده یا تولید کننده مطابق آنچه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است محدود خواهد شد. این پارامتر پیشنهاد را (Bid) در اطراف منحنی نهایی درست عرضه یا تقاضا تغییر

خواهـد داد. منحنـی عرضـه کـه هزیـنه نهایـی درسـت را انعکـاس بصـورت تـابع خطـی $P(s)=\frac{1}{m_s}S+P_{\min}$ تعـریف مـی‌شـود بطوریکه برای مصرف کننده، یک منحنی نهایی درست به صورت $P(d)=-\frac{1}{m_d}d+P_{\max}$ تعریف می‌شود.



شکل ۴-۱ تغییر پیشنهاد برای عرضه و تقاضا

قـابل ذکر است که اصلاح کردن پیشنهاد در این روش در حقیقت همان ضرایب تابع سود و هزینه استفاده شده در OPF بوسیله k می‌باشد:

$$C(s)=k(bs+cs^2) \qquad \text{و} \qquad B(d)=k(bd-cd^2)$$

در ایـنجا فـرض مـی‌گـردد که هر فرد به دنبال ماکزیمم کردن سود خودش می‌باشد. رفاه مصرف کنـنده بـه صـورت مقـدار سود دریافت شده از استفاده کردن برق، منهای هزینه‌های رخ داده شده در خـرید برق تعریف می‌شود. بطور مشابه، سود تولید کننده به صورت مقدار درآمد دریافت شده از فروش بـرق مـنهای هزیـنه تولـید برق می‌باشد. یک فرد می‌خواهد رفاه نهایی همه مصرف کنندگان و تولید کنندگان را ماکزیمم کند برای اینکه آن را کنترل کند.

$$f(s,d,\lambda)=\sum_{i=}[B_i(d_i)-\lambda_i d_i]+\sum_{i=}[-C_i(S_i)+\lambda_i S_i]$$

$$=(-d^T C_d d+B_d^T d)-(\lambda^T d)-(S^T C_S S+B_S^T S)+(\lambda^T S) \qquad (۱-۴)$$

ماتریسهای قطری ضرایب درجه دو برای توابع هزینه عرضه: $C_d \quad C_s$

و توابع سود تقاضا هستند.

بردارهای ضرایب خطی برای توابع هزینه عرضه و: B_s و B_d

توابع سود تقاضا هستند.

توجه کنید که رفاه انفرادی $f(s,d,\lambda)$ یک تابع آشکار از پیشنهاد متغیر با k نمی‌باشد، اما، f شامل λ,d,s می‌باشد که همه آنها توسط OPF حل می‌شوند که توابعی از متغیر k می‌باشند. [۲۸]

فرد به تخمین در مورد اینکه دیگر افراد چه پیشنهادی می‌دهند تمایل دارد هدف فرد ماکزیمم کردن رفاهش می‌باشد با انتخاب پیشنهادی که بهترین پاسخ به دیگر پیشنهادات می‌باشد. در نتیجه، حداکثر کردن رفاه فردی یک مسئله بهینه سازی را طوری تشکیل می‌دهد که فرد رفاهش را ماکزیمم کند مشروط به حل OPF که رفاه اجتماعی را برمبنای تمام پیشنهادات در بازار ماکزیمم می‌کند. داریم:

$$\underset{k}{MAX}\ f(s,d,\lambda)$$

مشروط به اینکه (s,d,λ) تعیین شوند

(۴-۲) بوسیله:

$$\begin{pmatrix} \underset{x,s,d}{MAX} \quad B_{ind}(d,k) - C_{ind}(s,k) + B_{comp}(d) - C_{comp}(S) \\ h(x,s,d) = 0 \\ g\{x,s,d) \le 0 \end{pmatrix}$$

که $B_{ind}(d,k)$ و C_{ind} (s,k) توابع هزینه و سود مصرف کننده‌ها و تولید کننده‌ها می‌باشند که بصورت فردی کنترل می‌شوند.

و $B_{comp}(d)$ و $C_{comp}(S)$ تخمیناتی از توابع سود و هزینه می‌باشند که رقبای انفرادی به عنوان پیشنهادات درنظر می‌گیرند. بنابراین، سود نهایی جامعه که بوسیله مدل OPF بازار استفاده شده برابر خواهد بود با $B(d) = B_{ind}(d,k) + B_{comp}(d)$ و هزینه نهایی جامعه برابر خواهد بود با:

$$C(s,k) = C_{ind}(s,k) + C_{comp}(s)$$

٤-٢- راه حل ماکزیمم سازی رفاه فردی با کاربرد مستقیم شرایط کان ـ تاکر

یک روش برای حل معادله (۴-۲) نمایش زیر مسئله ماکزیمم سازی OPF تحت شرایط ضروری کان ـ تاکر می‌باشد. بنابراین مسئله بهینه سازی ممکن است دوباره به عنوان یک مسئله بهینه سازی استاندارد ساختار بندی شود:

$$\max_{k} \quad f(s,d,\lambda)$$

مشروط به

$$-\frac{\partial c}{\partial s} + \lambda_h^T \frac{\partial h}{\partial s} + \lambda_g^T \frac{\partial g}{\partial s} = 0 \qquad (۴-۳)$$

$$\frac{\partial B}{\partial d} + \lambda_h^T \frac{\partial h}{\partial d} + \lambda_g^T \frac{\partial g}{\partial d} = 0$$

$$+ \lambda_h^T \frac{\partial h}{\partial x} + \lambda_g^T \frac{\partial g}{\partial x} = 0$$

$$h(x,s,d)$$

$$\lambda_g^T g(x,s,d) = 0$$

$$g(x,s,d) \le 0$$

$$\lambda_g^T \ge 0$$

دوباره ساختار بندی کردن مسئله طبق این روش طبیعی است. ازن نقطه نظر عملی ان نتیجه در یک مسئله بهینه سازی بسیار متفاوت تر از یک OPF استاندارد دارد. از نقطه نظر تئوری، نتیجه در یک زیر مجموعه از قیود دارند که بصورت مکمل قرار دارند:

$$\lambda_g^T g(x,s,d) = 0$$
$$g(x,s,d) \le 0$$
$$\lambda_g^T \ge 0$$

قیود مکمل برای اعمال به یک بهینه سازی روتین مشکل هستند، بدلیل اینکه آنها دو متغیر مکمل نیاز دارند برای غیرمنفی و غیرمثبت شدن. بطوریکه در زمان یکسان حاصلشان به صفر برسد. بدلیل این مشکلات یک راه حل تکنیکی به منظور اینکه در آینده توسعه داده شوند مورد نظر می‌باشند.

٤-٣- راه حل ماکزیمم سازی سود فردی با بکارگیری تکرارپذیری

با توجه به آنچه در بخش قبلی بحث شد، دوباره ساختار بندی کردن مسئله بهینه سازی به عنوان مسئله بهینه سازی استاندارد نتیجه در شرایط مکمل دارد که برای اعمال خیلی مشکل هستند. در این بخش یک تکنیک انعطاف پذیر نشان داده شده که کمترین اصلاحات را برای بوجود آوردن OPF برای حل معادله (۴-۲) می‌سازد.

حل مسئله OPF برای یک مجموعه داده شده از پیشنهادات را درنظر بگیرید. سپس از اطلاعات در دسترس از حل OPF، حساسیت سود فردی برای تغییرات در پیشنهادش می‌تواند برای تعیین یک گام ـ نیوتن استفاده شود تا سودها بهبود یابند.

این گام ـ نیوتن به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$K_{new} = K_{old} - \left[\frac{\partial^2 f}{\partial k^2}\right]^{-1}\Bigg|_{kold} \frac{\partial f}{\partial k}\Big|_{kold} \qquad (۴-۴)$$

ارزیابی معادله (۴-۴) نیاز به تعیین $\frac{\partial^2 f}{\partial k^2}$ و $\frac{\partial f}{\partial k}$ دارند.

$$\frac{\partial f}{\partial k} = (-2d^T C_d + B_d^T - \lambda^T)\frac{\partial d}{\partial k}$$

(۵-۴)

$$+ (-2S^T C_S - B_S^T + \lambda^T)\frac{\partial S}{\partial k} + \left[\frac{\partial \lambda}{\partial k}\right]^T (s-d)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial K^2} = -2\left(\left[\frac{\partial d}{\partial k}\right]^T C_d + \left[\frac{\partial \lambda}{\partial k}\right]^T\right)\frac{\partial d}{\partial k}$$

$$+2\left(-\left[\frac{\partial S}{\partial k}\right]^T Cs + \left[\frac{\partial \lambda}{\partial k}\right]^T\right)\frac{\partial S}{\partial K}$$

(۶- ۴)

$$+\left(-2d^T C_d + B_d^T - \lambda^T\right)\frac{\partial^2 d}{\partial k^2}$$

$$+(-2S^T C_S - B_S^T + \lambda^T)\frac{\partial^2 S}{\partial k^2} + \left[\frac{\partial^2 \lambda}{\partial k^2}\right]^T (s-d)$$

ارزیابی معادلات (۴-۵) و (۴-۶) نیاز به تعیین $\frac{\partial d}{\partial k}$ و $\frac{\partial s}{\partial k}$ و $\frac{\partial \lambda}{\partial k}$ و $\frac{\partial^2 d}{\partial k^2}$ و $\frac{\partial^2 s}{\partial k^2}$ و $\frac{\partial^2 \lambda}{\partial k^2}$ دارند. بدلیل اینکه λ, d, s متغیرهای حل OPFهستند. این مشتقات مستقیماً می‌توانند از متغیرهای در دسترس از حل OPF تعیین شوند. در یک OPF پایه ـ نیوتن، یک تکرارپذیری از نامعادلات $\Delta Z = -H^{-1}(\nabla L)$ انجام می‌شود تا $\Delta Z = 0$ گردد. به طوریکه $Z = \left[S^T \quad d^T \quad X^T \quad \lambda^t\right]^T$ بنابراین مشتقات λ, d, s مشتق گرفتن این نامعادله می‌توانند پیدا شوند.

داریم:

$$\frac{\partial Z}{\partial k} = -H^{-1}\frac{\partial H}{\partial K}\Delta Z - H^{-1}\frac{\partial \nabla L}{\partial K} \qquad (۷-۴)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial k^2} = -H^{-1}\frac{\partial^2 H}{\partial k^2}\Delta Z - H^{-1}\frac{\partial^2 \nabla L}{\partial k^2}$$

$$+2H^{-1}\frac{\partial H}{\partial K}H^{-1}\nabla Z + 2H^{-1}\frac{\partial H}{\partial K}H^{-1}\frac{\partial \nabla L}{\partial K} \qquad (۸-۴)$$

ایـن معـادلات مـی‌توانند با دوباره خوانی در یک راه حل OPF $\Delta Z = 0$ ساده شوند. بدلیل ساختار مسـئله مـان، k تنها به عنوان یک تابع خطی در هر دو گرادیان و هسین می‌باشند، بنابراین $\frac{\partial^2 H}{\partial K^2}$ و $\frac{\partial^2 \nabla L}{\partial K^2} = 0$ بنابراین، معادلات (۴-۷) و (۴-۸) ساده می‌شوند به صورت:

$$\frac{\partial Z}{\partial K} = -H^{-1}\frac{\partial \nabla L}{\partial K} \qquad (۹-۴)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial K^2} = ZH^{-1}\frac{\partial H}{\partial K}H^{-1}\frac{\partial \nabla L}{\partial K} = -2H^{-1}\frac{\partial H}{\partial K}\frac{\partial Z}{\partial K} \qquad (۱۰-۴)$$

تکنـیک توسـعه داده شـده محاسـبه را بهـبود می‌دهد بدلیل اینکه هر دو $\frac{\partial \nabla L}{\partial K}$ و $\frac{\partial H}{\partial K}$ بینهایت پراکنده هستند.

مشـتق جزئـی $\frac{\partial \nabla L}{\partial K}$ یـک ماتـریس است که در هر ستون فقط یک ورودی دارد، بطوریکه $\frac{\partial H}{\partial K}$ یـک پارامـتر سـه بعدی است که هر بعدش مرتبط هستند با K . بدلیل پراکندگی زیادی که وجود دارد. زمـان محاسـبه بـرای محاسـبه کردن این مشتقات بینهایت کوچک هستند. با استفاده کردن معـادلات (۴-۹) و (۴-۱۰) و جایگزینی به داخل معادلات ۴-۵ و ۴-۶ ، و معادله (۴-۴) برای اجرا یـک گـام ـ نیوتـن اسـتفاده می‌شود که سود انفرادی را بهبود می‌بخشد. الگوریتم زیر برای تعیین بهترین استراتژی پیشنهاد دادن انفرادی استفاده می‌شود.

الگوریتم: ماکزیمم سازی سود فردی مقدماتی

۱ـ انتخاب یک حدس اولیه برای بردار k .

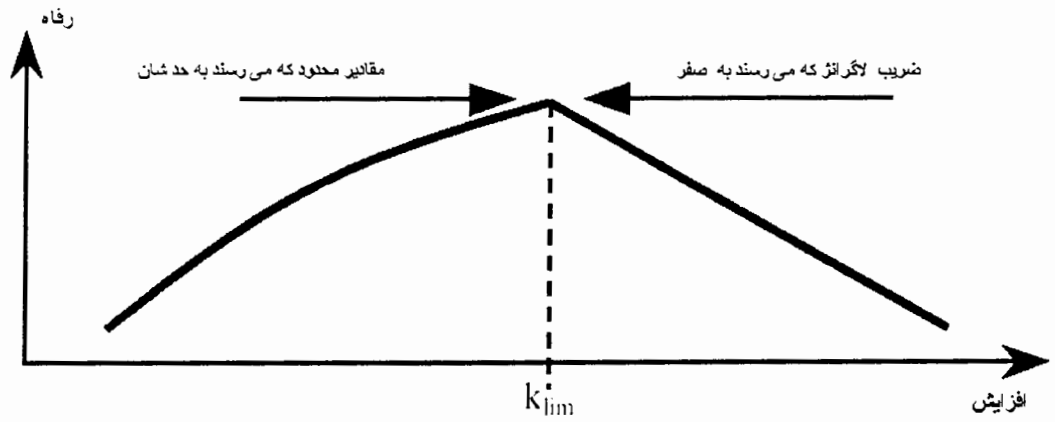
۲ـ حل ماکزیمم کردن سود اجتماعی که فرد فرض می‌کند که دیگر افراد پیشنهاداتشان را می‌دهند و فرد بردار K خودش را حدس می‌زند.

۳ـ استفاده از معادله (۴-۴) برای تعیین یک گام مستقیم برای بردار k .

۴ـ اگر $\|K_{new} - K_{old}\|$ کمتر از مقدار تولرانس باشد، توقف در غیر اینصورت برو به گام ۲ .

این الگوریتم تا زمانیکه نامعادلات الزامی الگوریتم OPF تغییر داده نشوند موثر خواهد بود. تغییرات در نامعادلات ضروری نتیجه در ادامه ندادن در $\frac{\partial f}{\partial k}$ دارد. بدین معنی که تابع f جدا می‌شود، یک تغییر در نابرابری اجباری، می‌تواند از دیگر اطلاعات در دسترس آشکار شود. از یک طرف نقطه جدا شدنی، این مقدار بوسیله نامعادله برای اینکه برسد به حدش و از طرف دیگر نقطه، ضریب لاگرانژ نامعادله به صفر برسد.

که در شکل ۴-۲ نشان داده می‌شود.



شکل ٤-۲ تغییر نابرابری اجباری در یک بعد

اگر نقطه یک پارامتر پیشنهاد و یک قید نابرابری درنظر گرفته شوند، الگوریتم ماکزیمم سازی رفاه فـردی مقدماتـی بسـادگی مـی‌توانسـت اصلاح شود بطوریکه یک ضریب گام مستقیم تعیین شده بوسـیله معادـله (۴-۴) را کاهش می‌دهد اگر این گام مستقیم از نقطه جدا شدنی عبور کند. ضریب سـپس مسـتقیماً جـواب را بـه نقطه جدا شدنی خواهد آورد. برای بسط دادن این نظریه ساده برای مـوارد کلـی‌تر، ضرایب پارامترهای پیشنهاد و ضرایب قیود و نابرابری که به عنوان منابع گام نیوتن در معادله (۴-۴) شرح داده شده‌اند درنظر گرفته می‌شوند. روش نیوتن برای مساوی صفر قرار دادن یـک تابع حل می‌شوند با تقریب زدن آن به عنوان یک تابع خطی و استفاده کردن از مقدار موجود و مشـتق آن، در یـک مسـئله ماکزیمم سازی، مشتق تابع هدف با صفر قطع داده می‌شود. بنابراین وقتی از روش نیوتن استفاده می‌شود تابع هدف بصورت سریهای تیلور درجه ۲ مدل می‌گردند:

(۱۱-۴)

$$f(K_{new}) = f(K_{old} + \Delta K) \approx f(k_{old}) + (\Delta k)^t \frac{\partial f}{\partial k}\Big| k_{old} + \frac{1}{2}(\Delta k)^t \frac{\partial^2 f}{\partial k^2}\Big|_{k_{old}} (\Delta k)$$

معادـله (۴-۴) سـپس بـا حـل کردن $\frac{\partial f(k_{old} + \Delta k)}{\partial \Delta k} = 0$ مشتق گرفته می‌شود. برای مقایسه با شـکل (۴-۲) ، Δk ای کـه معادـله (۴-۱۱) را بدون درنظر گرفتن قیود مرزی ماکزیمم کند درنظر گرفته می‌شود. این امر با حل کردن معادله (۴-۱۲) تعیین می‌شود.

$$\max_K f(K_{old}) + (\Delta k)^T \frac{\partial f}{\partial k}\Big| k_{old} + \frac{1}{2}(\Delta k)^T \frac{\partial^2 f}{\partial k^2}(\Delta k)$$

(۱۲-۴) (قیود غیراجباری) $(\Delta k)^T \frac{\partial \lambda_{gm}}{\partial k} - \lambda_{gm} \le 0 \quad \forall_{gm} = 0$ مشروط به اینکه

(قیود اجباری) $-(\Delta k)^T \frac{\partial \lambda_{gm}}{\partial k} - \lambda_{gm} \le 0 \quad \forall g_m = 0$

قابل توجه است که $\frac{\partial^2 f}{\partial k^2}$ منفی تعریف می‌شوند.

و تنها مشتقی که در معادله(۴-۱۲) بحث نشده است $\frac{\partial g_m}{\partial k}$ می‌باشد. این مشتق را می‌توان با استفاده کردن قانون زنجیری محاسبه نمود.

$$\frac{\partial g_m}{\partial k} = \frac{\partial d}{\partial k}\frac{\partial g_m}{\partial d} + \frac{\partial s}{\partial k}\frac{\partial g_m}{\partial s} + \frac{\partial x}{\partial k}\frac{\partial g_m}{\partial x} \qquad (۴-۱۳)$$

اضافه کردن مسئله ماکزیمم سازی دیگر به عنوان حلقه خارجی برای مسئله ممکن است مشکل بنظر برسند. اما اینطور نمی‌باشد بدلیل اینکه معادله (۴-۱۲) یک مسئله ماکزیمم سازی مقید شده بسیار ساده می‌باشد.[۳۱]

آن یک تابع هدف درجه دو با قیود نامعادله خطی می‌باشد. در حقیقت یک مسئله برنامه نویسی درجه دو می‌باشد. روشهای متفاوت زیادی برای حل این مسئله موجود می‌باشند که به سرعت می‌توانند با استفاده از معادله (۴-۱۲) در زمان سریعتر از حل OPF صورت بگیرند. بطوریکه زمان حل به تعداد تکرارپذیریهای OPF نیاز شده وابسته می‌باشد. با این بسط الگوریتم ماکزیمم سازی رفاه فردی اصلاح می‌شوند.

الگوریتم: ماکزیمم سازی رفاه فردی

۱ـ انتخاب یک حدس مقدماتی برای بردار k .

۲ـ حل ماکزیمم کردن OPF سود اجتماعی که داده می‌شود با فرض اینکه دیگر افراد پیشنهاداتشان را ارائه دهند و هر فرد بردار K خودش را حدس بزند.

۳ـ استفاده از معادله (۴-۱۲) برای تعیین یک گام درست برای بردار k .

۴ـ اگر $\|K_{new} - K_{old}\|$ کمتر از مقدار تولرانس باشد، متوقف در غیر اینصورت برگردد به ۲ .

٤-٤ پیدا کردن یک نقطه تعادل با استفاده کردن ماکزیمم سازی رفاه فردی

تـا زمانیکه الگوریتم ماکزیمم سازی رفاه فردی مورد استفاده شرکت کنندگان بازار است، استفاده از یـک الگوریـتم بـه عنوان مدل عملکرد فردی مطالعه در مورد رفتار بازار را قادر می‌سازند. برای مثال، تعیین نقاط تعادل اقتصادی از قبیل مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

تعریف : الگوریتم تعادل

ـ یک فرد رفتار طرف مقابلش را درنظر می‌گیرد.

ـ فرد تعیین می‌کند که بهترین پاسخش به رفتارهای طرف مقابلش ادامه دادن به رفتار حالش می‌باشد.

ـ این برای تمام افراد در بازار درست می‌باشد.

برای تعیین یک نقطه تعادل، ماکزیمم سازی رفاه فردی می‌تواند بصورت تکرارپذیری بوسیله تمام افرادش حل شود تا به یک نقطه برسد که بهترین پاسخ انفرادی برای ادامه به همان بردار پیشنهادات باشد.

الگوریتم: پیدا کردن نقطه تعادل

ـ شروع تمام افراد با یک بردار پیشنهادی $k = ۱$.

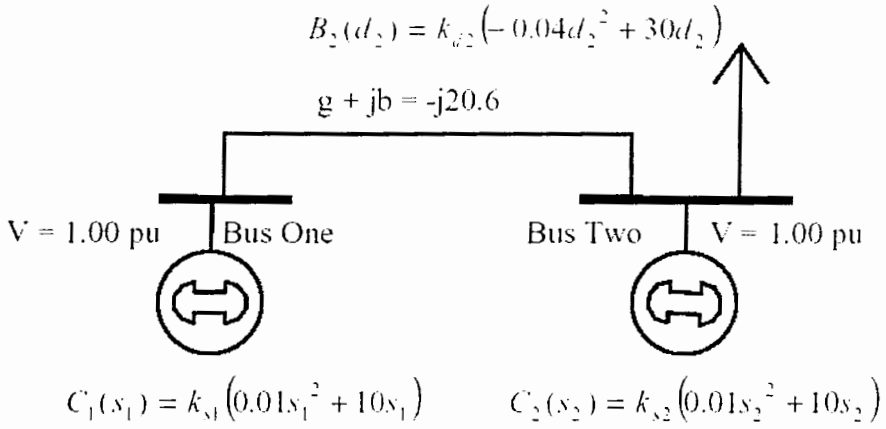
ـ راه اندازی الگوریتم ماکزیمم سازی رفاه فردی برای هر فرد به روز کردن تمام پیشنهادات.

ـ ادامه دادن به این راه اندازی تا اینکه تمام افراد تغییر دادن پیشنهاداتشان را متوقف کنند. سه موضوع باید با توجه به پیدا کردن الگوریتم تعادل درنظر گرفته شود:

وجود و یکتا بودن تعادل، نیازهای محاسباتی و همگرایی الگوریتم.

٤-٤-١- یک بازار نمونه بدون هیچ قیود همراه با رقابت دو تولید کننده

برای اثبات پیدا کردن الگوریتم تعادل، یک مثال ۲ باسه با دو تولید کننده و یک مصرف کننده در شکل ۴-۳ نشان داده شده اند.



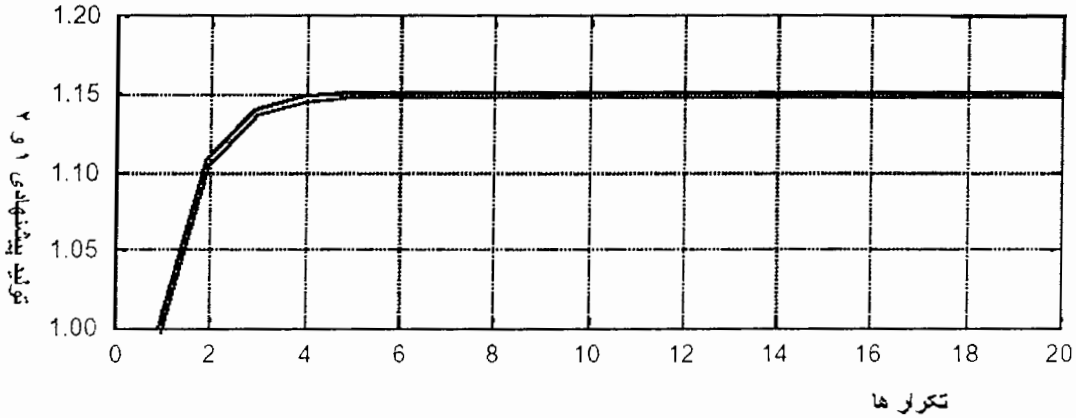
شکل ٤-۳ سیستم دو باسه: دو تولید کننده و یک مصرف کننده

برای این مثال تنها رفتار پیشنهادی تولید کننده درنظر گرفته می‌شود. بنابراین فرض می‌کنیم مصرف کننده در این بازار همیشه برحسب تابع سود درستش ۱= $Kd2$ پیشنهاد می‌دهد. نگه‌داری در تقاضا وابسته به قیمت.

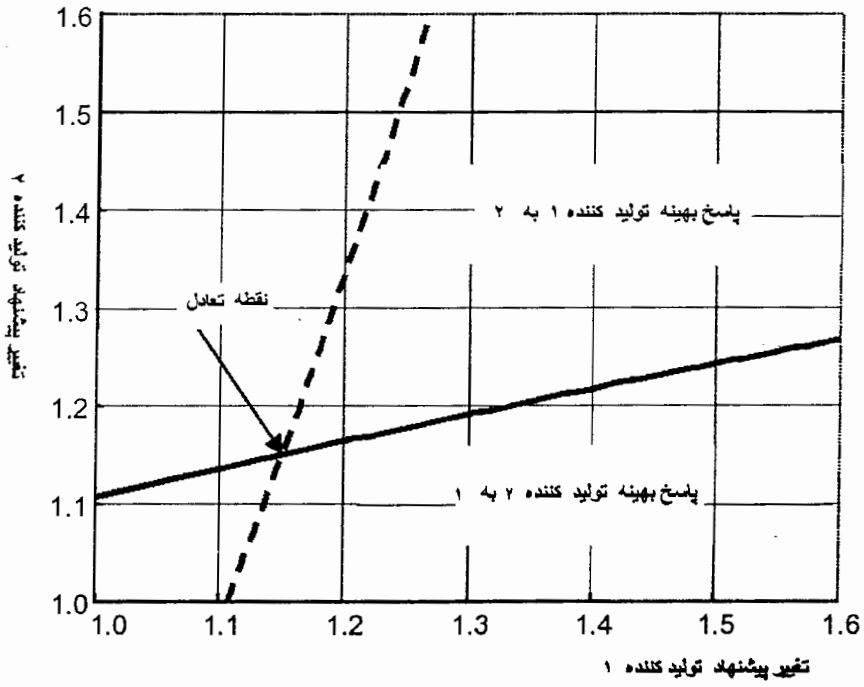
قابل توجه می‌باشد چرا که در غیر اینصورت وقتی که محدودیت خط انتقال به سیستم اضافه گردد. تولید کننده (۲) قسمتی از بار ثابت را بدون هیچ رقابتی در اختیار خواهد داشت، این امر برای تولید کننده (۲) منجر به پیشنهاد $KS2$ و معادل با بی‌نهایت کردن نتیجه در قیمت گذاری نامحدود و سود نامحدود خواهد داشت. این برابر با همان نتیجه نامعقول پیدا شده در شکل (۲-۸) برای سیستم ۶ باسه قدیم خواهد بود.

پیدا کردن الگوریتم تعادل نتیجه در پیشنهاد دادن هر دو تولید کننده ۱/۱۵۰۲ = $K_{s1} = Ks2$ خواهد داشت.

ایـن یـک اسـتراتژی خـالص تعـادل مـی‌باشد بدلیل اینکه توازن در نقطه‌ای است که هر پیشنهاد دهـنده با همان بردار K ادامه می‌دهد. شکل (۴-۴) پیشرفت الگوریتم پیشنهادی به سمت نقطه تعادل را نشـان مـی‌دهـد. شکل (۴-۵) یک راه حل کامل برای بهترین پاسخ بهینه هر تولید کننده نسبت به پیشنهاد یکدیگر درنظر گرفته می‌شوند و نقطه‌ای که دو منحنی در شکل (۴-۵) به هم می‌رسند نقطه تعادل می‌باشد.



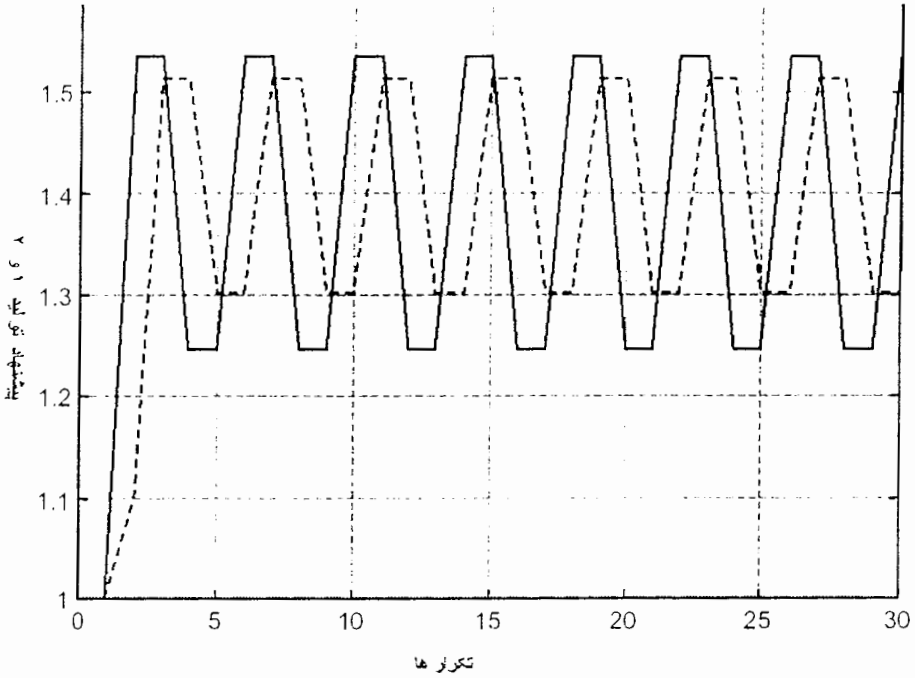
شکل ٤-٤ پیشرفت دو تولید کننده با هیچ محدودیت خطی



شکل ٤-٥ پاسخهای بهینه تولید کنندگان با هیچ محدودیت

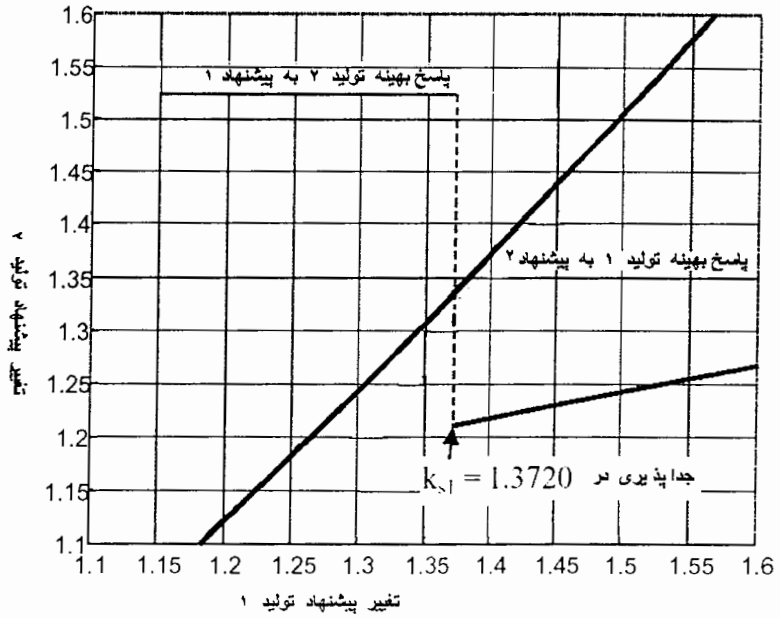
٤-٤-٢- بازار نمونه با قیود ـ رقابت دو تولید کننده

بـرای اثـبات بیشـتر الگوریـتم، سیستم شکل (۴-۱۳) را دوباره اما با یکسری قیود همراه با سیستم درنظر می‌گیریم، محدودیت فلوی روی خط انتقال تا ۸۰MVA می‌باشد.



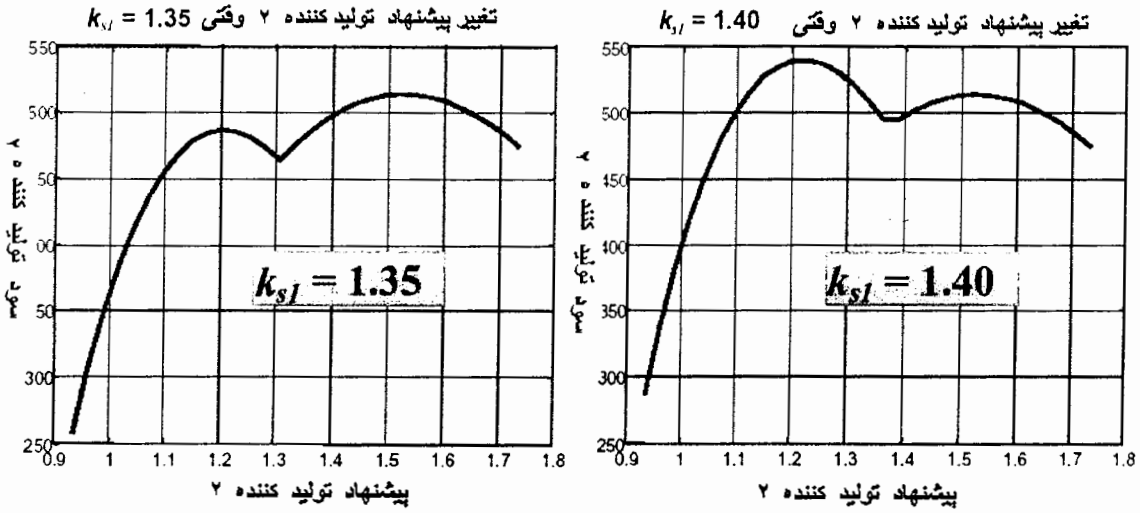
شکل ٤-٦ پیشرفت پیشنهادی دو تولید کننده با محدودیت خط ۸۰ MVA

این نتیجه در یک نقطه به تعادل نمی‌رسد. برای اینکه بهتر نشان دهیم که هیچ نقطه تعادلی وجود نـدارد. منحنـی‌های پاسخ بهینه روی تمام پیشنهادات امکان‌پذیر به وسیله هر فرد تهیه شده‌اند. که در شکل ۴-۷ نشان داده می‌شوند.[۲۵]



شکل ٤-۷ پاسخهای بهینه دو تولید کننده با محدودیت خط ۸۰ MVA

شکل ۴-۷ منحنی‌های پاسخ بهینه را برای دو تولید کننده نشان می‌دهد و دو تولید کننده هرگز تقاطع ندارند. برای تعیین اینکه چه علتی برای این بریدگی وجود دارند منحنی‌های سود تولید کننده ۲ را برحسب منحنی‌های پیشنهادی بوجود می‌آورند. که در شکل (۴-۸) نشان داده شده‌اند.[۲۶]



شکل ٤-۸ سود تولید کننده ۲ برحسب پیشنهاد روی هر دو طرف نقطه بریدگی

شکل ۴-۸ نشان می‌دهد که تابع سود برای تولید کننده ۲ غیر همگرا است با داشتن دو نقطه ماکزیمم محلی زمانیکه تولید کننده ۱ Ks_1 =۱/۳۷۲۰ را پیشنهاد می‌دهد این نقاط ماکزیمم محلی اندازه یکسان دارند و تولید کننده ۲ هیچ تقدمی در پیشنهاد دادن KS_2 =۱/۵۲۵ یا KS_2 =۱/۲۴۶ ندارد. روی هر طرف این نقطه پاسخ بهینه به طرف دیگر نقطه ماکزیمم محلی پرش می‌کند و این امر بدلیل این است که هیچ نقطه تعادل خالصی وجود ندارد. بنابراین دیده می‌شود که با وارد کردن یک قید خط انتقال، حتی در یک سیستم ۲ باسه نقطه تعادل حذف می‌گردد. این بدان معنی نیست که هیچ نقطه تعادلی موجود نمی‌باشد، بلکه این بدلیل وجود الگوریتم می‌باشد که بطور واحد درنظر گرفته شده است حال اگر از الگوریتمهای ترکیبی استفاده شوند پیدا کردن تعادل امکان‌پذیر می‌شود.[۲۷]

تعریف : الگوریتم ترکیبی

یک فرد چندین الگوریتم واحد را انتخاب می‌کند و یک احتمال را برای هر کدام درنظر می‌گیرد. سپس فرد الگوریتم واحد را برطبق احتمالات سهمشان می‌پذیرد. با دنبال کردن الگوریتم ترکیبی تعادل در مثال قبلی، یک تعادل برای مثال قبلی با درنظر گرفتن شکل (۴-۷) بدست می‌آید، وقتی تولید کننده ۱ ، Ks_1 =۱/۳۷۲ را پیشنهاد می‌دهد، تولید کننده ۲ ، هیچ تقدمی بین پیشنهاد دادن ۲۴۶ /۱= Ks_2 یا ۱/۵۲۵ = Ks_2 وجود ندارد. بنابراین پیشنهاد دادن با الگوریتم ترکیبی به طوریکه هر الگوریتم یک احتمال درنظر گرفته شود یک پاسخ بهینه منظور می‌گردد. یک الگوریتم ترکیبی برای این مثال ویژه پیدا می‌شوند.

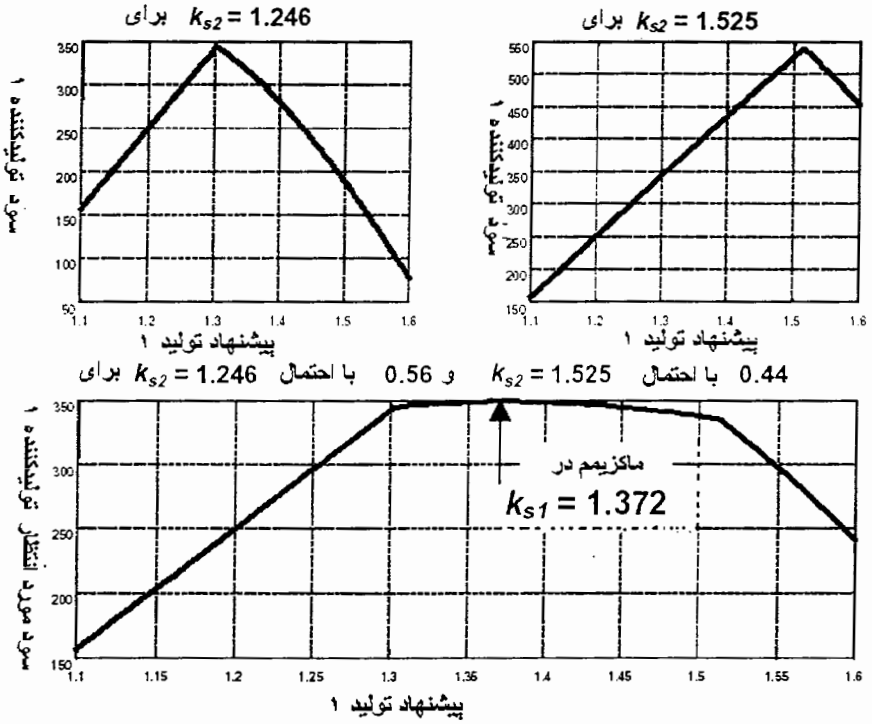
نقطه تعادل با الگوریتم ترکیبی در این مورد با محدودیت خط:

تولید کننده ۱ : پیشنهاد ۱/۳۷۲= KS_1 با احتمال (۱)

تولید کننده ۲: پیشنهاد ۱/۲۴۶ = Ks_2 با احتمال ۰/۵۶

تولید کننده ۲ : پیشنهاد ۱/۵۲۵ = Ks_2 با احتمال ۰/۴۴

زمانیکه تولید کننده ۲ این دو استراتژی را پیشنهاد می‌دهد با احتمالاتی که نشان داده شده، منحنی سود برحسب پیشنهاد برای تولید کننده ۱ در شکل ۴-۹ نشان داده شده‌اند.



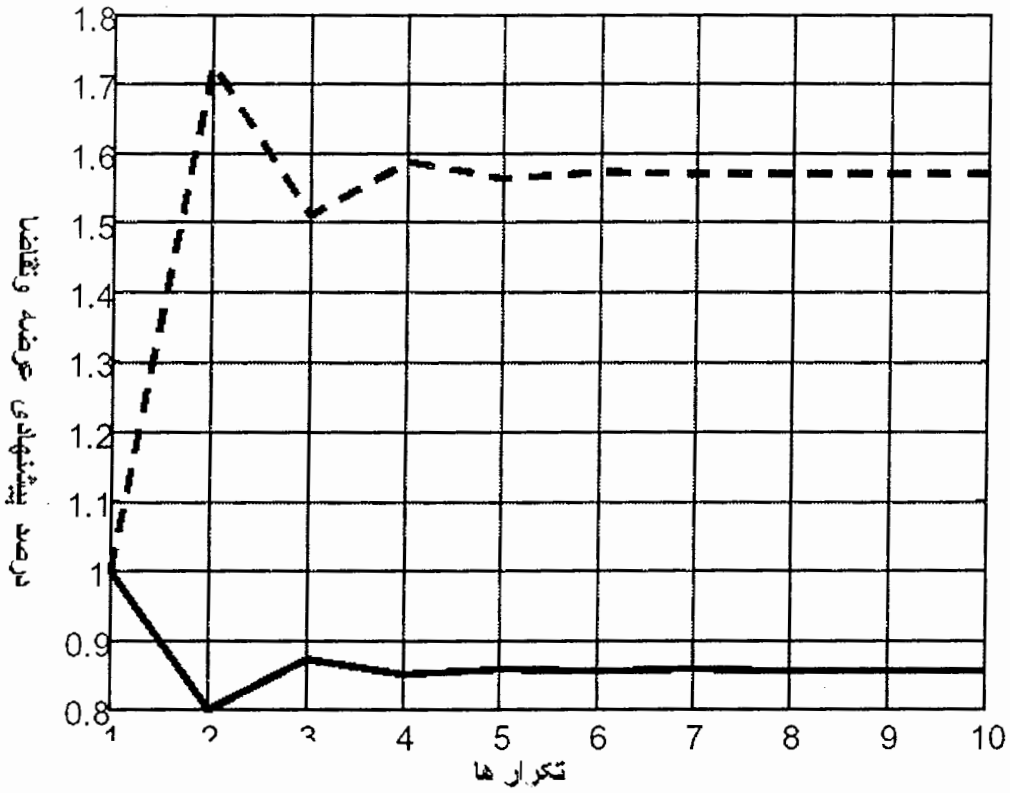
شکل ٤-۹ پیشنهاداتی بهینه برای تولید کننده ۱ در پاسخ به الگوریتم ترکیبی تولید کننده ۲

استراتژیهای ترکیبی عمومیت ندارند اما یک توسعه طبیعی از کاری می‌باشد که در اینجا نشان داده شده اند.

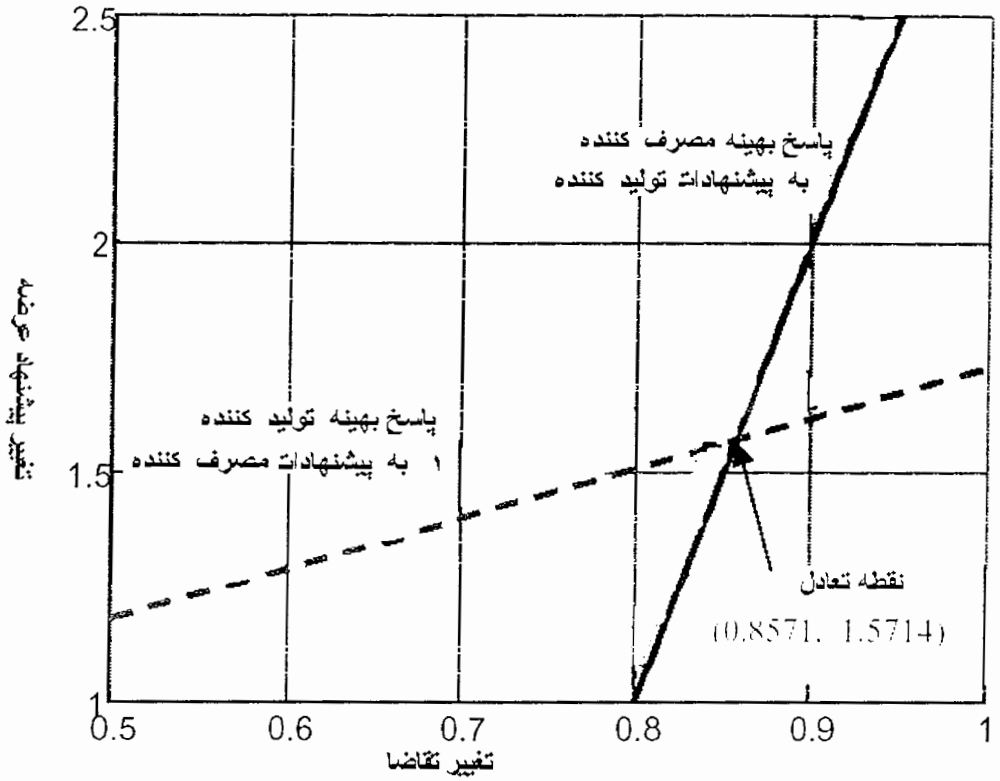
٤-٤-۳- بازار نمونه بدون قیود ـ رقابت بین مصرف کننده و تولید کننده

در بخشهای ۴-۴-۱ و ۴-۴-۲ تنها رقابت تولید کننده با تولید کننده در نظر گرفته شدند. حال همان سیستم ۲ باسه شکل ۴-۳ را دوباره درنظر می‌گیریم. اما فرض می‌کنیم که تولید کننده ۲ در

بـازار شـرکت نمـی‌کـند و فقـط تولـید کنـنده ۱ و مصرف کننده با تغییر پیشنهاداتشان در بازار رقابت مـی‌کنـند. پـیدا کردن الگوریتم تعادل نتیجه در پیشنهادات KS_1 =۱/۵۷۱۴ و Kd_2 =۰/۸۵۷ دارد. به مانـند رقابت کردن دو تولید کننده بدون قیود خطوط انتقال نقطه تعادل برای یک استراژی با الگوریتم واحـد پـیدا مـی‌شـود. شـکل ۴-۱۰ یـک راه حـل کامل برای مسئله با پاسخ بهینه هر شرکت کننده برحسـب پیشنهاد دیگری را نشان می‌دهد. نقطه‌ای که در شکل (۴-۱۱) برخورد می‌کنند، نقطه تعادل می‌باشد.



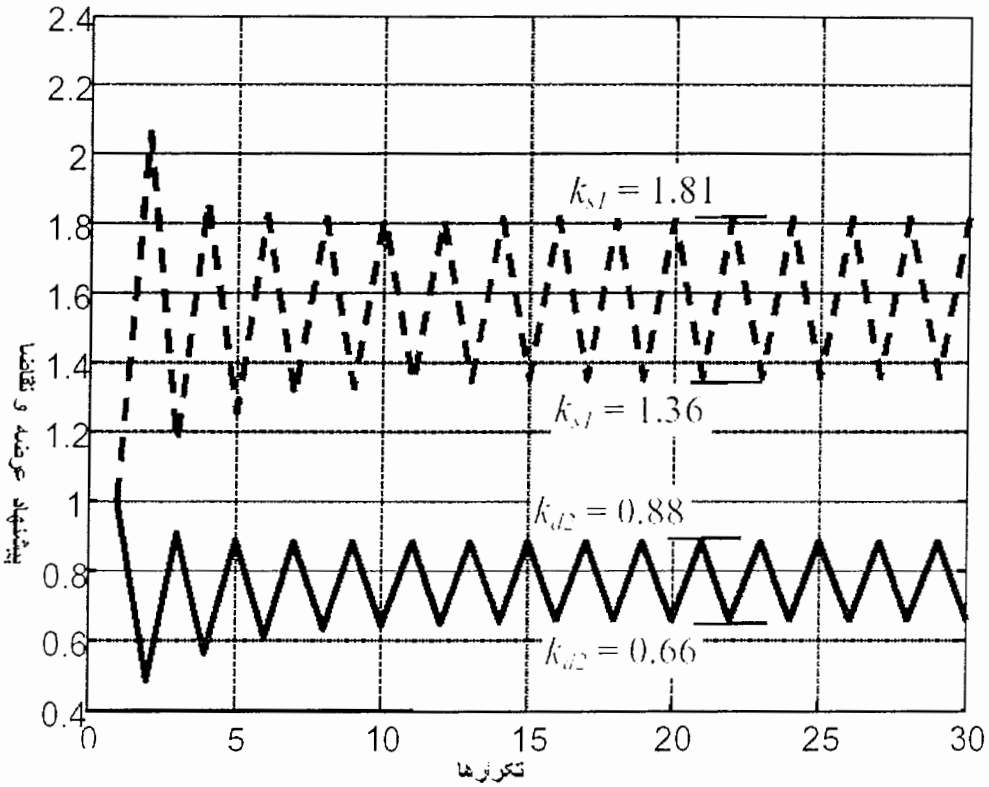
شکل ٤-۱۰ پیشرفت پیشنهاد تولید کننده و مصرف کننده بدون محدودیت خط



شکل ٤-١١ پاسخهای بهینه تولید کننده و مصرف کننده بدون هیچ محدودیت خطی

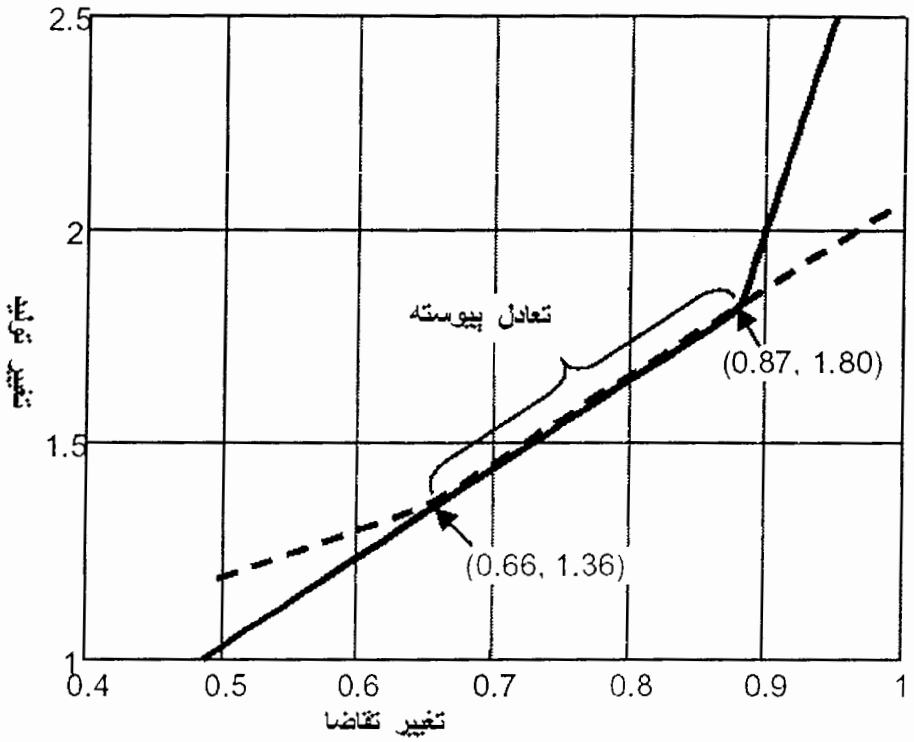
٤-٤-٤- نمونه بازار به همراه قیود ـ با رقابت مصرف کننده و تولید کننده

دوباره همان مثال قبل را درنظر می‌گیریم، اما اضافه کردن قیود در بخش ۴-۴-۲ با دو تولید کننده رقابتی انجام شد. شکل ۴-۱۲ پیشرفت الگوریتم با رقابت کردن مصرف کننده و تولید کننده ۱ درنظر گرفته شده‌اند. بطوریکه یک محدودیت MVA ۸۰ اعمال می‌شود.



شکل ٤-١٢ پیشرفت پیشنهاد تولید کننده و مصرف کننده با یک محدوده MVA ٨٠

بـه مانـند شـکل ۴-۶ در رقابـت دو تولـید کننده هیچ نقطه تعادل برای الگوریتم نقطه تعادل پیدا نمـی‌شـود و پاسـخ بهیـنه برحسـب پیشـنهاد هر فرد تعیین می‌شوند که در شکل (۴-۱۳) نشان داده میشوند.

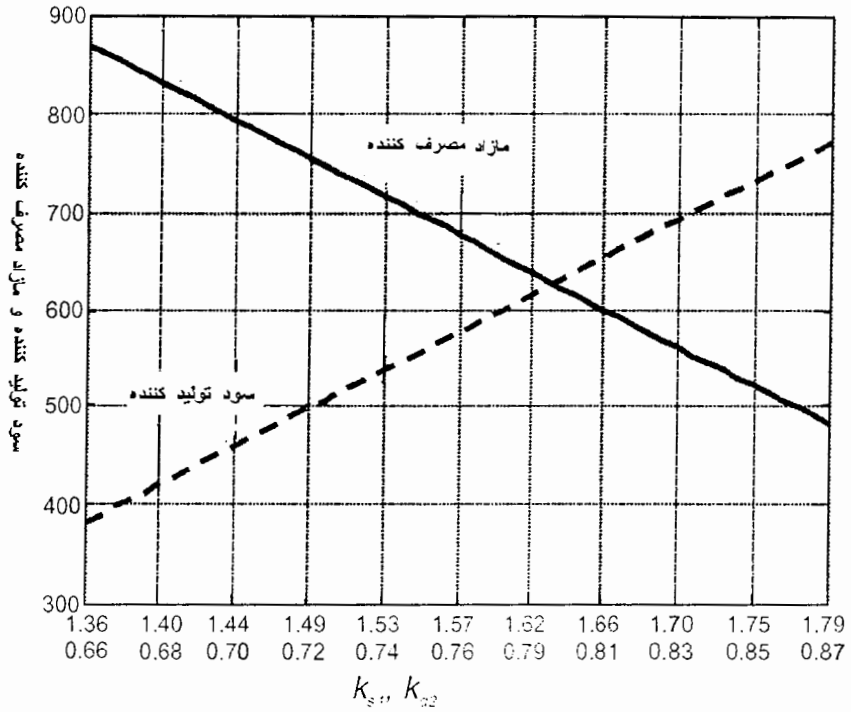


شکل ٤-۱۳ پاسخهای بهینه تولید کننده و مصرف کننده بهینه با محدودیت ۸۰MVA

هیچ نقطه توازنی دیده نمی‌شود بدلیل اینکه الگوریتم در حال پرش به عقب و جلو می‌باشد. آنچه در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده‌اند یک خط از نقاط توازن مختلف می‌باشند بین $Kd2 = 0.66$ و ۳۶ /۱= $Ks1$ و ۰/۸۷ = $Kd2$ و ۱/۸ = $Ks1$ می‌باشد. جدول ۴-۱ ، تغییر راه حل بازار متعلق به تعادل پیوسته را نشان می‌دهد و شکل ۴-۱۴ گرافهای مربوط به سود تولید کننده و مازاد مصرف کننده را نشان می‌دهد.

جدول ۱-٤ تغییر راه حل بازار مربوط به تعادل پیوسته

مازاد مصرف کننده+ سود تولید کننده ($/h)	سود تولید کننده ($/h)	مازاد مصرف کننده ($/h)	عرضه و تقاضا (MW)	قیمت در نقطه ۱و۲ ($/MVh)	فلوی خط (MVA)	Ks_1	Kd_2
۱۲۵۳/۲	۸۷۰/۹	۳۸۲/۳	۷۷/۷۹	۱۵/۶۹	۸۰	۰/۶۶	۱/۳۶
۱۲۵۳/۲	۸۳۲/۱	۴۲۱/۱	۷۷/۷۹	۱۶/۱۹	۸۰	۰/۶۸	۱/۴
۱۲۵۳/۲	۷۹۳/۳	۴۶۰	۷۷/۷۹	۱۶/۶۹	۸۰	۰/۷	۱/۴۴
۱۲۵۳/۲	۷۵۴/۴	۴۹۸/۸	۷۷/۷۹	۱۷/۱۹	۸۰	۰/۷۲	۱/۴۹
۱۲۵۳/۲	۷۱۵/۶	۵۳۷/۶	۷۷/۷۹	۱۷/۶۹	۸۰	۰/۷۴	۱/۵۳
۱۲۵۳/۲	۶۷۶/۷	۵۷۶/۵	۷۷/۷۹	۱۸/۱۹	۸۰	۰/۷۶	۱/۵۷
۱۲۵۳/۲	۶۳۷/۹	۶۱۵/۳	۷۷/۷۹	۱۸/۶۹	۸۰	۰/۷۹	۱/۶۲
۱۲۵۳/۲	۵۹۹/۱	۶۵۴/۲	۷۷/۷۹	۱۹/۱۹	۸۰	۰/۸۱	۱/۶۶
۱۲۵۳/۲	۵۶۰/۲	۶۹۳	۷۷/۷۹	۱۹/۶۹	۸۰	۰/۸۳	۱/۷
۱۲۵۳/۲	۵۲۱/۴	۷۳۱/۹	۷۷/۷۹	۲۰/۱۹	۸۰	۰/۸۵	۱/۷۵
۱۲۵۳/۲	۴۸۲/۵	۷۷۰/۷	۷۷/۷۹	۲۰/۶۹	۸۰	۰/۸۷	۱/۷۹



شکل ٤-١٤ سود تولید کننده و مازاد مصرف کننده در طول تعادل پیوسته

بـرای فهـم ایـنکه چـه رخ داده اسـت، حالتـی را که تولید کننده و مصرف کننده پیشنهاداتشان را مطـابق بـا توابع سود و هزینه درست می‌دهند، ۱= Ks_1 و ۱= Kd_2 قیمت تعیین شده بازار برای این پیشـنهادات ، بـرای تولـید کنـنده در نقطه ۱ برابر $۱۱/۵۶ \$/MWh$ و برای مصرف کننده در نقطه ۲ ، $۲۳/۳۳ \$/MWh$ تـا زمانـیکه ۷۷/۷۹ MW می‌باشد، تعیین می‌شوند. اختلاف قیمت گذاریها بعلت حق کرایه خط انتقال می‌باشد که بوسیله اپراتور پول جمع‌اوری می‌شود،

$$(۷۷/۷۹\ \text{MW}) \times (۲۳/۳۳ - ۱۱/۵۶)\ \$/MWh = ۹۰۷/۱\ \$/h$$

بنابرایـن یـک مقـدار زیـادی از پـول بـه مـنظور پرداخت هزینه انتقال بدلیل وجود محدودیتهای انتقال می‌باشد.

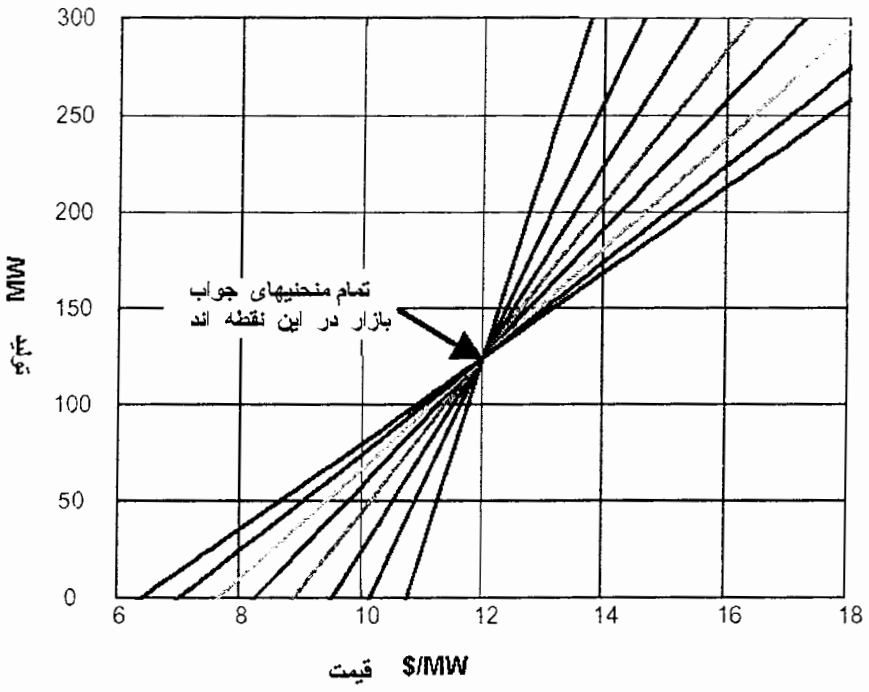
سود، مازاد و کرایه انتقال به صورت زیر جمع بندی می‌شوند:

مازاد مصرف کننده	$۲۸۵/۶\ \$/h$
سود تولید کننده	$۶۰/۵\ \$/h$
کرایه انتقال	$۹۰۷/۱\ \$/h$
جمع نهایی	$۱۲۵۳/۲\ \$/h$

قـابل ذکـر مـی‌باشـد که جمع نهایی مازاد مصرف کننده و سود تولید کننده و کرایه انتقال مجموع سود تولید کنده و مازاد مصرف کننده نقطه تعادل (دیده شده در جدول ۴-۱) می‌باشد. پیوستگی تعادل در شـکل ۴-۱۳ تمـام راههـای مخـتلف را تولـید کنـنده و مصـرف کننده می‌توانند پیشنهاد دهند به طوریکه نتایج دقیقی مخابره شود با توجه به محدودیتهای خط نشان داده می‌شوند.[۳۲]

٤-٥- تعمیم دادن منحنی پیشنهادی

در اینجا پیشنهاد دادن بازار برق‌مان به تغییرات یک بعدی در ضریب K برای هر مصرف کننده و تولید کننده محدود شده است. این به پیشنهاد دهنده اجازه نمی‌دهد که شیب و قطع دادن را مستقلاً تغییر دهند. نشان داده می‌شود که تغییر دادن شیب و قطع دادن هر دو باهم نتیجه در افزایش رفاه فردی نخواهد داشت. برای اثبات، مثال بدون هیچ محدودیت از بخش ۴-۴-۱ درنظر گرفته می‌شود. قطع دادنهای بهینه برای چندین شیب تعیین می‌شوند نتیجه آن منحنی‌های پیشنهادی بهینه در شکل ۴-۱۵ می‌باشد.



شکل ٤-١٥ منحنی‌های بهینه برای چندین شیب

ایـن منحنـی هـا یکدیگـر را در یـک نقطـه فضـای تولید قیمت قطع می‌کنند. بنابراین برای تمام پیشـنهادات، جـواب بـازار را در یـک نقطه قطع می‌کنند. این بدین معنی است که تغییر دادن شیب و نقطـه تقاطع نتیجه افزایش رفاه فردی نخواهد داشت. یک تولید و قیمت انفرادی مستقلاً قابل کنترل نیستند این بدلیل این است که یکی تابعی از دیگری می باشد بدلیل اینکه فضای بازار تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در ایـنجا دیـده می شود زمانیکه در حال ماکزیمم سازی انفرادی هستیم، افراد واقعاً سعی دارند که یـک نقطـه در فضـای قیمـت گـذاری عرضه / تقاضا پیدا کنند که سودشان را به حداکثر برساند. فرد صـرفاً در حـال جسـتجوی یـک منحنی پیشنهادی است که از این نقطه عبور می‌کند. ضریب K یک پارامـتر متغـیر خیلـی خوب می باشد بدلیل اینکه تمام فضای قیمت گذاری عرضه / تقاضا را با مقادیر مثبـت شـیب و نقطـه تقـاطع x می‌پوشاند. بنابراین، به استفاده از الگوریتم بالقوه برای پیدا کردن یک نقطه در فضا اجازه می‌دهد.

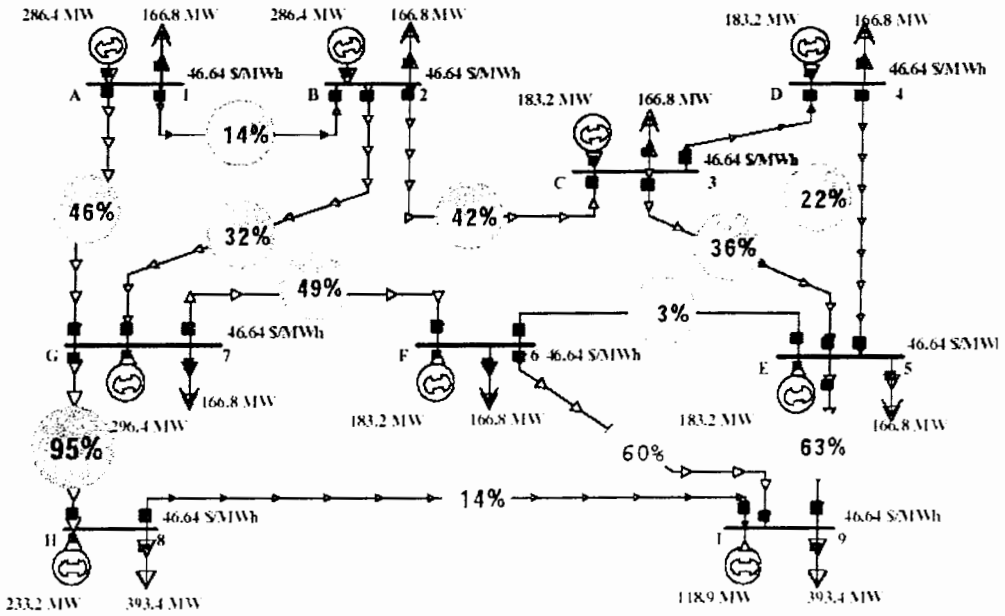
٤-٦- مثالی از سیستم نه باسه برای مشخص شدن قدرت افقی بازار[۲۹]

یـک سیسـتم بـرق ۹ باسه در شکل ۴-۱۶ با یک تولید کننده و یک مصرف کننده در هر باس در نظـر مـی‌گـیریم. تمام خطوط دارای مشخصات یکسان هستند (r+xj=0+0/1j) ،منحنی‌های هزینه و منحنی‌های سود تولید کنندگان و مصرف کنندگان به فرم زیر می‌باشند.

سود مصرفی = $\beta_i(d_i) = b_i(d_i + c_i d_i^2$

هزینه تولید کننده = $C_i(S_i) = b_i(S_i) + C_i S_i^2$

ضرایب b و c در جدول ۴-۲ تعریف شده‌اند.



شکل ٤-١٦ بازار برق ۹- باسه

جدول ٤-۲ ضرایب معادله سود و هزینه مثال

باس	ضریب تولید کننده b	ضریب تولید کننده c	ضریب مصرف کننده b	ضریب مصرف کننده C
۱ (A)	۱۸	۰/۰۵	۸۰	-۰/۱
۲ (B)	۱۸	۰/۰۵	۸۰	-۰/۱
۳ (C)	۲۱	۰/۰۷	۸۰	-۰/۱
۴ (D)	۲۱	۰/۰۷	۸۰	-۰/۱
۵ (E)	۲۱	۰/۰۷	۸۰	-۰/۱
۶ (F)	۲۱	۰/۰۷	۸۰	-۰/۱
۷ (G)	۱۷	۰/۰۵	۸۰	-۰/۱
۸ (H)	۰	۰/۱	۴۴۰	-۰/۵
۹ (I)	۳۰	۰/۰۷	۴۴۰	-۰/۵

بـه عنوان یک نقطه مرجع، پیشنهادات با سود نهایی درست و رفاه نهایی درست برای تمام مصرف کنـندگان و تولـید کنندگان فرض می‌شوند و OPF که سود اجتماعی را ماکزیمم می‌کند حل می‌شود. کـه نـتایج آن در شـکل ۴-۱۶ با قیمت گذاری بازار $\$/MWh$ ۴۶/۶۴ برای تمام سیستم درنظر گرفته مـی‌شـوند. نـتایج سود فردی و رفاه فردی برای هر تولید کننده و مصرف کننده در جدول ۴-۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ٤-۳ نتایج اقتصادی وقتی تمام پیشنهادات با هزینه نهایی درست مطابقت دارند.

باس	قیمت‌گذاری ($\$/MWh$)	خروجی تولید کننده (MW)	سود تولید کننده ($\$/h$)	تقاضا مصرف کننده (MW)	رفاه مصرف کننده ($\$/h$)
۱	۴۶/۶۴	۲۸۶/۵	۴۱۰۲/۵۵	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۲	۴۶/۶۴	۲۸۶/۵	۴۱۰۲/۵۵	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۳	۴۶/۶۴	۱۸۳/۲	۲۳۴۸/۷۳	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۴	۴۶/۶۴	۱۸۳/۲	۲۳۴۸/۷۳	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۵	۴۶/۶۴	۱۸۳/۲	۲۳۴۸/۷۳	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۶	۴۶/۶۴	۱۸۳/۲	۲۳۴۸/۷۳	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۷	۴۶/۶۴	۲۹۶/۵	۴۳۹۴/۰۰	۱۶۶/۸	۲۷۸۱/۴۶
۸	۴۶/۶۴	۲۳۳/۲	۵۴۳۹/۲۹	۳۹۳/۴	۷۷۳۶۴/۲۵
۹	۴۶/۶۴	۱۱۸/۹	۹۸۹/۴۳	۳۹۳/۴	۷۷۳۶۴/۲۵
جمع کل		۱۹۵۴/۲	۲۸۴۲۲/۷۴	۱۹۵۴/۲	۱۷۴۱۹/۷۴

قابل ذکر می‌باشد که تولید کنندگان در باسها ۷ و ۸ یک سود ترکیبی از

۹۸۳۳/۲۹ $\$/h$ = ۵۴۳۹/۲۹ $\$/h$ + ۴۳۹۴ $\$/h$ همچنیـن فلـوی خط انتقال از باس ۷ به باس ۸ ،

۱۸۹/۵ MVA می‌باشد.

حال فرض می کنیم که تمام مصرف کنندگان در این بازار شرکت کنندگان حاشیه‌ای هستند و هیچ استراتژی پیشنهادی بکار نمی‌برند و آنها همیشه منحنی سود نهایی درست را ارائه می‌دهند و تمام تولید کنندگان پیشنهاداتشان را برای افزایش سود فردیشان اصلاح می‌کنند. حال فرض می‌کنیم که تولید کنندگان ۷ و ۸ تبانی کرده باشند بامید اینکه سودهای ترکیب شده‌شان را افزایش دهند. حال با درنظر گرفتن شکل ۴-۱۶ آنچه باید توجه شود این است که خط بین باسهای ۷ و ۸ در ۹۵٪ محدوده‌اش بار می‌شود. در نتیجه، تولید کنندگان ۷ و ۸ ممکن بود که تبانی کنند تا این خط دچار اضافه بار گردد. بنابراین موجب افزایش دادن قیمتی که تولید کنند ۸ دریافت خواهد کرد می‌شود و برای انجام این تولید کننده ۷ قیمتش را بدلیل اضافه بار کاهش خواهد داد.

نتایج الگوریتم تعادل صورت می‌گیرد زمانیکه تولید کنندگان ۷ و ۸ هر دو باهم سعی به افزایش قیمت‌ها دارند بطوریکه تولید کنندگان ۶-۱ و ۹ به صورت انفرادی سعی به ماکزیمم کردن سودشان دارند که در جدول ۴-۴ نشان داده می‌شوند.

جدول ٤-٤ نتایج الگوریتم تعادل زمانیکه تولیدکنندگان ۷ و ۸ قیمتهایشان را افزایش می دهند.

باس	قیمت گذاری $\$/MWh$	خروجی تولید کننده (MW)	سود تولید کننده $(\$/h)$	تقاضا مصرف کننده (MW)	رفاه مصرف کننده $(\$/h)$
۱	۴۸/۵۱	۲۷۵/۸	۴۶۱۲/۳۶	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۲	۴۸/۵۱	۲۷۵/۸	۴۶۱۲/۲۶	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۳	۴۸/۵۱	۱۸۳	۲۶۹۰/۶۹	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۴	۴۸/۵۱	۱۸۳	۲۶۹۰/۶۹	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۵	۴۸/۵۱	۱۸۳	۲۶۹۰/۶۹	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۶	۴۸/۵۱	۱۸۳	۲۶۹۰/۶۹	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۷	۴۸/۵۱	۲۶۲/۱	۴۸۲۴/۸۹	۱۵۷/۴	۲۴۷۸/۵۵
۸	۴۸/۵۱	۲۶۲/۱	۵۸۱۳/۵۶	۳۹۱/۵	۷۶۶۳۰/۹۷
۹	۴۸/۵۱	۱۲۳/۱	۱۲۱۸/۲۶	۳۹۱/۵	۷۶۶۳۰/۹۷
نتایج کلی		۱۸۸۵	۳۱۸۸۴/۱۹	۱۸۸۵	۱۷۰۶۱۱/۸۱

قابل ذکر است که تولید کننده در باسهای ۷ و ۸ یک سود ترکیب شده $۱۰۶۳۸/۴۵ \$/h$ = ۵۸۱۳/۵۶ $\$/h$ + ۴۸۲۴/۸۹ $\$/h$. همچنین باید توجه شود که فلوی روی خط انتقال از باس ۷ به باس ۸ MVA ۱۹۰ می‌باشد.

در این قسمت قیمتها به $۴۸/۵۱ \$/MWh$ افزایش می‌یابد. این ۴٪ بیشتر از $۴۶/۶۴ \$/MWh$ خواهد بود. زمانیکه تمام تولید کنندگان دقیقاً هزینه نهایی درست را می‌دهند. حال نتایج الگوریتم تعادل را وقتی تولید کنندگان سعی به اضافه بار دار کردن خط انتقال بین باسهای ۷ و ۸ را بررسی می‌کنیم.

جدول ٤-٥ نتایج الگوریتم تعادل وقتی تولیدکنندگان ۷ و ۸ سعی به اضافه بار کردن یک خط دارند

باس	قیمت گذاری $\$/MWh$	خروجی تولید کننده (MW)	سود تولید کننده $(\$/h)$	تقاضا مصرف کننده (MW)	رفاه مصرف کننده $(\$/h)$
۱	۴۷/۰۸	۲۴۱/۹	۴۱۰۸/۸۹	۱۶۴/۶	۲۷۰۹/۰۱
۲	۴۷/۸	۲۵۷/۵	۴۳۵۷/۶۳	۱۶۱	۲۵۹۲/۳۲
۳	۴۹/۹۵	۱۹۲/۴	۲۹۷۸/۵۸	۱۵۰/۳	۲۲۵۷/۶۲
۴	۵۰/۶۷	۱۹۶/۱	۳۱۲۵/۷۹	۱۴۶/۷	۲۱۵۱/۱۶
۵	۵۱/۳۸	۱۹۸/۳	۳۲۷۲/۷	۱۴۳/۱	۲۰۴۷/۰۹
۶	۵۰/۶۷	۱۹۶/۱	۳۱۲۶/۴	۱۴۶/۷	۲۱۵۰/۶۸
۷	۴۶/۳۶	۲۹۵/۹	۴۳۱۰/۷۶	۱۶۸/۲	۲۸۲۸/۵۷
۸	۶۰/۷۳	۱۸۳/۳	۷۷۷۱/۸۳	۳۷۹/۳	۷۱۹۲۱/۸۲
۹	۵۴/۲۹	۸۴	۱۵۴۶/۰۳	۳۸۵/۷	۷۳۴۸۷/۴۷
نتایج کلی		۱۸۴۵/۴	۳۴۵۹۸/۶۲	۱۸۴۵/۴	۱۶۳۰۴۵/۷۴

قـابل ذکـر اسـت که تولیدکنندگان باسها ۷ و ۸ یک ترکیب به صورت $۱۲۰۸۲/۵۹ \$/h$ = $/۸۳ \$/h$ ۷۷۷۱ + $۴۳۱۰/۷۶ \$/h$ دارنـد و فلوی روی خط انتقال باس ۷ به ۸ به ۲۰۰MVA محدود می‌شوند. با مقایسـه کردن جدود ۴-۴ و جدول ۴-۵ تولیدکنندگان ۷ و ۸ قادر به افزایش سود ترکیبی‌شان از $\$/h$ ۱۰۶۳۸ بـه $۱۲۰۸۳ \$/h$ هسـتند یک افزایش ٪۱۳/۶ زمانیکه استراتژی اضافه بار کردن خط انتقال را انـتخاب مـی‌کنـند، حاصـل مـی‌شـود. بـا انجـام این عمل، آنها قیمت‌گذاریهای در باسهای ۸ و ۹ به $۶۰/۷۳ \$/MWh$ و $۵۴/۲۹ \$/MWh$ افزایش می‌دهد.

کـه ٪۳۰/۲ و ٪۱۶/۴ بیشـتر از قیمـت‌گذاریهـای رفاه اجتماعی می‌باشد. بنابراین دیده می‌شود که مقـداری از قـدرت بـازار زمانیکه تولید کنندگان ۷ و ۸ ادغام می‌شوند، به صورت محلی در اختیار قرار می‌گیرد. یک حل کامل برای مسئله صورت می‌گیرد تحت شرایطی که دیگر تولیدکنندگان پیشنهاد با K =۱ را بدهـند. پیشنهاد برای تولید کننده ۷ با K بین ۰/۸ و ۱/۵ و تولید کننده ۸ با K بین ۱ و ۱/۸ می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری
و
پیشنهادات

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری

این پایان نامه الگوریتمی را نشان می‌دهد که به شرکت کننده بازار اجازه می‌هد که سود فردیش را در بـازار لحظه‌ای برق ماکزیمم کند. بازارهای برق سراسر دنیا با هدف کارآمدتر کردن عملکردشان به اعمـال نیروهای رقابتی ادامه می‌دهند. برای رسیدن به این هدف الگوریتمی بررسی شد که به شرکت کنندگان بازار کمک می‌کند تا در یک روش مناسب رفتار کنند و سودشان ماکزیمم گردد.

در ایـن پایـان نامه استفاده از OPF به عنوان مدل بازار برق لحظه‌ای توضیح داده شده است. قابل ذکـر مـی‌باشـد کـه بـرای مـدل کـردن رفـتار بازار و رفتار مصرف کنندگان استفاده از OPF ضروری مـی‌باشـد و هـر نـرم افـزاری بـرای اینکه عملکرد بازار لحظه‌ای برق را مدل کند، OPF را در هسته مرکـزی‌اش خواهـد داشـت. هنگامـی کـه صـنعت برق به تجدید ساختار ادامه می‌دهد، شرکت دادن مصـرف کنـنده بـه داخـل سـاختار بـازار بـا اهمیت‌تر خواهد شد، بدلیل اینکه تمامی تولید کنندگان و مصـرف کنـندگان در سیسـتم بـرق تأثـیر می‌گذارند. آنچه مهم است اینکه تمام قیمتهای دریافتی به صـورت فیدبکـی مـی‌باشند که به استفاده درست از انرژی کمک می‌کند و نشان داده شد که مصرف کنـندگان بـا تغیـیر قیمـت، مصـرف انـرژی خودشـان را اصلاح می‌کنند و سودهایی را که از اصلاح

مصـرف صـورت می‌گیرد بررسی شد. این فیدبک بین تولید کنندگان و مصرف کنندگان به بازار جهت تصـمیم‌گیریهای بلندمدت کمک می‌کند که کی و کجا برای توسعه سیستم انتقال سرمایه‌گذاری کنند .

در فصـل ۳ نشـان داده شـد کـه مـدل کردن مصرف کننده یک توسعه طبیعی برای مسئله OPF مـی‌باشـد و یک توجیه ریاضیاتی برای وارد کردن آنها فراهم شده است. در فصل ۳ همچنین مدلهای خوبـی از تقاضـای مصـرف کنـنده بـرای بـرق اکتـیو و راکتیو نشان داده شده است. تولید کنندگان و مصـرف کنـندگان که به عنوان تشکیل دهنده ساختار بازار می‌باشند، برای تعیین استرتژیهای پیشنهاد دادن خوب به ابزاری جهت کمک به آنها نیاز پیدا می‌کنند.

الگوریـتم موجـود در فصـل ۴ چندیـن مثال موفقیت آمیز با توجه به الگوریتم ماکزیمم سازی سود فـردی نشـان داده مـی‌شـود. در تکنـیک استفاده شده در ماکزیمم سازی سود فردی یک روش بهینه سازی روتین نشان داده شده بطوریکه حتی در سیستم‌های ساده نیز امکان واگرا شدن تابع وجود دارد کـه نتـیجه در پیدا شدن چندین بهینه محلی خواهد داشت و هیچ روش مبنایی قادر به حل کلی برای ماکزیمم سازی نخواهد بود.

پیشنهادات

در ایـن پایان نامه ، قیمت‌گذاری مربوط به توان اکتیو بررسی شد. پیشنهاد می‌گردد، تأثیر قیمت گذاری توان راکتیو روی عملکرد شرکت کنندگان بازار بررسی گردد.

در ایـن پایـان نامـه الگوریـتم‌هـای بررسـی شـد که ، تمامی شرکت کنندگان با یک ضریب K منحنـی‌هـای پیشنهادیشـان را تغییر می‌دادند تا به حداکثر سود برسند و این ضریب K علاوه بر ایـنکه شیب منحنی را تغییر می‌دهد، مقدار مینیمم هزینه را نیز تغییر می‌دهد. پیشنهاد می گردد الگوریتمـی بررسی گردد که مقدار مینیمم هزینه جدای از شیب منحنی‌های پیشنهادی برای هر شرکت کننده تغییر داده شوند و عملکرد شرکت کنندگان بررسی گردند.

ضمیمه الف

پخش بار AC

هدف از یک برنامه رایانه‌ای پخش بار AC ، محاسبه توانهای حقیقی و راکتیو عبوری از خطوط انتقال یک شبکه معین، برای برخی شرایط از پیش تعیین شده باسها از قبیل توان حقیقی و راکتیو یا مقدار ولتاژ و توان حقیقی است. ساختار و پارامترهای شبکه (مثل مقاومت و راکتانس) یک مجموعه $2N_{b-1}$ (N_b تعداد باس) از معادلات چند مجهولی غیرخطی را نتیجه می‌دهد که باید حل شوند، مثلاً:

$$\underline{U} = \underline{h}(\underline{X})$$
$$\underline{U} = \left[P_1,...P_{N_b}, Q_1,...Q_{N_b}\right]^T$$
$$\underline{X} = \left[V_1,...V_{N_b}, \delta_1,....\delta_{N_b}\right]^T$$

$\underline{h}$: مجموعه‌ای از توابع که توسط معادلاتی ساخته می‌شوند که توان را مشخص می‌کنند.

نکته: مقدار $P_k, k =*$ در $\underline{U}$ قرار نمی‌گیرد و مقدار $\delta_k = *$ در مجموعه $\underline{X}$ قرار نمی‌گیرد. باس $K =*$ را باس سوئینگ می‌نامند.

مقدار $\underline{X}$ با مشخص بودن $\underline{U}$ قابل پیدا شدن است. پس توانهای عبوری از خط به راحتی بدست می‌آیند. توان حقیقی در باس سوئینگ $k =*$ هنوز معلوم نیست تا تعادل انرژی در سیستم برقرار

باشد. توان اختصاص داده شده به باس سوئینگ برابر اختلاف بین مجموع توان بار و توان تلفاتی محاسبه شده منهای مجموع توان در همه باسهای تولید کننده غیر از باس سوئینگ است. در حالت کل، زاویه در باس سوئینگ به شکل مطلق برابر صفر تنظیم می‌شود، زیرا مقادیر قطعی زوایای ولتاژ δ_j مهم نیستند.

پخش بار AC با استفاده از تکنیکهای تکراری حل می‌شوند. دو روش حل عبارتند از گوس ـ سایدل و نیوتن رافسون.

روش گوس ـ سایدل

این روش ابتدا مقادیر اولیه‌ای را برای ولتاژ (اندازه، زاویه) هر کدام از باسها فرض می‌کند. سپس ولتاژ در باس اول به گونه‌ای است که با نگه‌داشتن ولتاژهای همه باسهای دیگر در مقادیر اولیه خودشان، مقدار از پیش تعیین شده و معلوم توانهای آن باس ایجاد شود. سپس مقدار ولتاژ در باس دوم، با ثابت نگه داشتن مقدار ولتاژ باس ۱ در مقداری که محاسبه شده بود، محاسبه می‌شود.

این روال برای هر کدام از باسها تا زمانی که همگرایی ایجاد شود، تکرار می‌شود. این روش سریعاً همگرا نمی‌شود ولی بسیار ساده است و معمولاً موثر و کارا است.

روش نیوتن ـ رافسون

این روش هنگامی که تأثیرات متقابل سایر باسها را در محاسبات وارد می‌کند، اصلاحاتی را در مقادیر اولیه ولتاژهای تخصیص داده شده به باسها ایجاد می‌کند. تعریف می‌کنیم:

$$f(x,u) = \underline{u} - h(\underline{x})$$

مسأله این است که $\underline{X}$ را به گونه‌ای پیدا کنیم که $f(\underline{X},\underline{U}) = 0$ باشد. با استفاده از بسط سری تیلور حل و i امین متغیر $\underline{Xi}$ و فقط در نظر گرفتن بخش‌های خطی، نتیجه می‌دهد.

که: $\underline{f(\underline{X},\underline{U}) = \underline{f}(\underline{xi},\underline{u}) + \underline{J}(xi)(\underline{x} - \underline{xi})}$

$$\underline{J}(xi) = \frac{\partial \underline{f}(\underline{x},\underline{u})}{\partial \underline{x}} \quad \text{برای} \quad \underline{X} = \underline{Xi}$$

حدس بعدی $\underline{Xi}+1$ با حل معادله زیر بدست می‌آید:

$$\underline{J}(\underline{Xi})(\underline{X}_{i+1} - \underline{X}_i) + \underline{f}(\underline{X}_i, \underline{u}) = 0$$

این تکرار تا زمانی که شرط $\underline{X}_{i+1} = \underline{X}_i$ برقرار شود ادامه می‌یابد، که بدین معنی است که:

$$\underline{f}(\underline{X},\underline{U}) = 0$$

پخش بار AC مجزا شده

پخش بار AC با ۴ نوع متغیر اصلی کار می‌کند: توانهای حقیقی، توانهای راکتیو، اندازه‌های ولتاژ و زاوایای ولتاژ. طبیعت سیستمهای فیزیکی بگونه‌ای است که یک پیوند محکم بین توان حقیقی P و زاویه ولتاژ δ و نیز بین توان راکتیو Q و اندازه ولتاژ V وجود دارد. و یک پیوند بسیار ضعیف‌تر مثلاً بین زاویه ولتاژ δ و توان راکتیو Q وجود دارد. این خاصیت اغلب برای جداسازی منطق پخش بار AC به دو زیر مسأله جداگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد که در مورد هر یک جداگانه روشهای تکراری اعمال می‌شود.

پخش بار بهینه:

یک پخش بار بهینه یک برنامه رایانه‌ای است که سعی می‌کند مجموعه‌ای از توانهای تزریقی به باسها، اندازه‌های ولتاژ و غیره را پیدا کند که برخی ضوابط را براساس قیودی که شامل تان باسها می باشد را به حداقل برساند. پخش بار بهینه می‌تواند در بهره‌برداری سیستم در ارتباط با ایمنی و یا مسائل اقتصادی مهم باشد.

$$\text{قیود نابرابری} = \begin{bmatrix} S_{\min} - S \\ S - S_{\max} \\ d_{\min} - d \\ d - d_{\max} \\ \bar{g}(x) \end{bmatrix} = g(x,s,d)$$

$L, \bar{L}$ = توابع لاگرانژ

$$\text{بردار ضریب لاگرانژ} = \begin{bmatrix} \lambda_h^T & \lambda_g^T & \lambda_f^T \end{bmatrix}^T = \lambda$$

$$\text{بردار ضریب لاگرانژ} = \begin{bmatrix} \lambda_{h_p}^T & \lambda_{h_q}^T & \lambda_{\bar{h}}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_h^T & \lambda_{\bar{h}}^T \end{bmatrix} T = \lambda_h$$

برای معادلات پخش بار و دیگر قیود برابری

$$\text{بردار ضریب لاگرانژ برای قیود} = \begin{bmatrix} \lambda_{gs_{\min}}^T & \lambda_{gs_{\max}}^T & \lambda_{gd_{\min}}^T & \lambda_{gd_{\max}}^T & \lambda_{\bar{g}}^T \end{bmatrix}^T = \lambda_g$$

نابرابری

$$\text{بردار ضریب لاگرانژ کاهش یافته، با شامل شدن تنها ورودیها برای} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{hsp}^T & \tilde{\lambda}_{hsq}^T \end{bmatrix}^T = \tilde{\lambda}_{hs}$$

معادلات پخش بار که شامل یک تقاضای توان اکتیو و راکتیو می‌شود.

$$\text{بردار ضریب لاگرانژ برای قیود اضافی} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{fp}^T & \tilde{\lambda}_{fq}^T \end{bmatrix}^T = \tilde{\lambda}_f$$

$$\text{بردار قیمت برای تولید کنندگاه قابل} = \begin{bmatrix} p_{sq}^T & P_{sq}^T & P_{dp}^T & P_{dq}^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P_s^T & : & P_d^T \end{bmatrix}^T = P$$

تغییر و مصرف کنندگان تغییرپذیر

$$\text{D(P)= معکوس تابع } \frac{\partial B(d)}{\partial d}$$

$$\text{S(P) = معکوس تابع } \frac{\partial C(S)}{\partial S}$$

مراجع و مأخذ

مراجع و مأخذ

[1] R. Gibbens and S. Turner, "Call routing in telephone networks" Public Awareness and Schools Support for Mathematics, Issue2, May 1997, http://Pass. Maths.org.uk/issue2/dar.

[2] D. Shirmohammadi, X.v. Filho B. Gorenstin, and M. Pereiara, "Some fundamental technical concepts about cost based transmission pricing,"IEEE Transacions on Power Systems, vol, 11. No. 2 May 1996.

[3] T. Alvey, D. Goodwin, X. Ma, D. Streiffert, and D. Sun, "A security-constrained bidclearing system for the New Zealand wholesale electricity market,"IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 13. No. 2, May 1998, pp. 340-346.

[4] The California Power Exchange Web site, http://www.calpx.com.

[5] The Pennsylvania-New Jersey Maryland (PJM) Interconnection Web site, http://www.pjm. com

[6] The New England Indepenent System Operator Web site, http://www.iso-ne.com

[7] Public Utility Regulatory Policy Act of 1978 (PURPA). (A good index is in the Web site http:// www.ferc.fedus/intro/acts/purpa.htm at FERC.)

[8] J. A. Momoh, M. E El-Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993," IEEE Transactions of Power Systems, vol, 14, no. 1, February 1999. Pp. 96-111

[9] J. A. Momoh, R. J. Koessler, M. S. Bond, B. Stott, D. Sun, A. D, Papalexopoulos, and P. Ristanovic, "Challenges to optimal power flow, " 1996 IEEE/PES Winter Meeting, 96 WM 312-9 PWRS, Baltimore MD, January 21-25, 1996.

[10] H. Chao and S. Peck, "A market mechanism for electric power transmission," Journal of Regulatory Economics, July 1996, pp. 25-59.

[11] W.W. Hogan, "Markets in real electric networks requier reactive prices," The Energy Journal, vol. 14, no. 3, September 1993, pp. 171-200.

[12] D. Chattopadhyay, K. Bhattachary and J. Parikh, " Optimal reactive powr planning and its spot pricing: an integreted approach, " IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 4 November 1995, pp. 2014-2020.

[13] S. Hao and A. Papalexopoulos, "Reactive power pricing and management," IEEE Transactions on Power Systems, vol, 12, no. 1, February 1997, pp. 95-104.

[14] R.s Fang and A.K. David, "Optimal dispatch under transmission contracts," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14 no. 2, May 1999, pp. 732-737.

[15] H. Glavitsch and F. Alvarado, ? Management of multiple congested conditions in unbundled operation of a power system, "IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 3, August 1998, pp. 1013-1019.

[16] H. Singh, S. Hao, and A. Papalexopoulos, "Tran

[17] y. Wu, A. S. Debs, and R. E. Marsten, "Direct nonlinear predictor – corrector primal – dual interior point algorithm for optimal power ffows " 1993 IEEE Power Industry Computer Applications Conference, pp. 138-145.

[18] O. Alsac, J. Bright, M. Prais, and B. Stott, "Further developments in LP-based optimal power flow, " IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 3, August 1990, pp. 697-711

[19] D.L. Sun, B. Ashley, B. Brewer, A. Hughes, and W.F. Tinney, "Optimal power flow by Newton approach," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 103, October 1984, pp. 2864 – 2880.

[20] C. Li, A.J. Svobada, X. Guan, and H. Singh "Revenue adequate bidding strategies in competitive electricity markets," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 2, May 1999, pp.492-504.

[21] X. Bai, S.M. Shahidehpour, V.C. Ramesh, and E. Yu, "Transmission analysis by nash game method, " IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 3, August 1997, pp. 1046-1052.

[22] R.W. Ferrero, S.M. Shahidehpur, and V.C.Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems using game theory," IEEE Transactions on Power Wystems, vol. 12, no. 3, August 1997, pp. 1347.

[23] J.B.Cardell, C.C. Hitt, and W.W. Hogan, "Market power and strategic interaction in electricity networks, " Resource and Energy Economics, 1997, pp. 109-137.

[24] C.A. Berry, B.F. Hobbs, W.A. Meroney. R.P. O'Neill, and W.R. Steward, " Analyzing strategic bidding behavior in transmission networks," Game Theory Application in Electric power Markets, 99TP-136-0, IEEE PES Winter Meeting 1999, pp. 7-32.

[25] H.W.Kuhn and A.W. Tucker, "Nonlinear programming," Proceedings of Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, 1961,pp. 481-492.

[26] T.J. Overbye, P.W. Sauer, G. Gross, M.J. Laufenberg, and J.D. Weber, "A simulation tool for analysis of alternative paradigms for the new electrictity business," Proceedings of 30 th Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, January 1997, pp. V634-V640.

[27] D.P. Bertsekas, Nonlinear Programming. Belmont, MA: Athena Scientific, 1995.

[28] Q.H. Wu and J.T. Ma, "Genetic search for optimal reactive power dispatch of power systems," International Confernce on Control, 1997, vol. 1 pp. 717-722.

[29] G.P. de Azevedo, C.S. de Souza, and B. Feijo, "Enhancing the human – computer interface of power system applications," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, May 1996, pp. 646-653.

[30] P.M. Mahadev and R.D. Christie, "Minimizing user interaction in energy management systems: task adaptive visualization, " IEEE Transaction on Power Systems, vol. 11, no. 3, August 1996, pp. 1607-1612.

[31] R. Seydel, Practical Bifurcation and Stability Analysis. New York, NY: Springer – Verlag, 2ne Edition, 1997.

[32] J.A. Huang and F.D. Galiana, "An integrated personal computer graphics environment for power system education, analysis, and design," IEEE Transactions on Poer Systems, vol. 6, no. 3, August 1991, pp. 1297-1285.

[33] The Math Works Inc., Reference Guide for MATLAB. Natick, MA, 1992.

[34] G.W. Stagg and A.H. EL- Abiad, computer Methods in power system analysis, MC Graw Hill book company, New York, 1968.

[35] قیت گذاری لحظه‌ای برق (بازار برق) مترجم: دکتر علیرضا صداقتی