ششمین همایش بین‌المللی افق های نویـن در
مهندسی برق، کامپیوتـر و مکانیک
6th International Conference on the New Horizons in
Electrical Engineering, Computer and Mechanical
www.mhconf.ir

قیمت گذاری توان راکتیو با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ارزیابی برداری اجتماع ذرات

مهدی میرآب نوده [۱]، علی کاظمی پور[۲]، محمد شهابی [۳]، علیرضا اعتراف [۴]
[۱] شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان mirabmehdi44@yahoo.com
[۲] شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان kazemipoor129@gmail.com
[۳] شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان shahab_2017a@yahoo.com
[۴] شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان alirezaeteraf@gmail.com

چکیده

در برخی از کشورهای دنیا، که صنعت برق از شکل سنتی به شکل تجدید ساختار شده مبدل شده، قیمت گذاری سرویس های جانبی انتقال از اهمیت بیشتری برخوردار شده است .در صنعت برق سنتی، یک ارگان دولتی یا شبه دولتی موظف به تحویل انرژی الکتریکی در نقطهٔ مصرف به مشترکین است. در حالی که در صنعت برق تجدید ساختار شده، بسته به نوع آن، در سطوح مختلف تولید و توزیع، بین شرکت های مختلف رقابت ایجاد شده است و صنعت برق به یک بازار رقابتی انرژی مبدل شده است .در هر صورت، سیستم انتقال در محیط های تجدیدساختار شده، منحصر به فرد است و وظیفهٔ کنترل و بهره برداری از آن در اختیار اپراتور مستقل سیستم قرار دارد. اپراتور مستقل سیستم درانجام وظایف خود، ملزم به فراهم سازی و ارائهٔ سرویس هایی برای انتقال مطمئن توان از فروشندگان به خریداران انرژی الکتریکی است. از این سرویس ها تحت عنوان سرویس های جانبی انتقال یاد می شود. از مهمترین این سرویس ها، سرویس توان راکتیو در سیستم قدرت است. با توسعه ی صنعت برق در کشورهای پیشرفته دنیا و ایجاد تغییرات متنوع که منجر به تجدید ساختار در صنعت برق این کشورها شد، رقابت در صنعت برق به عنوان یکی از مهمترین عامل در بهره برداری از این سیستم مطرح گردید. بسته به اهداف، در صنعت برق تجدید ساختار یافته، نحوهی انجام تجدید ساختار متنوع می باشد. ولی در هر صورت، سیستم انتقال به اپراتور مستقل » صورت منحصر به فرد و اغلب در اختیار دولت باقی میماند و کنترل و بهرهبرداری سیستم انتقال در اختیارقرار می گیرد. تأمین توان راکتیو از مهمترین سرویس های جانبی می باشد که در افزایش امنیت و قابلیت اطمینان « سیستم شبکه نقش بسزایی دارد. در سیستم های قدرت پیشرفته، بررسی پایداری ولتاژ و ارزیابی حاشیه ی امنیت ولتاژ برای اجتناب از بروز ناپایداری و پدیده فروپاشی ولتاژ بسیار ضروری است. این مسئله در محیط تجدید ساختار یافته، از نقطه نظر امنیت واثرات اقتصادی ناشی از آن، از اهمیت بیشتری برخوردار است. از مسائل مهم در این زمینه نحوهی قیمتگذاری توان راکتیودر محیط رقابتی است که علاوه بر حفظ امنیت سیستم، سیگنال اقتصادی را مناسبی برای سرمایه گذاران و بهره برداران سیستم فراهم می نماید.در این مقاله، به منظور قیمت گذاری بهینه توان راکتیو از الگوریتم بهینه سازی ارزیابی برداری اجتماع ذرات استفاده شده است. نتایج شبیه سازی ها برای سیستم های ۵ و ۳۰ باسه انجام و نتایج شبیه سازی ها حاکی از عملکرد مؤثر الگوریتم اجتماع ذرات در بهینه سازی تابع هزینه توان راکتیو می باشد. شبیه سازی ها با چهار سناریوی مختلف انجام و قیمت بهینه پیشنهادی توان راکتیو ارائه شدهاست.

کلید واژه ها: قیمت گذاری توان راکتیو، بازار برق، الگوریتم هوشمند ذرات

۱- مقدمه

در دو دهه ی اخیر، صنعت برق در برخی از کشورهای دنیا، دستخوش تغییرات زیادی شده است. اخیراً به این نتیجه رسیدهاند که ایجاد رقابت در صنعت برق، یکی از عوامل مهم در بهره برداری هرچه مطلوب تر از سیستم قدرت است. این امر، صنعت برق را به یک بازار رقابتی تبدیل کرده است به نحوی که شرکت های مختلفی در سطح تولید و فروش به رقابت با یکدیگر می پردازند. بیش از یک قرن از تولد اولین شبکههای قدرت میگذرد. از بدو تشکیل این سیستمها، دولت یا یک یا صنعت » چند ارگان شبه دولتی، وظیفهٔ تولید، انتقال، توزیع و فروش برق را برعهده داشتهاند. اصطلاح برای چنین سیستمهایی بکار برده میشود. « برق سنتی صنعت برق در جهان، به دلایل مختلف اقتصادی و فنی، دچار تغییراتی در نحوهی مدیریت و بهره برداری شده است. از این تغییرات، در اصطلاح، تحت عنوان تجدید ساختار یاد می شود. تجدید ساختار در صنعت برق بر تغییر در ساختار قوانین و فعالیتهای اقتصادی دلالت دارد که دولت در خصوص کنترل و بهره برداری هرچه بهتر از صنعت برق، وضع می نماید. بسته به اهداف، در صنعت برق تجدید ساختار یافته، نحوهی انجام تجدید ساختار متنوع می باشد. ولی در هر صورت، سیستم انتقال به صورت منحصر به فرد و اغلب در اختیار دولت باقی میماند و کنترل و قرار می گیرد. اپراتور مستقل سیستم در « اپراتور مستقل سیستم » بهرهبرداری سیستم انتقال در اختیار انجام وظایفی که در انتقال توان برعهده دارد، ملزم به فراهم نمودن و قیمتگذاری سرویسهای جانبی انتقال میباشد. از مهمترین این سرویسها، تأمین توان راکتیو در شبکهٔ قدرت است. از طرفی تعیین قیمتی منصفانه، در یک بازار رقابتی انرژی از اهمیت ویژهای برخوردار است. پروفیل، پایداری ولتاژ و انتقال توان از محل تولید به محل مصرف در ارتباط مستقیم با چگونگی تأمین توان راکتیو در شبکه می باشد.

۱- اهمیت مدیریت توان راکتیو

در یک سیستم قدرت که تحت نظارت دولت نیست، مسئولیت اصلی (اپراتور مستقل سیستم) حفظ اطمینان و امنیت سیستم است که از طریق فراهم کردن سرویسهای خدماتی مانند پشتیبانی توان راکتیو، رزروهای چرخشی، تعادل انرژی و تنظیم فرکانس صورت میگیرد. برای حفظ پایداری شبکه های قدرت و انتقال توان مطمئن، افزون بر تأمین توان اکتیو نیاز به تأمین توان راکتیو نیز میباشد که برای بهبود امنیت سیستم بایستی توسط بهرهبردار سیستم قدرت بصورت بهینه تأمین گردد. مدیریت توان راکتیو به دلایل متعددی اهمیت روزافزون پیدا کردهاست. با توجه به نوسانات قیمت سوخت نیاز به بهرهبرداری بهینه از سیستمهای قدرت افزایش پیدا کردهاست. یک اصل مهم این است که برای توزیع یک مقدار معین توان با به حداقل رساندن پخش توان راکتیو کل، تلفات کاهش می یابد. از طرف دیگر، عموماً به دلیل میزان بالای نرخ سود و خصوصاً به خاطر مشکلات مربوط به حریم خطوط انتقال، از توسعه و احداث شبکه های انتقال جلوگیری می شود. صنایع جدید رو به افزایش است این امر موجب افزایش بار سیستم می شود که بایستی توسط شبکه تأمین شود. در اینجا لزوم استفاده از تجهیزات کنترل توان راکتیو و بهبود پایداری احساس می شود. نکته دیگر دوری منابع تولید انرژی الکتریکی از مراکز مصرف است. برای انتقال AC در فواصل طولانی مسائل مربوط به پایداری و کنترل ولتاژ به توان راکتیو مربوط میشود. به واسطه مصرف روز افزون وسایل الکترونیکی حساس نظیر رایانه ها و تلویزیون های دیجیتالی و همچنین رشد صنایع با فرآیند پیوسته، نیاز به داشتن تغذیه با کیفیت بالا افزایش یافته است. کاهش ولتاژ یا فرکانس اثرات نامطلوبی بر روی چنین بارهایی دارد و قطع تغذیه میتواند پر هزینه و زیان آور باشد. کنترل توان راکتیو یک ابزار اساسی در حفظ کیفیت تغذیه است به ویژه برای جلوگیری از اغتشاشات ولتاژ که از عمومیترین نوع اغتشاش میباشد. انواع معینی از بارهای صنعتی و از جمله کوره های الکتریکی، دستگاه های حفاری و دستگاه های جوشکاری با دریافت توان اکتیو و راکتیو از سیستم تغذیه تغییرات سریع و وسیع ولتاژ را بر آن تحمیل می کند و اغلب لازم است با بکارگیری وسایل تثبیت کننده ولتاژ، نظیر جبران کننده های توان راکتیو استاتیکی این تغییرات را کاهش داد. یکی از اهداف بازار توان راکتیو تثبیت ولتاژ در شبکه است. از آنجایی که انتقال توان راکتیو از روی شبکه مطلوب نیست، توان راکتیو باید در قسمت های مختلف از سیستم، وابسته به شرایط تقاضا، و علاوه بر آن با توجه به بار و تجهیزات تولیدکننده توان راکتیو همانند ادوات فکت، خازنها و کندانسورها، فراهم شود. تجهیزات تولیدکننده مشخصات مختلفی دارند، به عنوان مثال ژنراتورها تولید کننده های سریع توان راکتیو هستند و قابلیت عملکرد بالایی دارند. در حالی که خازن ها تولید کننده هایی کند هستند. هنوز اکثر بازارهای مستقل به دنبال راهکاری برای جبران مالی خدمات توان راکتیو می باشند. اگر بعد از پخش توان راکتیو توسط اپراتور مستقل سیستم ژنراتوری مجبور به کاهش

توان اکتیو خروجی اش شود، ژنراتور هزینهٔ از دست دادن فرصت به خاطر کاهش تولید و فروش انرژی دریافت می کند اپراتور مستقل سیستم باید مقدار توان راکتیو مورد نیاز و معیارهای مناسب برای انتخاب تولیدکننده های توان راکتیو را مشخص کند. به این خاطر که اپراتور مستقل سیستم برای تأمین توان راکتیو مسئول پرداخت است، از این رو به دنبال تولیدکنندههایی میگردد که پرداخت نهایی را حداقل می کنند. این معیار باعث پخش توان راکتیو روی شبکه می شود که نتیجه آن افزایش تلفات انرژی در سیستم است. در نتیجه اپراتور مستقل سیستم مجبور است سرویس های جبران سازی تلفات را تهیه کند که ایجاد کننده دهزینه های اضافی است. پیچیدگی، زمانی بیشتر می شود که تهیه ی توان راکتیو از طریق ژنراتورهای مستقل صورت بگیرد. در کشورهای صنعتی تا دو دهه ی اخیر صنعت برق که شامل تولید، انتقال و توزیع می شد در اختیار دولت بود و مصرف کننده نیاز خود را از شرکت های دولتی تأمین می کرد. اما به تدریج با توجه به دلایل که در ادامه بیان خواهد شد نظریه تجدید ساختار مطرح شد. دگرگونی و تغییر در قوانین قدیمی و تجدید بنای ساختار سنتی به ساختار نو و تحول یافته را تجدید ساختار گویند که در مفهوم کلی بیانگر تبدیل یک صنعت انحصاری یا دولتی به حالت رقابتی یا خصوصی است. سیاست گذاران و محققان بیان داشته اند که برای به وجود آمدن یک ساختار برق جدید باید چهار مرحله ی جداسازی، تنظیم مقررات، رقابت سازی و خصوصی سازی پیموده شود. نظارت و تنظیم مقررات به این معنی است که دولت قوانین و مقرراتی را برای محدود کردن فعالیت و اینکه یک شرکت چگونه عمل می کند تنظیم نماید. انحصاری بودن، تعهد تغذیه، نرخ های تنظیم شده، بهره برداری با حداقل هزینه، تضمین نرخ بازگشت، نظارت ناظر برخی از شاخص های ساختار سنتی برق می باشند شرکت های در بخش تولید، انتقال و توزیع با ویژگی های ذکر شده مشغول به کار بودند و در حال حاضر
نیز در بسیاری از کشورهای توسعه نیافته در حال ادامه کار می باشند. با این وجود برخی از عوامل محرک جهانی برای ایجاد روند تجدید ساختار در صنعت برق را می توان شامل مواردی همچون پیشرفت در فناوری تولید و افزایش بازده، جایگزینی صنعتی انحصاری با رقابت در تولید و انتقال مالکیت عمومی به خصوص دانست.

۴- مفاهیم اولیه تجدید ساختار

- خصوصی سازی: خصوصی سازی به مفهوم جذب سرمایه های بخش خصوصی و واگذاری اموال دولتی به شرکت های خصوصی می باشد. این مفهوم از مفاهیم اولیه تجدید ساختار در صنعت برق و بهره برداری از این سیستم بصورت ساختار غیر صنعتی است.
- تجارت برق: انرژی برق در صنعت تجدید ساختار شده بصورت یک کالای تجاری مبادله می شود.
- دسترسی باز: به مفهوم ایجاد شبکه برقی که تمامی بازیگران این صنعت، به آن دسترسی داشته باشند، می باشد. ایجاد یک محیط رقابتی، عامل استقبال سیاستگذاران کشورها از این روش می باشد.
- تفکیک یا جداسازی: به جداسازی شرکت های با ادغام عمومی به بخش های مجزای تولید، انتقال، توزیع و فروش تفکیک یا جداسازی می گویند که این امر موجب می شود که وظایف هر بخش به طور مجزا و مشخص تعیین شوند.
- مقررات زدایی: نگاهی جدید به قوانین سابق و تنظیم قوانین جدید در صنعت برق به منظور تشویق و برای ایجاد رقابت می باشد. البته اغلب از واژه تعدیل قوانین به جای مقررات زدایی استفاده می شود.

۵- دلایل عمده برای تجدید ساختار صنعت برق

الف) نیاز به تغییر قوانین نظارتی و تنظیمی: در اواخر قرن بیستم دیگر نیازی به ساختار سنتی نبود. چرا که فناوری صنعت به قدر کافی توسعه یافته بود و دیگر نیازی به عملکردهای مالی بدون ریسک احساس
نمی شد.

ب) خصوصی سازی: رسیدن به صنعت برق خصوصی از دلایل تجدید ساختار بود. یکی از دلایل این عمل بهره برداری بهتر بخش خصوصی نسبت به بخش دولتی است و توجه داشته باشید که تغییر ساختار صرفاً خصوصی سازی نمیباشد، ولی تغییر ساختار در بسیاری از کشورها با خصوصی سازی برای جذب سرمایه گذاری مصادف است

ج) پیش بینی کاهش هزینه: رقابت باعث ابداع و افزایش بازده میشود اما در مورد کاهش یا افزایش هزینه ها تجربیات مختلف وجود دارد ولی آنچه که مسلم است ارزش مشتری افزایش پیدا می کند.

د) عدم وجود انگیزه برای نوآوری در محیط نظارتی و تنظیمی: چنانچه ارائه یک طرح جدید که منجر به بهبود عملکرد شرکت شود نرخ بازگشت سرمایه شرکت را تغییر نخواهد داد، اما اگر باعث افزایش هزینه ها شود شرکت مجبور به تقبل این هزینه است. بنابراین انگیزهای برای نوآوری به وجود نمی آید.

ه) افزایش توجه به مشتری با توسعه رقابت: در سیستم تجدید ساختار شده به نیاز مشتری قبل از تقاضا پاسخ داده می شود در حالی که در ساختار سنتی بنا بر تعهد تغذیه، شرکت در صورت درخواست مجدد مشتری نیاز او را برطرف می کند. بنابراین صنعت تجدید ساختار شده به بهبود سرویسدهی به مشتری منجر خواهد شد.

و) صنعت برق تجدید ساختار شده: اساس تجدید ساختار در صنعت برق ایجاد رقابت در بخشهای تولید وفروش می باشد اما سیاستگذاران این صنعت به این نتیجه رسیده اند که بهتر است تنها یک سیستم انتقال و توزیع برق وجود داشته باشد، به این معنی که اولاً هر شرکت با صلاحیت میتواند برق تولیدی خود را در یک بازار با فضای رقابتی بفروشند ثانیاً شرکت هایی وجود دارند که برق را بطور عمده خریداری کرده و به مصرفکنندگان بفروشند ثالثاً تنها یک نهاد مستقل برای انتقال و توزیع برق وجود دارد که همه مصرف کنندگان می توانند به طور یکسان به آن دسترسی داشته باشند.

ز) بازار عمده فروشی توان: به طور کلی ایجاد رقابت در سیستم تجدید ساختار شده با وجود داشتن مکانی برای ارائه خدمات یک تولید کننده معنا پیدا می کند. در دنیای امروز این فرآیند توسط سه نوع تشکّل بازار اشتراکی، تبادل دوطرفه و بازار تبادل توان صورت می گیرد.

بازار اشتراکی: یک آژانس دولتی یا شبه دولتی است که در آن تعداد خریداران تنها یکی می باشد. در این بازار خریدار و فروشنده یکدیگر را می شناسند و معمولاً تمامی خریداران قیمت یکسانی می پردازند، ضمناً پاسخگویی این سیستم در قبال خدمات خود نیز یکی از مزایای این روش است.

تبادل دوطرفه: در این روش تعداد خریداران بیش از یکی است. مشابه بازار اشتراکی خریدار و فروشنده یکدیگر را می شناسند. تفاوت های این بازار با بازار اشتراکی در این است که تمامی خریداران ملزم به پرداخت قیمت یکسانی نیستند و قیمت امری کاملاً توافقی است

بازار تبادلات توان: این بازار مشابه بازار بورس می باشد که در آن تعداد خریداران بسیار زیاد می باشد تفاوت اصلی این بازار با دو بازار قبل در این است که خریدار و فروشنده یکدیگر را نمی شناسند. در این بازار نیز مشابه بازار اشتراکی، خریداران ملزم به پرداخت قیمت یکسانی می باشند.

۶- بخش انتقال در صنعت برق تجدید ساختار شده

هر رقابتی در بازار توان مستلزم اطمینان از دسترسی و استفاده از سیستم انتقال است. البته در ساختار بازار اشتراکی چون این نهاد بهره بردار سیستم انتقال است مشکلی ایجاد نمیشود. ولی در دو نوع مکانیزم دیگر باید شبکه انتقال به طور یکسان برای خریداران و فروشندگان وجود داشته باشد. تقریباً در تمامی طرح های سیستم تجدید ساختار شده، یک مرکز کنترل وجود دارد که سیستم انتقال را کنترل و بهره برداری می کند.

وظایف عمده بهره بردار سیستم از یک شبکه با دسترسی باز عبارتند از:

- ایمنی سیستم: یعنی بهره برداری پیوسته، پایدار و اقتصادی باشد .
- انتقال توان: تهیه سیستم انتقال توان در بازار رقابتی عمده فروشی
- قیمتگذاری انتقال: تعیین قیمت برای استفاده از سیستم انتقال
- دسترسی باز عمومی: تمامی بازیگران، باید دسترسی باز و یکسانی به شبکه داشته باشند.

۷- قیمت گذاری توان راکتیو در محیط تجدید ساختار یافته

امروز در برخی از کشورها تهیه انرژی الکتریکی بصورت رقابتی و توسط بازارهای انرژی الکتریکی صورت می گیرد. لازمهی ایجاد چنین بازارهایی وجود سرویس هایی تحت عنوان سرویسهای جانبی است که بهره بردار شبکه بتواند به کمک آنها مسائل و نیازهای فنی سیستم را برآورده سازد. توان راکتیو یکی از مهمترین این سرویس های می باشد که برای کنترل ولتاژ و کاهش تلفات سیستم های انتقال توان باید تولید و به سیستم تزریق گردد. وجود روش ها و الگوریتم های قیمت گذاری مناسب یکی از راه های تهیه سرویس های جانبی و از جمله توان راکتیو می باشد. در ساختار جدید صنعت برق بخشهای مختلف سیستم قدرت از هم مجزا شده اند و بهره بردار شبکه برای حفظ پایداری و ایمنی شبکه قدرت نیاز به یک سری سرویسهای پشتیبان دارد که یکی از این سرویسها توان راکتیو می باشد یکی از روش های مناسب برای تهیه چنین سرویس هایی وجود الگوریتم های قیمت گذاری مناسب و کارآمد می باشد. در زمینه ی قیمت گذاری توان راکتیو پژوهش هایی توسط شماری از محققین انجام گرفته است که در ادامه به ارائه ی پیشین های از آنها پرداخته شده است.

۸-توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز

با توجه به تأثیر قابل توجه توان راکتیو بر چگونگی پروفیل و پایداری ولتاژ، سرویس جانبی تأمین این نوع توان، به خصوص در شرایطی که در بازار رقابتی انرژی الکتریکی، بسته به نحوهٔ انجام قراردادها، سیستم قدرت به مرزهای بهره برداری خود نزدیک می شود، از اهمیت ویژهای برخورداراست.از طرف دیگر مسئلهٔ قیمت گذاری سرویس های جانبی، در شرایط مختلف بهره برداری سیستم حائز اهمیت است. به خصوص تعیین چارچوبی در قیمت گذاری توان راکتیو، با توجه به کیفیت برق تحویل داده شده به خریداران نیاز به توجه خاص دارد. در بخش های بعدی روشی جدید برای قیمت گذاری زمان-واقعی توان راکتیو با توجه به دستیابی به پروفیل بهینهٔ ولتاژ و پایداری بهینهٔ ولتاژ در کمتریتن هزینهٔ تولید توسط ISO ارائه می شود.

۹-تعیین نرخ زمان- واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به پروفیل و پایداری بهینهٔ ولتاژ

همچنان که ذکر شد، وظیفهٔ کنترل و بهره برداری از سیستم انتقال در صنعت برق با دسترسی باز بر عهدهٔ ISO قرار دارد. ISO موظف به فراهم کردن تجهیزات مورد نیاز برای انتقال مطمئن توان از فروشندگان توان به خریداران توان است .فراهم کردن تجهیزات تولید توان راکتیو و تأمین توان راکتیو مورد نیاز شبکهٔ قدرت از مهمترین وظایف ISO است .همچنین تعیین یک نرخ منصفانه و معقول برای توان راکتیو در قبال هر قرارداد انجام شده در سیستم، از دیگر وظایف ISO است.اهداف توأم در مسئلهٔ تعیین هزینهٔ زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به پروفیل بهینه و پایداری ولتاژ در شبکه وحداقل سازی تلفات سیستم است .قیود مسئلهٔ بهینه سازی یاد شده، کلیه قیود مساوی و نامساوی در بهره برداری از یک شبکهٔ قدرت با دسترسی باز است .بدین ترتیب مسئله به یک پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی در سیستم قدرت با دسترسی باز تبدیل می شود .در تعیین نرخ زمان-واقعی سرویس توان راکتیو، از مفهوم هزینه های حدی استفاده شده که در بخش های بعدی داده می شود.

۱۰-فرمول بندی مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی

در صنعت برق با دسترسی باز، ISO در انجام سرویس های جانبی انتقال که بر عهده دارد به واحد یا واحدهای نیروگاهی متعلق به خود نیاز دارد .از طرفی در محیط با دسترسی باز، قراردادهای دو جانبهٔ انرژی بین فروشندگان و خریداران توان، بر مبنای میزان مشخصی از توان در یک بازهٔ زمانی معین صورت می پذیرد و فروشندگان توان (تولید کنندگان) به تزریق توان حقیقی به شبکه، بر اساس قراردادهای از پیش تنظیم شده،

می پردازند. . بدین ترتیب ISO موظف به فراهم کردن امکاناتی است که با کمترین هزینه، قراردادهای منعقد شده در سیستم دریک حاشیهٔ امنیت مناسب انجام پذیرد .لذا حداقل سازی هزینهٔ تلفات در یک محیط با دسترسی باز، هم ارز حداقل سازی هزینهٔ تولید واحد یا واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO است[ ].

بنابراین اولین تابع هدف، حداقل سازی تابع به شکل زیر تعریف می شود :

$$F_1 = \sum_{i \in NG} C_i(P_{gi}) \quad (۱-۱)$$

که در آن

$C_i(P_{gi})$: هزینهٔ تولید (واحد پول برساعت) واحد نیروگاهی iام متعلق به ISO درمیزان تولید P_{gi} (مگاوات) است.

NG : تعداد کل تابع واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO است.

تابع زیر به عنوان تابع هدف در رابطه با پروفیل ولتاژ تعریف شده است.

$$F_2 = \sum_{i\in N}\alpha_i(|V_i| - V_{ref,i})^2 \quad (۱-۱)$$

که در آن

N : تعداد کل شین های شبکه

α_i : ضریب امنیت

$|V_i|$: اندازه ولتاژ

$V_{ref,i}$: میزان مطلوب ولتاژ شین iام

با حداقل سازی F_2 ، $|V_i|$ تا سرحدامکان به $V_{ref,i}$ نزدیک خواهد شد.

پایداری ولتاژ در شبکه، در ارتباط مستقیم با میزان توانایی سیستم در تأمین توان راکتیو مورد نیاز شبکه است .به عبارت دیگر هر چه بیشتر بودن رزرو توان راکتیو در سیستم منجر بهدرجهٔ بالاتری از پایداری ولتاژ در سیستم خواهد بود[ ].

بدین ترتیب، حداقل سازی تابع زیر معادل حداکثر رزرو توان راکتیو در شبکه است.

$$F_3 = \sum_{i\in NG}\left[\frac{Q_{gi}}{Q_{gi}^{max} - Q_{gi}^{min}}\right]^2 \quad (۱-۱)$$

که در آن

NG : تعداد کل منابع تولید توان راکتیو در شبکه

Q_{gi} : میزان تولید توان راکتیو

Q_{gi}^{max} : حداکثر مجاز تولید توان راکتیو منبع تولید توان راکتیو iام

Q_{gi}^{min} : حداقل مجاز تولید توان راکتیو منبع تولید توان راکتیو ام

تعریف F3 به صورت فوق باعث خواهد شد در روند بهینه سازی، هر منبع تولید توان راکتیو با توجه به ظرفیت نصب شده اش، به حداقل ممکن تولید توان راکتیو بپردازد.

بدین ترتیب، نمایش فشرده پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی به صورت زیر خواهد بود:

Min F1 (۱-۱)

Min F1 (۲-۱)

Min F1 (۳-۱)

قیود تساوی شامل قیود موازنهٔ توان (حقیقی و راکتیو) در هرشین و میزان تزریق توان حقیقی توسط فروشندگان توان(تولیدکنندگان) بر طبق قراردادهای منعقد شده است.

$$P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^{N}|V_i|.|V_j|.|V_{ij}|.\cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = 0 \quad i\in\{1,2,\dots,N\} \quad (۱-۱)$$

$$P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^{N}|V_i|.|V_j|.|V_{ij}|.\cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = 0 \quad i\in\{1,2,\dots,N\} \quad (۲-۱)$$

$$P_{gi} = P_{gi}^{cte} \quad i\notin\{1\dots,NG_ISO\},\ i\in\{1,\dots\dots NG\} \quad (۳-۱)$$

در روابط فوق

$P_{gi}(P_{di})$: میزان تولید توان حقیقی در شین iام

$Q_{gi}(Q_{di})$: میزان تولید توان راکتیو در شین iام

$|Y_{ij}|$: اندازه المان ij از ماتریس Y_{bus}

θ_{ij} : زاویه المان ij از ماتریس Y_{bus}

$|V_i|$: دامنه ولتاژ شین iام

δ_i : زاویه ولتاژ شین iام

P_{gi}^{cte} : میزان تزریق توان حقیقی توسط فروشندهٔ iام

قیود نامساوی عبارت است از حدود دامنهٔ ولتاژ شین ها،حدود تولید توان راکتیو منابع تولید توان راکتیو، حدود تولید توان حقیقی ژنراتورهای متعلق به ISO و بالاخره حدود ظرفیت انتقال توان حقیقی خطوط که به ترتیب در زیر نمایش داده شده است:

$$V_i^{min} \le |V_i| \le V_i^{max} \qquad i \in \{1,2 \dots .,N\} \qquad (۱-۱)$$

$$Q_{gi}^{min} \le Q_{gi} \le Q_{gi}^{max} \qquad i \in \{1,2 \dots .,N\} \qquad (۱-۲)$$

$$P_{gi}^{min} \le P_{gi,ISO} \le P_{gi}^{max} \qquad i \in \{1,2 \dots .,N\} \qquad (۱-۳)$$

$$P_{ij}^{min} \le P_{ij} \le P_{ij}^{max} \qquad i,j \in \{1,2 \dots .,N\}, i \ne j \qquad (۱-۴)$$

با حل مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی، روابط (۴ تا ۸) ، P_g میزان تولید واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO ، Q_g میزان توان راکتیو تولیدی منابع تولید توان راکتیو، $\underline{\delta}$ و $\underline{V}$ اندازه و زاویهٔ ولتاژ شین ها تعیین می شود .نحوهٔ حل مسئلهٔ فوق در زیر آورده شده است.

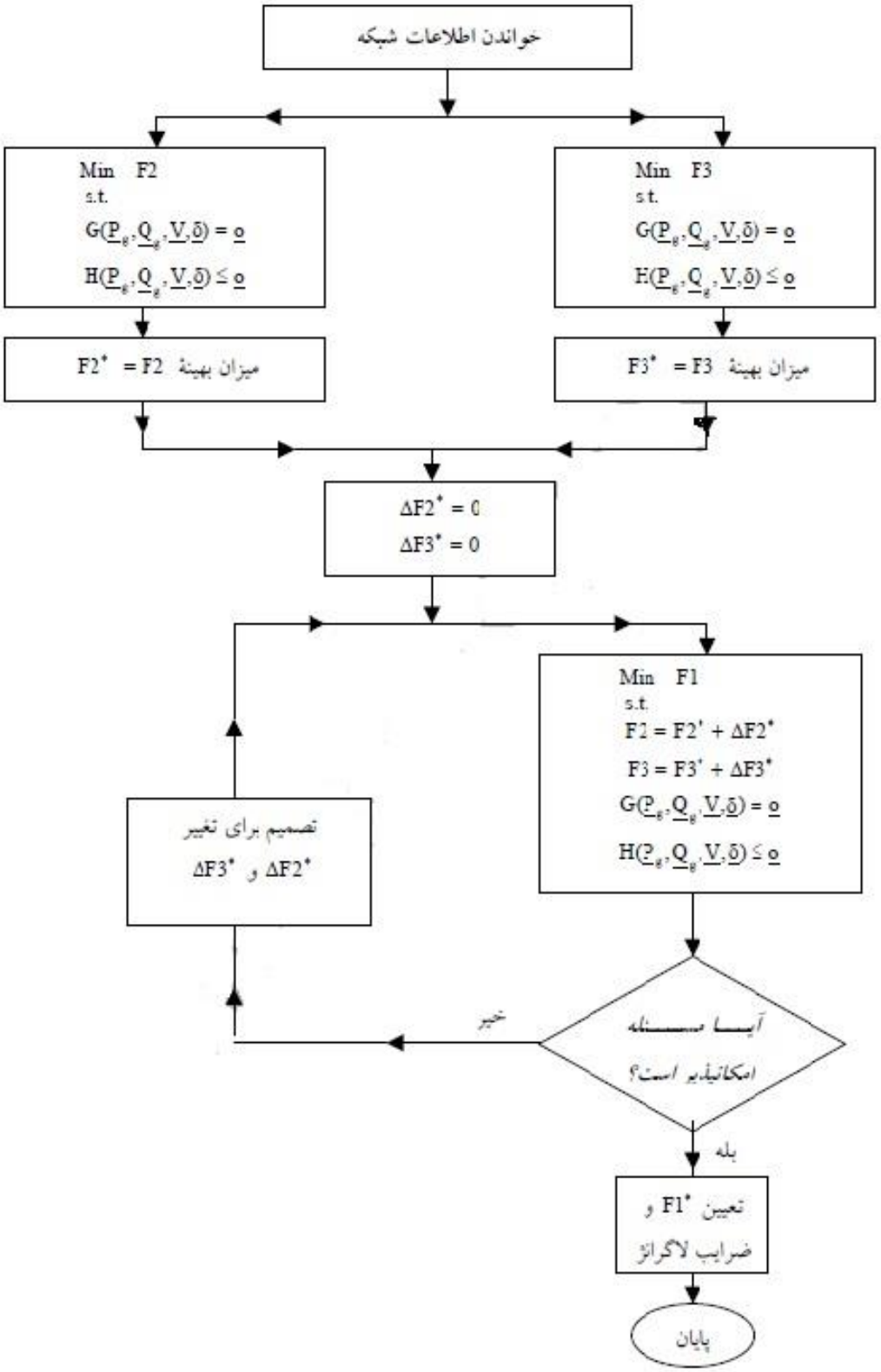
۱۱-روند حل مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی

به منظور حل مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی روابط (۴تا۸) ، از ایدهٔ روش LMG استفاده شده است[ ]. روش LMG]درحل مسائل بهینه سازی چند هدفی به کار می رود. با استفاده از روش فوق در بهینه سازی توأم n تابع هدف، تحت یک سری از قیود، ابتدا n-1 زیرمسئلهٔ بهینه سازی تشکیل می شود.

در این n-1 زیرمسئله قیود، همان قیود مسئلهٔ اصلی است اما فقط یکی از n تابع هدف منظور می شود.

با حل n-1 زیر مسئلهٔ بهینه سازی، حل بهینه برای n- 1 تابع هدف تحت قیود اصلی مسئله تعیین می شود .هر حل بهینه، یک کران برای تابع مورد نظر بدست می آید. در این مرحله nامین زیرمسئلهٔ بهینه سازی تشکیل حل می شود. در زیر مسئلهٔ اخیر، تابع هدف و و قیود شامل قیود مسئلهٔ اصلی به انضمام جواب های بهینهٔ n-1 تابع هدف قبلی است. با حل آخرین زیرمسئلهٔ بهینه سازی، حل بهینهٔ مسئلهٔ اصلی تعیین می شود.

با توجه به توضیحات فوق، نمودار جریانی شکل(۱) ، روندحل مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی (که از ایدهٔ LGM استفاده می کند) را به نمایش می گذارد.


خواندن اطلاعات شبکه
Min F2
s.t.
G(Pg,Qg,V,δ) = o
H(Pg,Qg,V,δ) ≤ o
Min F3
s.t.
G(Pg,Qg,V,δ) = o
H(Pg,Qg,V,δ) ≤ o
F2* = F2 میزان بهینه
F3* = F3 میزان بهینه
ΔF2* = 0
ΔF3* = 0
Min F1
s.t.
F2 = F2* + ΔF2*
F3 = F3* + ΔF3*
G(Pg,Qg,V,δ) = o
H(Pg,Qg,V,δ) ≤ o
تصمیم برای تغییر
ΔF3* و ΔF2*
آیـا مسـئله
امکانپذیر است؟
خیر
بله
تعیین F1* و
ضرایب لاگرانژ
پایان

با توجه به شکل (۱) پس از خواندن اطلاعات شبکه و تعیین حل بهینه (کران پایین) برای تابع هدف پروفیل ولتاژ، F2* ، برای تابع هدف پایداری ولتاژ، F3* ،آخرین زیرمسئلهٔ بهینه سازی به هدف حداقل سازی تلفات سیستم قدرت با دسترسی باز،F1 ، تشکیل می شود. از آنجایی که حداقل سازیF2 تنها با قیود حداقل و حداکثر تولید توان راکتیو منابع تولید توان راکتیو صورت می گیرد و قید دیگری روی تولید توان راکتیو وجود ندارد، امکان دارد در روند رسیدن به بهترین پروفیل ولتاژ، برخی ازمنابع تولید توان راکتیو به حدود بهره برداری خود نزدیک شوند. از طرف دیگر F ،در حداقل سازی تابع F3 و رسیدن به بهترین حد پایداری ولتاژ، برای داشتن بیشترین رزرو توان راکتیو، تا سرحد امکان تولید توان راکتیو منابع تولید توان راکتیو، نزدیک به صفرباقی می ماند .لذا بسته به شرایط شبکهٔ قدرت تحت آزمون، برقراری همزمان F2=F2* وF3=F3* مورد سوال است و ممکن است وارد شدن همزمان آنها به عنوان قید در مسئله، منجر به ناممکن شدن مسئله شود .از این رو در صورت امکان ناپذیر بودن مسئله، بسته به شبکهٔ قدرت مورد نظر، بایداجازه داده شود که تابع هدف پروفیل ولتاژ یا تابع هدف پایداری ولتاژ و یا هر دوی آنها مقداری از کران پایین خود (F2* وF3*) به میزان $\Delta F2^*$ و $\Delta F3^*$ فاصله بگیرند تا ازای از دست دادن بهینگی مطلق در پروفیل و یا پایداری ولتاژ، مسئله به یک مسئلهٔ امکانپذیر تبدیل شود .برای محاسبهٔ مقادیر $\Delta F2^*$ و $\Delta F3^*$ راه های مختلفی می توان پیشنهاد کرد .روش به کار گرفته شده بر این مبنا استوار است که ابتدا میزان $\Delta F2^*$ به صورت زیر تعیین می شود:

الف) با در نظر گرفتن F1 ، عنوان تنها تابع هدف و حل مسئله مقدار تابع F2 محاسبه می شود.

ب) میزان بهینهٔ مطلق F2 (F2 با در نظر گرفتنF2 به عنوان تنهاتابع هدف و حل آن) ، محاسبه می شود.

اکنون میزان مطلوب برای پروفیل ولتاژ، قرارگرفتن مقدار تابع F2 در میانگین دو عدد به دست آمده از حالت های (الف) و (ب) قرارداده می شود. روشن است که ΔF2* برابر تفاضل میزان بهینهٔ F2 (حالت ب) ، از مقدار میانگین یاد شده است.در شرایط فوق و در یک روند تکراری، مطابق شکل (۱) سعی می شود کوچکترین مقدار ممکن برایΔF3* به دست آید تا بدین ترتیب، تا سرحد امکان، بهترین پایداری ولتاژ در سیستم حاصل شود.بدین ترتیب حداقل هزینهٔ تولید واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO یعنی F1=F1*

و ضرایب لاگرانژ تعیین می شود. توضیح در خصوص ضرایب لاگرانژ و نحوهٔ استفاده از آنها درتعیین هزینهٔ زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در زیربخش زیرآورده شده است.

۱۲-استفاده از هزینه های حدی در قیمت گذاری زمان واقعی سرویس توان راکتیو

طبق تعریف، هزینهٔ حدی به مفهوم میزان تغییر تابع هدف بهینه سازی در اثر تغییر یک متغیر بهینه سازی است .به منظور قیمت گذاری زمان واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به پروفیل و پایداری بهینهٔ ولتاژ از هزینه های حدی استفاده شده است[ ].در ادامه، ارتباط هزینه های حدی با ضرایب لاگرانژ ارائه می شود.

برای حل یک مسئلهٔ بهینه سازی با استفاده از روش لاگرانژ، معادلهٔ لاگرانژ تشکیل و حل می شود .با توجه به نمودار جریانی موجود در شکل (۱) ، حل آخرین زیرمسئله (حداقل سازی F1) ، با استفاده از روش لاگرانژ، منجر به تشکیل معادلهٔ لاگرانژ زیرمی شود:

L((۱-۱)

$$\underline{P_g},\underline{Q_g},\underline{V},\underline{\delta}) = F1 - \gamma_{Profile}.[F2 - F2^* - \Delta F2^*] - \gamma_{stability}.[F3 - F3^* - \Delta F^*] - \underline{\gamma^t_=}.G(\underline{P_g},\underline{Q_g},\underline{V},\underline{\delta}) - \underline{\mu^t_\leq}.H(\underline{P_g},\underline{Q_g},\underline{V},\underline{\delta})$$

در رابطه فوق ،L تابع لاگرانژ ، $\gamma_{Profile}$ ،$\gamma_{stability}$ ، $\underline{\gamma^t_=}$ ، $\underline{\mu^t_\leq}$ به ترتیب، ضرایب لاگرانژ در رابطه با تابع پروفیل ولتاژ، تابع پایداری ولتاژ، قیود مساوی و قیود نامساوی است t نشانگر ترانهاده است .گستردهٔ معادلهٔ لاگرانژ در پیوست (الف)آورده شده است.با توجه به روابط (۹) تا (۱۵) ، $\underline{\gamma^t_=}$ و $\underline{\mu^t_\leq}$ شامل درایه های زیر است:

$$\underline{\gamma^t_=} = \left[MC_{pi}, MC_{qi}, \Gamma_{P_{gi}}\right] \quad (۱-۱)$$

$$\underline{\mu^t_\leq} = \left[\upsilon_i^{min}, \upsilon_i^{max}, \varphi_i^{min}, \varphi_i^{max}, \Gamma_{P_{gi}ISO}^{min}, \Gamma_{P_{gi},ISO}^{max}, \eta_{P_{ij}}^{min}, \eta_{P_{ij}}^{max}\right] \quad (۱-۱)$$

واحد هر یک از ضرایب لاگرانژ مندرج در روابط ( ) و ( ) با استفاده از رابطهٔ ( ) مشخص می شود

F1 بر حسب پول بر ساعت و قید مربوط به توان راکتیو در هر شین،رابطهٔ ( ) ، بر حسب مگاوار است، لذا ضریب لاگرانژ مربوطه،MC_{qi} ، برحسب واحد پول بر مگاوار ساعت است، در نتیجه با توجه به تابع لاگرانژ، معادله(۱۶) و تعریف هزینه های حدی،قیمت زمان واقعی توان راکتیو در شین مصرف iام در یک بازه زمانی مشخص، عبارت است از $\frac{\partial L}{\partial Q_{Qdi}}$ که با توجه به روابط ( ) و ( ) :

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{Qdi}} = MC_{qi} \quad i \in \{1,2,\dots\dots ND\} \qquad (۱-۱)$$

واحد پول بر مگاوار ساعت می باشد.

که در رابطه فوق ND تعداد کل شین های بار است . توان راکتیو تولیدی ، Q_{gi} ، جزو متغیرهای بهینه سازی است ، لذا $\frac{\partial L}{\partial Q_{gi}} = 0$ خواهد بود و با توجه به روابط ( ) تا ( ) :

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{gi}} = -MC_{qi} - \varphi_i^{min} + \varphi_i^{max} = 0 \qquad i \in \{1,2,\dots\dots NG\} \qquad (۱-۱)$$

$$MC_{qi} = \varphi_i^{max} - \varphi_i^{min} \qquad i \in \{1,2,\dots NG\} \qquad (۱-۱)$$

واحد پول بر مگاوار ساعت می باشد.

لازم به ذکر است، صفر شدن $\frac{\partial L}{\partial Q_{gi}}$ در یک شین تولیدی توان راکتیو ، لزوما به مفهوم صفر شدن هزینهٔ حدی در آن شین نیست؛ اگر منبع تولید توان راکتیو فوق، در روند حل، به یکی از حدود بالا یا پایین خود برسد، در این صورت، ضرایب لاگرانژ در خصوص محدودیت مربوطه، غیر صفر شده و در نتیجه هزینهٔ حدی توان راکتیو، در شین یاد شده، غیر صفر خواهد بود و برعکس .همچنان که مشاهده می شود، با تعیین ضرایب

لاگرانژ که در نتیجهٔ حل مسئلهٔ بهینه سازی به دست می آید، قیمت های زمان واقعی توان راکتیو در کلیهٔ شین های سیستم، با توجه به روابط ( ) و ( ) تعیین می شود.

۱۳- نتایج محاسبات

یک شبکهٔ ۹ شینه دارای نمودار تک خطی برای انجام آزمون و ارائهٔ تایج این تحقیق انتخاب شده است. در این شبکه، واحد نیروگاهی شین ۱ متعلق به ISO و واحدهای نیروگاهی موجود روی شین های ۲ و ۳ فروشندگان توان در سیستم فرض شده است. همچنین در جدول شماره یک قراردادهای دوجانبه بین تولیدکنندگان توان (فروشندگان) و مصرفکنندگان توان ارایه شده است.

جدول ۱- قراردادهای دوجانبهٔ منعقد شده در سیستم آزمون

قرارداد	شین تولید (فروشنده)	شین مصرف (خریدار)	میزان قرارداد (مگاوات)
T1	2	8	20
T2	3	5	20
T3	2	6	20

جدول ۲- نتایج حل بهینه، برای دو زیرمسئله با توابع هدف

Q_{g9}	Q_{g8}	Q_{g7}	Q_{g3}	Q_{g2}	Q_{g1}	$\|V_9\|$	$\|V_8\|$	$\|V_7\|$	$\|V_6\|$
0.0896	0.182	0.0883	0.1087	-0.075	0.43	1.03	1.027	1.033	1.001
0.1325	0.2928	0.1	-0.014	-0.343	0.711	1.000	1.000	0.999	0.975
0.0013	0.0014	0.0001	0.0127	0.0118	0.827	0.988	0.979	0.996	1.025

جدول ۳- نتایج حل پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی

Q_{g9}	Q_{g8}	Q_{g7}	Q_{g3}	Q_{g2}	Q_{g1}	$\|V_9\|$	$\|V_8\|$	$\|V_7\|$	$\|V_6\|$	$\|V_5\|$	$\|V_4\|$	$\|V_3\|$	$\|V_2\|$	$\|V_1\|$	تابع هدف
0.09	0.182	0.088	0.109	-0.075	0.43	1.03	1.027	1.033	1.001	1.00	1.034	1.05	1.05	1.06	F1
0.025	0.027	0.003	0.116	0.087	0.596	0.988	0.979	0.993	0.9998	0.997	1.03	1.03	1.041	1.063	F1 & F2=0.008 & F3=0.01115
0.067	0.078	0.008	0.163	0.103	0.437	0.994	0.986	0.955	0.981	0.981	1.015	1.028	1.034	1.043	F1 & F2=0.005 & F3=0.042
0.067	0.079	0.008	0.156	0.111	0.417	1.008	1.001	1.009	0.995	0.994	1.028	1.042	1.048	1.055	F1 & F2=0.008 & F3=0.042

۱۴-نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله، با فرمول بندی یک مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی یافتهٔ چند هدفی و حل آن با استفاده از ایدهٔ روش قیمت گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در سیستم قدرت با دسترسی باز پرداخته شده و اثر میزان مطلوبیت پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ در شبکه، بر قیمت گذاری نشان داده شده است. همچنین از روش تحلیل حساسیت در تعیین فاصلهٔ پایداری شبکه در نقطهٔ کار منتج از حل مسئلهٔ پخش بار بهینهٔ توسعه یافتهٔ چند هدفی استفاده شده است. انتخاب میزان مطلوب پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ، وابستگی مستقیم به شبکهٔ قدرت و تولیدکنندگان و مصرفکنندگان در شبکه دارد .در این مقاله ضریب اهمیت تمام شین ها برابر واحد در نظرگرفته شده است و پروفیل و پایداری ولتاژ در کل شبکه مد نظربوده است. امکان تکرار مطالعات با توجه خاص به یک شین دررسیدن جانبی انتقال در محیط با .به یک سطح مطلوب از پروفیل و پایداری ولتاژ در آنشین و قیمت گذاری در شرایط ذکر شده، امکانپذیر است دسترسی باز، مطرح است که باید درصورت لزوم توسط مشتریان خریداری شود.

۱۵-مراجع

1. Philipson, L., and Willis, H. L., *UnderstandingElectric Utilities and De-Regulation*, Marcel Dekker, Inc., 1999.

2. Ilic, M., Galiana, F., and Fink, L., *Power SystemRestructuring: Engineering and Economics*, Kluwer Academic Publishers, 1998.

3. Galiana, F. D., and Ilic, M. A., "MathematicalFramework for the Analysis and Management of Power Transactions Under Open Accessm" *IEEETransactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, May, pp. 681-7, 1998.

4. Shirmohammadi, D., Wollenberg, B., Vojdani, A.,Sandrin, P., Pereira, M., Rahimi, F., Schneider, T.,and Stott, B., "Transmission Dispatch andCongestion Management in the Emerging EnergyMarket Structures," *IEEE Transactions on PowerSystems*, Vol. 13, No. 4, Nov., pp. 1466-74, 1998.

5. Caramanis, M. C., Bohn, R. E., and Schweppe, F.C., "Spot Pricing of Electricity: Practice and Theory," *IEEE Transactions on Power Apparatusand Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3234-3245,Sep. 1982.

6. Bohn, R. E., Caramanis, M. C., and Schweppe, F.C., "Optimal Pricing in Electrical Network OverSpace and Time," *The Rand Journal of Economics*,Vol. 15, No. 3, pp.360-376, 1984.

7. Schweppe, F. C., Caramanis, M. C., Tabors, R. D.and Bohn, R. E., *Spot Pricing ofElectricity*,KluwerAcademic Publishers, 1988.

8. Baughman, M. L., and Siddiqi, S. N., "Real-timePricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results," *IEEE Transactions on Power Systems*.Vol. 6, No. 2, pp. 23-9, Feb. 1991.

9. Baughman, M. L., Siddiqi, S. N., and Zarnikau, J.W., "Advanced Pricing in Electrical Systems. I. Theory," *IEEE Transactions on Power Systems*,Vol. 12, No. 1, pp. 489-95, Feb. 1997.

10. Baughman, M. L., Siddiqi, S. N., and Zarnikau, J.W., "Advanced Pricing in Electrical Systems. II. Implications," *IEEE Transactions on PowerSystems*, Vol. 12, No. 1, pp. 496-502, Feb. 1997.

11. Li, Y. Z., and David, A. K., "Pricing Reactive PowerConveyance," *IEE-Proceedings-C-* (Generation, Transmission-and-Distribution) Vol. 140, No. 3,May, pp.174-80, 1993.

12. Li, Y. Z., and David, A. K., "Wheeling Rates ofReactive Power Flow Under Marginal CostPricing," *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 9, No. 3, pp.1263-9, Aug. 1994

13. Muchayi, M., and El-Hawary, M. E., "A Summaryof Algorithms in Reactive Power Pricing," 1995 Canadian Conference on Electrical and ComputerEngineering (Cat. No.95TH8103). *IEEE*, New York, NY, USA, Vol. 2, pp. 692-6, 1995.

14. Chattopadhyay, D., Bhattacharya, K., and Parikh, J.,"Optimal Reactive Power Planning and its Spot-Pricing: An Integrated Approach," *IEEETransactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp.2014-20, Nov. 1995.
15. El-Keib, A. A., and Ma, X., "Calculating Short-RunMarginal Costs of Active and Reactive Power Production," *IEEE Transactions on Power Systems*.Vol. 12, No. 2, pp. 559-65, May 1997.

16. Choi, J. Y., Rim, S. H., and Park, J. K., "OptimalReal Time Pricing of Real and Reactive Powers," *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 13,
No. 4, pp. 1226-31, Nov. 1998.

۱۷-یوسفی، غ.، سیفی، ح.، قاضیزاده، م. ص.، و سبوحی، ی.،قیمت گذاری سرویس توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز،" در مجلهٔ علمی و پژوهشی امیرکبیر، سال . ۳۷۶ شماره ۴۸ - دوازدهم، پاییز ۱۳۸۰ ، ص ۳۶۰

۱- ۱۸- پایداری و کنترل سیستمهای قدرت، تألیف پ.ش. کندور، .ترجمهٔ حسین سیفی، علی خاکی صدیق