بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

قیمت‌گذاری انرژی اکتیو به روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

سجاد مخدومی کویری

استاد راهنما

دکتر غلامرضا یوسفی

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق –قدرت آقای سجاد مخدومی کویری

تحت عنوان

قیمت‌گذاری انرژی اکتیو به روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی

در تاریخ ۹۱/۱۱/۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر غلامرضا یوسفی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر اکبر ابراهیمی
۳- استاد داور	دکتر مهدی معلم
۴- استاد داور	دکتر احمد رضا تابش
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود عمومی

بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و تشویق استاد گرامی جناب آقای دکتر غلامرضا یوسفی سپاسگزاری کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

پدرم که سخاوتش رشک باران است

مادرم که خورشید حتی به گرمی مهرش نیست

همسرم که ستاره همیشه درخشان آسمان قلبم است

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ کلیات ۲

۱-۲ تاریخچه ۳

۱-۳ خلاصه فعالیت‌های انجام شده در این پایان‌نامه ۴

۱-۴ روند ارائه مطالب ۵

فصل دوم: مروری بر روش‌های تعیین قیمت در بازارهای برق

۲-۱ بازارهای برق و اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها ۹

۲-۱-۱ عناصر کلیدی بازار برق ۱۰

۲-۱-۲ اصول قیمت‌گذاری انرژی در بازارهای برق ۱۳

۲-۲ معرفی پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه محاسبه‌ی قیمت حاشیه‌ای محلی ۱۶

۲-۳ معرفی سیستم‌های قیمت‌گذاری در بازارهای برق جهان ۲۰

۲-۴ معرفی سیستم قیمت‌گذاری در بازار برق ایران ۲۲

۲-۴-۱ منطق محاسباتی برنامه بازار روز قبل انرژی در ایران ۲۴

۲-۴-۲ تسویه در بازار روزانه انرژی و رزرو عملیاتی ۲۶

۲-۵ جمع‌بندی فصل ۲۷

فصل سوم: فرمول‌بندی مسأله قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی

۳-۱ معرفی مسئله‌ی پخش بار بهینه (OPF) ۲۹

۳-۲ فرمول‌بندی مسئله LMP با استفاده از ACOPF ۳۱

۳-۲-۱ شبکه تک شینه (در نظر نگرفتن تلفات و تراکم) ۳۲

۳-۲-۲ شبکه با ظرفیت نامحدود و دارای تلفات ۳۳

۳-۲-۳ شبکه با ظرفیت محدود و دارای تلفات ۳۶

۳-۲-۴ مزایا و معایب تعیین LMP با استفاده از ACOPF ۳۸

۳-۳ فرمول‌بندی مسئله LMP با استفاده از DCOPF ۳۹

۳-۳-۱ فرمول‌بندی مسئله بدون در نظر گرفتن تلفات ۳۹

۳-۳-۲ فاکتور تلفات و فاکتور تحویل ۴۱

۳-۳-۳ فرمول‌بندی مسئله با در نظر گرفتن تلفات ۴۲

۳-۳-۴ مزایا و معایب محاسبه‌ی LMP از طریق DCOPF ۴۵

۳-۴ جمع‌بندی فصل ۴۶

فصل چهارم: ارائه روشی جدید به منظور بهبود الگوریتم‌های حاضر در محاسبه LMP

۴-۱ مروری بر روش‌های تخصیص توان در سیستم‌های قدرت ۴۸

۴-۱-۱ روش تخصیص‌به‌تناسب ۴۸
۴-۱-۲ روش تقسیم‌به‌نسبت ۴۹
۴-۱-۳ روش به اشتراک‌گذاری متناسب ۵۰
۴-۱-۴ روش فرمول تلفات ۵۱
۴-۱-۵ روش بار گرهی مجازی (FND) ۵۳
۴-۲ استفاده از روش‌های ردیابی توان در تخصیص بهینه تلفات ۵۳
۴-۳ معرفی روش ردیابی توان مورد استفاده ۵۶
۴-۳-۱ ماتریس اتصال ۵۶
۴-۳-۲ مفهوم حوزه ژنراتور ۵۹
۴-۳-۳ شناسایی اولیه خطوط ۶۰
۴-۳-۴ تعیین مسیرهای تغذیه‌کننده بارها از طریق ژنراتورها ۶۱
۴-۳-۵ تبدیل مدل بار ۶۲
۴-۳-۶ حذف خطوط اختصاصی ۶۳
۴-۳-۷ محاسبه سهم ژنراتورها در فلوی اکتیو خطوط مشترک اولیه ۶۴
۴-۳-۸ تعیین قطعی نوع خطوط مشترک اولیه ۶۵
۴-۳-۹ محاسبه سهم ژنراتورها در فلوی خطوط و بارها ۶۷
۴-۳-۱۰ تعیین سهم بارها از فلوی خطوط ۶۹
۴-۳-۱۱ تخصیص تلفات انتقال ۶۹
۴-۴ استفاده از داده‌های تخصیص تلفات به منظور بهبود الگوریتم محاسبه‌ی LMP ۷۰
۴-۵ جمع‌بندی فصل ۷۴

فصل پنجم: پیاده‌سازی و نتایج آن

۵-۱ پیاده‌سازی و معرفی شبکه تست ۷۵
۵-۲ مقایسه نحوه عملکرد روش‌های مختلف تخصیص توان ۷۸
۵-۳ تعیین مقادیر LMP بر پایه ACOPF ۸۲
۵-۴ تعیین مقادیر LMP بر پایه DCOPF ۸۶
۵-۵ مقایسه مقادیر LMP در استراتژی‌های مختلف (ضریب بار ۰/۷) ۸۹
۵-۵-۱ بررسی نتایج بدست آمده در استراتژی فاکتور تحویل ۹۵
۵-۵-۲ بررسی نتایج استراتژی تخصیص‌به‌تناسب ۹۸
۵-۵-۳ بررسی نتایج استراتژی فرمول تلفات ۹۹
۵-۵-۴ بررسی نتایج روش FND ۱۰۱
۵-۵-۵ بررسی نتایج روش پیشنهادی ۱۰۱
۵-۵-۶ جمع‌بندی نتایج بدست‌آمده ۱۰۳
۵-۶ مقایسه مقادیر LMP در استراتژی‌های مختلف (ضریب بار ۰/۸۵) ۱۰۴
۵-۷ بررسی میزان سود و هزینه ژنراتورها در هر استراتژی ۱۱۱
۵-۸ بررسی حساسیت استراتژی‌های مختلف به تغییر بار ۱۱۳
۵-۸-۱ بررسی دلایل اختلاف LMP در ضرایب مختلف بار ۱۱۵

۵-۹ جمع‌بندی فصل ۱۱۷
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۱۸
۶-۲ پیشنهادات ۱۲۰
پیوست الف- اطلاعات سیستم تست ۳۰ شینه IEEE ۱۲۱
پیوست ب- اطلاعات مربوط به سود و هزینه ژنراتورها در استراتژی‌های مختلف ۱۲۵
مراجع ۱۲۷

چکیده

ساختار صنعت برق در بسیاری از کشورهای جهان در حال گذار از فضای انحصاری به فضای رقابتی است. در این فرآیند که تحت عنوان کلی تجدیدساختار در صنعت برق پیگیری می‌شود، کشورهای مختلف با مدل‌های متفاوتی در جهت خصوصی‌سازی و رقابتی کردن این صنعت در حال حرکتند. تجدیدساختار در صنعت برق مسائل مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صنعت برق را تحت تأثیر قرار داده است و مسائل جدیدی نیز در این حوزه‌ها متولد شده‌اند. در فضای رقابتی صنعت برق و با شکل‌گیری بازارهای مختلف برای انرژی، یکی از مسائل با اهمیت که نقش کلیدی را در برنامه‌ریزی شرکت‌های تولیدی، خریداران و بهره‌بردار سیستم ایفا می‌کند، مسئله قیمت انرژی برق و نحوه تعیین آن می‌باشد. برهمین اساس روش‌های مختلفی به منظور تعیین قیمت انرژی در بازارهای برق به کار گرفته می‌شود که هدف اصلی در همه‌ی آن‌ها برقراری عدالت و افزایش رفاه اجتماعی می‌باشد. یکی از سیستم‌های قیمت‌گذاری انرژی در بازارهای برق که در طی چند سال اخیر بسیار مورد توجه بازارهای برق بزرگ و پیشرو در جهان (همچون بازارهای برق آمریکا) بوده است روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی می‌باشد. در این روش برخلاف سایر روش‌های قیمت‌گذاری، با توجه به سیستم قدرت و محدودیت‌های موجود در آن، قیمت انرژی در هر باس تعیین می‌گردد که از این لحاظ می‌تواند موجب افزایش عدالت در قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی نسبت به سایر روش‌ها گردد. از روش‌های متنوعی در محاسبه‌ی قیمت حاشیه‌ای محلی در سیستم‌های قدرت بهره برده می‌شود که همه‌ی آن‌ها مبتنی بر دو الگوریتم پخش بار بهینه در حالت AC یا DC (ACOPF و DCOPF) می‌باشند. الگوریتم بر پایه ACOPF دارای نتایج دقیق و در عین حال بسیار زمان‌بر و کند می‌باشد در حالیکه الگوریتم بر پایه DCOPF به واسطه‌ی در نظر نگرفتن تلفات در سیستم قدرت، دارای نتایج با دقت کم و با سرعت عملکرد بسیار بالا می‌باشد. لذا افزایش دقت و بهبود عملکرد در روش محاسبه‌ی قیمت حاشیه‌ای محلی بر پایه DCOPF، به یکی از مسائل مورد توجه در تحقیقات بدل شده است. یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در این زمینه، استفاده از الگوریتم‌های مختلف به منظور در نظر گرفتن تلفات در سیستم و تخصیص بهینه آن در روش DCOPF می‌باشد. روش‌های مختلفی برای این منظور استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های تخصیص‌به‌تناسب، فاکتور تحویل و بار گرهی مجازی اشاره داشت. یکی از مهمترین نقاط ضعف در روش‌های مذکور، در نظر نگرفتن شرایط واقعی سیستم قدرت و موقعیت باس‌ها در آن می‌باشد که به همین دلیل تخصیص تلفات انجام شده در این روش‌ها با شرایط واقعی سیستم منطبق نبوده و نمی‌تواند در کاهش خطای روش مبتنی بر DCOPF چندان مفید باشد. به همین دلیل در این پایان‌نامه برای اولین بار از دو الگوریتم: فرمول تلفات و تخصیص تلفات به کمک ردیابی توان، در قالب الگوریتم‌های محاسبه‌ی قیمت حاشیه‌ای محلی استفاده شده است که الگوریتم‌های مذکور با توجه به در نظر گرفتن شرایط واقعی سیستم قدرت، می‌توانند از عملکردی موفق در تخصیص بهینه تلفات در سیستم قدرت برخوردار باشند. لذا در این پایان‌نامه براساس الگوریتم ارائه شده، در هر مرحله، الگوریتم DCOPF اجرا می‌گردد و سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از آن، تلفات در سیستم محاسبه شده و به کمک الگوریتم‌های تخصیص تلفات پیشنهادی، تلفات به باس‌های سیستم تخصیص می‌یابد و سپس مجدداً الگوریتم DCOPF اجرا می‌گردد و این پروسه تا زمانی که تلفات در سیستم به حد قابل قبولی از خطا دست یابد تکرار خواهد شد و در آخرین مرحله نیز با استفاده از نتایج بدست آمده و الگوریتم‌های مرسوم، قیمت حاشیه‌ای محلی در هر باس سیستم تعیین می‌گردد. همچنین در این پایان‌نامه به منظور سنجش دقیق نحوه عملکرد روش‌های پیشنهادی، سایر روش‌های مرسوم (تخصیص‌به‌تناسب، فرمول تلفات، بار گرهی موهومی و DCOPF) نیز شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن‌ها بر روی سیستم تست IEEE 30Bus ارائه شده است که با نتایج حاصل از روش‌های پیشنهادی و روش ACOPF (به عنوان روش معیار) مقایسه شده است. نتایج عددی بدست آمده از بررسی روش‌های پیشنهادی بر روی شبکه آزمون و مقایسه با روش‌های مذکور نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی توانسته‌اند در بهبود خطا در روش DCOPF، به طرز چشمگیری موثر واقع شده و با حفظ سرعت عملکرد بالای الگوریتم DCOPF، خطای آن را نیز در حد قابل قبولی کاهش دهد.

کلمات کلیدی: ۱- تجدیدساختار ۲- قیمت حاشیه‌ای محلی ۳- تخصیص تلفات ۴- ردیابی توان

فصل اول
مقدمه

۱-۱ کلیات

صنعت برق تا اواخر قرن بیستم در بسیاری از کشورها از یک ساختار یکپارچه[1] و اصطلاحاً عمودی[2] برخوردار بوده است. در این ساختار سنتی، مالکیت تمامی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع در اختیار یک نهاد خاص بوده است که این نهاد در اغلب کشورها دولت می‌باشد. عوامل زیادی از قبیل: کمبود منابع کافی برای سرمایه‌گذاری، انتظارات مصرف‌کنندگان، کاهش هزینه‌های تولید، توزیع انرژی، نارسایی برخی قوانین نظارتی و عدم تخصیص صحیح هزینه‌ها سبب گرایش به سمت تجدیدساختار[3] و مقرارت‌زدایی[4] در صنعت برق گردید.

ایجاد بازارهای رقابتی برق بین تولیدکنندگان در راستای تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان از پیامدهای این تجدیدساختار می‌باشد. در بازار برق بوجود آمده، قیمت انرژی الکتریکی به عنوان یک عامل تاثیر-گذار در تعیین نحوه عملکرد فروشندگان و خریداران انرژی در بازارهای رقابتی برق از اهمیت خاصی برخوردار است.

---

[1]- Vertically Integrated
[2]- Monopoly
[3]- Dergulation
[4]- Restructuring

روش‌های مختلفی نظیر روش‌های پرداخت بر مبنای قیمت پیشنهادی و پرداخت بر مبنای هزینه نهایی، در تعیین قیمت برق در بازارهای برق مورد استفاده قرار می‌گیرد که هریک از روش‌های فوق دارای محاسن و معایب مخصوص به خود می‌باشد. نکته بسیار مهم در انتخاب روش‌های قیمت‌گذاری توجه به وضعیت شبکه و بازار برق و همچنین شرکت‌کنندگان در آن می‌باشد که بر مبنای آن سیستم‌های قیمت‌گذاری متفاوت و منحصر به فردی در طول زمان پدید آمده است.

۱-۲ تاریخچه

از جمله مهمترین سیستم‌های قیمت‌گذاری می‌توان به روش قیمت‌گذاری کاملاً توزیع شده، روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد و روش پرداخت بر مبنای قیمت نهایی سیستم اشاره داشت [۱ و۲]. روش قیمت‌گذاری کاملاً توزیع شده به عنوان اولین و ساده‌ترین روش تعیین قیمت در شبکه‌های برق از دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی در کشورهای مختلف به کار گرفته شد که بر مبنای آن هزینه تامین انرژی به صورت کاملاً توزیع شده بین مصرف‌کنندگان آن توزیع می‌شد [۱].

با آغاز به کار بازارهای برق در دهه ۹۰ میلادی شیوه‌های جدیدی از مبادلات انرژی بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان پدید آمد که از جمله آن‌ها می‌توان به بورس برق، معاملات دوجانبه، و معاملات چندجانبه، اشاره داشت. در این دوره با هدف تضمین عدالت وتامین بار با کمترین هزینه، روش‌های قیمت‌گذاری متفاوتی چون روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد[1] و پرداخت بر مبنای هزینه نهایی[2] سیستم پدید آمد. همچنین در این رهگذر نهادهای جدیدی با عنوان بهره‌بردار مستقل سیستم[3] نیز به منظور هدایت و کنترل بازارهای برق آغاز به کار نمودند. در روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد، میزان قیمت ارائه شده توسط خریدار یا فروشنده معیار تسویه خواهد بود در حالیکه در روش پرداخت بر مبنای قیمت نهایی سیستم، قیمت نهایی تعیین شده توسط بهره‌بردار مستقل سیستم (با تلاقی منحنی‌های پیشنهاد خرید و فروش انرژی)، معیار تسویه در کل سیستم خواهد بود [۲].

در روش پرداخت بر مبنای قیمت نهایی، قیمت نهایی می‌تواند به صورت یک قیمت یکسان برای کل سیستم (MCP) [۳]، و یا قیمت‌نهایی در هر باس در نظر گرفته شود که اصطلاحاً به آن قیمت حاشیه‌ای محلی[4] می-

[1] - pay as bid
[2] - Market Clearing Price (MCP)
[3] - Independent System Operator (ISO)
[4] - Locational Marginal Price (LMP)

گویند [۴-۸]. این روش تاکنون در بسیاری از بازارهای برق مطرح در جهان همچون بازار برق PJM، New England و Nordic به کار گرفته شده است [۹-۱۱].

از روش‌های مختلفی برای تعیین قیمت حاشیه‌ای محلی استفاده می‌گردد که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به دو روش: محاسبه بر پایه ACOPF و محاسبه بر پایه DCOPF اشاره نمود که در مجموع ACOPF روشی دقیق اما کند در دستیابی به جواب و روش DCOPF روشی سریع اما با دقت اندک (نسبت به ACOPF) می‌باشد که دلیل اصلی آن را می‌توان در نظر نگرفتن تلفات و قیود توان راکتیو در این روش دانست [۲]. در همین راستا تلاش‌های زیادی نیز به منظور بهبود خطای محاسبات در روش‌های فوق به خصوص روش محاسبه بر پایه DCOPF (به واسطه خطای بیشتر نسبت به روش ACOPF)، در طی سال‌های گذشته صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به مراجع [۱۲-۱۶] اشاره داشت که هدف اصلی در آن‌ها نحوه در نظر گرفتن تلفات در سیستم قدرت به منظور دستیابی به نهایت دقت در روش DCOPF می‌باشد.

۱-۳ خلاصه فعالیت‌های انجام شده در این پایان‌نامه

روش فعلی تعیین قیمت در بازار برق ایران، روش پرداخت بر مبنای قیمت پیشنهادی می‌باشد که با توجه در نظر نگرفتن سیستم انتقال و محدودیت‌های آن در این روش، روش مذکور نمی‌تواند روشی ایده‌آل و تضمین‌کننده عدالت در بازارهای برق باشد. به همین دلیل استفاده از روش‌های جدیدتر قیمت‌گذاری (که عدالت را در سیستم قدرت تضمین می‌نمایند) به جای روش موجود در بازار برق ایران، می‌تواند به عنوان یکی از مهمترین دلایل پژوهش در این زمینه مطرح باشد. یکی از جدیدترین و عادلانه‌ترین روش‌های قیمت‌گذاری (به واسطه در نظر گرفتن سیستم انتقال و محدودیت‌های آن) که در حال حاضر در بسیاری از بازارهای برق جهان نیز به کار گرفته می‌شود، روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی می‌باشد. به کارگیری این روش در بازار برق ایران و ارائه الگوریتم متناسب با شرایط این بازار می‌تواند دلیلی برای انجام پایان‌نامه مذکور باشد.

صورت مسأله تحقیق در این پایان‌نامه، استفاده از روش‌های تخصیص تلفات در سیستم‌های قدرت به منظور بهبود عملکرد روش DCOPF و نزدیک‌تر کردن هرچه بیشتر نتایج بدست آمده در این روش به نتایج بدست آمده در روش ACOPF می‌باشد. به همین منظور، تاثیر روش‌های مختلف تخصیص تلفات[1] در سیستم همچون روش‌های تخصیص‌به‌تناسب[2]، فرمول تلفات[3] [۱۷]، بار گرهی مجازی[1] و فاکتور تحویل[2] [۱۸]، بر روی افزایش دقت الگوریتم

[1] - Loss Allocation
[2] - Pro Rata Method
[3] - Loss Formula Method

محاسبه‌ی LMP از طریق DCOPF سنجیده شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که کاربرد روش فرمول تلفات در قالب الگوریتم محاسبه‌ی LMP برای اولین بار در این پایان‌نامه در این پایان‌نامه اجرا شده است. همچنین در این پایان‌نامه برای اولین بار و به عنوان یک روش جدید، از یک روش تخصیص تلفات به کمک ردیابی توان [۱۹]، با عنوان روش پیشنهادی نیز برای تصحیح هرچه بیشتر نتایج بدست آمده در روش DCOPF استفاده شده است.

هدف اصلی از طرح این صورت مسأله، افزایش دقت در روش DCOPF بوده است که بدین وسیله می‌توان از روش مذکور به عنوان یک روش مطمئن و دقیق برای قیمت‌گذاری در بازار برق ایران استفاده نمود. همچنین با سنجش دقت عملکرد روش DCOPF در محدوده وسیعی از تغییرات بار، در عمل می‌توان کارایی این روش را برای عملکرد در یک بازه وسیع بهره‌برداری تضمین نمود. بدین ترتیب بسیاری از محدودیت‌های پیشین در روش DCOPF همچون دقت پایین آن (در مقایسه با روش ACOPF)، در این پایان‌نامه مرتفع شده و در عمل امکان استفاده از این روش برای بازار برق ایران محیا گردیده است.

۱-٤ روند ارائه مطالب

در فصل دوم، بازار برق و عناصر فعال در آن و وظایف هریک به طور مختصر تشریح شده است و روش‌های مختلف تعیین قیمت در بازارهای برق در گذر زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه این فصل نیز به معرفی برخی از بازارهای برق پیشرو در جهان و معرفی بازار برق ایران و سیستم قیمت‌گذاری انرژی در آن پرداخته شده است.

در فصل سوم، فرمول‌بندی مسأله LMP در دو روش DCOPF و ACOPF (به عنوان روش‌های معیار در تعیین LMP) معرفی شده است و معایب و محاسن هر روش نیز به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است و در انتهای این بخش نیز روش فاکتور تحویل به عنوان یکی از راه‌کارهای مورد استفاده به منظور بهبود عملکرد محاسبه‌ی LMP در روش DCOPF به همراه محاسن و معایب آن معرفی شده است.

فصل چهارم به معرفی روش پیشنهادی در این پایان‌نامه برای بهبود خطا در روش DCOPF و روش ردیابی توان مورد استفاده در قالب آن اختصاص داده شده است. همچنین در این فصل برخی از مهمترین روش‌های

---

[1] - Fictitious Nodal Demand (FND)
[2] - Delivery Factor (DF)

تخصیص تلفات و ردیابی توان نیز به منظور سنجش نقاط ضعف و قوت هر روش و مقایسه‌ی عملکرد هریک در تخصیص تلفات مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

در فصل پنجم، نتایج عددی حاصل از اجرای روش پیشنهادی در این پایان‌نامه برای تصحیح خطاهای روش DCOPF، بر روی یک شبکه آزمون بیان و با نتایج بدست آمده از روش‌های ACOPF، DCOPF، فاکتور تحویل، تخصیص‌به‌تناسب، بار گرهی مجازی و فرمول تلفات، مقایسه شده است که براساس آن دو روش پیشنهادی یعنی روش فرمول تلفات و روش تخصیص تلفات به روش ردیابی توان، توانسته‌اند از بهترین عملکرد در تصحیح خطاهای بوجود آمده در روش DCOPF برخوردار باشند. نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق در این زمینه در فصل پنجم ارائه گردیده است.

فصل دوم
مروری بر روش‌های تعیین قیمت در بازارهای برق

مقدمه

روند تجدیدساختار در صنایعی همچون صنعت هواپیمایی، مخابرات بین‌الملل و گاز طبیعی و نتایج مثبت حاصل از آن، تحلیل‌گران و سیاست‌گذاران عرصه صنعت برق را به اندیشه استفاده از تجارب بدست آمده، ترغیب نموده است. اکنون ساختار صنعت برق در بسیاری از کشورهای جهان در حال گذار از فضای انحصاری به فضای رقابتی است. در این فرآیند که تحت عنوان کلی تجدیدساختار در صنعت برق پیگیری می‌شود، کشورهای مختلف با مدل‌های متفاوتی به منظور خصوصی‌سازی و رقابتی کردن این صنعت در حال حرکتند. عواملی مانند عدم امکان ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ، انتقال انرژی الکتریکی براساس قوانین فیزیکی حاکم بر خطوط انتقال و نه بر اساس قراردادهای اقتصادی، حساسیت کم تقاضا به تغییرات قیمت به ویژه در افق زمانی کوتاه مدت، روند تجدیدساختار و طراحی بازارهای انرژی الکتریکی را با پیچیدگی‌های مضاعفی روبرو نموده است. تجدیدساختار در صنعت برق مسائل مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی این صنعت را تحت تأثیر قرار داده و مسائل جدیدی نیز در این حوزه‌ها متولد شده است.

ایده اصلی در فرایند رقابتی کردن صنعت برق در نظر گرفتن انرژی الکتریکی بعنوان یک کالا است که توسط قراردادهای مختلف می‌تواند خریداری یا به فروش رسانده شود [۲۰]. با طرح این ایده، خدماتی مانند انتقال

انرژی، تهیه ظرفیت رزرو، حفظ فرکانس و ولتاژ شبکه، حفظ کیفیت توان و غیره، بصورت خدمات جانبی[1] این کالا مطرح می‌شوند [۲۱]. البته می‌توان خدمات جانبی را نیز به کمک طراحی بازارهایی در کنار بازار انرژی تأمین نمود. در ساختار جدید صنعت برق، انرژی الکتریکی در بازارهای مختلفی مانند بازارهای پیش‌فروش، بازارهای ساعتی و غیره و در الگوهای متفاوتی براساس مدل‌هایی چون مدل حوضچه‌ای[2] یا قراردادهای دوطرفه[3] به فروش می‌رسد. تحت این شرایط نهادی بعنوان بهره‌بردار سیستم یا بهره‌بردار مستقل سیستم (SO/ISO)[4] مسئولیت حفظ امنیت شبکه و راهبری سیستم را به عهده دارد. این نهاد می‌تواند بصورت مینی‌مال (Min ISO) به مفهوم عدم مداخله در امور اقتصادی و یا ماکزیمال (Max ISO) به مفهوم انجام توأم امور فنی و اقتصادی طراحی شود [۲۲].

در این فضا قیمت برق بعنوان یک پارامتر مهم و تأثیرگذار مطرح می‌شود، که نقش مهمی را در فرایند تجدیدساختار صنعت برق ایفا می‌کند. به عبارت دیگر نحوه تعیین قیمت انرژی برق در سیستم قدرت با توجه به اهمیت کلیدی آن، می‌تواند از اهمیت خاصی برخوردار باشد. به همین دلیل روش‌های متنوعی برای تعیین قیمت برق پدید آمده است که در بازارهای برق در جهان به کار گرفته می‌شوند. هریک از روش‌های مذکور دارای نقاط ضعف و قوت مختص به خود می‌باشند که در این بخش به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی (LMP[5])، نیز به عنوان موضوع اصلی مورد بحث در این پایان‌نامه، به طور مفصل بررسی می‌گردد. بدین ترتیب در این فصل ابتدا مقدماتی در مورد تشکیل بازارهای برق در جهان و نهادهای فعال در آن‌ها مطرح می‌گردد و سپس تاریخچه‌ای از نحوه قیمت‌گذاری در بازارهای برق و سیستم قیمت‌گذاری در هر دوره معرفی می‌گردد. در ادامه نحوه تکامل روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی، در قالب مروری بر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، معرفی خواهد شد و در انتها نیز نمونه‌هایی از کاربرد عملی این روش در بازارهای برق فعلی در جهان، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

---

[1]- Ancillary service
[2]- Pool Co.
[3]- Bilateral Transactions
[4]- System Operator / Independent System Operator
[5]- Locational Marginal Pricing (LMP)

۲-۱ بازارهای برق و اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها

بازار برق از عناصر زیادی تشکیل شده است که مجموعه این عناصر به صورت کنترل شده‌ای در کنار یکدیگر ساختار یکپارچه بازار را تشکیل می‌دهند. انواع مختلف بازار برق برای برآورده کردن اهداف بهره‌برداری وجود دارد که فروشندگان و خریداران انرژی با توجه به نقطه نظرات اقتصادی خود، یکی از بازارهای انرژی را برای داد و ستد انتخاب می‌کنند.

دو هدف «اطمینان از بهره‌برداری ایمن» و «تسهیل بهره‌برداری اقتصادی»، از راه‌اندازی بازار برق متصور است. چه سیستم قدرت به صورت سنتی و چه به صورت تجدیدساختار شده اداره شود، مهمترین ویژگی بهره-برداری از آن، ایمنی است. در محیط تجدیدساختار شده، می‌توان با استفاده از خدمات گوناگونی که در اختیار بازار است، ایمنی را تسهیل کرد. بهره‌برداری اقتصادی از بازار برق، هزینه مصرف را کاهش می‌دهد. این موضوع، انگیزه اصلی برای تجدیدساختار و راهی برای تقویت ایمنی سیستم قدرت از طریق اقتصاد آن است و برای نیل به آن لازم است، راهبردهای صحیح و منطبق با نیازهای سیستم قدرت، طراحی شود.

به منظور نیل به اهداف بازار برق، چندین مدل برای ساختار بازار در نظر گرفته شده است. در ادامه سه مدل اصلی بازار برق تشریح می‌گردد.

مدل حوضچه‌ای یا PoolCo: بازار حوضچه‌ای، یک بازار متمرکز است که بازار را برای خریداران و فروشندگان، تسویه[1] می‌کند. فروشندگان و خریداران توان، پیشنهادات خود را برای توان مورد معامله به بازار ارائه می‌کنند. فروشندگان، نه برای مشتری های خاص، بلکه برای کسب حق تأمین انرژی شبکه، با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. اگر پیشنهاد شرکت‌کننده‌ای در بازار، بیش از حد، بالا باشد، ممکن است نتواند در فروش، موفق باشد. از طرف دیگر، خریداران نیز برای خرید توان به رقابت می‌پردازند و اگر پیشنهادات آن‌ها بیش از حد، پایین باشد، ممکن است موفق به خرید نشوند. در این بازار، تولیدکنندگان کم‌هزینه، برندگان عمده خواهند بود. بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO[2]) در این بازار، توزیع اقتصادی بار را انجام خواهد داد و قیمت منفردی (لحظه‌ای[3]) را برای برق که نشانه شفافی برای شرکت‌کنندگان از نظر تصمیمات مصرف و سرمایه‌گذاری است، ارائه می‌کند. تغییرات در بازار برق، قیمت لحظه‌ای را به سطح رقابتی که مساوی با هزینه نهایی[4] با راندمان‌ترین پیشنهاددهندگان قیمت است، سوق می‌دهد. در این بازار، به پیشنهاددهندگان برنده، قیمتی لحظه‌ای پرداخت می‌شود که مساوی بالاترین پیشنهاد قیمت برندگان است.

---

[1]- Clear
[2]- Independent System Operator (ISO)
[3]- Spot
[4]- Marginal Cost

مدل قراردادهای دوجانبه[1]: قراردادهای دوجانبه، توافق‌های مذاکره‌ای بین دو معامله‌گر برای دریافت و تحویل توان است. شرایط مورد توافق، مستقل از ISO است، اما ISO باید تأیید کند که ظرفیت انتقال کافی برای اجرای قرارداد و حفظ ایمنی شبکه انتقال را دارد. از این دیدگاه که طرفین می‌توانند شرایط مطلوب خود را تأمین کنند. مدل قراردادهای دوجانبه، قابلیت انعطاف زیادی دارد، اما عیوب آن به هزینه بالای مذاکرات و تهیه قراردادها و ریسک نیکنامی[2] طرفین قرارداد، باز می‌گردد.

مدل ترکیبی[3]: در این مدل، ویژگی‌های گوناگون دو مدل قبلی، حفظ می‌شود. در مدل ترکیبی، استفاده از PoolCo اجباری نیست و هر مشتری مجاز است تا بر سر تأمین توان خود، به توافق مستقیم با عرضه‌کنندگان رسیده یا توان را به قیمت لحظه‌ای بازار، خریداری کند. در این مدل، PoolCo به تمام شرکت‌کنندگان (خریداران و فروشندگان) که قراردادهای دوجانبه را امضا نکرده‌اند، خدمات لازم را ارائه می‌دهد. اما، اجازه به مشتریان برای مذاکره خرید توان با عرضه‌کنندگان، امکان انتخاب حقیقی را برای آنها فراهم آورده و انگیزه‌ای برای خدمات متنوع و گزینه‌های قیمت به منظور بهترین امکان تأمین نیازهای آن‌ها، خواهد بود [۲].

۲-۱-۱ عناصر کلیدی بازار برق

تجدیدساختار برق، نقش عناصر سنتی در ساختار یکپارچه عمودی را تغییر داده است و عناصر جدیدی را با امکان عملکرد مستقل، ایجاد کرده است. در اینجا، عناصر بازار را به اپراتور مستقل شبکه (ISO) و شرکت‌کنندگان در بازار، طبقه‌بندی می‌کنیم. ISO، عنصر راهبردی در یک بازار توان است و اعمال آن تعیین‌کننده قواعد بازار است. سایر عناصر کلیدی بازار که در اینجا مورد بحث واقع می‌شوند، شامل شرکت‌های تولید انرژی[4]، شرکت ارائه‌دهنده‌ی خدمات انتقال[5]، شرکت‌های توزیع[6]، شرکت‌های خرده‌فروشی[7]، جمع‌کننده‌ها[8]، کارگزارها[9]، بازاریاب‌ها[10] و مشتریان[11] می‌باشد.

---

[1]- Bilateral Contracts Model
[2]- Credit Worthiness
[3]- Hybrid Model
[4]- Generation Companies (GENCOs)
[5]- Transmission Companies (TRANSCOs)
[6]- Distribution Companies (DISCOs)
[7]- Retailer companies (RETAILCOs)
[8]- Aggregators
[9]- Brokers
[10]- Marketers
[11]- Customers

ISO: لازمه یک بازار رقابتی برق، وجود کنترل مستقل بهره‌برداری شبکه است. کنترل شبکه بدون ISO، قابل تضمین نیست. ISO، بهای انتقال را تعیین نموده، ایمنی سیستم را حفظ کرده، برنامه‌ریزی تعمیر را هماهنگ کرده و نقشی را در برنامه‌ریزی بلندمدت بازی می‌کند. ISO، مستقل از هر شرکت‌کننده‌ی بازار، اعم از مالکین انتقال، تولیدکنندگان، شرکت‌های توزیع و مصرف‌کنندگان نهایی، عمل می‌کند و باید امکان دسترسی آزاد را برای تمام استفاده‌کنندگان از سیستم انتقال فراهم آورد.

ISO، قدرت لازم برای در مدار قرار دادن و توزیع بار در برخی یا تمام واحدهای تولیدی سیستم را داشته و می‌تواند برای حفظ ایمنی سیستم، بارهایی را قطع کند (به عنوان مثال حذف انحراف از حدود مجاز انتقال، تعادل بین عرضه و تقاضا و حفظ فرکانس قابل قبول سیستم). همچنین، ISO این اطمینان را ایجاد می‌کند که سیگنال‌های صحیح اقتصادی به همه شرکت‌کنندگان در بازار ارسال شود که این موضوع، به نوبه خود، باعث تشویق استفاده مؤثر از امکانات موجود و انگیزه مناسب برای سرمایه‌گذاری در منابع لازم به منظور تخفیف و حذف انحرافات فوق‌الذکر می‌شود.

بطور کلی، دو ساختار ممکن برای ISO وجود دارد که انتخاب نوع، به اهداف و اقتدار آن بستگی دارد. اولین ساختار (Min ISO)، بر پایه حفظ ایمنی سیستم انتقال در بهره‌برداری از بازار توان است بقسمی که تبادلات برنامه‌ریزی شده در عین حفظ قیود سیستم، عملی شود. این ساختار ISO بر مبنای مدل معامله چندگانه هماهنگ[1] است [۲۲]، که در آن، ISO هیچ نقشی در بازار ندارد و هدف آن به حفظ ایمنی محدود شده و اقتدار آن کم است. ISO کالیفرنیا، مثالی از این نوع ساختار است که در آن، ISO اقتداری بر بازار پیش‌رو انرژی[2] نداشته و کنترل بسیار محدودی بر برنامه‌ریزی واقعی واحدهای تولید دارد.

ساختار دومی که برای ISO وجود دارد (Max ISO)، شامل یک مرکز مبادله توان[3] (PX) است که با بهره-برداری ISO مجتمع شده است. PX ، نهاد مستقل، غیردولتی و غیرانتفاعی است که با اجرای حراج مبادلات برق، بازاری رقابتی را تضمین می‌کند. PX، قیمت تسویه بازار[4] (MCP) را براساس بالاترین پیشنهاد قیمت بازار محاسبه می‌کند. در برخی ساختارهای بازار، ISO و PX، نهادهای مستقلی هستند هر چند که PX در همان سازمان ISO انجام وظیفه می‌کند. ساختار دوم ISO بر مبنای مدل پخش بار بهینه[5] است به نحوی که شرکت‌کنندگان در بازار باید داده‌های وسیعی از قبیل داده‌های هزینه هر واحد تولید و تقاضای روزانه برای هر مشتری یا بار را به ISO ارائه

[1]- Coordinated Multilateral Trade Model
[2]- Forward Energy Markets
[3]- Power Exchange
[4]- Market Clearing Price
[5]- Optimal Power Flow