دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد

رساله دکتری مهندسی برق- قدرت

قیمت گذاری توانهای اکتیو وراکتیو مقید به امنیت ولتاژ در محیط تجدید ساختار یافته

Voltage Security Constrained Active and Reactive Power Pricing in Deregulated Environments

سمیه حسن پور

استاد راهنما: دکتر رضا قاضی

استاد مشاور: دکتر محمد حسین جاویدی

تابستان ۱۳۸۸

چکیده:

تامین توان راکتیو از مهمترین سرویسهای جانبی می باشد که در افزایش امنیت و قابلیت اطمینان شبکه نقش بسزائی دارد. در سیستم های قدرت پیشرفته ، بررسی پایداری ولتاژ و ارزیابی حاشیه امنیت ولتاژ برای اجتناب از بروز ناپایداری و پدیده فروپاشی ولتاژ بسیار ضروری است. این مسئله درمحیط تجدید ساختار یافته، از نقطه نظر امنیت و اثرات اقتصادی ناشی از آن، از اهمیت بیشتری برخوردار است. از مسائل مهم در این زمینه نحوه قیمت گذاری توان راکتیو در محیط رقابتی است که ضمن حفظ امنیت سیستم، سیگنال اقتصادی مناسبی برای سرمایه گذاران و بهره بردار سیستم فراهم نماید.

موضوع اصلی این رساله قیمت گذاری توان مقید به امنیت ولتاژ از دیدگاه بازار محور می باشد. لذا روش جدیدی برای قیمت گذاری بازار محور توان های اکتیو و راکتیو مقید به امنیت ولتاژ ارائه می گردد. در این روش، جهت قیمت گذاری توان راکتیو، تابع هزینه جدیدی پیشنهاد و بر اساس آن قیمت گذاری انجام می شود. این قیمت گذاری برای توان های اکتیو و راکتیو بطور همزمان صورت می گیرد و هزینه تلفات با تعیین سهم هر ژنراتور در تلفات اکتیو و راکتیو لحاظ می گردد. سپس، قیمت گذاری توان مقید به امنیت ولتاژ از دیدگاه بازار محور در قالب یک مسئله بهینه سازی چند هدفه با حداکثر سازی همزمان رفاه اجتماعی و فاصله تا فروپاشی ولتاژ مطرح می گردد. همچنین، ضمن محاسبه شاخص قدرت بازار راکتیو و با توجه به روش تحلیلی، ضرایب وزنی تابع هدف بصورت مناسب تعیین می گردند. توجه به انتخاب ضرایب وزنی مناسب سبب می گرددد تا شرایط بهینه بگونه ای تعیین گرددد که علاوه بر جلوگیری از قدرت بازار، سیستم از امنیت مناسبی برخوردار باشد وبازار به سمت انحصار حرکت نکند.

از طرف دیگر، قیمت گذاری لحظه ای توان های اکتیو و راکتیو از دیدگاه بازار محور در بازار لحظه ای و در بازه زمانی ۱۵ دقیقه صورت می پذیرد. با توجه به تغییرات مداوم بار، در قیمت گذاری بازار محور توان مقید به امنیت ولتاژ، ارزیابی امنیت ولتاژ و محاسبه نقطه بحرانی شبکه باید سریع و بلادرنگ باشد. برای نیل به این منظور، در روش پیشنهادی، به جای حل کامل مسئله پخش بار، معادلات غیر خطی پخش بار صرفا در ناحیه ضعیف ولتاژ حل می شوند. برای حل معادلات مذکور از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

با توجه به ماهیت محلی بازار راکتیو، با تقسیم سیستم قدرت به نواحی کنترل ولتاژ و لحاظ نمودن شاخص قدرت بازار، قیمت گذاری بازار محور توان های اکتیو و راکتیو مقید به امنیت ولتاژ به صورت محلی انجام و تحلیل مناسبی ارائه می شود.

Abstract:

Provision of reactive power, which is an important ancillary service, plays an important role in increasing the reliability and security of power systems. In advanced power systems, analysis of voltage stability and assessment of voltage security margin are very much important to maintain voltage stability. This problem becomes more important in restructured power systems regarding system security and the resulting economic impacts. In this context, reactive power pricing can be an important issue, thereby the system security is preserved and appropriate economic signals are provided for investors and system operators.

The main subject of this thesis is concerned with the voltage security constrained power pricing. Therefore, a new method for voltage security constrained active and reactive power pricing in a deregulated environment is presented. In this method for the purpose of reactive power pricing, a new cost function is suggested by which the reactive pricing is performed more accurately. Furthermore, in reactive power pricing the cost of both active and reactive losses are considered using the well-known tracing method. Then, the market-based problem is modeled as a multi-objective OPF integrated with social welfare and distance to the voltage collapse point, so that both of them are simultaneously maximized. An important feature of the proposed approach is using the reactive market power index (HHI) to assign optimal weighting factors to the multi-objective function. In addition, in this method not only the reactive power is considered but its price is also determined based on real costs. Using the proposed method and considering reactive power market, a suitable range for weighting factors can be determined ensuring the optimal bidding as well as satisfying the voltage security of the system.
On the other hand, in the spot pricing, the ISO carries out the actual active and reactive power dispatch in a time frame of ۱۵ to ۳۰ minutes. Therefore, in online voltage stability assessment, reducing the computational time is an important problem in voltage collapse studies. In this thesis, a new method for fast and accurate calculation for maximum loading margin is proposed. The presented method is based on an optimization technique in which the genetic algorithm is utilized to solve the parameterized nonlinear load flow equations. To reduce the computational burden, the optimization problem is examined in the weak area of the system as a subsystem which is defined by modal analysis.
Also, in this research, a new market based approach for voltage security constrained active and reactive power pricing in terms of individual voltage control areas is proposed. The problem is modeled as a multi-objective OPF in which the social welfare and the distance to the voltage collapse point are maximized at the same time and the reactive power market index (HHI) is examined in localized markets.

فهرست مطالب

فصل ۱ ..... ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- اهمیت سرویس توان راکتیو ۱

۱-۳- سرویس توان راکتیو در بازارهای مختلف ۳

۱-٤- تدارک سرویس توان راکتیو در محیط تجدید ساختار یافته ۵

۱-٤-۱- پخش توان راکتیو در بازار لحظه ای ۷

۱-٤-۲- تامین توان راکتیو در بازار بلند مدت ۷

۱-٤-۳- تعیین حدود توان راکتیو ژنراتورها ۸

۱-۵- قیمت گذاری بازار محور توانهای اکتیو و راکتیو ۱۰

۱-٦- بازارهای محلی توان راکتیو ۱۲

۱-۷- اهداف تحقیق و نوآوریهای رساله ۱۲

۱-۸- محتوای فصلهای بعدی ۱۳

فصل ۲ ..... ۱٤

۲-۱- مقدمه ۱۵

۲-۲- تاریخچه موضوع ۱٦

۲-۳- تعیین تابع هزینه تولید توان راکتیو (تخصیص هزینه تولید توان راکتیو) ۱۹

۲-٤- قیمت گذاری هزینه محور توانهای اکتیو و راکتیو ۲۵

۲-٤-۱- تابع هزینه مسئله بهینه سازی ۲۵

۲-٤-۲- قیود مسئله بهینه سازی ۲۷

۲-۵- شبیه سازی مسئله ۲۸

۲-٦- جمع بندی ۳۲

فصل ۳ ..... ۳۳

۳-۱- مقدمه ۳٤

۳-۲- مفاهیم اولیه پایداری ولتاژ ۳٤
۳-۲-۱- تحلیل ریاضی پایداری ولتاژ ۳۵
۳-۲-۲- روش پخش بار تداومی(CPF) ۳٦
۳-۳- تاریخچه موضوع ۳۷
۳-٤- روش پیشنهادی ۳۹
۳-٤-۱- تحلیل مدال ۳۹
۳-٤-۲- الگوریتم ژنتیک برای حل معادلات غیر خطی ٤۰
۳-٤-۳- روش پیشنهادی ٤۱
۳-٤-۳-۱-مراحل روش ترکیبی بهبود یافته: ٤۲
۳-۵- شبیه سازی مسئله ..... **Error! Bookmark not defined.**
۳-۵-۱- شناسایی باس بحرانی و ناحیه ضعیف ولتاژ به کمک تحلیل مدال ٤٦
۳-۵-۲- محاسبه حاشیه امنیت ولتاژ با استفاده از روش پیشنهادی ٤۷
۳-٦- جمع بندی ۵۰
فصل ۴ ..... ۵۱
٤-۱- مقدمه ۵۱
٤-۲- تاریخچه موضوع ۵۱
٤-۳- مدل تسویه بازار مبتنی بر OPF ۵٤
٤-٤- تعیین قیمت بازار ۵٦
٤-۵- قیمت گذاری بازار محور توان مقید به امنیت ولتاژ ۵۸
٤-٦- روش پیشنهادی ۵۹
٤-٦-۱- قدرت بازار راکتیو ٦۳
٤-٦-۲- الگوریتم روش پیشنهادی ٦۵
٤-۷- شبیه سازی مسئله ٦٦
٤-۸- جمع بندی ۷۳
فصل ۵ ..... ۷۹
۵-۱- مقدمه ۸۰
۵-۲- تاریخچه موضوع ۸۰

۵-۳- تعیین نواحی کنترل ولتاژ با استفاده از مفهوم اندازه الکتریکی ۸۱
۵-۳- ۱- مفهوم اندازه الکتریکی ۸۱
۵-۳- ۲- تعیین نواحی کنترل ولتاژ ۸۳
۵-٤- قیمت گذاری توانهای اکتیو و راکتیو در نواحی کنترل ولتاژ ۸۳
۵-۵- شبیه سازی مسئله ۸۵
۵-۵-۱- تقسیم شبکه ۳۰ باس به نواحی کنترل ولتاژ ۸۵
۵-۵-۲- قیمت گذاری توانهای اکتیو راکتیو ۸۵
۵-۵-۲-۱- مطالعه شبکه و نواحی کنترل ولتاژ بدون در نظر گرفتن امنیت ولتاژ ۸۸
۵-۵-۲-۲- مطالعه شبکه و نواحی کنترل ولتاژ با در نظر گرفتن امنیت ولتاژ ۸۸
۵-۵-۲-۳- بررسی قدرت بازار توان راکتیو در نواحی کنترل ولتاژ ۸۹
۵-٦- جمع بندی ۹٦
فصل ۶ ..... ۹۷
٦-۱- نتیجه گیری ۹۷
٦-۲- پیشنهادات ۹۸
مراجع ۱۰۰

فهرست اشکال

۱شکل ۱-۱: بازه بازار توانهای اکتیو و راکتیو در روز D و ساعت k [۵]..... ۷

۲شکل ۱-۲: تامین توان راکتیو در بازار بلند مدت [۵]..... ۷

۳شکل ۱-۳: منحنی توانایی ژنراتور سنکرون [۵]..... ۱۰

٤شکل ۲-۱ : منحنی توانایی ژنراتور..... ۲۱

۵شکل ۲-۲ : منحنی هزینه تولید توانهای اکتیو و راکتیو با استفاده از روش پیشنهادی..... ۲۳

٦شکل ۲-۳ : مقایسه مدل پیشنهادی با روشهای متداول و مثلثی برای ژنراتور ۱ ..... ۲٤

۷شکل ۲-٤ : مقایسه مدل پیشنهادی با روشهای متداول و مثلثی برای ژنراتور ۲ ..... ۲٤

۸شکل ۲-۵ : شبکه ۹ باس استاندارد IEEE ۲۸

۹شکل ۲-٦: درصد تغییرات بار روزانه در یک روز ۲۹

۱۰شکل ۲-۷: قیمتهای توانهای اکتیو و راکتیو در دو روش متداول و پیشنهادی..... ۳۱

۱۱شکل ۳-۱ : منحنی P-V ۳٦

۱۲شکل ۳-۲ : یک توالی از روند محاسبات در روش پخش بار تداومی [۲۰]..... ۳۷

۱۳شکل ۳-۳ : مراحل روش پیشنهادی بهبود یافته..... ٤٤

۱٤شکل ۳-٤ : فلوچارت روش پیشنهادی ٤۵

۱۵شکل ۳-۵ : شبکه ۱٤ باس استاندارد IEEE..... ٤٦

۱۷شکل ۳-٦ : ضرایب مشارکت باسها برای کوچکترین مد پایدار سیستم در حالت پایه ٤۷

۱۸شکل ۳-۷ : منحنی P-V برای باس شماره ۱۲..... ٤۸

۱۹شکل ۳-۸ : منحنی P-V برای باسهای ناحیه ضعیف ولتاژ در شبکه ۱٤ باس ٤۹

۲۰شکل ۳-۹ : منحنی P-V برای باسهای ناحیه ضعیف ولتاژ در شبکه ۳۰ باس ٤۹

۲۱شکل ۳-۱۰ : منحنی P-V برای باسهای ناحیه ضعیف ولتاژ در شبکه ۵۷ باس..... ۵۰

۲۲شکل ٤-۱ : مراحل روش پیشنهادی..... ٦۳

۲۳شکل٤-۲ : تغییرات حداکثر حاشیه بار پذیری برحسب تغییرات ضریب وزنی ٦۸

۲٤شکل٤-۳ : تغییرات توان اکتیو پذیرفته شده تولید کنندگان برحسب تغییرات ضریب وزنی ٦۹

۲۵شکل٤-٤ : تغییرات توان اکتیو پذیرفته شده مصرف کنندگان برحسب تغییرات ضریب وزنی..... ٦۹

۲٦شکل٤-۵: تغییرات توان راکتیو پذیرفته شده تولید کنندگان برحسب تغییرات ضریب وزنی..... ٦۹

۲۷شکل٤-٦ : تغییرات معیار قدرت بازار راکتیو برحسب تغییرات ضریب وزنی ۷۰
۲۸شکل٤-۷ : معیار قدرت بازار راکتیو مسئله با ٦/. = w_2 ..... ۷۲
۲۹شکل٤-۸ : تغییرات حداکثر حاشیه بار پذیری برحسب تغییرات ضریب وزنی ۷۳
۳۰شکل٤-۹ : تغییرات توان اکتیو پذیرفته شده تولید کنندگان برحسب تغییرات ضریب وزنی ۷۳
۳۱شکل٤-۱۰ : تغییرات توان راکتیو پذیرفته شده تولید کنندگان برحسب تغییرات ضریب وزنی ۷٤
۳۲شکل٤-۱۱ : تغییرات معیار قدرت بازار راکتیو برحسب تغییرات ضریب وزنی ۷۵
۳۳شکل٤-۱۲ : معیار قدرت بازار راکتیو مسئله با ٦/. = w_2 ..... ۷٦
۳٤شکل ۵-۱: شبکه ۳۰ باس مورد مطالعه ۸۵
۳۵شکل ۵-۲: نواحی کنترل ولتاژ شبکه ۳۰ باس ۸۸

فهرست جداول

۱جدول ۲-۱ : مشخصات ژنراتورها در شبکه ۹ باس ۲۹
۲جدول ۲-۲ : مشخصات بارها در شبکه ۹ باس ۲۹
۳جدول ۲-۳ : نتایج شبیه سازی طرح شماره ۱ ..... ۳۰
٤جدول۲-٤ : نتایج شبیه سازی طرح شماره ۲ ..... ۳۲
٥جدول ۳-۱ : مشخصات بار در شبکه ١٤ باس ٤٦
٦جدول ۳-۲ : مقایسه بین روش پیشنهادی و روش متداول ٥٠
۷جدول ٤-۱ : اطلاعات شبکه ١٤ باس IEEE ٦٦
۸جدول ٤-۲ : اطلاعات شبکه ١٤ باس استاندارد IEEE برای مطالعه بازار محور در سناریو ۱ ..... ٦۷
۹جدول٤-۳ : نتایج شبیه سازی مسئله با ٦/. =w_2 ..... ۷۱
۱۰جدول ٤-٤ : اطلاعات شبکه ١٤ باس استاندارد IEEE برای مطالعه بازار محور در سناریو ۲ ..... ۷۲
۱۱جدول٤-٥ : نتایج شبیه سازی مسئله با ٦/. =w_2 ..... ۷٥
۱۲جدول٤-٦ : نتایج شبیه سازی مسئله در قیمت گذاری همزمان توانهای اکتیو وراکتیو ۷٦
۱۳جدول٤-۷ : نتایج شبیه سازی مسئله در تحقق بازار توان اکتیو ۷۷
١٤جدول٤-۸ : نتایج شبیه سازی مسئله در قیمت گذاری مجزا توان راکتیو ۷۸
١٥جدول ٥-۱ : اطلاعات بار پایه شبکه ۳۰ باس ۸٦
١٦جدول ٥-۲ : اندازه الکتریکی برای تعیین گروه بندی ژنراتورهای شبکه ۳۰ باس ۸۷
۱۷جدول ٥-۳ : پیشنهاد قیمت متقاضیان شبکه ۳۰ باس برای مطالعه بازار محور ۹۰
۱۸جدول٥-٤ : نتایج شبیه سازی شبکه ۳۰ باس بدون در نظر گرفتن امنیت ولتاژ ۹۱
۱۹جدول٥-٥ : نتایج شبیه سازی ناحیه کنترلی ۱ بدون در نظر گرفتن امنیت ولتاژ ۹۲
۲۰جدول٥-٦ : نتایج شبیه سازی ناحیه کنترلی ۲ بدون در نظر گرفتن امنیت ولتاژ ۹۳
۲۱جدول٥-۷ : نتایج شبیه سازی ناحیه کنترلی ۳ بدون در نظر گرفتن امنیت ولتاژ ۹۳
۲۲جدول٥-۸ : نتایج شبیه سازی شبکه ۳۰ باس با ٤/.=w_2 ..... ۹۳

۲۳جدول۵-۹ : نتایج شبیه سازی ناحیه کنترلی ۱ با $w_۲$=./٤ ..... ۹٤
۲٤جدول۵-۱۰ : نتایج شبیه سازی ناحیه کنترلی ۲ با $w_۲$=./٤ ..... ۹۵
۲۵جدول۵-۱۱ : نتایج شبیه سازی ناحیه کنترلی ۳ با $w_۲$=./٤ ..... ۹۵
۲٦جدول۵-۱۲ : مقایسه حداکثر حاشیه بار گذاری بین شبکه ۳۰ باس و نواحی کنترل ولتاژ با $w_۲$=./٤ ..... ۹٦
۲۷جدول۵-۱۳ : مقایسه شاخص HHI و $Index_{Q_G}$ بین شبکه ۳۰ باس و نواحی کنترل ولتاژ ۹٦

نشانه ها

قیمت توان اکتیو تولیدی تولید کننده

C_{S_P}

قیمت توان راکتیو تولیدی تولید کننده

C_{S_Q}

قیمت توان اکتیو مصرفی متقاضی

C_{D_P}

قیمت توان راکتیو مصرفی متقاضی

C_{D_Q}

تابع هزینه تولید توان اکتیو ژنراتور i ام

$Cost(P_{G_i})$

تابع هزینه تولید توان راکتیو ژنراتور i ام

$Cost(Q_{G_i})$

فاصله الکتریکی

D_{ij}

ولتاژ تحریک ژنراتور

E_f

جریان آرمیچر

I_a

جریان خط $i-j$ از هر دو طرف I_{ij} و I_{ji}

ماتریس ژاکوبین J

زیر ماتریسهای ماتریس ژاکوبین $J_{P\theta}$ ، J_{PV} ، $J_{Q\theta}$ و J_{QV}

تعداد باسهای شبکه N

تعداد متغیر های مسئله در الگوریتم ژنتیک N_{GA}

تعداد باسهای ناحیه ضعیف ولتاژ N_{VW}

مجموع واحدهای تولید کننده N_S

مجموع واحدهای متقاضی N_D

تعداد ژنراتورها N_G

توان خط $i-j$ از هر دو طرف P_{ij} و P_{ji}

توان اکتیو تولیدی ژنراتور باس i ام P_{G_i}

تولید اولیه توان اکتیو در ژنراتور i ام $P_{G_{i0}}$

میزان تولیدی که در بازار بلند مدت تعیین شده است P_{G_0}

تقاضای توان اکتیو در باس i ام P_{D_i}

تقاضای اولیه توان اکتیو در باس بار i ام

$P_{D_{i0}}$

حدود توان اکتیو پیشنهادی متقاضی $P_{D_{\max}}$ و

$P_{D_{\min}}$

محل تقاطع دو منحنی حد حرارتی آرمیچر و حد میدان

P_{GR}

تلفات توان اکتیو

P_{loss}

حدود توان اکتیو ژنراتور $P_{G_{\max}}$ و

$P_{G_{\min}}$

توان تولیدی پیشنهادی تولیدکننده i ام

P_{S_i}

حدود توان اکتیو پیشنهادی تولید کننده $P_{S_{\max}}$ و

$P_{S_{\min}}$

میزان مصرفی که باید بدون وقفه در مدار باشد

P_{L_0}

توان راکتیو تولیدی ژنراتور i ام

Q_{G_i}

تقاضای توان راکتیو در باس i ام

Q_{D_i}

تقاضای اولیه توانهای اکتیو و راکتیو در باس بار i ام

$Q_{D_{i0}}$

حدود توان راکتیو ژنراتور $Q_{G_{\max}}$ و

$Q_{G_{\min}}$

میزان توان راکتیو قابل دسترس ژنراتور

$Q_i^{m\arg in}$

حداکثر توان راکتیو تولیدی ژنراتور

$Q_i^{\max}$

میزان واقعی توان راکتیو تولیدی ژنراتور

Q_i^{actual}

درصد سهم بازار هر شرکت کننده

s_i

حداکثر توان ظاهری در باس i ام

$S_{G_i,\max}$

ولتاژ ترمینال ژنراتور

V_t

فازور ولتاژ در باس i ام

V_i

ضرایب وزنی

w_1, w_2

راکتانس سنکرون

X_s

ij امین عنصر ماتریس ادمیتانس شبکه

$Y_{ij}\angle\theta_{ij}$

قیمت تلفات توان اکتیو

α

ماتریس تضعیف

α_{ij}

قیمت تلفات توان راکتیو

β

پارامتر بار

λ

پارامتر بار بحرانی

λ_{cr}

قیمت توان اکتیو برای ژنراتور i ام

λ_{P_i}

قیمت توان راکتیو برای ژنراتور i ام

λ_{Q_i}

سهم ژنراتور i ام در تلفات توان اکتیو

ΔP_{G_i}

سهم ژنراتور i ام در تلفات توان راکتیو

ΔQ_{G_i}

طول گام پارامتر بار

$\Delta\lambda$

نشانه های اختصاری

پخش بار تداومی	CPF (Continuation Power Flow)
الگوریتم ژنتیک	GA (Genetic Algorithm)
معیار تعیین قدرت بازار راکتیو	HHI (Herfindahl-Hirschman Index)
بهره بردار مستقل سیستم	ISO (Independent System Operator)
قیمت نقطه ای محلی	LMP (Local Marginal Price)
پخش بار بهینه چند هدفه	MOPF (Multi Objective Optimal Power Flow)
پخش بار بهینه	OPF (Optimal Power Flow)
پخش بار پارامتری شده	PLF (Parameteraized Load Flow)

VCA (Voltage Control Area)	**ناحیه کنترل ولتاژ**
VSM (Voltage Stability Margin)	**حاشیه پایداری ولتاژ**

VSC-OPF (Voltage Security Constrained Optimal Power Flow)

پخش بار بهینه مقید به امنیت ولتاژ

فصل ۱

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

حفظ امنیت شبکه و تامین توان راکتیو یکی از مهمترین سرویسها در محیط تجدید ساختار یافته می باشند. از مسائل مهم در این زمینه، روش قیمت گذاری توان راکتیو و تخصیص هزینه ها در بازار رقابتی است که می بایستی در آن امنیت ولتاژ و حفظ حاشیه پایداری در کنار سایر ویژگیها مورد توجه خاص قرار گیرد. در رساله حاضر در تکمیل و توسعه روشهای موجود، روشی جدید برای قیمت گذاری بازار محور توان های اکتیو و راکتیو مقید به امنیت ولتاژ ارائه شده است که در آن شاخص قدرت بازار مد نظر قرار می گیرد. همچنین، روش پیشنهادی با توجه به بازار های محلی توان راکتیو که در آن سیستم قدرت به نواحی کنترل ولتاژ تقسیم بندی شده است، توسعه داده می شود.

در این فصل، پس از بیان اهمیت و جایگاه توان راکتیو در محیط بازار، بازار های مختلف توان راکتیو مورد بررسی قرار می گیرند. سپس، نحوه تدارک این سرویس بیان می شود و پس از آن قیمت گذاری هزینه محور و بازار محور توان راکتیو مورد مطالعه قرار می گیرد. در نهایت با دسته بندی تحقیقات انجام شده، موضوع تحقیق و نوآوری این رساله با جزئیات بیشتر مطرح می شود.

۱-۲- اهمیت سرویس توان راکتیو

سیستمهای قدرت در طی دو دهه گذشته شاهد تحولات ساختاری عمده ای بوده است. این تحول شامل عبور از ساختار انحصاری به ساختار رقابتی در صنعت برق می باشد. وظیفه اصلی سیستمهای قدرت تامین انرژی است. تامین بار و پایداری سیستم قدرت مستلزم تامین خدماتی است که از آنها بعنوان سرویسهای جانبی نام برده می شود. از جمله این خدمات می توان به تامین توان راکتیو مورد نیاز شبکه و فراهم نمودن ساز و کارهای تثبیت فرکانس اشاره نمود. از طرف دیگر، حفظ امنیت شبکه، با توسعه شبکه انتقال و افزایش مبادلات توان در محیط

بازار، یکی از مسائل جدی برای اپراتور سیستم می باشد. تامین توان راکتیو مورد نیاز شبکه از جمله خدماتی است که ضمن اینکه هزینه بالایی را برسیستم تحمیل می نماید، در پایداری تامین برق و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ[۱] شبکه نقش بسزایی دارد. در سیستم های قدرت پیشرفته، بررسی پایداری ولتاژ و ارزیابی حاشیه امنیت ولتاژ برای اجتناب از بروز ناپایداری و پدیده فروپاشی ولتاژ بسیار ضروری است. این مسئله درمحیط تجدید ساختار یافته از پیچیدگیهای بیشتری برخوردار است.

عملکرد مناسب سرویس توان راکتیو در سیستم قدرت می تواند منجر به موارد زیر گردد:

- فراهم نمودن توان راکتیو مصرفی بارها
- افزایش پایداری ولتاژ
- کاهش تلفات شبکه
- کمک به رفع پر شدگی[۲] در خطوط انتقال
- تامین رزرو کافی برای تضمین امنیت شبکه در برابر حوادث

در سیستم سنتی، تدارک[۳] سرویس توان راکتیو توسط یک بهره بردار مرکزی صورت می گیرد. در این حالت پرداختی که به واحدهای تولیدی بابت تدارک توان راکتیو تعلق می گیرد، بخش غیر قابل تفکیکی از کل درآمد آنها می باشد. بهره بردار سیستم هزینه تامین توان راکتیو را از یکی از روشها از جمله از طریق جریمه کردن مشتریان و با توجه به ضریب قدرت بار مصرفی آنها جبران می کند.

مصرف کنندگان توان راکتیو به دو صورت خانگی و صنعتی تقسیم می شوند. معمولا پرداخت مصرف کنندگان خانگی بابت مصرف توان راکتیو به صورت ضریبی از مصرف توان اکتیو آنها در نظر گرفته می شود و تعرفه ای جداگانه بابت مصرف توان راکتیو برای آنها در نظر گرفته نمی شود. مصرف کنندگان صنعتی توان راکتیو ، با توجه به میزان توان راکتیو مصرفی بهایی را خواهند پرداخت. به همین منظور، بسیاری از مصرف کنندگان صنعتی بزرگ سعی می کنند با استفاده از بانک های خازنی، راکتورها و... به تصحیح ضریب قدرت خود بپردازند و هزینه های خود را حداقل کنند.

در سیستم های تجدید ساختار یافته، تامین سرویس توان راکتیو بر عهده بهره بردار مستقل سیستم[۴] (ISO) می باشد. در این ساختارها، اغلب تولیدکنندگان یا مصرف کننده های مستقل مانند ژنراتورهای سنکرون، کندانسور

---

[۱] Voltage Collapse
[۲] Congestion
[۳] Provision
[۴] Independent System Operator

سنکرون، ادوات FACTS [1]، ... مالکان منابع راکتیو می باشند و بهره بردار سیستم برای حمایت تـوان راکتیـو و حفظ امنیت ولتاژ با آنها وارد قرارداد می شود.

قیمت توان راکتیو معمولا بر اساس هزینه و توسط تجهیزات تولیدی توان راکتیو (در حالت بـازار تـوان راکتیـو) محاسبه و یا توسط بهره بردار تعیین می گردد. در این میان، کل پرداختی که از مشتریان بابت مصرف توان راکتیـو دریافت می شود باید به گونه ای باشد که ضمن عادلانه بودن، کل هزینه های تدارک توان راکتیو را تحت پوشش قرار دهد. به همین منظور، برای عرضه توان راکتیو در یک محیط رقابتی، نحوه محاسبه هزینـه هـای تـدارک آن و تعیین روشی مناسب برای قیمت گذاری اهمیت پیدا کرده است.

۱-۳- سرویس توان راکتیو در بازارهای مختلف

بازار توان راکتیو در تعدادی از کشورها تحقق یافته است. به صورت متداول، مکانیزم بازار توان راکتیو بـر مبنـای قراردادهای بلند مدت استوار است. این قراردادها بین بهره بردار مستقل سیستم و مالکان منابع توان راکتیو بسته می شوند. در ادامه، برخی از بازارهای مختلف توان راکتیو مورد بررسی قرار می گیرند [۳-۱] .

۱) بازار نیویورک

در بازار نیویورک، NYISO مسئول تدارک سرویس توان راکتیو می باشد. در این بازار، قیمت گذاری توان راکتیو بر مبنای کل هزینه های فراگیر سالانه توان راکتیو برای پرداخت، هزینـه هـای فرصـت از دسـت رفتـه و تفـاوت پرداخت به تولید کنندگان و دریافت از مصرف کنندگان در سال گذشته، صورت می گیرد.

۲) بازار سوئد

بازار برق سوئد بیشتر بر قراردادهای دو جانبه[2] بین متقاضی و تولید کننده استوار است. قراردادهای دوجانبه غالبا به صورت بلند مدت بوده و از ماه قبل نهایی می شوند. در این کشور، SK [3] مسئول بهره برداری مطمئن شـبکه مـی باشد. سیستم قدرت سوئد به گونه ای است که بین مراکز بار و تولید فاصله طولانی وجود دارد. از این رو، شرکت های شبکه محلی و منطقه ای وظیفه تدارک توان راکتیو را برعهده دارند. در قراردادهای توان، SK برای تبادل توان راکتیو با ژنراتورهای مستقل و شبکه های محلی وارد قرار داد می شود.

۳) بازار بریتانیا

در بازار بریتانیا، NGC [4]نقش بهره بردار مستقل سیستم را بر عهده دارد. از این رو، بهـره بـردار مـستقل سیـستم مسئول تامین سرویسهای جانبی در محدوده استاندارد می باشد و برای این منظور با ژنراتورها، شرکت هـای بـرق منطقه ای و مصرف کنندگان بزرگ وارد قرارداد می شود. در این بازار، مکانیزم سـرویس تـوان راکتیـو اجبـاری

---

[1] Flexible AC Ttansmission System
[2] Bilateral Contract
[3] Svenka Kraftnat
[4] National Grid Commission

(ORPS[1]) وجود دارد که در این مکانیزم یک تعهد حداقل را برای تمام واحدهای بزرگتر از ۵۰ MW در نظر می گیرد تا سطح پایه ای از سرویس توان راکتیو را به صورت الزامی تدارک ببیند.

٤) بازار کالیفرنیا

در بازار کالیفرنیا، سرویس توان راکتیو از طریق قرار دادهای بلند مدت تامین می شود. نیاز کوتاه مدت واقعی به صورت روزانه بعد از ثبات بازار انرژی تعیین می گردد. ژنراتورها ملزم می گردند که توان راکتیو را در محدوده ضریب قدرت ۹/. پس فاز تا ۹۵/. پیش فاز تامین کنند.

۵) بازار کانادا

در کانادا، هر ایالت قوانین مربوط به خود را دارد. در انتاریو ، کلیه ژنراتورهای با قدرت بیشتر از ۱۰ MW به شبکه متصل هستند و ملزم به تامین توان راکتیو در محدوده ضریب قدرت ۹/. پس فاز تا ۹۵/. پیش فاز می باشند. همچنین ژنراتورها باید قادر به تغییرات پیوسته خروجی خود در بازه ۵٪ ± ولتاژ ترمینال باشند. برای تامین سرویس جانبی توان راکتیو، بهره بردار مستقل سیستم (IESO[2]) با ژنراتورهای مستقل وارد قرار داد می شود. این قرارداد ها به گونه ای است که هزینه های افزایشی آنها پوشش داده شود.

٦) بازار ژاپن

در ژاپن، شرکت برق توکیو (TEPCO) مسئول تامین توان راکتیو در محدوده استاندارد می باشد. قیمت برق در بازار ژاپن شامل دو تعرفه نرخ پایه و نرخ انرژی می باشد که از روابط زیر بدست می آیند:

نرخ پایه= قیمت واحد ×kw قرارداد× (ضریب قدرت-۱/۸۵)

نرخ انرژی= قیمت واحد × مجموع کارکرد

این تعرفه باعث شده است تا متقاضیان بمنظور کاهش نرخ پایه ضریب قدرت خود را افزایش دهند. در این کشور متوسط ضریب قدرت متقاضیان ۹۹/. می باشد.

۷) بازار ایران[٤]

خدمات توان راکتیو در ایران، کنترل و حفظ سطوح ولتاژ در شبکه انتقال و فوق توزیع تعریف می شود. شرکت مدیریت شبکه برق ایران مسئول تامین توان راکتیو مورد نیاز شبکه می باشد. واحد های نیروگاهی متصل به شبکه ملزم به تولید توان در بازه ۹/. پس فاز تا ۹۵/. پیش فاز می باشند. در این حالت بهایی برای تولید توان راکتیو دریافت نخواهند کرد. شرکت مدیریت شبکه می تواند بر اساس نیاز هر منطقه، اقدام به انعقاد قرارداد دو جانبه با واحدهای نیروگاهی ویا خازن ها و راکتورها برای تامین توان راکتیو نماید.

پرداخت ها در بازار توان راکتیو به موارد زیر تقسیم می شوند:

---

[1] Obligatory Reactive Power Service

[2] Independent Electric System Operator

- بهای آمادگی راکتیو: که برابر با حاصل ضرب نرخ پایه آمادگی راکتیو و ضرایب بهای آمادگی می باشد.
- بهای انرژی راکتیو: که بر مبنای در صدی از قیمت متوسط انرژی اکتیو تعیین می گردد.
- خسارت فرصت از دست رفته: چنانچه میزان پذیرفته شده یک واحد نیروگاهی در بازار اکتیو به دلیل نیاز شبکه به تولید انرژی راکتیو محدود شود، به شرطی که در خارج از محدوده ضریب توان ۹/. پس فاز تا ۹۵/. پیش فاز باشد، به واحد خسارت فرصت از دست رفته پرداخت می شود.

دریافت ها در بازار توان راکتیو ایران به موارد زیر تقسیم می شود:

- بهای انرژی راکتیو مصرفی: که بین خریدارانی که ضریب توان مصرفی آن ها خارج از محدوده تعیین شده باشد، سرشکن می شود.
- سهم توان راکتیو از تلفات راکتیو: که به خریدارانی که ضریب توان مصرفی آن ها خارج از محدوده تعیین شده باشد، تعلق می گیرد.
- سهم توان راکتیو از هزینه خدمات انتقال: که به خریدارانی که ضریب توان مصرفی آن ها خارج از محدوده تعیین شده باشد، تعلق می گیرد.

۱-٤- تدارک سرویس توان راکتیو در محیط تجدید ساختار یافته

با وجود این که سرویس جانبی توان راکتیو می تواند به وسیله گروه های مختلفی نظیر ژنراتورها، شرکت های توزیع و مصرف کنندگان بزرگ تامین گردد، اهمیت ژنراتورهای سنکرون در تدارک این سرویس از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در این رساله، منطبق با قوانین موجود FERC [۱] ، تنها ژنراتورهای سنکرون به عنوان تولیدکنندگان توان راکتیو در نظر گرفته شده اند [۱].

دو مرحله برای تدارک توان راکتیو مورد نیاز شبکه در محیط تجدید ساختار یافته وجود دارد:

۱- تامین توان راکتیو[۲]

۲- توزیع (پخش) توان راکتیو[۳]

تامین توان راکتیو معمولا جزو اهداف بلند مدت[٤] می باشد. به عبارت دیگر، ISO بر اساس پیش بینی بار و شرایط سیستم در دوره مشخص، تخصیص بهینه توان راکتیو را بین تولید کنندگان انجام می دهد. معیار استفاده شده برای

---

[۱] Federal Energy Regulatory Commission
[۲] Reactive Power Procurement
[۳] Reactive Power Dispatch
[٤] Long Term