



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

قیمت گذاری توان راکتیو در شبکه تجدید ساختار یافته با استفاده از پخش بار بهینه

توسط:

بابک معظمی

استاد راهنما:

دکتر مسعود علی اکبر گلکار

استاد مشاور:

دکتر سید مسعود مقدس تفرشی

تابستان 1390

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: بابک معظمی

را با عنوان: قیمت‌گذاری توان راکتیو د شبکه تجدید ساختار یافته با استفاده از پخش بار بهینه

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیئت داوران
	استاد	آقای دکتر مسعود علی اکبر گلکار	1- استاد راهنما
	استادیار	آقای دکتر سید مسعود مقدس تفرشی	2- استاد مشاور
	استاد	آقای دکتر محمودرضا حقی- فام	3- استاد ممتحن
	دانشیار	آقای دکتر سید محمد تقی بطحایی	4- استاد ممتحن
	استادیار	آقای دکتر سید مسعود مقدس تفرشی	5- نماینده گروه

تقدیم

این پایان نامه را تقدیم می کنم به پدر و مادر مهربانم و برادر عزیزم که این کار، نتیجه زحمات بی دریغ آنهاست.

تشر و قدردانی

بر خود لازم می دانم که از زحمات بی دریغ استاد راهنمایم در این پروژه، جناب آقای دکتر مسعود علی اکبر گلکار و همچنین استاد مشاور جناب آقای دکتر سید مسعود مقدس تفرشی، کمال تشر و قدردانی را به عمل آورم، زیرا بدون راهنمایی ها و مساعدت‌های ایشان انجام این پروژه نامیسر بود.

چکیده

امروزه با تغییر شکل بازار برق از سنتی به رقابتی لازم است تا هزینه‌های اقتصادی مربوطه در چارچوب تغییر ساختار در ارائه سرویس توان راکتیو به عنوان یکی از خدمات جانبی بسیار مهم شبکه که کنترل آن بر عهده اپراتور مستقل سیستم است و بدون وجود آن، امکان انتقال مطلوب توان حقیقی در سیستم قدرت وجود ندارد، مورد توجه قرار گیرند. به دلایل مختلف از جمله نو بودن و پیچیدگی مطلب، به مقوله قیمت گذاری سرویس توان راکتیو در صنعت برق تجدید ساختار یافته کمتر پرداخته شده است. اساس نظری و تحلیل قیمت‌گذاری زمان-واقعی برای نخستین بار در سال 1982 میلادی مطرح شد. پس از آن بر اساس روش مشابه به قیمت‌گذاری توان راکتیو در صنعت برق سنتی پرداخته شد که بعدها به روش‌های مشابه مطالعات زیادی در خصوص قیمت‌گذاری توان اکتیو و راکتیو صورت گرفت که اساس کار آنها استفاده از پخش بار بهینه است و تفاوت عمده آنها در تابع هدف و قیود انتخاب شده است. در این پایان نامه ابتدا با استفاده از الگوریتم‌های خاص به طراحی مدل قیمت توان راکتیو با استفاده از هزینه فرصت‌های از دست رفته توان اکتیو در یک محیط تجدید ساختار شده صنعت برق پرداخته شده است و سپس با هدف کمینه کردن قیمت توان اکتیو و راکتیو با تشکیل معادله لاگرانژ مناسب، مسئله پخش بار بهینه ایجاد خواهد شد. در ادامه با معرفی روش‌های مناسب جهت حل مسئله پخش بار بهینه، که مطابق با ماهیت یک صنعت برق تجدید ساختار یافته با امکان دسترسی باز باشد، میزان بهینه توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط واحدهای نیروگاهی و در نتیجه با استفاده از تئوری هزینه‌های حدی، هزینه توان اکتیو و راکتیو در قبال هر قرارداد بدست خواهد آمد. در نهایت، با اعمال الگوریتم‌های معرفی شده بر روی شبکه آزمون، صحت مطالب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلید واژه:

شبکه‌های تجدید ساختار یافته ، قیمت گذاری توان راکتیو ، پخش بار بهینه ، هزینه فرصت‌های از دست‌رفته، سرویس‌های جانبی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست جدول‌ها.....
ه.....	فهرست شکل‌ها.....
و.....	فهرست علائم و نشانه‌ها.....
7.....	فصل 1- مقدمه
7.....	1-1- پیشگفتار.....
8.....	2-1- هدف از انجام این پایان نامه.....
10.....	فصل 2- آشنایی با بازار خدمات جانبی.....
10.....	2-1- مقدمه
11.....	2-2- مدل‌های بازار برق رقابتی.....
12.....	2-2-1- مدل بازار برق اشتراکی.....
13.....	2-2-1-1- مدل تک خریدار
14.....	2-2-1-2- رقابت در سطح عمده فروشی.....
15.....	2-2-1-3- رقابت در سطح خرده فروشی.....
16.....	2-2-2- مدل قراردادهای دوطرفه.....
16.....	2-2-3- مدل ترکیبی.....
17.....	2-3- نهادهای بازار برق.....
17.....	2-3-1- نهادهای نظارتی - مدیریتی.....
18.....	2-3-2- نهادهای تجاری.....
20.....	2-4- بازار خدمات جانبی.....
27.....	2-5- قیمت گذاری در بازار برق.....
28.....	2-5-1- قیمت گذاری مبتنی بر حراج.....
28.....	2-5-1-1- حراج انرژی.....
30.....	2-5-1-2- مدیریت تراکم.....
31.....	2-5-1-3- تخصیص هزینه های تلفات.....
31.....	2-5-2- قیمت گذاری مبتنی بر پخش بار بهینه.....
32.....	2-5-3- تأمین هزینه های انتقال.....

35	فصل 3- سرویس توان راکتیو در شبکه تجدید ساختار یافته
35	3-1- مقدمه
36	3-2- توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز
36	3-3- لزوم قیمت گذاری توان راکتیو
39	3-4- معرفی تابع هزینه توان راکتیو
39	3-4-1- هزینه ثابت
40	3-4-2- هزینه متغیر
40	3-4-3- هزینه فرصتهای از دست رفته
43	3-5- تأثیر قیمت توان اکتیو بر تابع هزینه توان راکتیو
45	3-6- نتیجه گیری
46	فصل 4- قیمت گذاری مبتنی بر پخش بار بهینه
46	4-1- مقدمه
46	4-2- بررسی روشهای قیمتگذاری محققان دیگر
50	4-3- فرمولبندی مسئله قیمت گذاری توان
50	4-3-1- تابع هزینه توان اکتیو
51	4-3-2- تابع هزینه توان راکتیو
51	4-3-3- هزینه سرمایه گذاری خازنها
51	4-4- کمینه کردن تابع هدف
55	4-5- قیود مسئله پخش بار
56	4-6- قیمت گذاری توان راکتیو با احتساب هزینه های حدی
58	4-7- نتیجه گیری
59	فصل 5- نتایج محاسبات و شبیه سازی
59	5-1- مقدمه
59	5-2- ارائه الگوریتم مناسب حل پخش بار بهینه
60	5-3- مشخصات شبکه آزمون
62	5-4- نتایج شبیه سازی به ازای بار ثابت
62	5-4-1- قیمت گذاری بدون در نظر گرفتن تابع هزینه راکتیو
65	5-4-2- قیمت گذاری با در نظر گرفتن هزینه توان راکتیو
68	5-5- نتایج شبیه سازی با استفاده از منحنی بار روزانه

70.....	6-5 - صحه گذاری نتایج.....
74.....	7-5 - نتیجه گیری.....
75.....	فصل 6 - نتیجه گیری و پیشنهادات.....
75.....	6-1 - نتیجه گیری.....
76.....	6-2 - پیشنهادات.....
78.....	ضمیمه أ - محاسبه ضرایب تابع هزینه توان راکتیو به روش مینیمم مربعات.....
80.....	ضمیمه ب - گسترده معادلات پخش بار.....
82.....	فهرست مراجع.....
84.....	واژه نامه فارسی به انگلیسی.....
85.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول 1-2: مشخصات کلیدی صنعت برق سنتی.....	11
جدول 2-2: انواع خدمات جانبی.....	22
جدول 3-2: مشخصات ابزار کنترل ولتاژ.....	24
جدول 4-2: خدمات مورد نیاز برای بهره بردار بهای مختلف.....	26
جدول 5-2: مشخصات کلیدی 12 مورد از خدمات.....	27
جدول 6-2: روشهای تخصیص هزینه انتقال.....	34
جدول 1-5: اطلاعات مربوط به ژنراتورها.....	61
جدول 2-5: اطلاعات مربوط به خطوط انتقال.....	62
جدول 3-5: مقادیر بهینه تولید بدون در نظر گرفتن هزینه توان راکتیو.....	62
جدول 4-5: هزینه های حدی بدون در نظر گرفتن هزینه توان راکتیو.....	64
جدول 5-5: مقادیر بهینه تولید با در نظر گرفتن هزینه توان راکتیو.....	65
جدول 6-5: هزینه های حدی با در نظر گرفتن هزینه توان راکتیو.....	67
جدول 7-5: هزینه های حدی با در نظر گرفتن هزینه توان راکتیو.....	67
جدول 8-5: نتایج بدست آمده از شبکه آزمون 4 شینه.....	71
جدول 9-5: اطلاعات ژنراتورهای ورودی.....	71

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل 2-1: اصول حراج تک قیمتی	29
شکل 2-2: اصول پرداخت بر اساس پیشنهاد	30
شکل 3-1: منحنی ظرفیت بار ژنراتور	40
شکل 3-2: اجزای تشکیل دهنده قیمت توان راکتیو بر حسب توان راکتیو تولیدی در ژنراتور 250 مگاوات	42
شکل 3-3: اجزای تشکیل دهنده قیمت توان راکتیو بر حسب توان راکتیو تولیدی در ژنراتور 500 مگاوات	43
شکل 3-4: تأثیر قیمت‌های مختلف توان اکتیو در تابع هزینه توان راکتیو در ژنراتور 250 مگاوات	44
شکل 3-5: تأثیر قیمت‌های مختلف توان اکتیو در تابع هزینه توان راکتیو در ژنراتور 500 مگاوات	44
شکل 3-6: مقایسه تابع هزینه دو ژنراتور 250 و 500 مگاواتی	45
شکل 4-1: میزان تولید توان راکتیو در ازای پیشنهاد نیروگاه	48
شکل 4-2: نمودار جریان‌ی روند قیمت گذاری توان اکتیو و راکتیو	49
شکل 5-1: شبکه آزمون	61
شکل 5-2: میزان توان اکتیو تولیدی و مصرفی در شبکه بدون در نظر گرفتن هزینه تولید توان راکتیو ..	63
شکل 5-3: میزان توان راکتیو تولیدی و مصرفی در شبکه بدون در نظر گرفتن هزینه تولید توان راکتیو ..	64
شکل 5-4: میزان توان اکتیو تولیدی و مصرفی در شبکه با در نظر گرفتن هزینه تولید توان راکتیو	66
شکل 5-5: میزان توان اکتیو تولیدی و مصرفی در شبکه با در نظر گرفتن هزینه تولید توان راکتیو	66
شکل 5-6: منحنی بار روزانه	68
شکل 5-7: تغییرات قیمت زمان-واقعی توان اکتیو در شین 5 در 24 ساعت	69
شکل 5-8: تغییرات قیمت زمان-واقعی توان راکتیو در شین 5 در 24 ساعت	69
شکل 5-9: شبکه 4 شینه آزمون [8]	70
شکل 5-10: تغییرات بار روزانه در 24 ساعت [9]	72
شکل 5-11: هزینه های حدی توان اکتیو در هر یک از شین هادر 24 ساعت [9]	72
شکل 5-12: هزینه های حدی توان راکتیو در هر یک از شین هادر 24 ساعت [9]	73
شکل 5-13: تغییرات هزینه حدی توان اکتیو به ازای تغییر تولید توان اکتیو [9]	73
شکل 5-14: تغییرات هزینه حدی توان راکتیو به ازای تغییر تولید توان راکتیو [9]	74

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تابع هزینه	c
توان اکتیو تولیدی	P_G
توان اکتیو مصرفی	P_D
توان راکتیو تولیدی	Q_G
توان راکتیو مصرفی	Q_D
هزینه افزونی تولید	IC
تلفات انتقال افزونی	ITL
هزینه حدی	MC
ضریب لاگرانژ	l
ضریب لاگرانژ حد پایین توان اکتیو تولیدی	$l_{i,\min}$
ضریب لاگرانژ حد بالای توان اکتیو تولیدی	$l_{i,\max}$
ضریب لاگرانژ حد پایین توان راکتیو تولیدی	$m_{i,\min}$
ضریب لاگرانژ حد بالای توان راکتیو تولیدی	$m_{i,\max}$
ضریب لاگرانژ حد توان انتقال	h_{ij}
ضریب لاگرانژ حد پایین ولتاژ	$u_{i,\min}$
ضریب لاگرانژ حد بالای ولتاژ	$u_{i,\max}$
ولتاژ	V
جریان	I
زاویه ولتاژ	d
زاویه بین جریان و ولتاژ	q
مقاومت خط انتقال	R
هدایت خط انتقال	G
راکتانس خط انتقال	X
سوسپتانس خط انتقال	B

فصل 1 - مقدمه

1-1 - پیشگفتار

صنعت برق به عنوان زیربنا در زیر ساخت اساسی فعالیت های صنعتی، اقتصادی، اجتماعی و کشاورزی هر کشوری نقش بسزایی را ایفا می کند. توسعه اقتصادی و صنعتی در جهان و افزایش روزافزون جمعیت، تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی در کل جهان را دو چندان کرده است. برای پاسخگویی به این افزایش تقاضا فشار سنگینی بر اقتصاد کشورها جهت توسعه زیر ساخت های صنعت برق وارد شده است.

صنعت برق، با احداث واحدهای کوچک و خصوصی تولید برق حیات خود را آغاز کرد، اما بتدریج و با درک اهمیت این صنعت روند دولتی شدن آن آغاز شد و ساختار این صنعت به عنوان یک ساختار یکپارچه عمودی و کاملاً انحصاری در اذهان شکل گرفت که هر کسی توان ورود به عرصه آن و انجام فعالیت در آن را نداشت. با همین ذهنیت بود که دولت ها کنترل صنعت برق را در دست گرفتند. در ساختار انحصاری سیستم های قدرت، تولید انرژی الکتریکی انتقال این انرژی و توزیع آن در یک منطقه و توسط یک واحد کنترل می باشد. مصرف کنندگان کوچک و بزرگ، انرژی مورد نیازشان را از مالک سیستم (اغلب دولت) خریداری می کردند و سیستم بازار برق تک قطبی بود. در واقع، دولت ها با احداث نیروگاه های کوچک و بزرگ در نقاط مختلف کشور یا منطقه و انتقال انرژی تولیدی به محل های مصرف و توزیع آن، بازار برق را اداره می کردند و بر کل سیستم توسط واحد مرکزی نظارت داشتند.

لیکن بتدریج و با بروز مشکلاتی در اداره دولتی صنعت برق، همانند ناتوانی دولت در تأمین مالی مناسب برای این صنعت، ناکارایی سرمایه گذاری و بهره برداری و همچنین لزوم تأمین تقاضای انرژی الکتریکی با قابلیت اطمینان بالا، تغییر ساختار در صنعت برق ضرورت یافت. دولتها با این واقعیت انکار ناپذیر مواجه گردیدند، که انحصار صنعت برق در دست دولت، تأمین منابع مالی کافی برای سرمایه گذاری در زیر ساخت های این صنعت را با مشکل مواجه می کند. از طرف دیگر با گسترش رقابت های جهانی و انقلاب اطلاعات و افزایش انتظارات مصرف کننده ها برای استفاده از کالاها و خدمات با کیفیت بهتر و حق انتخاب بیشتر، زمینه برای حرکت به سمت رقابتی کردن تولید و توزیع برق فراهم شده است. از این تحول به سوی بازار رقابتی برق، به عنوان مقررات زدایی و تجدید ساختار برق نام برده می شود.

در ساختار جدید از نظر تجاری انرژی الکتریکی و خدمات جانبی آن به عنوان یک کالا می توانند در سیستم بازار رقابتی به فروش روند، در حالیکه فقط مقررات عرضه و تقاضا بر آن حاکم است. انرژی الکتریکی می تواند، توسط بنگاه های معاملاتی و یا بازارهای واسطه بین فروشندگان (تولیدکنندگان) و

خریداران (مصرف کنندگان) مبادله شود. در واقع آنچه در صنعت برق در فرآیند تجدید ساختار اتفاق می افتد، جایگزین شدن نگاه کالایی به برق بجای تفکر تلقی برق به عنوان یک خدمت عمومی می باشد. در سیستم بازار رقابتی برق، مشتریان می توانند فروشنده را انتخاب کنند. با تأمین سرویس بهتر و انرژی ارزانتر، فروشندگان می توانند مشتریان بیشتری جذب نمایند و در نتیجه سود بیشتری عاید خود گردانند و از طرف دیگر مشتریان نیز منافع بیشتری می برند. فروشندگان یا تأمین کنندگان انرژی نمایندگانی هستند که انرژی را به مشتری می فروشند، هرچند که ممکن است آنها تولیدکننده نباشند، اما سهم تولید نیروگاه ها را بخرند. این ساختار جدید سیستم قدرت، مفاهیم قدیمی را به چالش می خواند. در گذشته تمرکز تحقیقات روی فرمول سازی برخی محدودیت های عملی از قبیل دامنه ولتاژ شین ها، محدودیت های تولید، ظرفیت خطوط انتقال، محدودیت های احتمالی، ملاحظات محیطی و مسائلی از این قبیل بود. اما امروزه با توجه به رقابتی شدن بازار علاوه بر محدودیت های قبلی به مسائلی از قبیل سرمایه گذاری و تولید بهینه و همچنین سودآوری تولید توجه می شود.

1-2 - هدف از انجام این پایان نامه

در روش های سنتی قیمت گذاری اقتصادی، پخش بار بهینه صرفاً میزان بهینه تولید هر واحد نیروگاهی را بر اساس تابع هزینه تولید هر نیروگاه محاسبه می کرد و بدین ترتیب هر نیروگاه موظف به تولید میزان توان خواسته شده توسط اپراتور سیستم بود. لازم به ذکر است که این محاسبات فقط بر مبنای توان اکتیو صورت می گرفت و هزینه های مربوط به توان راکتیو در آنها لحاظ نمی گردید. با توجه به اینکه مصرف توان راکتیو توسط مصرف کننده ها باعث بوجود آمدن تلفات در خطوط انتقال می گردد، لذا به ازای مصرف توان راکتیو بیش از مقدار تعیین شده توسط اپراتور سیستم، مصرف کننده در پرداخت هزینه، مشمول ضرایب پنالتی می شد که این ضرایب با احتساب میزان تلفات توان اکتیو در خطوط انتقال محاسبه می گشت.

با توجه به اینکه در شبکه های سنتی، چارچوب مشخصی برای قیمت گذاری توان و علی الخصوص توان راکتیو وجود نداشت، امروزه بحث قیمت گذاری با توجه به اینکه مراکز تولید توان و واحدهای نیروگاهی به بخش خصوصی واگذار می شوند، اهمیت دوچندان می یابد. در شبکه های سنتی، هزینه ای که مصرف کننده ملزم به پرداخت آن بود عبارت بود از هزینه توان اکتیو و در مورد مصرف کننده های صنعتی این هزینه شامل توان راکتیو نیز می شد، چرا که مصرف بیش از حد توان راکتیو توسط مصرف کننده باعث بروز افت ولتاژ در خط انتقال می شود. بنابراین جهت جلوگیری از مصرف بیش از حد توان راکتیو، ضرایب پنالتی برای آنها در نظر گرفته می شد.

با مصرف روز افزون توان، نیاز به قیمت گذاری توان راکتیو و ایجاد انگیزه برای تولید آن توسط نیروگاه‌ها بیش از گذشته احساس می‌شود، بنابراین بسیاری از محققان را بر آن داشت تا با انتخاب الگوریتم‌های مناسب به قیمت گذاری بهینه توان راکتیو بپردازند، اما از آنجا که پیش بینی مصرف توان راکتیو مسئله پیچیده‌ای است، لذا تعیین قیمت برای آن نیازمند مطالعات گسترده است که در این پایان نامه پس از معرفی شبکه‌های تجدید ساختار یافته و انواع آن در فصل دوم، به معرفی بازارهای برق می‌پردازیم، در ادامه نقش هر یک از اجزای شبکه تجدید ساختار یافته در بازار برق را بررسی می‌نماییم. سپس به مدیریت توان راکتیو در شبکه تجدید ساختار یافته پرداخته و در راستای آن، وظایف ISO¹ و خدمات جانبی در بازار برق معرفی می‌گردند. سپس در فصل سوم با بررسی لزوم قیمت گذاری توان راکتیو، توان راکتیو تولیدی و مصرفی را از دید هر یک از اجزای شبکه بررسی می‌نماییم. در این فصل به معرفی تابع قیمت توان راکتیو تولیدی می‌پردازیم. پس از بررسی لزوم قیمت گذاری توان راکتیو، الگوریتم‌های انتخاب شده توسط سایر محققین در این زمینه معرفی می‌گردند و مقایسه‌ای بین نتایج کار آنها انجام خواهد گرفت. در نهایت در فصل چهارم با تشکیل پخش بار بهینه بر اساس تابع هزینه توان راکتیو پیشنهادی، و ارائه روش حل مناسب پخش بار بهینه، قیمت توان راکتیو و همچنین میزان بهینه تولید آنها مشخص خواهد شد، در انتها در فصل پنجم نتایج محاسبات بر روی شبکه آزمون اعمال خواهد شد.

هدف از انجام این پایان نامه، ضرورت بررسی هزینه توان راکتیو در کنار توان اکتیو است. در سالیان اخیر، بحث قیمت‌گذاری توان راکتیو توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. چرا که تولید بیشتر توان راکتیو، توسط واحدهای نیروگاهی باعث می‌شود تا ظرفیت تولید توان اکتیو کاهش یابد، از طرفی بدون تولید توان راکتیو، بهره بردار شبکه در کنترل پروفیل ولتاژ با مشکل مواجه می‌شود. بنابراین لازم است تا ISO چارچوب قیمت‌گذاری مناسبی برای توان راکتیو ایجاد کند. در این پایان نامه سعی بر این شده است تا با ارائه مدل دقیق‌تری از قیمت توان راکتیو، نسبت به محققین گذشته، قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان راکتیو از دید بهره بردار مستقل سیستم انجام گیرد. بدین منظور، تابع هزینه توان راکتیو تولیدی بر اساس میزان توان راکتیو تولیدی که از نتایج کار گذشتگان استخراج گردیده، در بهینه سازی مصرف توان راکتیو در شبکه و الگوریتم معرفی شده، بکار گرفته خواهد شد. در نتیجه بر خلاف محققان پیشین، مدلی از تابع هزینه تولید توان راکتیو بر اساس میزان توان راکتیو تولیدی واحد نیروگاهی در محاسبات قیمت نهایی توان راکتیو در شبکه، لحاظ خواهد شد که مدل دقیق‌تری را نسبت به گذشتگان بدست می‌دهد.

¹ Independent System Operator

فصل 2 - آشنایی با بازار خدمات جانبی

در این فصل، پس از ارائه مقدمه‌ای بر شبکه‌های تجدید ساختاریافته، به بازار خدمات جانبی و مهم‌ترین بخش آن یعنی توان راکتیو که توسط ISO کنترل می‌شود، پرداخته خواهد شد و در انتها روش‌های قیمت‌گذاری در شبکه تجدیدساختاریافته معرفی خواهد شد.

2-1- مقدمه

در سالیان اخیر در کشورهایی که اقدام به تجدید ساختار در صنعت برق نموده‌اند، ساختار سنتی متمرکز عمودی، که سه حوزه اصلی تولید، انتقال و توزیع را در بر می‌گرفت، به مراجع جداگانه و مختلفی که هر کدام وظایف خاصی را در چهارچوب کلی سیستم عرضه انرژی عهده دار هستند، تفکیک شده‌اند. در سیستم تجدید ساختار شده که سیستم تفکیک افقی نامیده می‌شود، ایجاد رقابت در بخش‌های تولید و مصرف باعث می‌شود تا نیروگاه‌هایی که تا چندی قبل در تعیین قیمت برق دخالت مستقیم نداشتند و در یک محیط یکنواخت، تنها مبلغی به عنوان هزینه تولید و هزینه‌های فرعی دیگر دریافت می‌کردند، هم اکنون قیمت فروش برق خود را اعلام داشته و برای فروش برق با نیروگاه‌های مجاور خود رقابت کنند. تجدید ساختار، همچنین این امکان را برای مشترکان فراهم می‌کند که تأمین کننده برق خود را بر اساس هزینه، کیفیت و قابلیت اطمینان انتخاب کنند. فروش برق در صنعت برق تجدید ساختار یافته، نیازمند ایجاد بازاری جهت معاملات انرژی الکتریکی و خدمات جانبی آن می‌باشد.

انرژی الکتریکی به عنوان یک کالا دارای خصوصیات متفاوت با کالاهای دیگر است، که قبل از تشکیل بازار برای داد و ستد باید مورد توجه قرار گیرد. بر خلاف دیگر کالاهای تجاری، انرژی الکتریکی قابل ذخیره سازی در سطح گسترده نیست، و از اینرو قیمت در بازار برق بسیار بی‌ثبات و به سختی قابل پیش‌بینی است. تقاضای انرژی الکتریکی نیز به سختی قابل پیش‌بینی است و دارای تغییرات ناگهانی است که قوانین خاصی را برای پوشش‌دادن به این تغییرات می‌طلبد. تولید، انتقال و مصرف انرژی الکتریکی تابع قواعد فیزیکی و فنی است، بطوریکه باید در هر لحظه توازن بین تولید و مصرف انرژی الکتریکی بر خلاف دیگر کالاها حفظ شود. عدم توازن توان یا انرژی باعث بروز ناپایداری و به خطر افتادن ایمنی سیستم می‌شود، که برای اطمینان از ایمنی سیستم باید در بازار انرژی الکتریکی نیز به این موضوع توجه شود. نکته دیگر اینکه از لحاظ فیزیکی بین تولید تا مصرف، یک ارتباط مستقیم و مشخصی وجود دارد و در ساختار مالی بازار، این ارتباط فیزیکی نقش مهمی ایفا می‌کند. بر اساس این رفتار غیرمترعارف انرژی الکتریکی نسبت به کالاهای دیگر، مدل‌های بازار رقابتی مختلفی برای معاملات آن طراحی و برپا

شده است که مدل‌های کلی آن به سه دسته کلی مدل اشتراکی، مدل قراردادهای دوجانبه و مدل ترکیبی تقسیم می‌شوند.

قبل از پرداختن به مشخصات مدل‌های بازار برق رقابتی برق، ضرورت دارد با مشخصات مدل بازار انحصار کامل آشنا گردیم. در این مدل یک کمپانی انحصار تولید و تحویل برق را از طریق شبکه‌های انتقال و توزیع به مصرف کننده نهایی در اختیار دارد. در این مدل تمامی اجزاء تولید، انتقال و توزیع در انحصار یک مجموعه است و در هیچ سطحی رقابت وجود ندارد. در جدول 2-1 مشخصات این نوع مدل بطور خلاصه آورده شده است.

جدول 2-1: مشخصات کلیدی صنعت برق سنتی

امتیاز انحصاری	فقط شرکت برق محلی می‌تواند تولید، انتقال و یا فروش برق را در منطقه تحت سرویس خود انجام دهد
تعهد تغذیه	سرویس شرکت بایستی برای تمام مصرف کنندگان در منطقه سرویس دهی شود و نه فقط برای آنکه سوددهی دارد
نظارت ناظر	عملکرد مالی شرکت بایستی مطابقت با قوانین و خطوط کلی ترسیم شده توسط ناظران دولتی باشد.
بهره برداری با حداقل هزینه	شرکت بصورتیکه درآمد کل آن حداقل شود کار کند (بر پایه صورتحساب مصرف کنندگان)
نرخ‌های تنظیم شده	نرخ‌های شرکت (قیمت‌ها) مطابق با قوانین و خطوط کلی ترسیم شده توسط ناظر دولت تنظیم می‌شود.
اطمینان از نرخ بازگشت	شرکت از بازگشت منصفانه سرمایه اش مطمئن می‌شود اگر قوانین و مقررات را اجرا نماید

2-2 - مدل‌های بازار برق رقابتی

به منظور دستیابی به اهداف بازار برق، سه مدل کلی برای این بازار در نظر گرفته می‌شوند.

(1) مدل بازار اشتراکی

(2) مدل قراردادهای دوطرفه

(3) مدل ترکیبی

هریک از بازارهای ذکر شده بر اساس رقابت در سطوح مختلف خود به انواع زیر مدل‌ها تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال بازار برق اشتراکی به 3 زیرمدل قابل تقسیم می‌باشد، که در ادامه این مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

2-2-1 - مدل بازار برق اشتراکی

بازار اشتراکی از نوع بازارهای کوتاه مدت تبادل انرژی محسوب می گردد. این نوع بازارها به سه مدل کلی تک خریدار، رقابت در سطح عمده فروشی و رقابت در سطح خرده فروشی تقسیم می شوند. این سه مدل از نظر حدود انحصار، متفاوت می باشند.

معامله کالا در هر بازار بر پایه پیشنهاد فروشنده و تقاضای مصرف کننده است. بنابراین در بازار اشتراکی نیز ابتدا پیشنهادات فروشندگان انرژی و تقاضای مصرف کنندگان از جانب برپا کنندگان بازار، دریافت شده سپس پیشنهادهای دریافتی و تقاضا به همراه محدودیت های فیزیکی و فنی شبکه وارد نرم افزارهای پخش بهینه بار شده و میزان تولید و قیمت تولید برای هر فروشنده مشخص می گردد. در برخی از بازارهای اشتراکی با ایجاد بازار بورس (مرکز تبادل و معاملات برق (PX)¹))، قیمت انرژی مستقل از مسائل فنی محاسبه می شود، و بر این اساس پیشنهادهایی با کمترین قیمت انتخاب شده و برای بررسی های فنی ارسال می شوند. اگر پس از بررسی های فنی مشخص شد که شبکه از لحاظ فنی قادر به جوابگویی پیشنهادهای ارسالی نیست (بخاطر محدودیت های فنی) آنگاه با ساز و کارهای متفاوتی مانند استفاده از خدمات جانبی، تغییر توان تولیدی نیروگاه ها از مقدار توافق اولیه بازار، استفاده از پیشنهادهای تغییر توان تولیدی که همراه پیشنهادهای اصلی انرژی از جانب تولیدکنندگان داده می شود، قطع بار و ... مشکلات فنی مرتفع می گردند. از آنجا که در بازارهای اشتراکی قیمت نهایی انرژی برای ژنراتورها از جانب برنامه های پخش بار تعیین می شود، هزینه خدمات نیز بصورت کم رنگ در این قیمتها گنجانده می شود. فروشندگان انرژی یا شرکت های تولیدی موافق این نوع بازار نبوده و اذعان می دارند که پیشنهاد قیمت برای خدمات مختلف از جانب آنها واقعی تر و عادلانه تر است و اعتمادی به رعایت انصاف از جانب نرم افزارهای مربوطه نیست. چه بسا بازهم در مورد خدمات تبعیضی در حق برخی تولیدکنندگان شود و این همان انگیزه ای که گرایش به سمت استفاده از بازارهای بورس برق را فزونی می بخشد. از اینرو آزادی در مبادله انرژی الکتریکی که لازمه ایجاد یک رقابت داغ و پر رونق است، در بازارهای بورس بسیار بیشتر به چشم می خورد. اما ایمنی شبکه در بازارهای اشتراکی کلاسیک مطمئن تر است و به همین دلیل بهره برداری شبکه با مشکل کمتری مواجه است. از اینرو در اکثر کشورهای جهان، ابتدا بازار اشتراکی کلاسیک به عنوان مدل اولیه تجدید ساختار انتخاب شده و بتدریج به سمت بازارهای بورس پیش رفته است.

¹ power exchange

2-2-1-1- مدل تک خریدار

در این نوع بازار تنها یک خریدار وجود دارد. بازار، یک آژانس دولتی یا شبه دولتی است که با آگاهی از میزان مصرف، توان کافی را از خریداران با ارزان ترین قیمت تهیه می کند. در این مدل خریدار منفرد (آژانس خرید برق) برق مورد نیاز خود را از بین تولیدکنندگان مختلف به طور انحصاری خریداری می کند. این امر رقابت در بخش تولید را به همراه دارد، اما آژانس انحصار کامل بر شبکه انتقال و توزیع تا تحویل به مصرف کننده نهایی را بر عهده دارد و برق را بطور انحصاری به خریداران (شرکت های توزیع) می فروشد. از آنجایی که در این مدل فقط یک خریدار وجود دارد، برای تعیین قیمت منحنی عرضه رسم می شود. سپس با توجه به اینکه تنها خریدار از مقدار توان مصرفی اطلاع دارد، برق را با توجه به توان مورد نیاز خریداری می کند. منحنی تقاضا به صورت یک خط عمودی است که توان مورد نیاز را مشخص می کند. منحنی تولید نیز به صورت پله ای و بر اساس پیشنهادات با کمترین قیمت تا بیشترین قیمت رسم می شوند. تأمین قدرت مورد نیاز در این مدل به ترتیب از ارزان ترین پیشنهاد شروع شده و واحدهای با پیشنهاد گران تر در مراحل بعد پذیرفته می شوند. این امر برای کمترین قیمت اعلامی بعدی نیز تکرار می شود، تا جاییکه پاسخ کامل به تقاضا داده شود.

نرخ خرید برق از فروشندگان می تواند بر اساس دو مکانیزم زیر تعیین شود:

الف- بهای پرداختی به هر فروشنده بر اساس پیشنهاد خود فروشنده در هر ساعت و قدرت تحویلی وی محاسبه و پرداخت می شود.

ب- بهای پرداختی به هر فروشنده بر اساس قیمت بهایی بازار در هر ساعت و قدرت تحویلی هر فروشنده محاسبه و پرداخت می شود.

در این سیستم قیمتی که هر مصرف کننده می پردازد متوسط موزون قیمت تولید پذیرفته شده هر نیروگاه در آن ساعت می باشد.

مزایا:

- رقابت میان شرکت های نیروگاهی باعث کاهش هزینه های تولید می شود.
- امکان ورود بخش خصوصی به بازار و آزادسازی در بخش تولید فراهم می گردد.
- دولت می تواند اهدافی مانند مسائل زیست محیطی را دنبال کند.
- این مدل از بعضی از هزینه های سیستم کاملاً مقررات زدایی شده مانند هزینه های دسترسی انتقال اجتناب می کند.

معایب:

- این مدل بسیاری از معایب مدل انحصاری کامل را دارا می باشد.

2-2-1-2- رقابت در سطح عمده فروشی

در این مدل به تدریج خریدار واحد (با ایجاد زیر ساخت های لازم و تدارک شرایطی که امکان شکست بازار را به حداقل برساند)، معاملات بازار را به عوامل مستقیم بازار واگذار می کند و خریداران عمده (شرکت های توزیع برق) و فروشندگان (شرکت های نیروگاهی) می توانند بطور مستقیم برق خود را مبادله نمایند. خریداران عمده انحصار کامل بر فروش برق به مصرف کننده نهایی را دارا می باشند. در این مدل امکان دسترسی باز به شبکه انتقال بایستی فراهم باشد. از الزامات این مرحله تدوین استانداردهایی برای اتصال به شبکه، تدوین تعرفه های انتقال و توزیع و ترانزیت برق و ایجاد زمینه ای مساعد برای دسترسی منصفانه و آزاد علاقمندان (با رعایت استانداردها) به شبکه می باشد.

در این مدل، خریداران عمده برق، برای برق درخواستی خود قیمت و مقدار پیشنهاد می دهند. گرداننده بازار خریداران را به ترتیب کاهش قیمت اعلامی در منحنی تقاضا مرتب می کند و با مکانیزم مزایده، قیمت نهایی فروش برای هر فروشنده و خرید برای هر خریدار مشخص می شود. در این نوع بازار تقاضا کشش دار است و با تغییر قیمت مقدار تقاضا تغییر می کند. هرچه قیمت بالاتر رود تقاضا کاهش می یابد.

در صورت ایجاد بازار بورس در این مدل، بازار بر اساس مناقصه یکنواخت اداره می شود. بر اساس مناقصه یکنواخت قیمت در کل بازار یکسان است و این قیمت، همان قیمت نقطه تسویه بازار می باشد. در یک بازار بورس قیمت انرژی از قطع منحنی پیشنهادی تولید (عرضه) و پیشنهاد مصرف (تقاضا) مستقل از مسائل فنی محاسبه می شود و بعد از معلوم شدن مقدار تولید هر تولید کننده و مقدار مصرف هر مصرف کننده، وضعیت بازار برای بررسی مسائل فنی به مرکز فرستاده می شود. به عبارت دیگر در ابتدا بدون توجه به محدودیت های فنی شبکه مانند هر بازار بورس کالا، عرضه و تقاضا مطرح می شود و پس از رسیدن به نقطه تسویه و مشخص شدن مقدار تولید هر تولید کننده و مقدار مصرف هر مصرف کننده در آن ساعت بازار، اطلاعات برای بررسی امکان اجرای این شرایط به مرکز فرستاده می شود. پس از بررسی موارد نقص مشخص می شود و با استفاده از راهکارهایی، مشکلات فنی رفع می شوند. در نهایت برندگان در مناقصه مشخص خواهند شد. در این بازار، خریدار و فروشنده یکدیگر را نمی شناسند.

مزایا:

- فشارهای رقابتی موجب متوجه نمودن ریسک بازار و ریسک فنی به شرکت های نیروگاهی می-گردد.