بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی

گروه برق

گرایش قدرت

بهینه‌سازی هزینه‌های خدمات‌جانبی تولید توان‌راکتیو در سیستم‌های تجدیدساختارشده

از

حامد حسن زاده کته‌سری

استاد راهنما

دکترآلفرد باغرامیان

استاد مشاور

دکترحسین افراخته

شهریور ۸۹

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها.....ث و ج

فهرست جداول.....چ

فهرست سر واژه‌ها.....ح

فهرست نمادها.....خ و د

چکیده(فارسی).....ذ

چکیده(انگلیسی).....ر

فصل اول: معرفی بازارهای انرژی و خدمات‌جانبی در ساختار بهره‌برداری سیستم‌قدرت تجدیدساختارشده

۱-۱- مقدمه.....۲

۱-۲- بازارهای انرژی ، خدمات‌جانبی و انتقال.....۴

۱-۲-۱- بازار انرژی.....۴

۱-۲-۲- بازار خدمات‌جانبی.....۴

۱-۲-۳- خدمات‌جانبی برای تجدید ساختار.....۵

۱-۳- حراج پیشرو، خدمات‌جانبی، رویهٔ ترتیبی.....۶

۱- ۴- دو گزینه در حراج ترتیبی خدمات‌جانبی.....۷

۱-۵- طراحی بازار حراج خدمات‌جانبی.....۸

۱-۶- برنامه‌ریزی خدمات‌جانبی.....۱۰

۱-۷- خلاصه‌ای از مطالب.....۱۱

۱-۸- مسائل قیمت‌گذاری.....۱۲

۱-۸-۱- محاسبه‌ی MCP ۱۲

۱-۸-۲- محاسبه‌ی ZMCP ۱۳

۱-۸-۳- محاسبه‌ی LMP ۱۳

فصل دوم: ساختار تامین توان‌راکتیو در بازار برق تجدیدساختارشده

۲-۱- معرفی ژنراتور سنکرون به عنوان تامین‌کننده اصلی سرویس توان‌راکتیو ۱۵

۲-۲- ساختار پیشنهادی بازار توان‌راکتیو ۱۶
۲-۲-۱- تابع پیش‌بینی پرداخت (EPF) ۱۶
۲-۲-۲- هزینه تلفات ۱۶
۲-۲-۳- هزینه تولید توان‌راکتیو ۱۷
۲-۳- ساختار توان‌راکتیو پیشنهادی از سوی تولیدکنندگان ۱۷
فصل سوم: محاسبه و حداکثر سازی تابع سود اجتماعی در تامین توان‌راکتیو
۳-۱- فراهم‌سازی بهینه سرویس توان‌راکتیو ۲۰
۳-۲- سود نهایی حاصل از سرویس توان‌راکتیو ۲۰
۳-۳- تولید توان‌راکتیو بهینه ۲۲
۳-۴- ماکزیمم سازی SAF ۲۳
فصل چهارم: دستیابی و خلق بازار رقابتی توان‌راکتیو
۴-۱- دستیابی به بازار رقابتی برای توان‌راکتیو ۲۵
۴-۲- تصفیه بازار و شکل‌دهی قیمت ۲۵
فصل پنجم: نتایج اجرای انواع حراج‌های تامین توان‌راکتیو در سیستم برق تجدید ساختارشده
۵-۱- پخش بار برای سیستم آزمون ۳۳
۵-۲- نتایج پخش بار دائمی برای سیستم آزمون ۳۵
۵-۳- نتایج پخش بار بهینه برای سیستم آزمون ۳۷
۵-۴- حراج ساده ۳۹
۵-۵- حراج تسویه بازار ۴۱
۵-۶- حراج بازار براساس OPF ۴۳
۵-۷- حراج با قید پایداری ولتاژ ۴۵
۵-۸- حراج در شرایط حداکثر بارگذاری ۴۷
فصل ششم: تحلیل و بررسی نتایج اجرای انواع حراج‌های تامین توان‌راکتیو در سیستم برق تجدیدساختارشده

۶-۱- نتایج اجرای متفاوت حراج‌ها..... ۵۰

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد..... ۶۹

مراجع..... ۷۱

پیوست۱: معرفی شبکه آزمون..... ۷۳

پیوست۲: آموزش جعبه ابزار PSAT ۷۶

پیوست۳: دستور العمل برقراری ارتباط میان MATLAB و GAMS ۹۳

پیوست۴: چگونگی بهینه‌سازی ریاضی یک تابع هدف با وجود قیود..... ۹۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: بهره‌برداری بازار برق تجدیدساختارشده..... ۳

شکل ۱-۲ : شرکت‌کنندگان در بازار تجدیدساختارشده..... ۶

شکل ۱-۳ : حراج ترتیبی خدمات‌جانبی..... ۷

شکل ۱-۴ : برنامه‌ریزی خدمات‌جانبی..... ۱۱

شکل۱ -۵ : شکل محاسبه MCP..... ۱۲

شکل ۲-۱ : محدودیت گرمایی آرمیچر و میدان..... ۱۵

شکل ۲-۲ : منحنی ظرفیتی ژنراتور سنکرون..... ۱۶

شکل ۲-۳ : منحنی هزینه‌های تامین توان‌راکتیو..... ۱۷

شکل ۲-۴ : منحنی پیش‌بینی پرداخت برای تامین توان‌راکتیو..... ۱۸

شکل ۴-۱: منحنی پایداری ولتاژ و دوشاخگی..... ۲۸

شکل ۴-۲ : منحنی پایداری ولتاژ و حدود مربوطه..... ۲۹

شکل ۴-۳ : منحنی پایداری ولتاژ و مسایل بارگذاری..... ۲۹

شکل ۴-۴ : طرح نهایی پیشنهادی بازار توان‌راکتیو..... ۳۱

شکل ۶-۱ : مقایسه نتایج سطح کلی تبادلات توان در انواع متفاوت حراج‌ها..... ۵۱

شکل ۶-۲ : مقایسه نتایج پرداخت‌های تلفات توان در انواع متفاوت حراج‌ها..... ۵۲

شکل ۶-۳ : مقایسه نتایج تقاضای تولید توان در انواع متفاوت حراج‌ها..... ۵۲

شکل ۶-۴ : مقایسه نتایج پرداخت توسط اپراتور مستقل بازار در انواع متفاوت حراج‌ها..... ۵۳

شکل ۶-۵ : مقایسه نتایج سطح کلی تلفات توان در انواع متفاوت حراج‌ها..... ۵۴

شکل ۶-۶ : مقایسه نتایج هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون در حراج ساده..... ۵۶

شکل ۶-۷ : مقایسه LMP در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون در حراج ساده..... ۵۶

شکل ۶-۸: مقایسه نتایج پرداخت هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون در حراج ساده..... ۵۷

شکل ۶-۹ : مقایسه نتایجLMP در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون در حراج برای تسویه بازار..... ۵۷

شکل ۶-۱۰ : مقایسه نتایج هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون در حراج برای تسویه بازار.....۵۸

شکل ۶-۱۱ : مقایسه نتایج پرداخت هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون در حراج برای تسویه بازار.....۵۸

شکل ۶-۱۲ : مقایسه نتایج LMP در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای حراج با شرط پایداری ولتاژ.....۵۹

شکل ۶-۱۳ : مقایسه نتایج هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای حراج با شرط پایداری ولتاژ.....۵۹

شکل ۶-۱۴ : مقایسه نتایج پرداخت هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای حراج با شرط پایداری ولتاژ.....۶۰

شکل ۶-۱۵ : مقایسه نتایج LMP در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای حراج با شرط حداکثر بارگذاری.....۶۰

شکل ۶-۱۶ : مقایسه نتایج هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای حراج با شرط حداکثر بارگذاری..۶۱

شکل ۶-۱۷ : مقایسه نتایج پرداخت هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای حراج با شرط حداکثر بارگذاری.....۶۱

شکل ۶-۱۸ : مقایسه نتایج LMP در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای انواع متفاوت حراج‌های بازار برق.....۶۳

شکل ۶-۱۹ : مقایسه نتایج هزینه‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم آزمون برای انواع متفاوت حراج‌های بازاربرق.۶۴

شکل ۶-۲۰ : مقایسه نتایج پرداخت هزینه‌های مصرف توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای انواع متفاوت حراج‌های بازار برق.....۶۵

شکل ۶-۲۱ : مقایسه نتایج پرداخت هزینه‌هاو پرداخت‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای انواع متفاوت حراج‌های بازار برق.....۶۶

شکل ۶-۲۲ : مقایسهLMP ، نتایج پرداخت هزینه‌هاو پرداخت‌های تولید توان در شین‌های متفاوت سیستم‌آزمون برای انواع متفاوت حراج‌های بازار برق.....۶۷

فهرست جداول

جدول ۶-۱: جدول نتایج برای اجرای متفاوت حراج‌ها..... ۵۱

جدول ۶-۲: جدول نتایج برای اجرای متفاوت حراج‌ها و در تمام شینه‌های سیستم مطالعه(۱)..... ۵۵

جدول ۶-۳: جدول نتایج برای اجرای متفاوت حراج‌ها و در تمام شینه‌های سیستم‌آزمون(۲)..... ۶۲

فهرست سر واژه‌ها

ISO	INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR	اپراتور مستقل سیستم
FERC	FEDERAL ELECTRICITY REGULATION COMMITTE	انجمن نظارت برق فدرال
GENCO	GENERATION COMPANY	شرکت تولید انرژی الکتریکی
SCUC	SECURITY- CONSTRAINED UNIT COMMITMENT	برنامه‌ریزی امنیت-مقید واحدها
PBUC	PRICE - BASED UNIT COMMITMENT	برنامه‌ریزی مبتنی بر قیمت مشارکت واحدها
PX	POWER EXCHANGE	مرکز مبادله توان
MINI ISO	MINIMUM INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR	یکی از دو ساختار برای اپراتور مستقل سیستم با اختیارات کمتر
MAX ISO	MAXIMUM INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR	یکی از دو ساختار برای اپراتور مستقل سیستم با اختیارات بیشتر
MCP	MARKET CLEARING PRICE	قیمت تسویه‌ی بازار
LMP	LOCAL MARGINAL PRICE	قیمت محلی نهایی
TC	TRANSMISSION COSTUMER	مشتری انتقال
TP	TRANSMISSION PROVIDER	فراهم‌ساز انتقال
IOSWG	IOSWG OPERATOR	کارگروه خدمات عملیاتی داخلی در آمریکای شمالی
NERC	NORTH AMERICA ELECTRICITY COMMITTE	انجمن نظارت برق آمریکای شمالی
FACTS	FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM	سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر
POOLCO	POOLCO MODEL	بازار متمرکزی که بازار خریداران و فروشندگان را تسویه می‌کند
DISCO	DISTRIBUTION COMPANY	شرکت توزیع انرژی الکتریکی
TRANSCO	TRANSMISSION COMPANY	شرکت انتقال انرژی الکتریکی
OASIS	OPEN ACCESS SAME INFORMATION SYSTEM	سیستم با دسترسی باز
ZMCP	ZONAL MARKET CLEARING PRICE	قیمت ناحیه‌ای تسویه‌ی بار
OPF	OPTIMAL POWER FLOW	پخش بار بهینه

فهرست نمادها

i, j	اندیس شینه‌ها
k	اندیس پریود زمانی
g	اندیس ژنراتورها
gen	اندیس ژنراتورها
ng	اندیس شینه بار
a_0	پیشنهاد قیمت آماده به کار
C_L	ارزش اقتصادی کاهش تولید
E_{af}	ولتاژ تحریک (P.U)
f	فرکانس سیستم (HZ)
G	کنداکتانس خط (P.U)
I_a	جریان حالت دائمی ژنراتور (P.U)
m_1	قیمت پیشنهادی هزینه تلفات برای کار کرد در حالت زیر تحریک
m_2	قیمت پیشنهادی هزینه تلفات برای کارکرد در ناحیه $Q_{Base} \le Q \le Q_A$
$m_3 Q$	قیمت پیشنهادی مربوط به فرصت از دست رفته ناشی از کاهش تولید در ناحیه $Q_A \le Q \le Q_B$
P	توان اکتیو
P_R	توان اسمی
PG^{Con}	تولید توان حقیقی قراردادی
P_{GEN}	حداقل تولید واحد تولیدی
$P_{GEN,Actual}$	تولید واقعی واحد
P_{LOAD}	بار
P_{MAX}	حداکثر ظرفیت تولیدی ژنراتور
Q	توان‌راکتیو
QD	توان‌راکتیو درخواستی
QC	توان‌راکتیو تامینی از خازن‌ها
Q_{Base}	تولید توان‌راکتیو برای تجهیزات داخلی تولیدکننده
Q_{Min}	حداقل توان‌راکتیو تولیدی ژنراتور
$RAMP$	نرخ شیب در ژنراتور

V	ولتاژ شینه
V_t	ولتاژ ترمینال ژنراتور
W	متغیر باینری
W_1	متغیر باینری نشان‌دهنده نقطه‌کار ژنراتور در ناحیه ۱ منحنی ظرفیت
W_2	متغیر باینری نشان‌دهنده نقطه‌کار ژنراتور در ناحیه ۲ منحنی ظرفیت
W_3	متغیر باینری نشان‌دهنده نقطه‌کار ژنراتور در ناحیه ۳ منحنی ظرفیت
X	راکتانس خطوط انتقال
X_s	راکتانس سنکرون
$XP_{i,gen}^{con}$	مقدار قرارداد توان اکتیو انتقالی میان شینه i و ژنراتور gen
$XP_{i,gen}$	مقدارواقعی توان اکتیو انتقالی میان شینه i و ژنراتور gen
Y	ادمیتانس
θ	زاویه ادمیتانس
δ	زاویه ولتاژ
ρ_0	قیمت یکپارچه پیشنهادی آماده به کار
ρ_1	قیمت یکپارچه پیشنهادی هزینه تلفات برای کارکرد در حالت زیر تحریک
ρ_2	قیمت یکپارچه پیشنهادی هزینه تلفات برای کار کرد در ناحیه $Q_{Base} \le Q \le Q_A$
ρ_3	قیمت یکپارچه پیشنهادی مربوط به فرصت از دست رفته ناشی از کاهش تولید در ناحیه $Q_A \le Q \le Q_B$
λ	دوگان قید تعادل توان‌راکتیو گرهی
γ	دوگان قید ظرفیتی توان‌راکتیو ژنراتور
μ	دوگان قید زیر تحریک در تولید توان‌راکتیو

چکیده :

(بهینه‌سازی هزینه‌های خدمات‌جانبی تولید توان‌راکتیو در سیستم‌های تجدید ساختارشده)

(حامد حسن زاده کته‌سری)

خدمات‌جانبی به طور کلی به خدماتی گفته می‌شود که در کنار تولید انرژی، برای بهره‌برداری مطمئن شبکه برق لازم است. یکی از موضوعات اساسی سیستم‌قدرت تجدید ساختارشده، تعیین هزینه خدمات‌جانبی و بررسی چگونگی تغییر این هزینه‌ها با توجه به تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری است. از جمله خدمات‌جانبی که در تعرفه‌های انتقال در سیستم‌های قدرت بررسی می‌شود، کنترل‌ولتاژ و تامین توان‌راکتیو است که طی آن دستیابی به میزان ولتاژ مناسب خطوط را ممکن می شود. کنترل‌ولتاژ و تأمین توان‌راکتیو در سیستم‌های‌الکتریکی قدرت، به روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. در این پایان‌نامه نقاط قوت و ضعف روش‌های مختلف موجود بررسی و با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت روشی کارآمدتر برای دستیابی به افزایش اطمینان بهره‌برداری از این خدمت جانبی در سیستم‌های الکتریکی قدرت، ارایه شده است. در مرحله مطالعاتی، خدمات‌جانبی بازار سیستم‌های الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین روش های تامین و طراحی خدمات‌جانبی که قبلا در این بازارها اعمال می‌شد، بررسی شده است. سپس با اجرای انواع حراج‌های بازار کنترل‌ولتاژ و تأمین توان‌راکتیو در یک سیستم‌الکتریکی استاندارد، عملکرد روش‌های متفاوت در اجرای حراج‌های بازار، موردارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی : حراج بازار، خدمات‌جانبی، توان‌راکتیو، سیستم تجدیدساختارشده.

Abstract

Optimization of reactive power generation as ancillary service in reconstructed power systems.

Hamed hassanzadeh katehsari

Beside energy generation, ancillary services are necessary for reliable operation of power systems. One of the fundamental subjects in a reconstructed power system is costs prediction and appointment of ancillary services due to the operation decisions; and one of the most important ancillary services that considered in power systems is voltage control and securing reactive power generation which guarantees suitable voltages in transmission lines.

Voltage control and reactive power providing are introduced in many different methods. In this thesis firstly weak and strength points of available methods are studied and compared and then an efficient solution to increase the reliability of power systems operation included this type of ancillary service is presented. In review section, previous methods of providing and designing of this type of ancillary service introduced in power markets are studied and analyzed. Then in system analysis section, by operating different market auction of voltage control and reactive power providing in a standard electrical system, different methods in market auctions are analyzed and compared.

Key words: ancillary services, market auction, reactive power, reconstructed power system.

فصل اول

(معرفی بازارهای انرژی و خدمات‌جانبی در ساختار بهره‌برداری برق تجدیدساختارشده)

۱-۱- مقدمه

در این فصل به تشریح و تبیین بازارهای انرژی و خدمات‌جانبی در سیستم‌های تجدید ساختارشده، می‌پردازیم. انواع خدمات‌جانبی معرفی شده و ارزش و جایگاه تامین توان‌راکتیو در آن بررسی می‌شود. سپس دو نوع مدل حراج خدمات‌جانبی معرفی و طراحی بازار حراج خدمات‌جانبی، با ارائه روابط و مسائل مربوط به آن به صورت کلی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. درنهایت، به صورت مختصر فاکتورهای قیمت‌گذاری در فضای بازار معرفی می‌شوند.

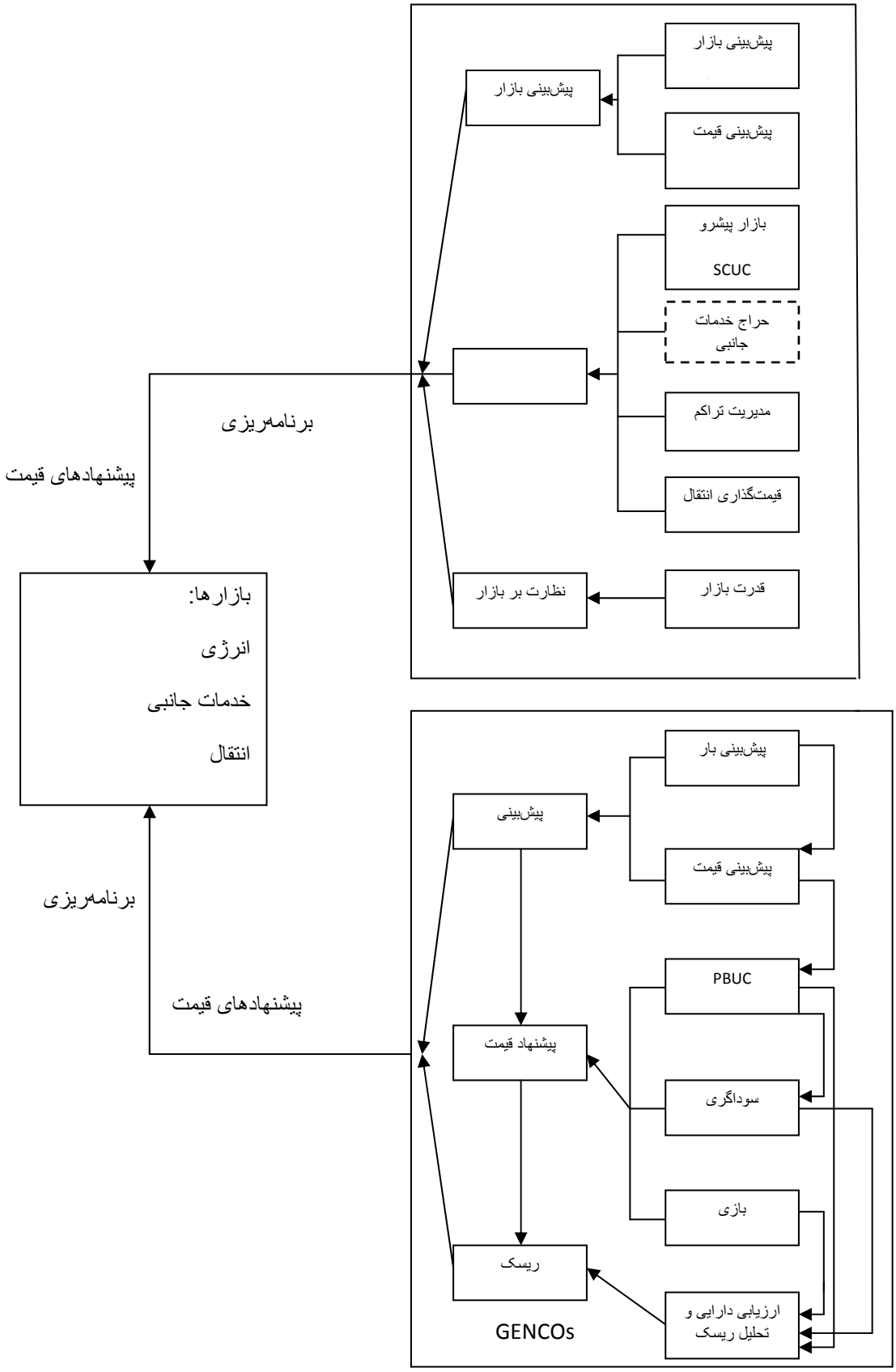
در سرتاسر جهان، صنعت‌برق که در دوره‌ای طولانی با شرکت‌های یکپارچه با ساختار عمودی اداره می‌شود، دستخوش تغییرات شگرفی شده است. صنعت‌برق به صنعتی رقابتی و توزیع شده‌ای در حال تبدیل است که در آن، قدرتهای بازار، تعیین‌کننده قیمت‌برق بوده و هزینه خالص از طریق افزایش رقابت، کاهش می‌یابد.

تجدید ساختار، جداسازی سه عنصر صنعت‌برق یعنی تولید، انتقال و توزیع را ایجاب می‌کند. در صنعت تجدیدساختارشده، کنترل مستقل بهره‌برداری شبکه انتقال، بازار رقابتی را برای تولید و دسترسی مستقیم خرده فروشی، تسهیل می‌کند. با وجود این، استقلال در بهره‌برداری شبکه، بدون وجود هویت مستقلی مانند اپراتور مستقل سیستم[۱] (ISO)، میسر نیست. لازم است که ISO از شرکت‌کنندگان منفرد بازار از جمله مالکان انتقال، تولیدکنندگان، شرکت‌های توزیع و مصرف‌کنندگان نهایی، مستقل باشد. به منظور عملکرد موثر بازار رقابتی و در عین حال حصول اطمینان از عملکرد مطمئن سیستم‌قدرت، لازم است ISO، به عنوان اپراتور بازار، قواعد سالم و بی‌نقصی را در خصوص انرژی و بازار خدمات‌جانبی برقرار نموده؛ سیستم انتقال را به صورت منصفانه و بدون تبعیض اداره کرده؛ ابزار لازم را برای مقابله با مخاطرات بازار تسهیل بخشیده و به نحوی بازار را تحت نظارت قرار دهد که از استیلای قدرتها بر آن جلوگیری نماید.ISO، برای نیل به مسئولیتهای خود، باید مجهز به ابزار محاسباتی لازم برای نظارت بربازار، طرحهای مربوط به حراج خدمات‌جانبی و مدیریت تراکم باشد.

قانون شماره ۸۸۸ صادره از انجمن نظارت برق فدرال(FERC)، حکم به گشودن بازار در صنعت نوین تجدیدساختارشده برق داد. انرژی و خدمات‌جانبی به صورت رقابتی عرضه‌شده و شرکت‌های تولید[۲] (GENCOs)، با ارائه پیشنهاد رقابتی قیمت به بازار برق، قادر به رقابت در فروش انرژی به مشتریان می‌باشند. آنها بی‌توجه به منافع کلی سیستم، می‌توانند سود خود را حداکثر کنند. در این بازار، شرکت‌های تولید، دیگر توسط کنترل‌کنندگان سیستم انتقال، کنترل نمی‌شوند و می‌توانند به منظور تصمیم‌گیریهای صحیح در این بازار بی‌ثبات و متغیر، ابزار محاسباتی لازم از جمله برای پیش‌بینی قیمت، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، مدیریت‌ریسک و سوداگری را فراهم آورند. شکل ۱-۱، شمایی از این گونه بازار برق را به نمایش می‌گذارد. [۱]

[۱] - independent system operator

[۲] - generation company



شکل۱-۱: بهره‌برداری بازار برق تجدیدساختارشده

۱-۲ - بازارهای انرژی، خدمات‌جانبی و انتقال

۱-۲-۱- بازار انرژی

بازار انرژی، محلی است که معاملات رقابتی برق رخ می‌دهد. این بازار، مکانیزم متمرکزی دارد در آن که معامله انرژی بین خریداران و فروشندگان، تسهیل می‌یابد. قیمت‌های بازار انرژی، نه تنها برای شرکت‌کنندگان بازار بلکه برای سایر بازارهای مالی و مصرف‌کنندگان برق نیز از شاخص‌های مطمئن قیمت است. بازار انرژی، وظیفه بی‌طرفانه و مستقل تسویه و تسویه‌نهایی را بر عهده داشته و به عبارت دیگر، ISO یاPX بازار انرژی را اداره کرده و در دو مدل کلی، اجرا می‌نماید.

۱- مدل MinISO که در آن ISO (یاPX) پیشنهاد تقاضا و عرضه (قیمت و مقدار مربوطه) را از شرکت‌کنندگان در بازار پذیرفته و قیمت تسویه‌ی بازار (MCP) که با آن انرژی، خرید و فروش می‌شود را تامین می‌کند. به طور کلی، روش تعیین MCP بدین صورت است: پیشنهادات عرضه در یک منحنی عرضه و پیشنهادات تقاضا در یک منحنی تقاضا برروی یک صفحه جمع می‌شوند. نقطه تلاقی دو منحنی عرضه و تقاضا، مقدار MCP است. در دوره های زمانی تراکم، تعدیل مناسبی صورت می‌گیرد. در کالیفرنیا، تعدیل به صورت بهای تراکم (یا بهای استفاده) برای هر مسیر تحت تراکم، پیاده می‌شود. در بازارهای برق انگلستان و ولز، MCP به شکل بهای ظرفیت که شامل احتمال قطع بار (LOLP) و ارزش بار از دست رفته (VOLL) است، تعدیل می‌شود. در مدل MinISO، نه ISO، بلکه GENCOها، مسئول برنامه‌ریزی مشارکت واحدها هستند.

۲- مدل MaxISO که در آن شرکت‌کنندگان بازار، مشابه با صنعت تحت مقررات، باید اطلاعات وسیعی از قبیل انرژی، هزینه راه‌اندازی، هزینه بی‌باری، نرخ‌های مربوط به شیب تولید و حداقل زمان توقف و فعالیت را ارائه کنند. بااستفاده از این اطلاعات، ISO، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را با هدف حداکثرسازی رفاه اجتماعی و در عین حال، حفظ قیود ایمنی، اجرا می‌کند. ISO، قیمت‌های تراکم انتقال را به صورت متغیرهای دوگان مطابق با قیود ظرفیت انتقال تنظیم می‌کند یا قیمت‌های محلی نهایی (LMP) را به صورت متغیرهای دوگان مطابق با قیود تعادل بار، به دست می‌آورد. [۱و۲۶]

۱-۲-۲- بازار خدمات‌جانبی

خدمات‌جانبی برای عملکرد مطمئن سیستم، لازم است. در صنعت تحت مقررات، خدمات‌جانبی با انرژی به هم وابسته‌اند. در صنعت تجدیدساختارشده، خدمات‌جانبی از انرژی تفکیک شده است. این خدمات، از طریق بازار و به صورت رقابتی، تهیه می‌شود. در امریکا (در کالیفرنیا، نیویورک و New England)، بازار رقابتی خدمات‌جانبی، فعال است. به طورکلی، پیشنهادهای قیمت خدمات‌جانبی که توسط شرکت‌کنندگان در بازار ارائه می‌شود، شامل دو بخش ظرفیت و انرژی است. معمولا"، پیشنهادهای قیمت خدمات‌جانبی برحسب پیشنهادهای قیمت ظرفیت، تسویه می‌شود. در بازار، خدمات‌جانبی متفاوت می‌تواند متوالیا" یا همزمان، تسویه شود. در روش متوالی، بازار در ابتدا برای کیفیت خدمات تسویه شده، سپس برای بالاترین بعدی و به همین ترتیب. به عنوان مثال، فرض‌کنید که چهار خدمات‌جانبی "تنظیم "، "ذخیره‌چرخان "، "ذخیره‌غیرچرخان "و"ذخیره جایگزین " مورد معامله قرار گرفته است که به ترتیب بالاترین و پایین ترین کیفیت را دارا هستند. بازار، به ترتیب برای تنظیم، ذخیره‌چرخان، ذخیره‌غیرچرخان و ذخیره‌جایگزین تسویه می‌شود. در هر دور، شرکت‌کنندگان مجازند تا منابع استفاده نشده خود در دور قبلی را پیشنهاد قیمت مجدد دهند. به عنوان مثال، اگر پیشنهاد قیمت تنظیم شرکت‌کننده‌ای در دور تسویه تنظیم، پذیرفته نشده‌است، شرکت‌کننده می‌تواند آن را دوباره به عنوان ذخیره‌چرخان پیشنهاد قیمت دهد. شرکت‌کننده می‌تواند پیشنهاد قیمت را در دور جدید و قبل از ارائه مجدد آن، اصلاح کند.

در روش همزمان، شرکت‌کنندگان، تمام پیشنهاد قیمت خدمات‌جانبی را یکباره ارائه کرده و ISO (یا PX)، بازار خدمات‌جانبی را با حل یک مسئله بهینه‌سازی، بطور همزمان تسویه می‌کند. هدف در مسئله بهینه‌سازی به بازار بستگی داشته

و می‌تواند حداقل‌سازی هزینه اجتماعی، حداقل‌سازی هزینه فراهم سازی و غیره باشد. در فرآیند بهینه‌سازی، ISO(یا PX) می‌تواند جایگزین خدمات‌جانبی، یعنی جایگزینی یک ذخیره کیفیت بالا با یک نوع کیفیت پایین را مدنظر قرار دهد. [۲۰]

۱-۲-۳- خدمات‌جانبی برای تجدید ساختار

مطابق قوانین FERC، شش خدمت‌جانبی که باید در تعرفه‌های انتقال در سیستم‌های الکتریکی قدرت لحاظ شود، بدین صورت تعیین شده است:

۱- برنامه‌ریزی، کنترل و توزیع بار به‌قسمی که شرکت‌های انتقال باید با دیگر شرکت‌ها به برنامه‌ریزی و هماهنگ‌سازی قراردادهای دو جانبه بپردازند و میزان تبادل توان ورودی به و خروجی از نواحی کنترلی شان را نهایی کنند.
۲- کنترل‌ولتاژ و تأمین توان‌راکتیو که طی آن منابع تولید دستیابی به میزان ولتاژ مناسب خطوط انتقال را ممکن می‌سازند. براساس این خدمت، کنترل‌ولتاژ و تأمین توان‌راکتیو مستقل از نرخ‌های اولیه انتقال انجام می‌شود.
۳- تنظیم و پاسخ فرکانسی برای تعقیب لحظه به لحظه تغییرات تقاضای مشتری یا عرضه تولید برنامه‌ریزی شده، به منظور ثابت نگاه داشتن فرکانس در ۵۰Hz.
۴- عدم تعادل انرژی، به منظور تصحیح ساعت به ساعت عدم تطابق بین انرژی تولیدی توسط مشتری انتقال (TC) و میزان بار تغذیه شده در یک ناحیهٔ کنترلی.
۵- ذخیره های بهره‌برداری که ذخیره های چرخان و غیرچرخان به عنوان انرژی اضافی برای تأمین بار در مواردی که پیشامدهای پیش‌بینی نشده همانند خارج شدن یک نیروگاه (بزرگ) به وقوع می پیوندد، تعریف می‌شوند.

- ذخیرهٔ چرخان باید در مدار باشد، در میزانی کمتر از میزان حداکثر خروجی بهره‌برداری شود و بتواند بلافاصله بار مورد نیاز را تأمین کند.
- ذخیرهٔ غیرچرخان باید ظرفیت تولید در شرایط اضطراری را داشته‌باشد و البته بلافاصله قابل دسترسی نیست. ذخیرهٔ غیرچرخان باید خیلی سریع قابل راه‌اندازی باشد. (معمولا کمتر از ۱۰ دقیقه)

گر چه فراهم ساز انتقال (TP) باید به گونه‌ای مجهز باشد که بتواند تمام شش خدمت بالا را به TC ها ارائه کند، اما براساس FERC، تنها دو خدمت اول باید به تمام TC ها ارائه گردد. همچنین، قوانین FERC مشتری را موظف نموده است که هر دو خدمت را از TP خریداری نماید، چرا که این خدمات ذاتا" محلی هستند و TP بهترین انتخاب برای ارائه این خدمات است. برای چهار خدمت جانبی بعدی، FERC مشتری را مخیر نموده است که خدمت را از هر یک از سه راه زیر تأمین نماید: از TP، از منبعی دیگر و یا خود، خدمات را ایجاد نماید. شش خدمتی که از طرف FERC به عنوان ضروریات برای یک TP معرفی شده است، مانعی برای ارائه خدمات داوطلبانه دیگر به TCها در کنار ارائه خدمت اصلی انتقال نمی‌باشد.

FERC، به بحث پیرامون خدمات‌جانبی دیگری همانند جایگزینی تلفات توان حقیقی، برنامه‌ریزی پویا، منابع پشتیبان و راه‌اندازی‌تاریک پرداخته‌است. TP ها ملزم به مجزا نمودن و ارائه خدمات فوق به صورت جداگانه نیستند، چرا که اغلب این خدمات کم بها بوده و به شدت به موقعیت مکانی وابسته هستند. جایگزینی تلفات توان حقیقی به مفهوم استفاده از تولید برای جبران تلفات سیستم انتقال می‌باشد. برنامه‌ریزی پویا، اندازه‌گیری، اندازه‌گیری راه دور، نرم‌افزار کامپیوتری، سخت افزار، سیستمهای مخابراتی، مهندسی و امور اداری مورد نیاز برای انتقال الکترونیکی بخشی یا تمام خروجی تولیدی یا بار یک مشتری از یک ناحیه کنترلی به ناحیه دیگر را مهیا می‌سازد. تولید پشتیبان، ظرفیت تولیدی می‌باشد که در طی یک ساعت قابل دسترسی است و به صورت ذخیرهٔ بهره‌برداری پشتیبان و برای مصارف تجاری بکار گرفته می‌شود. قابلیت راه‌اندازی‌تاریک، توانایی واحد تولیدی برای رفتن از حالت خاموش به وضعیت قابل بهره‌برداری بدون کمک شبکه و تزریق توان به شبکه و کمک به واحدهای دیگر در شرایط وقوع خاموشی است.

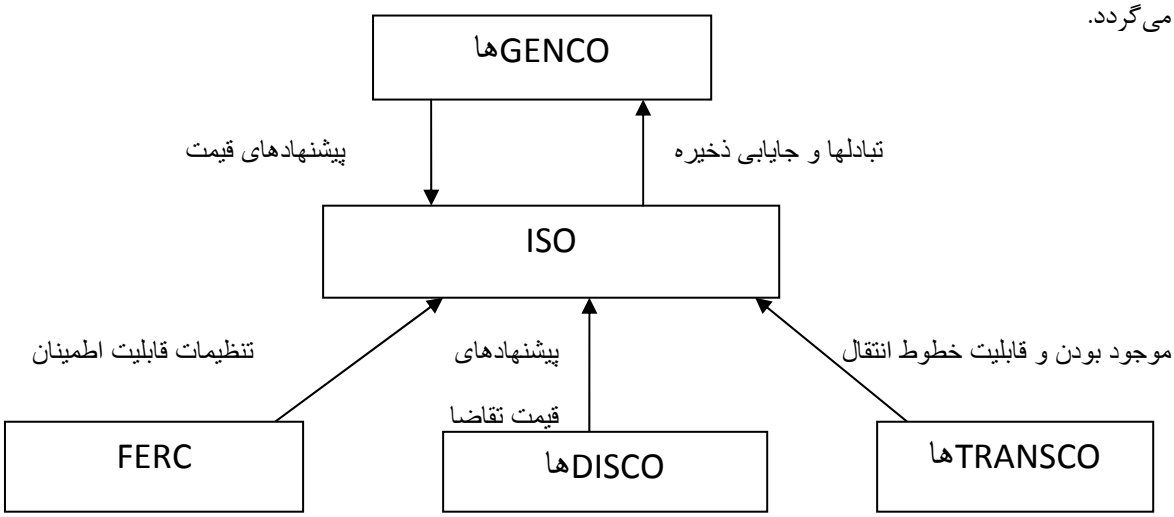
IOSWG، که توسط NERC به منظور ایجاد همسانی در تعاریف، ملاحظات، بایدها و مدیریت خدمات‌جانبی تأسیس شده، دو تعریف دیگر برای خدمات‌جانبی ارائه کرده است: تعقیب بار و خدمت پایداری شبکه. تعقیب بار استفاده از تولید برای تطبیق با تغییرات ساعتی و روزانه بار سیستم است. پایداری شبکه به استفاده از تجهیزات خاص برای تأمین پایداری و قابلیت‌اطمینان شبکه انتقال اشاره دارد. تجهیزات خاص می‌تواند شامل پایدارسازها، مقاومتهای ترمز پویا و ادوات FACTS باشد. از آنجایی که ذخیره های بهره‌برداری، عمدهٔ هزینه خدمات‌جانبی را شامل می‌شود، در شوراهای گوناگون قابلیت اطمینان، توجه خاصی به ملاحظات ذخیره های بهره‌برداری معطوف شده است. معیار NERC برای ذخیرهٔ بهره‌برداری به این موضوع اشاره دارد که هر ناحیه کنترلی باید تا سطح معینی ذخیرهٔ بهره‌برداری برای جبران مواردی مانند: خطای پیش‌بینی، عدم‌آمادگی تجهیزات تولید و انتقال، تعداد و اندازه واحدهای تولیدی، نرخ خروجهای اجباری تجهیزات سیستم، برنامه‌ریزی تعمیرات، ملاحظات تنظیم و گوناگونی بار منطقه ای و سیستمی، داشته‌باشد.

حداقل نیاز ذخیرهٔ بهره‌برداری از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت می‌باشد. موارد مورد نیاز برای پاسخ کامل در زمان ۱۰ دقیقه، توسط NERC ارائه شده است و بنابراین در سراسر آمریکای شمالی رعایت می‌شود. زمان مورد نیاز این ذخیره‌ها برای باقی‌ماندن درمدار در مناطق مختلف، متفاوت و حتی گاهی نامشخص است. برخی تعرفه‌ها، ذخیره‌های بهره‌برداری می‌باید تا پایان ساعتی که در آن، پیشامد اتفاق می‌افتد، در دسترس باشند. در بعضی مناطق درخواست می‌شود که ذخیره‌های بهره‌برداری به مجرد عملی بودن، به سطوح اعلام شدهٔ حداقل، باز گردند. ایجاد بازار رقابتی، برای تأمین، کسب و قیمت‌گذاری خدمات‌جانبی کاری ممکن، ولی دشوار است. دشواری این کار از پیچیدگی این خدمات، وجود ارتباط بین خدمات و ارتباط با خدمت انرژی برای تأمین بار، نشأت می‌گیرد. [۱و۱۱]

۱-۳- حراج پیشرو، خدمات‌جانبی، رویهٔ ترتیبی

در مدل PoolCo، مطابق شکل۱-۲، ارتباط GENCO ها با ISO از طریق پیشنهاد قیمت برای تأمین بار سیستم و خدمات‌جانبی می‌باشد.ISO، مسئول انعقاد معاملات انرژی به منظور تأمین بار در بازارهای پیشرو انرژی و نیز مسئول انجام معاملات خدمات‌جانبی در بازارهای زمان- حقیقی و پیشرو انرژی می‌باشد. TRANSCO ها اطلاعاتشان را در رابطه با آمادگی و ظرفیت خطوط با استفاده از سیستم اطلاعات همزمان، منتقل می‌نمایند.

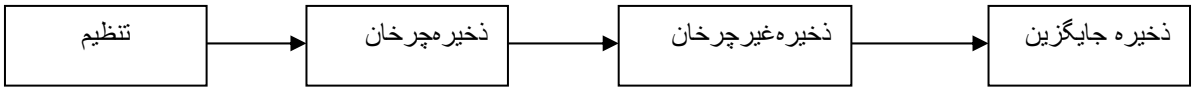
DISCO ها، پیشنهادهای قیمت در مورد تقاضایشان را به ISO ارائه می‌کنند تا از آن طریق با پیشنهادهای قیمت GENCO ها تطابق داده شود. این در حالی است که مقررات FERC رعایت شده و از اطلاعات TRANSCO ها استفاده می‌گردد.



شکل۱- ۲ : شرکت‌کنندگان در بازار تجدیدساختارشده

از آنجائی که حراج‌های خدمات‌جانبی توسط ISO راهبری می‌شود، ISO تنها خریداری است که باید الزامات قابلیت اطمینان لازم را تأمین کند. هدفISO، حداقل‌کردن پرداختها بابت هزینه‌های خدمات‌جانبی به GENCO ها است، در حالیکه GENCO ها را به تولید کافی خدمات‌جانبی، تشویق می‌کند. بدیهی است، GENCO ها بدنبال پیشنهاد قیمتی هستند که با تخصیص های انجام‌شده، منافعشان را حداکثر کند. پیشنهادهای خدمات‌جانبی باید شامل اطلاعات مالی برای ظرفیت‌ذخیره و انرژی، همچنین اطلاعات بهره‌برداری مانند مکان، نرخ‌رشد و بلوکهای کمیت باشد. بر پایه ملاحظات ISO برای خدمات‌جانبی و پیشنهادهای قیمت ارسالی شرکت‌کنندگان به ISO، قیمت و میزان هر خدمت مشخص می‌شود و چگونگی پرداخت نیز توسط ISO محاسبه می‌شود.

در طرح اولیه بازار، همانطور که در شکل۱-۳ دیده می‌شود، حراج چهار نوع ذخیره انرژی به صورت ترتیبی با شروع از تنظیم انجام می‌شود. در هر مرحله، GENCO ها اجازه دارند که به ارائه مجدد پیشنهاد قیمت برای آن قسمت از منابع‌شان که در مدار نیستند، مبادرت ورزند. [۱و۲۴]



شکل۱- ۳ - حراج ترتیبی خدمات‌جانبی

۱- ۴- دو گزینه در حراج ترتیبی خدمات‌جانبی

برای اجرای حراج یک خدمت جانبی خاص به صورت حراج ترتیبی، دو گزینه زیر در نظر گرفته می‌شود:

گزینه اول: در این روش، پیشنهاهای قیمت هم براساس پیشنهاد قیمت ظرفیت ذخیره و هم پیشنهاد قیمت انرژی، رتبه‌بندی می‌شوند. ISO، براساس فرضیات مربوطه به استفاده از هر خدمت، پیشنهادهای قیمت با پایین‌ترین قیمت ترکیبی ظرفیت و انرژی را انتخاب می‌کند. برای حداقل‌کردن مقدار امید ریاضی پرداخت انرژی و در نتیجه کل پرداخت برای ذخیره ها، ISO از یک عامل وزنی x در رابطه [C(i,t)+x.E(i,t)] برای رتبه‌بندی پیشنهادهای قیمت استفاده می‌کند. در این رابطه، C(i,t) و E(i,t) به ترتیب پیشنهاد قیمت ظرفیت و پیشنهاد قیمت انرژی برای یک خدمت جانبی توسط واحد تولیدی i، در زمان t می‌باشد. به منظور پیشگیری از ریسک مواجهه ISO با پیشنهادهای قیمت بسیار بالای انرژی در زمان بکارگیری، استفاده از پیشنهادهای قیمت انرژی در گزینه اول مطرح می‌شود.

گزینهٔ دوم: این گزینه روش سنتی برای طرح بازار حراج خدمات‌جانبی می‌باشد. گزینهٔ دوم حالت خاص گزینهٔ اول است که در آن، x صفر در نظر گرفته شود و پیشنهادهای قیمت فقط براساس ظرفیت ذخیره [C(i,t)] رتبه‌بندی می‌گردد. ISO، پایین‌ترین قیمت پیشنهادی برای ظرفیت ذخیره را انتخاب می‌کند. پیشنهادهای قیمت انرژی در مرحله رتبه‌بندی لحاظ نمی‌شوند ولی در محاسبات پرداختهای ISO در نظر گرفته می‌شوند. در بازار زمان – حقیقی انرژی که توسط ISO راهبری می‌شود، مولفه انرژی در پیشنهادهای قیمت خدمات‌جانبی برای ایجاد تعادل در انرژی و سیستمهای پیشین قیمت‌گذاری، استفاده می‌گردد. منابع قابل دسترسی در سیستم متعادل سازی انرژی عبارتند از: تنظیم، ذخیره های چرخان، غیرچرخان و جایگزین و نیز منابعی که در پیشنهادهای تکمیلی برای موارد عدم تعادل زمان – حقیقی ارائه می‌شود. این منابع در سیستم متعادل‌سازی انرژی وارد می‌شوند و به ترتیب براساس ارزش قیمت‌های پیشنهادی انرژی، مرتب می‌شوند. تنها آن پیشنهادهای قیمتی که برای محاسبه MCP خدمات‌جانبی در نظر گرفته شده‌اند، در سیستم متعادل‌سازی مورد استفاده قرارمی‌گیرند. روش محاسبه MCP، در ادامه ارائه خواهد شد.[۲۱]