بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

۹۲٤۱۳۰۲

رساله دکتری مهندسی برق

گرایش قدرت

عنوان :

برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و شبکه انتقال در محیط بازار برق

استادراهنما:

دکتر محسن صنیعی

استادمشاور:

دکترحبیب رجبی‌مشهدی

نگارنده :

محمد صادق جوادی اصطهباناتی

دی‌ماه ۱۳۹۲

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

لحظات ناب باور بودن،

لذّت و غرور دانستن،

جسارت خواستن،

عظمت رسیدن

و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست.

تقدیم به همسر مهربان و خانواده عزیزم

سپاس گزاری

نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبان جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هرچه گویم و سرایم، کم گفته ام.

بالاترین مرتبه از سپاس و تشکر از استاد راهنمای محترم و گرامی ام، جناب آقای دکتر صنیعی و استاد مشاور بزرگوارم، جناب آقای دکتر رجبی مشهدی که در به سرانجام رسیدن این رساله، در کمال تواضع و فروتنی، همگام و همراهم بودند.

فهرست مطالب

فصل اول ۱

مقدمه ۱

۱-۱- بیان مسئله ۳

۱-۲- اهداف اصلی پایان‌نامه ۳

۱-۳- فرضیات اصلی پایان‌نامه ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۶

۲- فصل دوم ۷

مروری بر پژوهش‌های گذشته ۷

۲-۱- برنامه‌ریزی توسعه تولید ۷

۲-۱-۱- مدل‌سازی گسترش تولید ۱۱

۲-۱-۲- بررسی موضوعی روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید ۱۴

۲-۲- برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال ۱۷

۲-۲-۱- برنامه‌ریزی توسعه انتقال در محیط‌های رقابتی ۲۲

۲-۲-۲- خصوصیات TEP در محیط‌های رقابتی ۲۲

۲-۲-۳- روش‌های پیشنهادی TEP در محیط های رقابتی ۲۳

۲-۳- برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و شبکه انتقال ۲۵

۲-۳-۱- خصوصیات برنامه‌ریزی هم‌زمان GEP و TEP در محیط‌های رقابتی ۲۶

۲-۳-۲- روش‌های پیشنهادی حل هم‌زمان GEP و TEP در محیط های رقابتی ۲۹

۲-۴- مروری بر مقالات پراستناد و معتبر ۳۵

۲-۵- ارزیابی دینامیک بازار بر مطالعات برنامه‌ریزی توسعه ۳۷

۲-۶- جمع‌بندی ۳۸

۳- فص ل سوم ۴۰

مبانی نظری رساله پیشنهادی ۴۰

۳-۱- ارزیابی مکانیزم‌های پرداخت به تولیدکنندگان در محیط بازار ۴۰

۳-۱-۱- مکانیزم پرداخت PAB و محاسبه سود تولیدکنندگان ۴۲
۳-۱-۲- مکانیزم پرداخت UP و محاسبه سود تولیدکنندگان ۴۳
۳-۲- مکانیزم‌های حمایتی در توسعه تولید ۴۷
۳-۲-۱- بازار انرژی ۴۷
۳-۲-۲- مکانیزم پرداخت بابت ظرفیت ۴۸
۳-۲-۳- مکانیزم تعهد تأمین ظرفیت ۴۹
۳-۲-۴- ارزیابی اثر برنامه‌ریزی همزمان بر مکانیزم‌های حمایتی در توسعه تولید ۵۰
۳-۳- نتیجه‌گیری ۵۵
۴- فصل چهارم ۵۶
حل مسئله برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و انتقال ۵۶
۴-۱- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و انتقال ۵۶
۴-۲- پیاده‌سازی مسئله بهینه‌سازی در قالب مدل دو سطحی ۷۱
۴-۲-۱- رمزگشایی از ماهیت دینامیک مسئله بهینه‌سازی در سطح نخست ۷۷
۴-۲-۲- ارزیابی طرح‌های توسعه در سطح دوم ۸۰
۴-۲-۳- بهره‌گیری از پایگاه داده مجازی پیشنهادی ۸۲
۴-۳- توسعه مدل برنامه‌ریزی همزمان بر مبنای تکنیک پیشنهادی ۸۵
۴-۳-۱- مدل بهینه‌سازی کمینه‌گرا ۸۶
۴-۳-۲- مدل بهینه‌سازی بیشینه‌گرا ۹۲
۴-۴- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی ۹۶
۵- فصل پنجم ۱۰۴
شبیه‌سازی موردهای مطالعاتی و تحلیل نتایج آن‌ها ۱۰۴
۵-۱- مورد مطالعاتی (۱)- شبکه ۲۴ شین استاندارد ۱۰۴
۵-۱-۱- کمینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری بر اساس مدل کمینه‌گرا ۱۱۰
۵-۱-۲- ارزیابی طرح‌های توسعه مبتنی بر بازار ۱۱۳
۵-۱-۳- تحلیل نتایج توسعه انتقال در شبکه ۲۴ شین استاندارد ۱۲۱
۵-۲- مورد مطالعاتی (۲)- شبکه ۱۱۸ شین استاندارد ۱۲۳
۵-۲-۱- کمینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری بر اساس مدل کمینه‌گرا ۱۲۴

۵-۲-۲- ارزیابی طرح‌های توسعه بر اساس مدل بیشینه‌گرا ۱۳۱
۵-۲-۳- تحلیل نتایج توسعه انتقال در شبکه ۱۱۸ شین اصلاح شده ۱۵۱
۵-۳- جمع‌بندی ۱۵۴
۶- فصل ششم ۱۶۳
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۶۳
۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۶۳
۶-۲- پیشنهادات ۱۶۴
مراجع ۱۶۵

فهرست شکل‌ها

شکل(۳-۱): منحنی تداوم بار سیستم نمونه و دیاگرام تک خطی سیستم تولید و بار..... ۴۱
شکل (۳-۲): الف) تابع هزینه واحدهای تولیدی ب) منحنی هزینه مقایسه‌ای سیستم به شکل افزایشی ج) منحنی هزینه حاشیه‌ای فزایشی..... ۴۲
شکل (۳-۳): منحنی هزینه مقایسه‌ای سیستم و ارتباط بین VOLL و FixC..... ۴۵
شکل (۳-۴): مدل مفهومی توصیف کننده VOLL در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده..... ۴۶
شکل (۴-۱): مدل مفهومی تفکیک مسئله برنامه‌ریزی به یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی..... ۷۲
شکل (۴-۲): نحوه رمزگشایی رشته عدد صحیح تولیدی در برنامه سطح نخست..... ۷۹
شکل (۴-۳): اثرگذاری تغییر در زمان‌بندی ورود تجهیزات در مدار در مدل رمزگشایی شده ۸۲
شکل (۴-۴): بهره‌گیری از پایگاه داده در برنامه سطح دوم..... ۸۳
شکل (۴-۵): روندنمای ارزیابی مسئله برنامه‌ریزی همزمان در قالب مدل دو سطحی..... ۸۴
شکل (۴-۶):توصیف گرافیکی منحنی بهینه پارتو در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ۸۸
شکل (۴-۷): بهره‌گیری از پایگاه داده مجازی در مدل چندهدفه..... ۹۰
شکل (۴-۸): جریان نقدی مربوط به توسعه یک واحد نیروگاهی در محیط بازار برق..... ۹۵
شکل (۴-۹): روندنمای حل مسئله برنامه‌ریزی در قالب مدل سه سطحی..... ۹۸
شکل (۵-۱): دیاگرام تک‌خطی شبکه ۲۴ شین RTS..... ۱۰۵
شکل (۵-۲): منحنی تداوم بار کامل شبکه ۲۴ شین RTS ۱۰۷
شکل (۵-۳): سطوح مختلف بار در شرایط پیک مربوط به حالت پایه..... ۱۰۷
شکل (۵-۴): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۱..... ۱۱۱
شکل (۵-۵): منحنی پارتوی حاصل از ارزیابی چندهدفه توسعه تولید و انتقال در شبکه..... ۱۱۳
شکل (۵-۶): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۲..... ۱۱۵
شکل (۵-۷): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۳..... ۱۱۷
شکل (۵-۸): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۴..... ۱۱۷
شکل (۵-۹): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۵..... ۱۱۹
شکل (۵-۱۰): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۶..... ۱۱۹
شکل (۵-۱۱): مقایسه ظرفیت نصب شده نیروگاهی و میزان بار پیش‌بینی شده در شبکه ۲۴ شین..... ۱۲۰
شکل (۵-۱۲): دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۱۸ شین استاندارد..... ۱۲۳
شکل (۵-۱۳): مقایسه زمان همگرایی به‌ازای جمعیت اولیه‌های متفاوت در تکرارهای متوالی..... ۱۲۸

شکل (۵-۱۴): مقایسه پاسخ‌های بهینه به‌ازای جمعیت اولیه‌های متفاوت در تکرارهای متوالی..... ۱۳۰
شکل (۵-۱۵): نتایج بهینه برنامه‌ریزی با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی پویا در کنار الگوریتم پیشنهادی..... ۱۳۰
شکل (۵-۱۶): روند تکمیل پایگاه داده به ازای حالات مختلف..... ۱۳۱
شکل (۵-۱۷): نحوه تولید اعداد تصادفی در الگوریتم مونت‌کارلو (a) و مونت‌کارلو شبکه‌ای (b)..... ۱۳۴
شکل (۵-۱۸): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم بازار انرژی به تنهایی در شبکه ۱۱۸ شین..... ۱۴۰
شکل (۵-۱۹): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم پرداخت ثابت بابت ظرفیت در شبکه ۱۱۸ شین..... ۱۴۳
شکل (۵-۲۰): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم پرداخت دینامیک بابت ظرفیت در شبکه ۱۱۸ شین..... ۱۴۶
شکل (۵-۲۱): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم حمایت از انرژی‌های نو در شبکه ۱۱۸ شین..... ۱۴۹
شکل (۵-۲۲): رزرو سیستم به ازای سناریوهای مختلف در شبکه ۱۱۸ شین..... ۱۴۹
شکل (۵-۲۳): مقایسه ظرفیت نصب شده نیروگاهی و میزان بار در شبکه ۱۱۸ شین..... ۱۵۰
شکل (۵-۲۴): دیاگرام حلقه علّی عوامل مؤثر بر برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال در..... ۱۶۱

فهرست جداول

جدول (۲-۱): مقایسه مقالات مهم و پر استناد و دسته‌بندی موضوعی آن‌ها ۳۷
جدول (۵-۱): اطلاعات مربوط به منحنی تداومی بار شبکه ۲۴ شین RTS ۱۰۶
جدول (۵-۲): اطلاعات خطوط پیشنهادی مربوط به شبکه ۲۴ شین RTS ۱۰۸
جدول (۵-۳): اطلاعات واحدهای کاندیدا مربوط به شبکه ۲۴ شین RTS ۱۰۹
جدول (۵-۴): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۱ ۱۱۱
جدول (۵-۵): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۲ ۱۱۴
جدول (۵-۶): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۳ ۱۱۶
جدول (۵-۷): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۴ ۱۱۶
جدول (۵-۸): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۵ ۱۱۸
جدول (۵-۹): نتایج توسعه تولید در شبکه ۲۴ شین RTS- سناریو ۶ ۱۱۸
جدول (۵-۱۰): مقایسه هزینه کل هر یک از سناریوها در شبکه ۲۴ شین RTS ۱۲۰
جدول (۵-۱۱): نتایج توسعه انتقال در شبکه ۲۴ شین RTS ۱۲۲
جدول (۵-۱۲): اطلاعات خطوط انتقال کاندیدا شبکه ۱۱۸ شین، مدل کمینه‌گرا ۱۲۴
جدول (۵-۱۳) اطلاعات واحدهای نیروگاهی کاندیدا شبکه ۱۱۸ شین، مدل کمینه‌گرا ۱۲۵
جدول (۵-۱۴): نتایج مقایسه‌ای سال ورود واحدهای تولیدی به مدار ۱۲۶
جدول (۵-۱۵): نتایج مقایسه‌ای سال ورود تجهیزات انتقال به مدار ۱۲۶
جدول (۵-۱۶): اطلاعات واحدهای نیروگاهی کاندیدا شبکه ۱۱۸ شین، مدل بیشینه‌گرا ۱۳۲
جدول (۵-۱۷): اطلاعات خطوط انتقال کاندیدا شبکه ۱۱۸ شین، مدل بیشینه‌گرا ۱۳۳
جدول (۵-۱۸): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم بازار انرژی به تنهایی در شبکه ۱۱۸ شین ۱۳۷
جدول (۵-۱۹): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم پرداخت ثابت بابت ظرفیت در شبکه ۱۴۱
جدول (۵-۲۰): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم پرداخت بابت ظرفیت دینامیک در شبکه ۱۴۴
جدول (۵-۲۱): نتایج توسعه تولید برمبنای مکانیزم حمایت از انرژی‌های نو در شبکه ۱۴۷
جدول (۵-۲۲): مقایسه هزینه کل هر یک از سناریوها در شبکه ۱۱۸ شین ۱۵۰
جدول (۵-۲۳): نتایج توسعه انتقال در شبکه ۱۱۸ شین ۱۵۳

فهرست علامت‌ها و اختصارها

$Cost_i$ تابع هزینه تولید واحد iام

Fix_i هزینه ثابت واحد iام

P_i میزان تولید واحد iام

Var_i هزینه متغیر واحد iام

π_i قیمت حاشیه‌ای حدی واحد iام

b اندیس مربوط به بلوک بار در منحنی تداوم بار سالیانه

d نرخ تنزیل سالیانه

i اندیس مربوط به شین تولید

j اندیس مربوط به خط انتقال

k اندیس مربوط به واحد نیروگاهی

y اندیس مربوط به سال برنامه‌ریزی

B_j سوسپتانس خط jام

C اندیس مربوط به تجهیزات کاندیدا

E اندیس مربوط به تجهیزات موجود

M پارامتر ثابت به منظور تبیین مدل برنامه‌ریزی خطی

DT_{by} زمان تداوم بار مربوط به بلوک bام در سال yام

GI_{kiy} هزینه سرمایه‌گذاری واحد kام، واقع بر شین iام، در سال yام

Gn_{kiy} متغیر باینری وضعیت واحد kام، واقع بر شین iام، در سال yام

Ln_{jy} متغیر باینری وضعیت خط jام در سال yام

TI_{jy} هزینه سرمایه‌گذاری خط jام در سال yام

OC_{kiby} هزینه بهره‌برداری واحد kام، روی شین iام، برای بلوک bام در سال yام

PG_{kiby} میزان تولید واحد kام، روی شین iام، برای بلوک bام در سال yام

PD_{lby} میزان بار شین lام، مربوط به بلوک bام در سال yام

PL_{jby} توان عبوری از خط jام، مربوط به بلوک bام در سال yام

$MTGI_{ki}$ حداقل زمان مورد نیاز برای احداث واحد kام، واقع بر شین iام

$MTTI_{j}$ حداقل زمان مورد نیاز برای احداث خط انتقال jام

NCU تعداد واحدهای کاندیدا تولید

NEU تعداد واحدهای موجود تولید

NG تعداد شین‌های تولید

NY تعداد سال‌های برنامه‌ریزی

NCL تعداد خطوط انتقال کاندیدا

NEL تعداد خطوط انتقال موجود

NU تعداد کل واحدهای نیروگاهی که در برنامه‌ریزی تولید مشارکت دارند

NB تعداد کل بلوک‌های بار در منحنی تداومی بار

SL متغیر شناور

TGI_{y} کل هزینه تخصیص یافته به توسعه تولید در سال yام

TGC_{y} کل ظرفیت تخصیص یافته به توسعه تولید در سال yام

TTI_{y} کل هزینه تخصیص یافته به توسعه انتقال در سال yام

TTC_{y} کل ظرفیت تخصیص یافته به توسعه انتقال در سال yام

TC هزینه کل (توسعه شبکه و بهره‌برداری)

$PG^{\max,\sim}$ حداکثر توان قابل تولید برای واحدهای تولیدی (موجود یا کاندیدا)

$PL^{\max,\sim}$ حداکثر توان قابل انتقال خطوط (موجود یا کاندیدا)

δ زاویه ولتاژ شین

چکیده

نام خانوادگی: جوادی اصطهباناتی	نام: محمد صادق	شماره دانشجویی : ۸۸٤۱۳۰۱

عنوان پایان نامه: برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و شبکه انتقال در محیط بازار برق

استاد راهنما: دکتر محسن صنیعی

استاد مشاور: دکتر حبیب رجبی‌مشهدی

درجه تحصیلی: دکتری تخصصی	رشته: مهندسی برق	گرایش: قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه : برق

تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵ **تعداد صفحه: ۱۷۱ صفحه**

کلید واژه ها : برنامه‌ریزی توسعه تولید، توسعه شبکه انتقال، دینامیک بلندمدت بازار، رقابت شبه‌کامل

در توسعه بلند مدت شبکه قدرت در محیط بازار برق، بنگاه‌های تولید با چالش دسترسی به شبکه انتقال مواجه خواهند شد. در چنین فضایی تولیدکنندگان بدون حصول اطمینان از وضعیت شبکه انتقال حاضر به سرمایه‌گذاری در بخش تولید نخواهند بود. به این ترتیب هر تولیدکننده در تصمیم‌سازی خود در توسعه تولید، وضعیت شبکه انتقال و ظرفیت قابل بهره‌برداری در افق برنامه‌ریزی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این رساله، به برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه تولید و شبکه انتقال به صورت هم‌گام در محیط‌های تجدیدساختار شده و مدرن امروزی می‌پردازد. برنامه‌ریزی مورد نظر شامل برنامه‌ریزی در فضای رقابت شبه‌ایده‌آل بین تولیدکنندگان بر مبنای رقابت در بازار برق، از طرف بازیگران عرصه تولید انرژی، و همچنین برنامه‌ریزی توسعه مطلوب شبکه انتقال در سیستم قدرت می‌باشد. رویکرد اتخاذ شده در این رساله مبتنی بر توسعه همزمان تولید و شبکه انتقال بر اساس مدل‌سازی دینامیک بلند مدت بازار می‌باشد. به این ترتیب، نهاد برنامه‌ریز سیستم قدرت به منظور فراهم نمودن شرایط نزدیک به رقابت کامل و با در نظر گرفتن رفاه اجتماعی کل، طرح‌های بهینه متناسب با هر یک از مکانیزم‌های بازار را برای توسعه شبکه انتخاب می‌نماید. ارزیابی طرح‌های توسعه بر مبنای یک مدل بهینه‌سازی چند سطحی صورت می‌گیرد که از یک پایگاه داده مجازی، به منظور ذخیره‌سازی حالات بررسی شده، استفاده می‌نماید. تکنیک بهینه‌سازی پیشنهادی در این رساله، قابلیت ارزیابی طرح‌های توسعه در هر دو مدل کمینه‌گرا و بیشینه‌گرا را دارا بوده و نتایج قابل قبولی در هر دو مدل ارائه می‌نماید.

فصل اول

مقدمه

توسعه تولید و شبکه انتقال در افق بلندمدت، یکی از بخش‌های مهم در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت به‌شمار می‌رود. منظور از برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال، تعیین زمان‌بندی ورود واحدهای نیروگاهی و خطوط شبکه انتقال و همچنین، تعیین محل نصب آن‌ها در شبکه قدرت می‌باشد. با توجه به نیازمندی‌های سیستم قدرت در آینده، لازم است یک برنامه‌ریزی منسجم و نظام‌مند جهت ورود تجهیزات شبکه به مدار صورت پذیرد. در سیستم‌های قدرت سنتی، برنامه‌ریزی توسعه توسط نهاد برنامه‌ریز شبکه و به‌صورت هماهنگ با نیازهای بهره‌بردار سیستم صورت می‌پذیرد. در چنین ساختاری، معمولاً، یک نهاد مشخص وظیفه تأمین نقدینگی لازم برای سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه را بر عهده دارد. به‌علاوه، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه به‌صورت انحصاری و تحت نظارت مستقیم نهاد متولی تأمین انرژی بوده و هماهنگی‌های لازم بین بخش‌های مختلف از تولید انرژی، انتقال آن به مراکز بار و تحویل به مشترکین به صورت یکپارچه و متمرکز صورت می‌گیرد.

با تجدیدساختار در صنعت برق و شکسته شدن انحصار در زنجیره تأمین انرژی، شرایط متفاوت‌تری نسبت به مدل یکپارچه و انحصاری پیشِ روی نهاد برنامه‌ریز و بهره‌بردار سیستم قرار گرفته است. آزادسازی رقابت در بخش تولید انرژی به عنوان اولین تغییر اساسی در یک سیستم تجدید ساختار شده رخ می‌نماید. فراهم آوردن شرایط برای رقابت بنگاه‌های اقتصادی فعال در عرصه تأمین انرژی در شرایط گذار سیستم از حالت انحصاری به مدل چند انحصاری یا رقابت شبه‌کامل، حائز اهمیت است. مکانیزم‌هایی که در ابتدای آزادسازی رقابت، از سوی نهادهای نظارتی برای روان‌سازی تجارت و توسعه رقابت در شرایط گذار صورت می‌گیرد، هم بر شرایط بهره‌برداری اثرگذار خواهد بود و هم بر توسعه سرمایه‌گذاری در آینده تأثیر خواهد گذاشت. نظر به این‌که در ابتدا بهره‌برداری و مالکیت نیروگاه‌های موجود به بخش خصوصی واگذار می‌گردد و توسعه تولید جدید توسط بخش خصوصی پس از شناسایی کامل شرایط بازار و خطر ناشی از سرمایه‌گذاری در

این حوزه به آینده‌ای نه‌چندان دور موکول می‌گردد؛ سیاست‌گذاری‌های نهاد برنامه‌ریز شبکه قدرت تجدیدساختار شده، بر روند توسعه سرمایه‌گذاری در این بخش تأثیر بسیار زیادی خواهد داشت.

استراتژی‌های مختلف بازار بر عوامل اقتصادی سیلان توان در شبکه اثرگذار بوده، از این‌رو می‌تواند شرایط بهره‌برداری از شبکه قدرت را تغییر دهد. همچنین، تصمیم‌سازی[1] بنگاه‌های خصوصی تولید در عرصه سرمایه‌گذاری شدیداً تحت تأثیر عوامل فنی، اقتصادی و امنیت شبکه می‌باشند که خود بر پیچیدگی‌های مسئله برنامه‌ریزی دامن می‌زند.

ویژگی‌های خاص انرژی الکتریکی سبب می‌گردد تا نگرش در برنامه‌ریزی با محافظه کاری بیشتری همراه باشد. توجه به مقوله امنیت در بهره‌برداری از سیستم قدرت در هر یک از سطوح برنامه‌ریزی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها به شمار می‌رود. یکی از ویژگی‌های انرژی الکتریکی عدم امکان ذخیره‌سازی آن در ابعاد بزرگ است. این موضوع سبب می‌گردد بهره‌بردار سیستم قدرت برای هر یک از افق‌های برنامه‌ریزی برای تأمین بار با سطح کیفیت و کمیت تعریف شده با چالش‌هایی مواجه باشد. در باب ضرورت و اهمیت بررسی عوامل مؤثر بر برنامه‌ریزی توسعه بلندمدت تولید و انتقال می‌توان گفت که سلسله مراتب برنامه‌ریزی در افق میان مدت و کوتاه مدت تابعی از وضعیتی است که در گذشته در بخش سرمایه‌گذاری صورت گرفته است. از این‌رو، می‌توان گفت که بهره‌برداری مناسب و بهینه از منابع، ظرفیت‌ها و پتانسیل‌های تأمین بار مشترکین در آینده سیستم نیازمند یک برنامه‌ریزی مطلوب در بخش تولید و انتقال خواهد بود. برای رسیدن به شرایطی که میزان رفاه اجتماعی کل در آینده افزایش یابد، لازم است تا مطلوبیت تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی در سیاست‌گذاری‌ها مورد توجه قرار گیرد. شرایط خاص انرژی الکتریکی با توجه به میزان نفوذ آن در بخش‌های صنعتی، تجاری و مصارف خانگی در کنار غیرقابل ذخیره بودن آن از یک‌سو و زمان‌بر بودن فرآیند جایابی، تصمیم‌گیری و سرمایه‌گذاری به‌منظور احداث تجهیزات جدید تا لحظه ورود آن‌ها به مدار، لزوم بررسی تأثیر مکانیزم‌های مختلف بر دینامیک بلندمدت بازار را بیش از پیش نشان می‌دهد.

[1] Decision Making

۱-۱- بیان مسئله

برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و شبکه انتقال یک مسئله بهینه‌سازی متغیر با عدد صحیح با ماهیت دینامیک در افق تحت مطالعه است. در این میان، متغیرهای عدد صحیح به زمان‌بندی ورود تجهیزات شبکه به مدار و همچنین در مدار بودن یا نبودن آن‌ها در شرایط بهره‌برداری اشاره دارد. به‌علاوه، باید مجموعه وسیعی از متغیرهای پیوسته مربوط به میزان تولید واحدهای نیروگاهی و توان عبوری از خطوط انتقال نیز به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسئله برنامه‌ریزی تعیین وضعیت شوند. قیود مسئله برنامه‌ریزی به سه دسته قیود فنی، اقتصادی و امنیت بهره‌برداری دسته‌بندی می‌شوند که می‌توانند به‌صورت قیود خطی یا غیرخطی بیان گردند. قیود اقتصادی بر زمان‌بندی ورود تجهیزات به مدار تأثیر می‌گذارند و مرتبط با نرخ بهره، تنزیل سالیانه و بودجه بنگاه‌های سرمایه‌گذار می‌باشند. در نهایت، قیود مربوط به قابلیت اطمینان و قیود امنیت استاتیکی در بهره‌برداری از شبکه قدرت هستند که در مسئله برنامه‌ریزی به عنوان مجموعه قیود سخت‌گیرانه از سوی نهاد برنامه‌ریز شناخته می‌شوند و در مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی مورد توجه قرار می‌گیرند. ابعاد مسئله برنامه‌ریزی و میزان پارامترهای تأثیرگذار بر پاسخ نهایی مسئله، معمولاً، قابل توجه است. نظر به این موضوع، ساده‌سازی‌هایی در بخش مدل‌سازی تابع هدف و قیود صورت می‌گیرد.

مدل پیشنهادی در این رساله، از یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی برای حل مسئله برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و انتقال بهره می‌گیرد که در آن قابلیت‌هایی برای حل مسئله در مدل تک‌هدفه و چندهدفه در مدل سیستم‌های قدرت سنتی نیز در نظر گرفته شده است. از آن مهم‌تر، یک سطح بازخورد[1] نیز برای ارزیابی مکانیزم‌های مختلف بازار در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده در نظر گرفته شده است. اضافه نمودن سطح یاد شده به مسئله برنامه‌ریزی در راستای تحلیل ماهیت دینامیک بازار بر چگونگی جلب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در عرصه تولید انرژی ارائه شده است.

۱-۲- اهداف اصلی پایان‌نامه

هدف اصلی در این پایان‌نامه، بر ارائه یک روش کارا جهت ارزیابی موضوع برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و شبکه انتقال در محیط بازار برق استوار شده است. ضمن آن‌که مدل پیشنهادی باید

[1] Feedback

این توانایی را داشته باشد تا علاوه بر بهینه‌سازی برنامه‌ریزی در فضای سنتی، قادر باشد دینامیک بازار برق به‌ازای مکانیزم‌های پذیرفته شده بازار در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده را نیز مدل نماید. همچنین، امکان توسعه روش بهینه‌سازی متناسب با سایر مکانیزم‌هایی که در حال حاضر در مرحله تئوری‌پردازی قرار دارند نیز فراهم باشد.

لزوم ارائه یک طرح بهینه نهایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستمی، نظیر رشد بار و تغییرات قیمتی سوخت و ... و عدم قطعیت‌های غیر سیستمی، نظیر نرخ بهره و تنزیل سالیانه، یک چالش بسیار مهم در موضوع برنامه‌ریزی به شمار می‌رود. هر چند مدل‌سازی هر یک از عدم قطعیت‌های یاد شده بر بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله و پیچیدگی آن می‌افزاید؛ با این حال به‌دلیل اهمیت مدل‌سازی آن‌ها در مطالعات سیستم قدرت لازم است نحوه دست‌یابی به پاسخ نهایی به‌گونه‌ای طراحی گردد که طرح نهایی نسبت به شرایط نایقین آینده مقاوم بوده و نسبت به آسیب‌های ناشی از آن‌ها ایمن باشد. از این‌رو، لازم است برای حل مسئله برنامه‌ریزی از کلیه ابزارها و تکنیک‌های نرم‌افزاری که در دسترس هستند و به دست‌یابی به پاسخ توصیف شده کمک می‌نمایند، استفاده شود.

۱-۳- فرضیات اصلی پایان‌نامه

در دنیای مهندسی، هر مدلی که به‌منظور توصیف سیستم مورد مطالعه ارائه می‌شود دارای محدودیت‌ها و نواقصی خواهد بود. هر اندازه سیستم تحت مطالعه پیچیده‌تر شود و دامنه تغییر پارامترهای نایقین در آن افزایش یابد شرایط حاکم بر سیستم نیز به تبعیت از آن تغییر می‌کند. در این مطالعه، که مدل‌سازی رفتار دینامیکی مکانیزم‌های مختلف بازار بر موضوع برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و شبکه انتقال مورد توجه قرار گرفته است، شرایط پیچیده‌تری بر مسئله حاکم خواهد بود. در حقیقت یک مسئله در دنیای مهندسی با یک مدل اقتصادی دینامیک ترکیب شده که پارامترهای نایقین آن بسیار زیاد و گسترده خواهند بود. به‌همین منظور لازم است تا ضمن اشاره به محدودیت‌های پیش‌رو، فرضیاتی برای ساده‌سازی مسئله نهایی در نظر گرفته شود.

یکی از رایج‌ترین فرضیاتی که در مسئله برنامه‌ریزی توسعه بلندمدت در نظر گرفته می‌شود، ساده‌سازی شبکه انتقال و محدودیت‌های مربوط به انتقال توان در شبکه قدرت می‌باشد. به‌این ترتیب، معادلات مربوط به سیلان توان به شکل مدل ساده‌سازی شده پخش توان DC پیاده‌سازی می‌گردند. همچنین، فرض بر این است که طرح‌های توسعه تولید و انتقال از پیش تعیین شده‌اند.

به‌عنوان نمونه، نصب واحدهای آبی در نقاط خاصی از شبکه امکان‌پذیر خواهد بود که مکان نصب و حداکثر تعداد واحدهای قابل نصب در مکان کاندیدا از پیش مشخص شده‌اند. به‌همین ترتیب، مسیرهایی که به‌منظور توسعه یا تقویت شبکه انتقال پیشنهاد شده‌اند، به‌عنوان ورودی مسئله برنامه‌ریزی شناخته می‌شوند.

همچنین فرض شده است که سرمایه‌گذاران یک رفتار منطقی و منصفانه در مشارکت در بازار از خود بروز می‌دهند و شرایط بازار نیز به‌گونه‌ای است که انحصار در تأمین انرژی در شرایط پایه در اختیار تولیدکننده خاصی نیست. از این‌رو، می‌توان گفت که بنگاه‌های سرمایه‌گذار در عرصه تولید قیمت‌پذیر[1] هستند و شرایط بازار تعیین کننده قیمت بسته شدن بازار خواهد بود. مکانیزم بسته شدن بازار در این مطالعه، از نوع پرداخت یکنواخت[2] به کلیه نیروگاه‌های تولیدکننده انرژی می‌باشد. هر چند پیاده‌سازی مکانیزم پرداخت بابت پیشنهاد[3] نیز به‌سادگی قابل انجام می‌باشد، اما تحلیل نتایج آن بسیار متفاوت با مکانیزم پرداخت یکنواخت می‌باشد. لازم به ذکر است که طرح‌های توسعه مربوط به گذشته که در حال انجام است به‌عنوان متغیر لحاظ نمی‌گردد و بر اساس زمان‌بندی تعیین شده وضعیت آن‌ها در مدار مشخص خواهد شد.

فرض بر این است که یک نهاد غیرانتفاعی متولی ارزیابی طرح‌های توسعه تولید و انتقال خواهد بود و این نهاد غیرانتفاعی هیچ نفعی از معاملات بازار نمی‌برد. این نهاد غیرانتفاعی که از آن در ادامه تحت عنوان نهاد برنامه‌ریز یاد می‌شود، مسئولیت اجرای برنامه‌ریزی را بر عهده دارد و بر اساس شرایط بازار و قیمت بسته شدن بازار، جریان نقدی خالص هر یک از طرح‌های پیشنهادی را محاسبه و نسبت به پذیرش یا عدم پذیرش طرح‌های سرمایه‌گذاری در عرصه تولید مبادرت می‌ورزد. مشابه با سایر سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده، توسعه شبکه انتقال تحت نظارت مستقیم همین نهاد بوده و به بخش خصوصی واگذار نمی‌گردد.

در راستای ساده‌سازی روند برنامه‌ریزی فرض شده است که زمان ورود تجهیزات شبکه در ابتدای هر سال صورت می‌گیرد و زمان مورد نیاز برای احداث تجهیزات نیز بر حسب سال مشخص شده است. سایر فرضیات در نظر گرفته شده متناسب با موردهای مطالعاتی در بخش شبیه‌سازی ارائه شده است.

---

[1] Price Taker
[2] Uniform Pricing (UP)
[3] Pay-As-Bid (PAB)

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

فصل دوم این پایان‌نامه به مروری بر پژوهش‌های پیشین در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه اختصاص یافته است. مطالب فصل دوم در پنج بخش دسته‌بندی شده است. بخش نخست، شامل معرفی برنامه‌ریزی توسعه تولید و پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌باشد. در فصل سوم، مکانیزم‌های مختلف بازار در سیستم‌های تجدیدساختار شده در افق بلندمدت معرفی و یک دسته‌بندی از مهم‌ترین مکانیزم‌های بازار ارائه شده است. در فصل چهارم، مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه همزمان تولید و انتقال به‌صورت توصیفی همراه با فرمولاسیون ریاضی آن ارائه شده است. فصل پنجم، به شبیه‌سازی موردهای مطالعاتی اختصاص یافته است. در مورد مطالعاتی نخست، شبکه استاندارد ۲۴ شین و در مورد مطالعاتی دوم، شبکه ۱۱۸ شین استاندارد جهت ارزیابی روش پیشنهادی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، به‌منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، در مورد مطالعاتی ۱۱۸ شین، یک مقایسه عددی ارائه شده است. فصل ششم این رساله به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات اختصاص یافته است.

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های گذشته

موضوع برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال از دیرباز مورد توجه صاحب‌نظران قرار گرفته است. پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته است. نظر به تنوع مطالعات انجام شده، تنها آن دسته از پژوهش‌هایی که مرتبط با موضوع برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال ارائه شده‌اند و نقش تأثیرگذاری بر روند پیاده‌سازی مسئله برنامه‌ریزی بلندمدت سیستم قدرت داشته‌اند، بررسی شده است. همچنین، با توجه به این موضوع که به‌طور کلاسیک موضوع برنامه‌ریزی توسعه انتقال در سیستم‌های قدرت سنتی بعد از مشخص شدن وضعیت واحدهای تولید صورت می‌گیرد، ابتدا مروری بر ادبیات و پژوهش‌های مرتبط با توسعه تولید مورد توجه قرار گرفته است. سپس، مباحث مطرح شده در زمینه توسعه انتقال ارائه شده‌اند. در ادامه، موضوع برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و شبکه انتقال در محیط بازار برق ارائه شده تا جایگاه مسئله به روشنی مشخص گردد. به‌علاوه، یک دسته‌بندی موضوعی از منابع پراستناد در زمینه توسعه تولید در نظر گرفته شده که نحوه مدل‌سازی در آن‌ها به صورت مقایسه‌ای ارائه شده است. همچنین، مطالعاتی که در سال‌های گذشته به‌منظور ارزیابی مکانیزم‌های مختلف بازار و چگونگی مدل‌سازی دینامیک بازار ارائه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- برنامه‌ریزی توسعه تولید

هدف اصلی برنامه‌ریزی توسعه تولید[1] در یک سیستم قدرت سنتی، برقراری کفایت سیستم تولید با کمترین هزینه است. مدل‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید به‌منظور رسیدن به این هدف، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متنوع ارائه شده است. هدف مدل‌های

[1] Generation Expansion Planning (GEP)