

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن رزرو چرخان

نگارنده: مجتبی کولیوند

استاد راهنما:

دکتر مرتضی رحیمیان

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۱۵۰۲/۳۰۰
تاریخ: ۹۲/۶/۱۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مجتبی کولیوند با شماره دانشجویی ۹۳۱۴۵۲۴ رشته مهندسی قدرت گرایش سیستم تحت عنوان: مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن رزرو چرخان که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با امتیاز ۱۸.۲۵ درجه <u>خوب</u>)
<input type="checkbox"/> عملی	<input checked="" type="checkbox"/> نظری

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مرتضی رحمان	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر حسن اصیلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسن علی زاده زم	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر یاسر دایچی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: و نام
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

پیشگاه مقدس حضرت ولیعصر (عج)

و تقدیم به

بزرگ مرد زندگی و حامی همیشگی ام؛ پدرم

گرم ترین نگاه و سنگ صبور زندگی ام؛ مادرم

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهِشان به

شجاعت می‌گراید

یگانه برادر صبورم

و خواهران نجیبم

و تقدیم به

پناه خستگی ام، گرمی زندگی ام، همسرم، به پاس فداکاری‌ها و صبرش

تشکر و قدردانی

تشکر و قدردانی ویژه اینجانب تقدیم به استاد گرانقدر و دلسوز جناب آقای دکتر رحیمیان که همواره از لطف و بزرگواری ایشان بهره‌مند شده‌ام. بدون شک به سرانجام رساندن این کار تحقیقاتی حاصل حمایت‌ها و هدایت‌های عالمانه ایشان می‌باشد. سلامتی، سعادت، سربلندی، طول عمر و توفیق روز افزون ایشان را از خداوند بزرگ خواستارم.

همچنین از آقای کعبه که اینجانب را مورد لطف خود قرار داده و در این راه بسیار مرا یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

و نیز از تمام عزیزانی که در طول دوره تحصیل کمک هایشان شامل حال اینجانب شده

تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب **مجتبی کولیوند** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/قدرت دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن رزرو چرخان تحت راهنمایی دکتر مرتضی رحیمیان متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان‌نامه، به منظور مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی زمان‌حقیقی نیروگاه مجازی، یک مدل تصادفی ارائه می‌شود. نیروگاه مجازی شامل منابع تولید پراکنده (همچون ایستگاه خورشیدی و واحد حرارتی)، واحدهای ذخیره انرژی و متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت می‌باشد که توسط یک شبکه الکتریکی کوچک انرژی به یکدیگر متصل می‌باشند. همچنین نیروگاه مجازی قابلیت تبادل انرژی با شبکه اصلی را داراست. مدل پیشنهادی با برنامه‌ریزی انرژی و ظرفیت رزرو چرخان، امنیت سیستم را در سطح مناسبی حفظ می‌کند. عدم قطعیت‌های تولید خورشیدی و قیمت انرژی با استفاده از روش پیش‌بینی نقطه‌ای نمایش داده شده‌اند. عدم قطعیت دسترس‌پذیری امان‌های شبکه به صورت سناریوها مدل‌سازی شده‌اند. روش ارائه شده در یک شبکه انرژی الکتریکی اندازه کوچک با درجه‌های متفاوت از آسیب‌پذیری سیستم پیاده‌سازی شده است. نتایج، عملکرد خوب مدل ارائه شده را در پیشامدهای سیستم نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مدیریت انرژی، نیروگاه مجازی، شبکه هوشمند، پیشامد، رزرو چرخان.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
پیشگفتار	۱
۱-۱ انگیزه تحقیق	۲
۱-۲ هدف تحقیق	۴
۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۵
فصل دوم	۷
مروری بر کارهای انجام شده	۷
۲-۱ مقدمه	۸
۲-۲ مدیریت انرژی	۸
۲-۲-۱ اهمیت مدیریت انرژی در شبکه‌های الکتریکی کوچک	۹
۲-۳ نیروگاه مجازی	۱۰
۲-۳-۱ اجزای نیروگاه مجازی	۱۲
۲-۳-۱-۱ نیروگاه‌های قابل کنترل	۱۲
۲-۳-۱-۲ بارهای انعطاف‌پذیر	۱۲
۲-۳-۱-۳ تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی	۱۳
۲-۳-۱-۴ واحدهای تولیدتصادفی	۱۳
۲-۴ شبکه هوشمند	۱۴
۲-۴-۱ ساختار شبکه هوشمند	۱۵

۱۵	۲-۴-۲ نحوه عملکرد شبکه هوشمند
۱۶	۲-۵ عدم قطعیت در نیروگاه مجازی
۱۸	۲-۶ رزرو چرخان
۱۸	۲-۷ مروری بر کارهای انجام گرفته
۱۹	۲-۷-۱ مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی
۲۲	۲-۷-۲ مدیریت خروج
۲۴	۲-۷-۳ عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در نیروگاه مجازی
۲۷	۲-۸ جمع بندی و نتیجه گیری
۲۹	فصل سوم
۲۹	مدل سازی مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی
۳۰	۳-۱ مقدمه
۳۱	۳-۲ فهرست نمادها و اختصارات
۳۵	۳-۳ تشریح مسئله
۳۸	۳-۳-۱ الگوریتم مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی
۳۸	۳-۳-۱-۱ مرحله برنامه ریزی
۳۹	۳-۳-۱-۲ مرحله توزیع و اجرای تصمیمات
۴۱	۳-۴ مدل سازی ریاضی مسئله
۴۲	۳-۴-۱ تابع هدف
۴۴	۳-۴-۲ قیود

- ۴۴ ۳-۴-۲-۱ مرحله اول؛ برنامه‌ریزی
- ۵۳ ۳-۴-۲-۲ مرحله دوم؛ توزیع توان
- ۶۱ ۳-۴-۲-۳ ارتباط مرحله برنامه‌ریزی با مرحله توزیع توان
- ۶۲ ۳-۵ پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای
- ۶۳ ۳-۵-۱ پیش‌بینی قیمت انرژی
- ۶۴ ۳-۵-۲ پیش‌بینی تولید خورشیدی
- ۶۶ ۳-۶ مدل‌سازی عدم قطعیت پیشامدهای سیستم
- ۶۸ ۳-۷ جمع بندی و نتیجه‌گیری
- ۶۹ فصل چهارم
- ۶۹ شبیه‌سازی
- ۷۰ ۴-۱ مقدمه
- ۷۰ ۴-۲ مشخصات سیستم
- ۷۱ ۴-۳ اطلاعات فنی و اقتصادی سیستم
- ۷۴ ۴-۴ مشخصات پارامترهای غیرقطعی
- ۷۷ ۴-۵ نتایج شبیه‌سازی
- ۷۸ ۴-۵-۱ خروج خطوط انتقال در ساعات مختلف در نرخ خروج پایه
- ۷۹ ۴-۵-۱-۱ اثر خروج خط ۶ بر روی میزان سود نیروگاه مجازی در نرخ خروج پایه
- ۸۱ ۴-۵-۱-۲ اثر خروج خط ۶ بر روی بار و انرژی تأمین نشده
- ۸۳ ۴-۵-۱-۳ رزرو تأمین شده از منابع رزرو در پیشامدهای خروج خط ۶

- ۴-۵-۱-۴ خروج خط ۶ و اثر آن بر توان تأمین شده از ایستگاه خورشیدی ۸۷
- ۴-۵-۱-۵ اثر پیشامدهای خروج خط ۶ بر تبادل توان با شبکه اصلی ۸۸
- ۴-۵-۱-۶ توان تولیدی واحد حرارتی در پیشامدهای خروج خط ۶ ۸۹
- ۴-۵-۱-۷ تأثیر خروج خط ۶ بر توان انتقالی خطوط ۹۰
- ۴-۵-۲ خروج خط ۶ در ساعات مختلف در نرخ خروج بالاتر ۹۰
- ۴-۵-۲-۱ اثر خروج خط ۶ در نرخ خروج های متفاوت بر سود نیروگاه مجازی ۹۱
- ۴-۵-۲-۲ توان تبدالی با شبکه اصلی با خروج خط ۶ در نرخ خروج های متفاوت ۹۳
- ۴-۵-۲-۳ اثر خروج خط ۶ بر توان عبوری از خطوط ۹۴
- ۴-۵-۳ خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف در نرخ خروج بالاتر ۹۶
- ۴-۵-۳-۱ اثر خروج واحد حرارتی بر روی سود نیروگاه مجازی ۹۶
- ۴-۵-۳-۲ تبادل توان با شبکه اصلی در پیشامدهای خروج واحد حرارتی ۹۸
- ۴-۵-۳-۳ تأمین رزرو در پیشامدهای خروج واحد حرارتی ۱۰۰
- ۴-۵-۴ خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف در نرخ خروج بالاتر ۱۰۳
- ۴-۵-۴-۱ اثر خروج واحد حرارتی در نرخ خروج های متفاوت بر سود نیروگاه مجازی ۱۰۳
- ۴-۵-۴-۲ توان بار تأمین شده با خروج واحد حرارتی در نرخ خروج های متفاوت ۱۰۴
- ۴-۵-۴-۳ توان تبدالی با شبکه در خروج واحد حرارتی در نرخ خروج های متفاوت ۱۰۵
- ۴-۶ جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۸
- فصل پنجم ۱۰۹
- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۹

۱۱۰ ۵-۱ مروری بر مطالب ارائه شده در پایان نامه

۱۱۱ ۵-۲ نتایج

۱۱۲ ۵-۳ پیشنهادات

۱۱۵ مراجع

فهرست جدول‌ها

- شکل (۳-۳) پیش‌بینی تک نقطه‌ای قیمت انرژی بازار زمان حقیقی (مرجع [۴۶]) ۶۴
- شکل (۳-۴) پیش‌بینی تک نقطه‌ای تولید خورشیدی (مرجع [۴۶]) ۶۵
- جدول (۴-۱): مشخصات فنی متقاضیان شبکه (مرجع [۴۵]) ۷۱
- جدول (۴-۲): تابع مطلوبیت متقاضیان انرژی نیروگاه مجازی (مرجع [۴۵]) ۷۲
- جدول (۴-۳): مشخصات خطوط انتقال (مرجع [۴۵]) ۷۲
- جدول (۴-۴): مشخصات ایستگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز (مرجع [۴۶]) ۷۳
- جدول (۴-۵): مشخصات فنی واحد حرارتی (مرجع [۴۳]) ۷۳
- جدول (۴-۶): مشخصات اقتصادی واحد حرارتی (مرجع [۴۳]) ۷۴
- جدول (۴-۷): اطلاعات پارامترهای غیرقطعی روز دهم آگوست ۲۰۰۹ (قیمت انرژی و تولید خورشیدی) ۷۵
- جدول (۴-۸): میزان حذف بار و انرژی تأمین نشده روزانه در زمان‌های مختلف خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط = ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی = ۰/۰۰۲ ۸۲
- جدول (۴-۹): تأمین رزرو توسط متقاضیان انرژی در ساعت‌های خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط = ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی = ۰/۰۰۲ ۸۴
- جدول (۴-۱۰): رزرو فراهم شده از منابع رزرو در ساعت‌های مختلف پیشامد خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط = ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی = ۰/۰۰۲ ۸۶
- شکل (۴-۱۰): مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی؛ نرخ خروج خط ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۲ ۹۲

جدول (۴-۱۱): رزرو ایجاد شده توسط منابع رزرو در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف؛

نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱؛ نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ ۱۰۳

جدول (۴-۱۲): مقادیر رزرو تأمین شده از منابع رزرو در پیشامد خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج

خط=۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۱. نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ و ۰/۰۲ ۱۰۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۳-۱) روندنمای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در دو مرحله برنامه‌ریزی و توزیع توان ۴۰
- شکل (۳-۲): همبستگی قیمت انرژی بازار روز قبل و بازار زمان حقیقی، ناحیه
ماساچوست، نیوانگلند (مرجع: [۲۲]) ۶۳
- شکل (۴-۱): شبکه نیروگاه مجازی مورد مطالعه ۷۰
- شکل (۴-۲): پیش‌بینی حد پایین و بالا، میانگین و مقادیر واقعی قیمت انرژی شبکه اصلی در اولین
ساعت روز برنامه‌ریزی ۷۶
- شکل (۴-۳): پیش‌بینی حد بالا و پایین و مقادیر واقعی و میانگین تولید توان خورشیدی در اولین
ساعت از روز برنامه‌ریزی ۷۷
- شکل (۴-۴) روند مجموع سود روزانه در پیشامدهای خروج خطوط ۲ و ۶ ۷۸
- شکل (۴-۵): مجموع سود روزانه در پیشامد خروج خط ۶ در ساعات مختلف؛ نرخ خروج
خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ ۷۹
- شکل (۴-۶): مجموع توان بار تأمین شده روزانه در وضعیت خروج خط ۶ در ساعات مختلف روز
برنامه‌ریزی؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ ۸۰
- شکل (۴-۷): مجموع توان روزانه تأمین شده از ایستگاه خورشیدی در ساعات مختلف خروج خط ۶؛
نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ ۸۷
- شکل (۴-۸): مجموع روزانه توان تبادلی با شبکه در وضعیت خروج خط ۶ در ساعات مختلف؛ نرخ
خروج خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ ۸۸
- شکل (۴-۹): مجموع توان تولیدی توسط واحد حرارتی در طول روز در پیشامدهای مختلف خروج خط
۶؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ ۸۹

شکل (۴-۱۱): مجموع توان تبدالی روزانه با شبکه اصلی در پیشامد خروج خط ۶ در ساعات مختلف؛

نرخ خروج خط = $0/0001$ و $0/0001$ ، نرخ خروج واحد حرارتی = $0/002$ و $0/02$ ۹۴

شکل (۴-۱۲): عملکرد خط ۳ در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۱۲، نرخ خروج خط = $0/0001$ ، نرخ خروج

واحد حرارتی = $0/02$ ۹۵

شکل (۴-۱۳): مجموع توان تأمین شده روزانه از واحد حرارتی در پیشامدهای خروج خط ۶؛ نرخ

خروج خط $0/0001$ ، $0/0001$ و نرخ خروج واحد حرارتی $0/002$ ، $0/02$ ۹۶

شکل (۴-۱۴): مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی در زمان‌های مختلف خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج

خط = $0/0001$ نرخ خروج واحد حرارتی = $0/002$ ۹۷

شکل (۴-۱۵): مجموع توان تبدالی روزانه با شبکه اصلی با خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف: نرخ

خروج خط = $0/0001$ ، نرخ خروج واحد حرارتی = $0/002$ ۹۹

شکل (۴-۱۶): مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی در پیشامد خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج خط =

$0/0001$ ، $0/0001$ ، نرخ خروج واحد حرارتی = $0/002$ ، $0/02$ ۱۰۴

شکل (۴-۱۷): مجموع بار تأمین شده روزانه در پیشامد خروج واحد حرارتی، نرخ خروج خط =

$0/0001$ ، $0/0001$ ، نرخ خروج واحد حرارتی = $0/002$ ، $0/02$ ۱۰۵

شکل (۴-۱۸): مجموع توان روزانه تبدالی با شبکه اصلی در پیشامد خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج

خط = $0/0001$ و $0/0001$ ، نرخ خروج واحد حرارتی = $0/002$ ، $0/02$ ۱۰۶

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ انگیزه تحقیق

کمبود منابع انرژی و نیازهای اساسی انسان به انرژی الکتریکی، توجه به مسائل مربوط به بهینه‌سازی استفاده از این انرژی را ضروری ساخته است و این امر مستلزم توجه به مسئله مدیریت انرژی می‌باشد.

طبق گزارش دورنمای انرژی جهانی که در سال ۲۰۰۹ منتشر شده است، روند رو به رشد مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته و اوضاع انرژی جهانی وخیم اعلام شده است. افزایش روز افزون ادوات و وسایل الکتریکی همچون سیستم‌های تهویه، سرمایشی و گرمایشی و نیز گسترش صنایع وابسته به انرژی از دلایل رشد مصرف انرژی می‌باشد. تولید انرژی از منابع سوخت‌های فسیلی در مراکز تولیدی نیروگاهی بزرگ و انتقال آن با استفاده از روش‌های سنتی و خطوط انتقال و رساندن آن به مراکز مصرف، تلفات بالای توان و مشکلات زیست محیطی زیادی به وجود می‌آورد. بنابراین برای تأمین نیاز روزافزون انرژی الکتریکی، توجه به منابع جدید انرژی ضروری می‌باشد. نزدیک نمودن تولید و مصرف انرژی، راه حلی است که امروزه در سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است. به عبارتی، استفاده از منابع تولیدپراکنده، روشی برای غلبه بر مشکلات تلفات توان می‌باشد، زیرا با نزدیک شدن مرکز تولید انرژی به محل مصرف آن، تلفات ناشی از انتقال انرژی کاهش یافته و به دنبال آن آلودگی‌های زیست محیطی نیز کاهش می‌یابد. مشکلات زیست محیطی استفاده از سوخت‌های فسیلی و همچنین مسائل اقتصادی، مصرف‌کنندگان انرژی را به سمت استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر سوق داده است.

وجود منابع تولید پراکنده متعدد در سیستم قدرت، پیچیدگی و اندازه این سیستم را روز به روز گسترش داده است و مشکلاتی در زمینه هماهنگی تولید و مصرف و امنیت شبکه قدرت به وجود آورده است. به علاوه، منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر موجود در سیستم قدرت و ماهیت تصادفی تولید انرژی این منابع، مسائلی همچون خطای پیش‌بینی را بوجود می‌آورد. همچنین وجود تعداد بیشماری از منابع تولید پراکنده، رویت‌پذیری این منابع را برای سیستم قدرت مشکل می‌سازد. بنابراین ایجاد

پشتیبانی‌های لازم برای بالا بردن امنیت سیستم قدرت ضروری می‌باشد. پس به منظور بهره‌مندی از مزایای منابع تولید پراکنده و کنترل اثرات نامطلوب آن‌ها و همچنین مدیریت ارتباط بین منابع سنتی تولید انرژی و تولیدات پراکنده، ایجاد الگوی جدیدی در سیستم قدرت ضروری می‌باشد.

یکپارچه‌سازی سیستم قدرت با تعداد بیشمار منابع تولید پراکنده در قالب یک سیستم واحد، به گونه‌ای که هر واحد تولید پراکنده با اپراتور سیستم انتقال ارتباط داشته باشد، غیرممکن می‌باشد، زیرا ایجاد زیرساخت‌های فناوری اطلاعات برای اینچنین سیستم قدرتی هزینه‌های سنگینی در بر خواهد داشت. ایجاد یک مدیریت نامتمرکز برای هماهنگ‌سازی منابع تولید پراکنده می‌تواند راه‌حل مناسبی باشد تا این منابع را تحت یک الگوی پویا هماهنگ‌سازی نماید تا به منابع تولید پراکنده اجازه دهد در بازارهای انرژی و کمکی شرکت نمایند.

این مدیریت نامتمرکز باید بتواند منابع تولید پراکنده و همچنین متقاضیان انرژی را در سیستم قدرت، تحت یک الگوی کنترلی پویا هماهنگ‌سازی نماید و قادر به مدیریت ارتباط بین منابع سنتی تولید انرژی و تولیدات پراکنده باشد.

به‌علت کمبود منابع انرژی و اهمیت استفاده از انرژی الکتریکی، بهینه‌سازی انرژی و مدیریت مصرف آن امری ضروری است. مدیریت انرژی به بهبود کیفیت محیط زیست کمک می‌کند و با کاهش مصرف انرژی، بار الکتریکی بر روی نیروگاه‌ها را کاهش می‌دهد و بهره‌وری فنی و اقتصادی از انرژی را تسهیل می‌بخشد.

ماهیت متغیر و عدم قطعیت در تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر موجود در سیستم‌های قدرت و همچنین عدم قطعیت در قیمت انرژی از دیگر چالش‌های مدیریت انرژی است. در دیدگاه سنتی مدیریت تولید و تقاضا، مقدار قابل توجهی رزرو از منابع تولید قطعی برای تضمین امنیت شبکه اختصاص داده می‌شود. در نگاه جدید، نه تنها به بار به‌عنوان یک متغیر تصادفی مستقل از شبکه نگاه نمی‌شود، بلکه کنترل بار به‌عنوان یک متغیر قابل کنترل در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند مقدار مصرف خود را متناسب با شرایط شبکه تغییر دهد.

هماهنگ‌سازی منابع تولید پراکنده و بارهای انعطاف‌پذیر نیازمند زیرساخت‌های ارتباطی و ابزار تصمیم‌سازی پیشرفته در روند تولید، انتقال و توزیع توان می‌باشد. به این ترتیب، امکان بهره‌برداری کارا و ایمن منابع و بارها میسر می‌شود.

۲-۱ هدف تحقیق

هدف این پایان‌نامه، ارائه مدل یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند زمان‌حقیقی برای مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده تصادفی و قطعی، بارهای پاسخگو و سیستم ذخیره انرژی در قالب نیروگاه مجازی می‌باشد. مجموعه در نظر گرفته شده در قالب یک سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک^۱، قابلیت تبادل توان با شبکه اصلی را دارا می‌باشد. بارهای پاسخگوی موجود در این سیستم انرژی، مصرف خود را متناسب با مطلوبیت و قیمت انرژی شبکه تغییر می‌دهند. همچنین با تأمین رزرو چرخان از منابع تولیدی و مصرفی، امنیت شبکه انرژی در سطح مناسبی حفظ می‌شود. منابع تولید تصادفی از نوع ایستگاه خورشیدی می‌باشد و از واحد حرارتی نیز به‌عنوان منبع تولید پراکنده قطعی استفاده شده است.

روند دستیابی به این هدف در موارد زیر خلاصه می‌شود:

۱. مدل‌سازی یک سیستم مدیریت انرژی زمان‌حقیقی بطوریکه با در نظر گرفتن مدل بار پاسخگو و منابع تولید داخلی و تبادل با شبکه اصلی و نیز اختصاص رزرو چرخان از منابع موجود، بیش‌ترین سود را برای نیروگاه مجازی به دنبال داشته باشد.

۲. مدل‌سازی مسئله در دو مرحله برنامه‌ریزی و توزیع توان، و بررسی تأثیر تصمیمات اتخاذ شده بر توزیع توان.

۳. مطالعه عملکرد رزرو در پیشامدهای شبکه انرژی.

۴. استفاده از یک روش پیش‌بینی مناسب برای غلبه بر عدم قطعیت ناشی از تولید خورشیدی و قیمت انرژی و نیز عدم قطعیت ناشی از پیشامدهای سیستم.

¹ Small size electric energy system

۵. شناسایی المان‌های مهم و تأثیرگذار در یک سیستم انرژی به منظور آماده‌سازی سیستم در برابر

پیشامدها.

۶. شناخت عوامل تأثیرگذار بر سود نیروگاه مجازی.

۷. بررسی اثر نوع پیشامد و زمان وقوع آن بر عملکرد سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی.

۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

سایر فصل‌های این پایان‌نامه بدین شرح است:

در فصل دوم، به بیان مفاهیم مدیریت انرژی، بارهای انعطاف‌پذیر و منابع تولید پراکنده پرداخته می‌شود. سپس ریزشبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند و لزوم وجود شبکه‌های هوشمند در سیستم‌های قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتهای این فصل سابقه موضوع ارائه می‌شود و تحلیل و بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی و ریزشبکه‌ها بیان می‌شود. در فصل سوم، مدل‌سازی ریاضی مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن رزرو چرخان در پیشامدهای شبکه ارائه می‌شود. فصل چهارم به شبیه‌سازی و ارائه نتایج اختصاص دارد. در این فصل، شبیه‌سازی برای یک شبکه انرژی الکتریکی اندازه کوچک که دارای یک ایستگاه خورشیدی، یک واحد حرارتی، یک واحد ذخیره‌ساز و تعدادی متقاضی انرژی الکتریکی (بار) است، انجام می‌شود. شبکه موردنظر امکان تأمین رزرو چرخان در پیشامدهای شبکه را دارا می‌باشد. در فصل پنجم، نتایج و پیشنهادات ارائه می‌شود.

فصل دوم

مروری بر کارهای انجام

شده

۱-۲ مقدمه

با افزایش تعداد ادوات و وسایل الکتریکی همچون سیستم‌های پیشرفته گرمایشی، سرمایشی و سیستم‌های تهویه که هرروزه وارد زندگی می‌شوند و همچنین پیشرفت روزافزون صنایع وابسته به انرژی الکتریکی، تقاضای بار به‌صورت قابل توجهی افزایش پیدا کرده است، که این امر بار سنگینی بر روی سیستم‌های قدرت موجود وارد آورده است. از این‌رو توجه به سیستم قدرت از نظر پویایی، ایمنی، کارایی و با آلاینده‌گی کمتر، اهمیت پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر تغییرات زیادی در بخش انرژی الکتریکی صورت پذیرفته است. این تغییرات در راستای بهبود بهره‌وری انرژی و مسائل زیست محیطی تولید، انتقال و مصرف برق بوده است [۱-۴].

در این فصل، در ابتدا درمورد مدیریت انرژی و اهمیت آن در شبکه قدرت و سیستم‌های انرژی اندازه کوچک بحث می‌شود. سپس مفهوم نیروگاه مجازی، اجزا، ساختار و کارکردهای آن تشریح می‌شود. منابع تولید پراکنده از جمله مباحثی است که در این فصل ارائه می‌شود ریزشبکه، شبکه هوشمند و ساختار آن در ادامه بیان می‌شود. در نهایت به بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه مدیریت انرژی این سیستم‌ها پرداخته شده است.

۲-۲ مدیریت انرژی

به‌علت کمبود منابع انرژی و اهمیت استفاده از انرژی الکتریکی، بهینه‌سازی انرژی امری ضروری است. مدیریت انرژی شامل تمام اندازه‌گیری‌هایی می‌باشد که برنامه‌ریزی شده و بکار گرفته می‌شوند که تا حد ممکن حداقل میزان انرژی مصرف شود. مدیریت انرژی، فعالیت‌های سازمانی و فنی، همچنین الگوهای رفتاری در رابطه با انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد تا مصرف انرژی کلی و در نتیجه انرژی تولیدی را کاهش دهد. مدیریت انرژی شامل مهندسی، طراحی، کاربرد، عملکرد و ابقا سیستم‌های الکتریکی است تا انرژی الکتریکی را به‌صورت بهینه مصرف نمایند. منظور از بهینه، طراحی یا اصلاح یک سیستم به منظور مصرف حداقل انرژی می‌باشد. در اینجا مفهوم بهینه،

جنبه‌هایی همچون راحتی کار سیستم، شرایط کاری سالم و جنبه‌های بهره‌وری عملیاتی را شامل می‌شود [۵، ۶].

۱-۲-۲ اهمیت مدیریت انرژی در شبکه‌های الکتریکی کوچک

در سال‌های اخیر، سازمان‌های تجاری، صنعتی و دولتی تحت فشارهای زیاد اقتصادی و زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی الکتریکی قرار گرفته‌اند. رقابت اقتصادی در بازار جهانی و افزایش استانداردهای سخت‌گیرانه زیست محیطی برای کاهش آلودگی آب و هوا، از جمله مهم‌ترین عوامل هزینه‌های عملیاتی اخیر و هزینه‌های اساسی سرمایه‌گذاری برای سازمان‌ها بوده است. مدیریت انرژی یک ابزار مهم برای کمک به سازمان‌ها می‌باشد تا علاوه بر کاهش هزینه‌ها، در بلندمدت نیز به نتایج مطلوب خود دست یابند [۷].

مدیریت انرژی به بهبود کیفیت محیط زیست کمک می‌کند و به طور قابل ملاحظه‌ای مقدار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و در نتیجه روند گرم شدن زمین را کند می‌سازد. مدیریت انرژی با کاهش مصرف انرژی، بار الکتریکی بر روی نیروگاه‌ها را کاهش می‌دهد و نقش کلیدی در حرکت به سمت بهره‌وری اقتصادی انرژی ایفا می‌کند. از طریق مدیریت انرژی، میزان قابل توجهی انرژی و هزینه صرفه‌جویی می‌شود. مدیریت انرژی با ایجاد تمایز آشکار بین سود و زیان، زمینه ایجاد رقابت واقعی بین شرکت‌ها را فراهم می‌کند. همچنین در قالب تکنولوژی‌های جدید، مواد و فرآیندهای تولیدی جدید و استفاده از فناوری‌های جدید در تجهیزات و مواد اولیه برای تجارت و صنعت، به شرکت‌ها کمک می‌کند تا تولیداتشان را بهبود بخشند و کیفیت خدمات خود را ارتقا دهند. مدیریت انرژی در حل دیگر مسائل کلان نیز نقش به‌سزایی دارد؛ از جمله، ایجاد مشاغل جدید، بهبود تعادل هزینه‌ها با کاهش هزینه‌های انرژی، به حداقل رساندن اثرات وقفه‌های ایجاد شده در تأمین انرژی [۷].

۳-۲ نیروگاه مجازی

تولید انرژی به روش‌های سنتی، یعنی تولید در نیروگاه‌های مرکزی و انتقال انرژی از طریق خطوط انتقال و توزیع در مراکز مصرف، تلفات بالایی به همراه دارد. همچنین مسائل زیست محیطی و آلودگی‌های ناشی از تولید انرژی الکتریکی از سوخت‌های فسیلی و محدود بودن منابع این سوخت‌ها سبب شده تا گرایش به سمت تولیدات پراکنده^۱ به صورت روز افزونی افزایش یابد. سیاست کنونی استفاده از منابع تولید پراکنده صرفاً مبتنی بر گسترش استفاده از این منابع می‌باشد و به یکپارچه‌سازی آن‌ها توجهی نمی‌شود. تحت این شرایط، منابع تولید پراکنده برای سیستم قابل رویت نمی‌باشند و می‌توانند انرژی تولیدشده توسط واحدهای نیروگاهی متمرکز را جابجا نماید، در این صورت فراهم آوردن پشتیبانی‌های لازم برای سیستم و اقدامات امنیتی، ضروری بنظر می‌رسد. از این‌رو، نیروگاه‌های تولیدی مرکزی باید حفظ شوند تا این پشتیبانی را انجام دهند. با روند روبه رشد تمایل به سمت تولید پراکنده، این‌روش پشتیبانی از سیستم منجر به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سیستم می‌شود و در نهایت آهنگ رو به رشد استفاده از منابع تولید پراکنده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شبکه‌های توزیع آینده باید هزاران و حتی میلیون‌ها منبع تولید پراکنده و بار پاسخگو را یکپارچه‌سازی نمایند. در نتیجه، ارتباط هر واحد تولید پراکنده با اپراتور سیستم انتقال غیرممکن می‌باشد، زیرا ایجاد زیرساخت‌های فناوری اطلاعات در این چنین سیستم قدرتی هزینه‌های بالایی را در پی خواهد داشت. از این‌رو به منظور بهره‌مندی از مزایای تولید پراکنده و اجتناب از اثرات نامطلوب آن‌ها بر سیستم قدرت، باید الگوی جدیدی به منظور هماهنگی بین تولید پراکنده و بارهای انعطاف‌پذیر، محقق شود. ایجاد یک مدیریت نامتمرکز برای هماهنگ‌سازی منابع تولید پراکنده، می‌تواند راه‌حل مناسبی باشد تا منابع تولید پراکنده در سیستم قدرت را تحت یک الگوی کنترلی پویا، هماهنگ‌سازی نماید تا به این منابع اجازه دهد در بازارهای انرژی و خدمات جانبی شرکت نمایند. این

¹ Distributed Generation

هدف با مفهوم نیروگاه مجازی^۱ قابل دستیابی است. نیروگاه مجازی منابع تولید پراکنده را به منظور تبادل انرژی الکتریکی یا فراهم آوردن پشتیبان سیستم به یکدیگر پیوند می‌دهد [۸, ۹].

نیروگاه مجازی، راه‌حلی برای مدیریت ارتباط بین منابع سنتی تولید انرژی و تولیدات پراکنده می‌باشد. با تجمیع منابع تولید پراکنده در قالب نیروگاه مجازی، انرژی تولیدشده حتی از ژنراتورهای کوچک، در بازارهای انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این مقدار کوچک می‌تواند در ارتقا سیستم قدرت مورد استفاده قرار گیرد. همچنین دسترس‌پذیری و رویت‌پذیری منابع در بازارهای برق ممکن می‌شود و سیستم قدرت از تمام ظرفیت موجود بهره می‌برد و در نتیجه بهره‌وری سیستم افزایش می‌یابد [۱۰].

مفهوم نیروگاه مجازی نخستین بار به منظور بهبود رویت‌پذیری منابع تولید پراکنده، ایجاد ارتباط بین اجزای محلی سیستم قدرت، پویا کردن راهبردهای کنترل تولید پراکنده و استفاده بهینه از انرژی الکتریکی در دسترس، طرح شد [۱۱]. نیروگاه مجازی ظرفیت منابع تولید پراکنده^۲ بیشتر موجود در شبکه را هماهنگ می‌کند و یک مشخصه منحصربفرد از تمام مشخصه‌های منابع تولید پراکنده ایجاد می‌کند تا به‌عنوان یک مجموعه واحد در سیستم قدرت عمل نماید. دو نوع نیروگاه مجازی وجود دارد، نیروگاه مجازی تجاری^۲ و نیروگاه مجازی فنی^۳. نیروگاه مجازی تجاری در مجموعه‌های تجاری عمل می‌کند و مستقل از وضعیت عملکرد شبکه می‌باشد [۸]. نیروگاه مجازی یا شرکت مجازی^۴ به‌صورت مجموعه‌ای از واحدهای تولیدی پراکنده، بارهای انعطاف‌پذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی تعریف می‌شود که به‌صورت یک مجموعه واحد عمل می‌کنند. منابع تولیدی در نیروگاه مجازی می‌تواند شامل منابع سوخت فسیلی و منابع انرژی تجدیدپذیر باشند. هدف اولیه^۴ یک نیروگاه مجازی، هماهنگ

¹ Virtual Power Plant

² Commercial VPP(CVPP)

³ Technical VPP(TVPP)

⁴ Virtual Utility

ساختن تولید و مصرف اجزای تشکیل دهنده خود می‌باشد تا عملکرد آن‌ها را با بیش‌ترین بازدهی همراه سازد [۹].

۱-۳-۲ اجزای نیروگاه مجازی

اجزای اصلی نیروگاه مجازی عبارتند از: نیروگاه‌های قابل کنترل^۱، بارهای انعطاف‌پذیر^۲، تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی و واحدهای تولید تصادفی [۹].

۱-۳-۱-۱ نیروگاه‌های قابل کنترل

نیروگاه‌های قابل کنترل در یک نیروگاه مجازی، ایستگاه‌های کوچک تولید توان هستند که از منابع سوخت فسیلی مانند نفت یا گاز طبیعی برای تولید برق استفاده می‌کنند. از جمله اینگونه ژنراتورها می‌توان به دیزل ژنراتور و توربین‌های گازی اشاره نمود. بیو دیزل^۳ یا بیوگاز^۴ نیروگاه‌های قابل کنترلی هستند که پایه سوختی آن‌ها زیست توده^۵ می‌باشد [۹].

۱-۳-۱-۲ بارهای انعطاف‌پذیر

افزایش اوج بار، مصرف‌کنندگان را ناچار می‌سازد که به سمت تولیدات جدید روی آورند. این مشکلات سبب شد که نه تنها به بار به‌عنوان یک متغیر تصادفی مستقل از شبکه نگاه نشود، بلکه از ابزار اقتصادی و مهندسی برای کنترل پروفایل بار بهره گرفته شود. در واقع نکته کلیدی این است که اکثر بارهای الکتریکی، درجه‌ای از انعطاف‌پذیری را دارند که در ماهیت متغیر شبکه قابل کنترل می‌باشد [۱۲].

طبق تعریف، بار منعطف شامل مصرف‌کنندگانی می‌شود که در قالب ساختاری ارتباطی و کنترلی، الگوهای مصرفی خود را تنظیم می‌کنند. انعطاف‌پذیری تقاضا در نیروگاه مجازی با دو عامل صورت

¹ Dispatchable power plant

² Flexible load

³ Biodiesel

⁴ biogas

⁵ Biomass

می‌پذیرد؛ سیگنال‌های قیمت و کنترل مستقیم بار. در واقع یکی از روش‌های منعطف نمودن بارهای الکتریکی، تلفیق قیمت گذاری پویا با مدیریت توان می‌باشد. یک بار انعطاف‌پذیر این قابلیت را دارد که در پاسخ به قیمت‌های بالای بازار یا مشوق‌های بازار، مصرف برق خود را کاهش یا افزایش دهد و یا اینکه مصرف خود را به تعویق بیندازد. در ساده‌ترین حالت، مدل یک مصرف‌کننده انعطاف‌پذیر، شبیه واحد نیروگاهی قابل کنترل می‌باشد [۷، ۹].

۳-۱-۳ تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی

واحد ذخیره‌ساز انرژی عبارت از تمام تجهیزاتی است که انرژی الکتریکی را ذخیره می‌نمایند تا از این انرژی در زمان دیگری که مورد نیاز می‌باشد، استفاده شود. بعبارت دیگر، ذخیره‌سازها، انرژی الکتریکی را از یک زمان به زمان دیگر (شیفت زمانی) انتقال می‌دهند تا استفاده بهتری از آن شود. نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای، چرخ طیاره‌های سرعت پایین و باتری‌های اسید-سرب جزء اولین تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی می‌باشند که در سیستم قدرت بکار گرفته شده‌اند. امروزه تکنولوژی ذخیره انرژی وسعت بیشتری یافته و حیطه‌هایی همچون خازن‌های شیمیایی، هوای فشرده، آهنرباهای ابررسانا و سلول‌های سوختی را در بر گرفته است [۹].

۴-۱-۳ واحدهای تولید تصادفی

واحدهای تولید تصادفی تجهیزاتی هستند که از پتانسیل طبیعی آب و هوایی، انرژی برق تولید می‌کنند. مثال‌هایی از این دست عبارتست از توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی. انرژی خروجی این منابع، ماهیتی غیرقطعی دارد. زیرا میزان توان خروجی از این چنین منابعی وابسته به پدیده‌های آب و هوایی می‌باشد. در نتیجه این‌گونه منابع از نظر میزان تولید انرژی غیرقابل کنترل هستند و نیاز به منابع پشتیبانی دارند [۹].

۴-۲ شبکه هوشمند

تغییرات آب و هوایی و مسائل زیست محیطی، شکل صنعت برق آینده را تغییر داده است. در سال‌های اخیر، به دلیل گرایش جهانی به سمت مسائل سازگار با محیط زیست، سیستم‌های تولید توان به سمت منابع تجدیدپذیر انرژی سوق داده شده است و از این‌رو پیچیدگی و اندازه سیستم‌های قدرت روز به روز در حال گسترش است. در نتیجه ایجاد تغییر و توسعه فناوری در روند تولید، انتقال و توزیع توان ضروری می‌باشد. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی، استفاده از مفهوم شبکه هوشمند^۱ می‌باشد که هم از مزایای تولیدات تجدیدپذیر بهره‌بردار و هم دارای فناوری ارتباطات و محاسبات پیشرفته برای ارسال انرژی ایمن و با قابلیت اطمینان بالا باشد [۱۳].

باتوجه به ماهیت منابع و بارهایی که یک نیروگاه مجازی را تشکیل می‌دهند، استفاده از شبکه هوشمند امری ضروری و غیرقابل اجتناب می‌باشد. شبکه هوشمند عبارت است از یک سیستم الکتریکی انتقال و توزیع که از اطلاعات دوطرفه، فناوری ارتباط سایبری ایمن و محاسبات هوشمند در یک روش یکپارچه در سراسر سیستم از تولید تا مصرف، استفاده می‌کند تا جریان انرژی در سیستم را تشخیص، نظارت و مدیریت نماید و به صورت زمان حقیقی تصمیمات لازم را اتخاذ نماید. شبکه هوشمند، قابلیت‌های زمان حقیقی تولید، انتقال و توزیع تجهیزات را تحلیل می‌کند و به بهره‌بردارهای سیستم قدرت اجازه می‌دهد تعادل بین تولید و نیازمندی بار را در بهینه‌ترین روش مدیریت نمایند. شبکه هوشمند در جهت حفظ انعطاف‌پذیری، پایداری و امنیت سیستم به سمت استانداردهای تنظیمی عمل می‌کند و همزمان با حداکثر نمودن تولید توان تجدیدپذیر متصل به شبکه، اثرات مخرب زیست محیطی را به حداقل می‌رساند [۱۳، ۱۴].

شبکه هوشمند تأثیرات زیادی بر اقتصاد، اجتماع و محیط زیست دارد. سرمایه‌گذاری در یک شبکه هوشمندتر، مقادیر قابل توجهی بازگشت سرمایه را در سیستم قدرت در پی خواهد داشت. حتی یک

¹ Smart grid

تغییر کوچک که در راستای توسعه شبکه هوشمند باشد، منجر به صرفه‌جویی‌های اقتصادی کلانی می‌شود [۱۴].

۱-۴-۲ ساختار شبکه هوشمند

یک شبکه هوشمند شامل تجهیزاتی همچون مبدل‌های بزرگ توان، سیستم اتوماسیون کنترل، ساختار ارتباطی مدرن، تکنولوژی‌های اندازه‌گیری هوشمند و تکنیک‌های مدیریت انرژی پیشرفته می‌باشد. شبکه‌های هوشمند، نسل بعدی سیستم‌های قدرت را شامل می‌شود، زیرا توان تولیدی در شبکه هوشمند، ایمنی و قابلیت اطمینان بالاتری دارد و اطلاعات بین مصرف‌کنندگان، تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان توان به کمک فناوری ارتباطات و سیستم‌های محاسبات دیجیتال به اشتراک گذاشته می‌شود [۱۵].

اجزای شبکه هوشمند از طریق مسیر ارتباطی به یکدیگر متصل می‌شوند و حسگرهای سیستم، ارتباط بین آن‌ها را برای انتقال و توزیع در مناطق مسکونی، صنعتی و تجاری فراهم می‌آورد. در شبکه هوشمند، اطلاعات قابل اعتماد و زمان‌حقیقی، عامل اصلی برای ارسال انرژی قابل اطمینان از تولیدکنندگان برای مصرف‌کنندگان می‌باشد. معماری شبکه هوشمندی که توسط موسسه ملی استانداردها و فناوری^۱ ارائه شده است، ۷حیطه را شامل می‌شود که عبارتند از سیستم قدرت، انتقال، توزیع، مصرف‌کنندگان، ارائه دهنده خدمات، بهره‌بردارها و بازارهای برق [۱۵].

۲-۴-۲ نحوه عملکرد شبکه هوشمند

در شبکه هوشمند، اندازه‌گیرهای هوشمند، میزان مصرف انرژی را شناسایی می‌کنند و جزئیات انرژی مصرفی شبکه را برای سیستم مرکزی ارسال می‌کنند تا در مورد میزان انرژی موردنیاز شبکه تصمیم‌گیری نماید. اندازه‌گیرهوشمند، اطلاعات توان مصرفی ساعتی را جمع‌آوری و خطاها و

¹ National Institute of Standards and Technology(NIST)

اخطارهای ضروری را با استفاده از فن‌آوری GPRS^۱ برای سیستم مرکزی ارسال می‌کند. سپس تأمین‌کنندگان انرژی شبکه هوشمند، میزان انرژی مورنیاز هر یک از اجزای شبکه را تأمین می‌کنند. در شبکه هوشمند از دو نوع شبکه ارتباطی خانگی^۲ و سراسری^۳ استفاده می‌شود. شبکه خانگی به منظور ارتباط مصرف‌کنندگان با اندازه‌گیرهای هوشمند بکار می‌رود و شبکه سراسری نیز ارتباط بین اندازه‌گیرهای هوشمند، تأمین‌کنندگان انرژی و سیستم مرکزی را برقرار می‌سازد [۱۵].

۵-۲ عدم قطعیت در نیروگاه مجازی

منابع متغیر موجود در سیستم همچون منابع انرژی تجدیدپذیر، بار، قیمت انرژی و در دسترس بودن تجهیزات، عدم قطعیت‌هایی در تصمیم‌گیری حوزه بهره‌برداری سیستم بوجود می‌آورند. از آنجا که نیروگاه مجازی در بازار انرژی مشارکت دارد، متعهد به تأمین نیازهای بازار می‌باشد. پس در بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم، برای برنامه‌ریز و کنترل کننده مهم است که ماهیت عدم قطعیت‌های نیروگاه مجازی را در نظر بگیرد [۱۶].

سیستم قدرت همواره در معرض پیشامدهای مختلفی قرار دارد. از جمله پیشامدهایی که امکان وقوع آن‌ها برای یک نیروگاه مجازی محتمل می‌باشد می‌توان به خروج یا از دست دادن خطوط انتقال، فیدرهای توزیع، واحدهای تولیدی یا هر یک از تجهیزات سیستم اشاره نمود. وقوع پیشامدها می‌تواند به صورت خروج یک یا چند المان باشد. خروج تجهیزات به دو علت واقع می‌شود. دلایل داخلی مانند خرابی عایق تجهیزات، افزایش دمای بیش از حد یا عملکرد اشتباه رله‌های سیستم، و دلایل خارجی که عمدتاً شرایط آب و هوایی مسبب آن‌ها می‌باشد. تمام این موارد دلایلی هستند که موجب بوجود آمدن عدم قطعیت در شبکه می‌شوند [۱۷].

منابع عدم قطعیت در نیروگاه مجازی به شرح زیر است:

¹ General Packet Radio Service

² Home Area Network(HAN)

³ Wide Area Network

۱. بار الکتریکی یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در این سیستم‌ها می‌باشد. امکان پیش‌بینی بارهای با ماهیت ثابت با دقت قابل قبولی وجود دارد اما بارهای انعطاف‌پذیر به راحتی قابل پیش‌بینی نمی‌باشند. زیرا به تغییرات ساعتی قیمت انرژی، شرایط آب و هوایی و تصمیم‌هایی که مصرف‌کنندگان برای میزان مصرفشان اتخاذ می‌کنند، وابسته می‌باشند.

۲. تولیدات تجدیدپذیر یکی دیگر از منابع ایجاد عدم قطعیت در سیستم می‌باشند. بطور معمول در نیروگاه‌های مجازی ظرفیت قابل توجهی از تولیدات تجدیدپذیر وجود دارد. مقدار توان خروجی روزانه این منابع از یک الگوی خاص و تکراری پیروی نمی‌کند. میزان دقت پیش‌بینی تولیدات تجدیدپذیر به شدت وابسته به محل نصب آن‌ها و شرایط آب و هوایی می‌باشد.

۳. از دیگر عدم قطعیت‌هایی که یک سیستم الکتریکی کوچک با آن سروکار دارد، قیمت انرژی می‌باشد. زیرا عوامل بسیاری در تعیین میزان قیمت انرژی دخیل می‌باشد، که این عوامل عبارتند از: الف) قیمت شرکت‌های تولیدکننده انرژی، ب) تراکم و تلفات شبکه انتقال و ج) مصرف‌کنندگانی که قابلیت پاسخ به قیمت‌های بازار را دارند (بارهای انعطاف‌پذیر). قیمت بازار (یعنی قیمت برق زمان حقیقی در شبکه) مهم‌ترین منبع عدم قطعیت در مسئله برنامه‌ریزی شبکه‌های کوچک الکتریکی می‌باشد، زیرا تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی برنامه توزیع توان منابع تولید پراکنده دارد.

۴. آخرین نوع عدم قطعیت، عدم قطعیت پیشامدهای سیستم می‌باشد. زیرا زمان وقوع و طول مدت اینچنین اختلالاتی برای سیستم ناشناخته است. پیشامدهای نیروگاه مجازی از نوع خروج اجزای آن و خروج اجزای شینه اصلی می‌باشد. خروج شینه اصلی منجر به جزیره‌ای شدن نیروگاه مجازی می‌شود. در صورت وقوع اختلال در شبکه اصلی، نیروگاه مجازی باید به حالت جزیره‌ای تغییر وضعیت دهد. هنگام رفع اختلال، نیروگاه مجازی باید بتواند در این وضعیت مجدداً با مطلوبیت سیستم همگام^۱ شود [۱۸].

¹ Synchronize

۲-۶ رزرو چرخان

استفاده از رزرو چرخان، اولین راهکار حفظ سیستم پس از وقوع پیشامدهای سیستم می‌باشد. این پیشامدها می‌تواند از دست دادن پیش‌بینی نشده بخش مهمی از تولید یا از دست دادن خطوط انتقال مهم سیستم، باشد. افزایش استفاده از رزرو چرخان، می‌تواند احتمال و شدت حذف بار را کاهش دهد. رزرو چرخان در پی وقوع پیشامد در سیستم به سرعت فعال شده تا سیستم به عملکرد عادی خود ادامه دهد. رزرو چرخان (رزرو هماهنگ یا واکنشی) بخشی از ظرفیت استفاده نشده واحدهای شبکه می‌باشد که در صورت نیاز به سرعت قابل دسترسی است [۱۹، ۲۰].

۲-۷ مروری بر کارهای انجام گرفته

مدیریت انرژی همواره مسئله‌ای اساسی در بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی بوده است. با ورود منابع انرژی پراکنده تصادفی و منابع ذخیره انرژی در ریزشبکه‌ها، مسئله مدیریت انرژی با چالش‌ها و پیچیدگی‌های جدیدی مواجه شده است. سیستم مدیریت انرژی شامل تمامی مراحل طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی می‌باشد تا در نهایت منجر به مصرف بهینه انرژی شود. با افزایش قیمت انرژی، مدیریت بهینه انرژی اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند [۲۱].

امروزه با پیشرفت شبکه‌های هوشمند، امکان ایجاد ارتباط دوسویه در سیستم‌های انرژی فراهم شده است، از طرفی با توجه به نقش مهم سیستم اتوماسیون در امنیت این سیستم‌ها، کاربرد شبکه هوشمند در سیستم‌های انرژی سرعت بیش‌تری یافته است. شبکه‌های برق نیز می‌توانند به ساختارهای ارتباط دوطرفه، ابزار اندازه‌گیری پیشرفته و الگوریتم‌های کنترلی روی آورند. همچنین با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده همچون منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع ذخیره انرژی در ریزشبکه‌ها، به منظور مدیریت این منابع، می‌توان آن‌ها را با بارهای پاسخگو به قیمت یکپارچه‌سازی نمود تا به‌عنوان یک نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی شرکت نماید، که قابلیت خرید/فروش انرژی از/به شبکه اصلی را در زمان‌های مناسب داشته باشد. در نتیجه نیروگاه مجازی با دو عدم قطعیت یکی ناشی از

قیمت بازار و دیگری تولید تصادفی منابع تولید پراکنده مواجه می‌باشد که این امر، مدیریت انرژی نیروگاه مجازی را با چالش‌های جدیدی مواجه می‌سازد. تحت این شرایط، لازم است سیستم مدیریت انرژی از قابلیت‌های شبکه هوشمند برای کنترل عدم قطعیت و بهبود بهره‌وری تولید و مصرف انرژی، بهره‌برد [۲۱].

۱-۷-۲ مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی

در مرجع [۲۲] مسأله قیمت‌دهی نیروگاه مجازی شامل بارهای پاسخگو، واحد ذخیره‌ساز و نیروگاه بادی به کمک مدل مقاوم مطالعه شده است. این نیروگاه مجازی مجهز به شبکه هوشمند است و قابلیت خرید و فروش انرژی را در بازارهای روز قبل و زمان حقیقی دارد. مدیریت انرژی این نیروگاه مجازی تحت فرآیندی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است. در مرحله اول، تصمیمات در خصوص خرید یا فروش انرژی در بازار روز پیش‌رو اتخاذ می‌شود. پس از اطلاع از تصمیمات روز پیش‌رو، در مورد بازار زمان حقیقی و برای هر ساعت روز تصمیم‌گیری می‌شود. فرض بر این است که نیروگاه مجازی بطور مستقل قیمت‌ها را تعیین نمی‌کند بلکه پذیرنده قیمت در این دو بازار است. بهینه‌سازی مقاوم برای غلبه بر عدم قطعیت‌های تولید بادی و قیمت انرژی بکار گرفته می‌شود، که این دو عامل عدم قطعیت با استفاده از بازه‌های اطمینان بیان می‌شوند.

در [۲۳] به منظور برنامه‌ریزی واحدهای حرارتی و الکتریکی در یک نیروگاه مجازی اندازه بزرگ، در روز پیش‌رو، الگوریتمی ارائه می‌شود تا سود روزانه مجموعه حداکثر شود. این مجموعه شامل تعداد زیادی تولیدکننده و مصرف‌کننده کوچک می‌باشد که در یک منطقه وسیع گسترده شده‌اند. همچنین مجموعه دارای ذخیره‌سازهای انرژی و منابع تولیدی الکتریسیته-حرارت می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن محل فیزیکی هر منبع تولید پراکنده در شبکه کلی و ظرفیت آن‌ها و با مدیریت منابع انرژی پراکنده موجود در یک نیروگاه مجازی، به دنبال حداکثر نمودن سود روزانه می‌باشد. مدل پیشنهادی، قابلیت در نظر گرفتن قیود پخش توان شبکه، برنامه‌ریزی در عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه،

نرخ‌های واقعی برای تولید و مصرف و پاداش‌ها به منظور پیش‌بینی دقیق الگوهای توانی را دارا می‌باشد.

به منظور استفاده از تقاضای انعطاف‌پذیر در سیستم‌های توزیع ولتاژ پایین با استفاده از میزان گرمای ساختمان، روشی در [۲۴] ارائه شده است که مصرف توان را با استفاده از گرمایش الکتریکی ایجادشده در ساختمان هوشمند به تعویق می‌اندازد. توان مصرف شده برای گرمایش، توسط یک نیروگاه مجازی کنترل می‌شود، که یک نقطه تنظیم برای مصرف انرژی به سیستم مدیریت ساختمان هوشمند ارسال می‌کند. در این مرجع، یک مسئله بهینه‌سازی ارائه می‌شود تا توان‌های تولیدی از گرماسازهای برقی، نقطه تنظیم توان را دنبال نمایند که این نقاط براساس میزان آسایش درون ساختمان می‌باشد و توسط مصرف‌کنندگان ساختمان تنظیم می‌شود.

با پیشرفت‌های اخیر در زمینه ریزشبکه‌ها و منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، نیاز به سیستم‌های مدیریت انرژی خانه، بیش از پیش اهمیت یافته است. به‌علت مشخصه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های فعلی مدیریت انرژی خانه کارآمد نمی‌باشند و نمی‌توانند عملکرد قابل قبولی داشته باشند. بدین سبب یک سیستم مدیریت انرژی خانه ابری^۱ در مرجع [۲۵] معرفی شده است. این سیستم براساس نوع تجهیزات خانگی و وضعیت فعلی آن‌ها، یک اولویت دینامیکی برای آن‌ها در نظر می‌گیرد. براساس اولویت تعیین شده، استفاده از وسیله خانگی با در نظر گرفتن قابلیت انرژی تجدیدپذیر موجود، برنامه‌ریزی می‌شود. از جمله اهداف این روش عبارتست از: ۱. حداکثر نمودن سود منابع انرژی تجدیدپذیر ۲. کنترل بهینه تجهیزات خانه براساس الگوهای همچون رفتار و خصوصیات اهالی خانه، مصرف انرژی و مواردی از این دست.

معرفی یک سیستم مدیریت انرژی قطعی برای یک ریزشبکه که شامل تولیدکنندگان خورشیدی، واحدهای ذخیره و یک میکروتوربین گازی می‌باشد، اساس روش ارائه شده در [۲۶] می‌باشد. در این

¹ Cloud home energy management system

مرجع، در مجموعه ریزشبهه، نرم افزارهای کاربردی خانه با واحدهای تولیدی متعارف توسط یک سیستم مدیریت مرکزی هماهنگ می‌شوند. سیستم معرفی شده براساس توابع مختلف سازمان یافته است و براساس تفاوت اهداف مدیریت، روش نظارت انرژی پیشنهادی در دو بخش اجرا می‌شود: یک مدیریت انرژی مرکزی برای کل ریزشبهه به منظور مدیریت انرژی بلندمدت، و یک مدیریت توان محلی در سمت مصرف‌کننده به منظور تعادل توان کوتاه‌مدت. برنامه‌ریزی توان براساس پیش‌بینی تولید توان خورشیدی و پیش‌بینی بار، طراحی شده است. از آنجا که اکتساب داده‌ها و اطلاعات از وضعیت هر منبع (مانند ظرفیت انرژی و توان تولیدی زمان‌حقیقی)، برای سیستم مدیریت انرژی ریزشبهه بسیار مهم می‌باشد، سیستم‌های مرکزی و محلی، داده‌ها و دستورالعمل‌ها را از طریق یک شبکه ارتباطی با یکدیگر تبادل می‌کنند. همچنین دستورات کنترلی از مدیریت انرژی مرکزی برای ناظر محلی فرستاده می‌شود. براساس منابع توان شبکه، توابعی برای مدیریت محلی پخش توان بین منابع مختلف طراحی شده‌اند.

استفاده از روش‌های آماری و تعرفه‌های مربوط به الگوی مصرف توان به منظور حداقل نمودن هزینه انرژی الکتریکی، روش پیشنهادی در مرجع [۲۷] می‌باشد. روش ارائه شده بدینصورت می‌باشد:

۱. یکپارچه‌سازی کنترل انرژی موجود و بارهای الکتریکی: یک روش کنترل یکپارچه برای انرژی موجود و بارهای الکتریکی از طریق فرآیند برنامه‌ریزی سه مرحله‌ای با ترکیبی از پیش‌بینی، کنترل تولید و کنترل تقاضا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. تحلیل عددی تأمین انرژی موردنیاز صنعت: هزینه‌های انرژی تأمین‌کنندگان انرژی (شبکه قدرت، ذخیره‌سازی غیرفعال، واحدهای الکتریکی-حرارتی و خورشیدی) برحسب هزینه‌های برق و سوخت مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۳. انعکاس مطلوبیت مصرف‌کننده به مطلوبیت سمت تقاضا؛ از دیگر اقدامات در این زمینه، مدل‌کردن مطلوبیت سمت تقاضا با استفاده از اختلاف بین رضایتمندی مصرف‌کننده و هزینه انرژی می‌باشد تا مصرف‌توان تجهیزات با هزینه کم و مطلوبیت بالا همراه باشد.

۴. غلبه بر خطای پیش‌بینی منبع انرژی و بار الکتریکی؛ به منظور کنترل خودکار تقاضای زمان‌حقیقی، یک منحنی-مشخصه براساس برنامه‌ریزی ارائه می‌شود، که خطاهای پیش‌بینی را بطور موثری کاهش می‌دهد.

۲-۷-۲ مدیریت خروج^۱

خروج واحدهای تولیدی بزرگ منجر به تحمیل بارهای بیش از حد بر روی سیستم قدرت می‌شود. این اضافه‌بارهای تحمیلی بر سیستم قدرت، اثرات نامطلوبی بر عمر تجهیزات سیستم از جمله ترانسفورماتورها دارد. در مرجع [۲۸]، یک روش جدید پاسخگویی بار ارائه می‌شود که با یک مدل بهینه‌سازی، هنگام وقوع پیشامدها، بار را محدود می‌کند. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، ترکیبی از بهترین اقدامات اصلاحی شامل پاسخگویی بار، قطع بار و انتقال بار به فیدهای دیگر را انتخاب می‌کند تا هنگام وقوع پیشامدها، اضافه بار وارد بر ترانسفورماتورها را کاهش دهد.

باوجود تولیدات پراکنده موجود در سیستم‌های توزیع امروزه، این سیستم از شکل کم‌اثر گذشته به یک سیستم پویا تبدیل شده است. از این‌رو، سیستم توزیع نه تنها به‌عنوان یک بار می‌تواند در سیستم قدرت عمل نماید، بلکه به‌عنوان یک نیروگاه مجازی در نظر گرفته می‌شود که بارهای محلی را تأمین می‌نماید و حتی قابلیت تزریق توان به سیستم انتقال را نیز دارا می‌باشد. در مرجع [۲۹]، یک روش سلسله‌مراتبی به منظور ارزیابی اثر تغییر نقش سیستم توزیع در برآورد خطای وارده بر سیستم قدرت، معرفی شده است. در این‌روش، بعد از وقوع یک پیشامد، منابع تولید پراکنده قادر به تأمین بارهای حیاتی می‌باشند. مدل احتمال گسسته برای شبیه‌سازی خروج منابع تولید پراکنده بکار

¹ Outage management

گرفته شده است. ظرفیت در دسترس موجود، به عنوان یک قید کلی به منظور تضمین سطح امنیتی سیستم توزیع که به قابلیت اطمینان بالایی نیاز دارد، بکار می‌رود. به منظور استخراج شاخص‌های ریسک با در نظر گرفتن جزئیات شبکه توزیع، یک محاسبه بازگشتی بین سیستم انتقال و شبکه توزیع اجرا می‌شود. همچنین در این مرجع، اثرات برخی عوامل مانند ظرفیت تولیدات پراکنده، پراکندگی، محل و احتمالات خروج اجزا بر ریسک سیستم بررسی می‌شود.

برای تشخیص مصرف غیرعادی و جعلی برق، شبکه‌های موازی فازی^۱ مرتبه کسری خودهمگام ساز مبتنی بر خطا، در مرجع [۳۰] پیشنهاد شده است، تا خطاهای غیرفنی و اتفاقات خروج در سیستم تشخیص داده شود. در ساختار اندازه‌گیری هوشمند، سیستم اسپرات (سیستم‌های همزمان‌کننده اختلال) یک استخراج کننده مشخصه است، که تفاوت بین استفاده معمول و استفاده غیرعادی انرژی مانند وقوع خطا را ردیابی می‌کند. از این‌رو، مصرف غیرمجاز، خروج المان‌ها و فعالیت‌های ترمیم خدمات، قابل شناسایی می‌باشند. در این‌روش، شبکه‌های موازی فازی چندگانه، برای تعیین محل اغتشاش‌ها بکار گرفته می‌شوند.

به منظور مدیریت دوره‌های عملکرد وسایل الکتریکی پاسخگو، دوره‌های عملیاتی پیشنهادی برای تجهیزات غیرپاسخگو و برنامه‌ریزی سیکل شارژ/دشارژ خودرو برقی متصل به شبکه^۲ با در نظر گرفتن اولویت مشتریان مختلف در مرجع [۳۱] تعیین شده است. اولویت مشتریان در قالب هزینه پرداختی، هزینه قطع و قیود عملیاتی مختلف می‌باشد. الگوریتم طراحی شده به صورت برخط می‌باشد، بدین‌صورت که وسایل خانگی در ابتدا براساس هزینه پرداختی اولویت‌بندی می‌شوند و در صورت ایجاد وقفه در بار خانه، برنامه‌ریزی انجام گرفته، به منظور حداقل نمودن هزینه وقفه مشتری، به‌روز می‌شود. براساس قابلیت تجهیزات الکتریکی خانگی، خروج تجهیزات خانه با حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی قابل مدیریت می‌باشد.

¹ Fuzzy Petri net(FPN)

² Plug-in hybrid electric vehicle(PHEV)

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، اثرات قابل توجهی بر امنیت سیستم قدرت دارد. مرجع [۳۲] یک مدل ارزیابی تحلیل سود/امنیت حقیقی ارائه می‌دهد که قابلیت تشخیص ناپایداری منابع تجدیدپذیر انرژی را دارا می‌باشد و تاریخچه و همبستگی متغیرهای تصادفی را حفظ می‌کند. این مرجع، یک روش شبیه‌سازی ارائه می‌کند که با ایجاد شاخص‌های عینی، به برنامه‌ریزی‌های سیستم این امکان را می‌دهد که درمورد محل‌های مناسب نصب، روش‌های بهره‌برداری و انتخاب نوع، اندازه و ترکیب انرژی در سیستم‌های کوچک مجزایی که دارای تولید خورشیدی و بادی هستند، تصمیم‌گیری نماید. تحلیل درخت خطا^۱ برای ارزیابی قابلیت اطمینان ریزشکته جزیره‌ای شده در وضعیت اضطراری و خروج المان‌های حساس سیستم، روش ارائه شده در [۳۳] می‌باشد.

۳-۷-۲ عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در نیروگاه مجازی

در مرجع [۳۴]، الگوریتمی برای طراحی یک جبران ساز خازنی پیشنهاد شده است تا حاشیه پایداری اولین نوسان ریزشکته دارای تولید پراکنده از نوع ماشین‌های سنکرون را بهبود بخشد. برای تعیین حساسیت سرعت و زاویه روتور ژنراتورهای توزیع سنکرون نسبت به سوسپتانس جبران کننده، از مفهوم تحلیل حساسیت مسیر استفاده می‌شود. با وقوع یک پیشامد خطا، حداقل سوسپتانس موردنیاز و محل جبران کننده تعیین می‌شوند تا پایداری اولین نوسان ژنراتور سنکرون حاصل شود. روش پیشنهادی برای ریزشکته‌های با تعداد دلخواه ژنراتور سنکرون توزیع، انواع خطاها و همچنین در عملکردهای مختلف ریزشکته از جمله اتصال به شبکه و حالت جزیره‌ای، قابل استفاده می‌باشد.

در صورت وقوع پیشامد برای شبکه اصلی، ریزشکته‌ها باید این قابلیت را داشته باشند که در حالت جزیره‌ای به عملکرد خود ادامه دهند. با اتصال/قطع ریزشکته به/از شبکه اصلی، ممکن است جریان گذرای زیادی بوجود آید که برای سیستم نامطلوب باشد. روش ارائه شده در [۳۵] با ارائه الگوریتمی جدید برای ایجاد جزیره‌های الکتریکی در سیستم‌های سه فاز دارای منابع تولید پراکنده، برای

¹ Fault tree analysis

جلوگیری از چنین اتفاقی طراحی شده است. این روش کنترلی، در یک مبدل توان متصل به شبکه که به‌عنوان یک عامل اتصال هوشمند عمل می‌کند، پیاده‌سازی می‌شود و مُد عملکردی آنرا براساس وضعیت اتصالات به شبکه، هماهنگ می‌سازد. بعلاوه، این روش عملکرد یک سوئیچ کنترل شده را مدیریت می‌کند. وظیفه این سوئیچ قطع/وصل نمودن ریزشبکه از/به شبکه اصلی می‌باشد. در وضعیت عملکرد عادی شبکه، مبدل منبع ولتاژ به‌عنوان ناظر شبکه عمل می‌نماید اما هنگامیکه برای شبکه خطایی رخ می‌دهد، عامل اتصال هوشمند، ریزشبکه را از شبکه اصلی قطع می‌کند.

به منظور مدیریت انرژی نیروگاه مجازی، یک مدل بهینه‌سازی مقاوم در مرجع [۳۶] ارائه شده است. نیروگاه مجازی معرفی شده در این مرجع شامل تولید خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و متقاضیان می‌باشد که در قالب ریزشبکه با یکدیگر در ارتباط هستند. این سیستم با پارامترهای غیرقطعی همچون تولید توان خورشیدی و قیمت انرژی مواجه است که این پارامترها به‌صورت بازه‌های اطمینان مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به تجهیز مجموعه به فناوری شبکه هوشمند، سیستم مدیریت انرژی این امکان را دارد که اطلاعات دریافتی از ریزشبکه را به روزرسانی نماید و به‌صورت زمان‌حقیقی از پیشامدهای سیستم همچون خروج خطوط و سایر اجزای شبکه مطلع شود و تصمیمات لازم درمورد میزان تبادل با شبکه اصلی، تولید توان خورشیدی و قطع بارها را اصلاح می‌نماید. اثر دقت پیش‌بینی پارامترهای غیرقطعی و پیشامدهای سیستم بر عملکرد روش بهینه‌سازی ارائه شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با نفوذ رو به رشد منابع تجدیدپذیر انرژی در ریزشبکه‌ها، عدم قطعیت‌های ناشی از این منابع در سیستم افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به اهمیت و تأثیر وقوع پیشامد در ریزشبکه‌ها، ایجاد یک منبع پشتیبان قطعی برای ریزشبکه امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی باید تعاملی بین منبع پشتیبان شبکه و میزان هزینه برقرار شود تا هم سیستم بتواند به عملکرد عادی خود، حتی در زمان وقوع پیشامد، ادامه دهد و هم از نظر اقتصادی امری قابل توجیه و پذیرفتنی باشد. از این‌رو، با بررسی

مراجع مختلف، ایجاد رزرو برای سیستم انرژی، راه حل مناسبی برای دستیابی به اهداف ذکر شده می‌باشد. برخی از مراجعی که به بررسی نقش رزرو در ارتقا قابلیت اطمینان سیستم پرداخته‌اند، در ادامه می‌آید:

با افزایش تعداد تولیدکنندگان توان تجدیدپذیر همچون توان بادی، پیش‌بینی دقیق مقدار کل توان تولیدشده تزریقی به سیستم قدرت توسط تولیدکنندگان بادی، دشوار می‌شود. برای غلبه بر این عدم قطعیت اضافه شده به سیستم، مرجع [۳۷] پیشنهاد ایجاد رزرو چرخان را ارائه نموده است. در این مرجع، روشی برای محاسبه مقدار بهینه رزرو چرخان پیشنهاد شده است تا بهره‌بردار سیستم نه تنها بتواند به خروج منابع تولیدی پاسخ مناسب دهد، بلکه همچنین بر خطاهای پیش‌بینی بار و تولید بادی نیز غلبه نماید. همچنین این روش با روش سنتی تعیین میزان رزرو (یعنی میزان رزرو به اندازه ظرفیت بزرگ ترین منبع باشد) مقایسه شده است.

برای تخمین میزان رزرو چرخان موردنیاز در ریزشکه‌ها، در مرجع [۱۹] یک روش تصادفی پیشنهاد شده است. در واقع میزان رزرو چرخان با مصالحه‌ای بین قابلیت اطمینان و مسائل اقتصادی برای ریزشکه تعیین می‌شود. احتمال خروج واحدها و عدم قطعیت‌های ناشی از بار و واحدهای غیرقابل کنترل (مانند منابع تجدیدپذیر انرژی)، در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش بار محاسباتی، عدم قطعیت‌های مختلف، یکپارچه‌سازی شده‌اند. در این مرجع، یک روش چندمرحله‌ای برای در نظر گرفتن مشخصه‌های ترکیبی پیشامد خروج واحدها پیشنهاد شده است. با روش ارائه شده، محاسبات تعیین نیازمندی رزرو چرخان، بهبود قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. مسئله بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط حل شده است.

در [۳۸]، روشی برای مدل‌سازی و تحلیل امنیت در یک ریزشکه دارای منابع تجدیدپذیر، بیان شده است. این طرح امنیتی با استفاده از رزرو افزایشی و کاهش پیاده‌سازی شده است، و باعث می‌شود فرکانس سیستم پس از وقوع یک خطای ناشی از پیش‌بینی بار، یا خطای ناشی از پیش‌بینی

تولید تجدیدپذیر، به وضعیت پایدار خود برگردد. روش پیشنهادی در یک ریزش شبکه واقعی که دارای تولید خورشیدی می باشد، پیاده شده است.

در مراجعی که به تعیین نیازمندی رزرو چرخان برای بهبود قابلیت اطمینان ریزش شبکه پرداخته اند، توجهی به بار انعطاف پذیر نشده است. مثلاً در مرجع [۱۹]، بار، قابلیت پاسخگویی به سیگنال های قیمت را ندارد و در نتیجه قادر به شرکت در تأمین رزرو مورد نیاز شبکه نمی باشد. در حالیکه در کار پیش رو، بار نقشی اساسی در تأمین رزرو مورد نیاز شبکه ایفا می کند.

در مرجع [۳۸]، پیشامدهای در نظر گرفته شده از نوع خطای پیش بینی بار یا تولید تجدیدپذیر می باشد و پیشامدهای خروج تجهیزات سیستم در نظر گرفته نشده است.

در اکثر مراجعی که مورد بررسی قرار گرفتند، مدیریت انرژی برای روز پیش رو در نظر گرفته شده است و به مدیریت انرژی زمان حقیقی توجهی نشده است.

استفاده از حداکثر ظرفیت سیستم انرژی برای تأمین رزرو چرخان، نکته قابل ملاحظه ای است که در بهبود امنیت سیستم نقش مهمی دارد، در حالیکه در مراجع ارائه شده، تنها از یک یا دو منبع برای تأمین رزرو استفاده شده است.

۸-۲ جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل، در ابتدا به بیان مفاهیمی همچون مدیریت انرژی و نیروگاه مجازی و اجزای آن، پیشامد و عدم قطعیت در سیستم قدرت پرداخته شد. در ادامه، کارهای انجام گرفته در زمینه مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با وجود پیشامد و عدم قطعیت در سیستم بررسی شد. با توجه به اینکه منابع تولید پراکنده از جمله منابع تجدیدپذیر انرژی به جزئی جدایی ناپذیر از سیستم های قدرت امروزی تبدیل شده اند، عدم قطعیت هایی که این منابع بر سیستم وارد می کنند، اجتناب ناپذیر است. بعلاوه، سیستم انرژی همواره در معرض پیشامدهای مختلفی همچون خروج خطوط و المان های مختلف

می‌باشد. توجه به این پیشامدها در ریزشکده‌ها و سیستم‌های الکتریکی کوچک، اهمیت ویژه‌ای دارد. بنابراین در مطالعات بررسی شده، به قابلیت اطمینان نیروگاه مجازی در پیشامدهای سیستم و عدم قطعیت‌هایی که بر آن عارض می‌شود توجه شده است. روش‌های مختلفی برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها و پاسخگویی مناسب در زمان وقوع پیشامد، مورد بررسی قرار گرفت. در برخی از مراجع بررسی شده، عدم قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر و بار در نظر گرفته شده است، اما در این مراجع بطور معمول بار را به‌عنوان یک مصرف‌کننده محض انرژی در نظر می‌گیرند و انعطاف‌پذیری بار و قابلیت پاسخگویی آن به قیمت‌های انرژی نادیده گرفته می‌شود. همچنین در اکثر مراجع مورد بررسی به قیود امنیتی ریزشکده همچون محدودیت توان انتقالی خطوط توجهی نشده است. راه‌حل‌های ارائه شده برای مقابله با پیشامدهای شبکه عمدتاً مبتنی بر روش‌های تصادفی و آماری می‌باشد. در اکثر این مراجع، افق برنامه‌ریزی برای سیستم مدیریت انرژی، بطور معمول روزپیش‌رو می‌باشد و به برنامه‌ریزی زمان‌حقیقی¹ برای سیستم مدیریت انرژی توجهی نشده است. در این پایان‌نامه به مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی در قالب یک سیستم انرژی الکتریکی کوچک پرداخته می‌شود. همچنین پیشامدهای سیستم انرژی و عدم قطعیت‌های مولفه‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

¹ Real time

فصل سوم

مدل‌سازی مسئله

مدیریت انرژی نیروگاه

مجازی

۱-۳ مقدمه

روند رو به رشد نفوذ منابع انرژی پراکنده به ویژه منابع تجدیدپذیر انرژی در سیستم قدرت، پیچیدگی این سیستم را به دنبال داشته است. کنترل یکپارچه و مرکزی اینگونه سیستمی، علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین در حوزه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، بسیار مشکل نیز می‌باشد. از این رو توجه به مدیریت غیرمتمرکز و هوشمند سیستم‌های انرژی الکتریکی کوچک، امری اجتناب ناپذیر می‌باشد.

با تغییر دیدگاه سنتی نسبت به متقاضیان انرژی الکتریکی از یک متغیر تصادفی مستقل از شبکه به عاملی قابل کنترل در شبکه قدرت، قابلیت جدیدی در سیستم قدرت ایجاد شده است. بعبارت دیگر با در نظر گرفتن مفهوم بار انعطاف‌پذیر و پاسخگو به قیمت، سیستم مدیریت انرژی نیز باید متناسب با این ویژگی بار عمل نماید. از این رو، برای هماهنگ نمودن منابع تولید پراکنده و متقاضیان پاسخگو به قیمت در نیروگاه مجازی و همچنین غلبه بر عدم قطعیت‌های ناشی از پیش‌بینی تولید تجدیدپذیر و قیمت انرژی، به یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند نیاز می‌باشد که با پایش وضعیت سیستم، درمورد میزان تولید انرژی از منابع پراکنده موجود در سیستم و همچنین میزان تبادل انرژی با شبکه اصلی تصمیم‌گیری نماید. این سیستم مدیریت انرژی هوشمند باید قادر به اداره کردن نیروگاه مجازی در هنگام وقوع پیشامدهای احتمالی همچون خروج المان‌های سیستم باشد.

در این فصل، مدل‌سازی سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی ارائه می‌شود. مدل معرفی شده پیشامدهای سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک را نیز در نظر می‌گیرد. همچنین از رزرو چرخان به منظور غلبه بر عدم قطعیت‌های سیستم استفاده شده است. مسئله بهینه‌سازی در قالب یک مسئله خطی مدل‌سازی شده است و قیودی همچون حداقل انرژی روزانه، حداقل و حداکثر توان موردنیاز بار، رزرو، بار قطع شده ساعتی، انرژی تأمین نشده روزانه، توان تولیدی واحدهای تولیدی، میزان تبادل

با شبکه اصلی، انرژی ذخیره شده در ذخیره‌سازها، تعادل توان در باس‌های سیستم و محدودیت خطوط را در نظر می‌گیرد.

در ادامه فهرست اختصارات بکار رفته در مدل‌سازی بیان می‌شود، در بخش ۳-۳ الگوریتم مدیریت انرژی زمان حقیقی برای نیروگاه مجازی توضیح داده می‌شود. سپس مدل ریاضی مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی با توضیحات مربوط به آن در بخش ۳-۴ آورده می‌شود. در زیربخش‌های ۳-۵ و ۳-۶ نیز به تشریح روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۳ فهرست نمادها و اختصارات

الف) اندیس‌ها

عنوان	علامت	عنوان	علامت
شاخص متقاضیان الکتریکی	j	شاخص واحد حرارتی	g
شاخص خط انتقال	k	شاخص ساعت	h, t, τ
شاخص سناریو	ω, ω'	شاخص ایستگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز	i
شاخص پیشامد	l	شاخص باس	n

ب) پارامترها

عنوان	پارامتر	عنوان	پارامتر
حداقل توان تولیدی توسط واحد حرارتی g	$P_g^{H,min}$	حداقل توان مصرف‌کننده j	$P_j^{D,min}$
حداکثر توان تولیدی توسط واحد حرارتی g	$P_g^{H,max}$	حداکثر توان مصرف‌کننده j	$P_j^{D,max}$
محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی در باس n	$P_n^{M,max}$	حداقل انرژی الکتریکی مصرفی مورد نیاز روزانه مصرف‌کننده j	$E_j^{D,min}$
حد بالای رزرو افزایشی فراهم شده توسط شبکه اصلی	$\overline{R}^{M,max}$	حد بالای کاهش توان مصرفی بار j	RD_j^D
حد بالای رزرو کاهشی فراهم شده توسط شبکه اصلی	$\underline{R}^{M,max}$	حد بالای افزایش توان مصرفی بار j	RD_j^U
هزینه رزرو ارائه شده توسط شبکه اصلی در زمان h	$C_h^{M,R}$	حد بالای رزرو افزایشی فراهم شده توسط بار j	$\overline{R}_j^{D,max}$
حداکثر انرژی الکتریکی قابل ذخیره در واحد	$E_i^{ST,max}$	حد بالای رزرو کاهشی فراهم شده	$\underline{R}_j^{D,max}$

ذخیره i		توسط بار j	
حداقل انرژی قابل ذخیره در واحد ذخیره i	$E_i^{ST,min}$	تابع مطلوبیت بار j ام در ساعت h	$U_{j,h}^D$
بازده تبدیل انرژی ورودی به واحد ذخیره ساز i	η_i^{in}	هزینه رزرو ارائه شده توسط بار j	$C_j^{D,R}$
بازده تبدیل انرژی خروجی از واحد ذخیره ساز i	η_i^{out}	ضریب جریمه کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه و حداقل توان مصرفی ساعتی	F^{sh}
حد بالای رزرو افزایشی فراهم شده توسط واحد ذخیره i	$\bar{R}_i^{ST,max}$	قیمت انرژی خورشیدی پیشنهادی توسط تولید کننده i ام در ساعت h	$C_{i,h}^{SO}$
حد بالای رزرو کاهش یافته فراهم شده توسط واحد ذخیره i	$\underline{R}_i^{ST,max}$	هزینه تولید انرژی برای واحد حرارتی g در ساعت h	$C_{g,h}^H$
هزینه رزرو ارائه شده توسط واحد ذخیره i در زمان t	$C_i^{ST,R}$	هزینه تعمیر و نگهداری واحد حرارتی g	$C_g^{H,o}$
ظرفیت خط k	$P_k^{L,max}$	هزینه رزرو چرخان ارائه شده توسط واحد حرارتی g	$C_g^{H,R}$
سوسپتانس خط k	B_k	هزینه روشن شدن واحد حرارتی g در ساعت h	$C_{g,h}^{H,u}$
ضریب تبدیل توان به انرژی	α	حد بالای افزایش توان تولیدی واحد حرارتی g	RH_g^U
احتمال وقوع سناریوی ω	ρ_ω	حد بالای کاهش توان تولیدی واحد حرارتی g	RH_g^D
تعداد تولید کنندگان حرارتی	N_H	حد بالای رزرو افزایشی فراهم شده توسط واحد حرارتی g	$\bar{R}_g^{H,max}$
تعداد متقاضیان در ارتباط با سیستم مدیریت انرژی	N_D	حد بالای رزرو کاهش یافته فراهم شده توسط واحد حرارتی g	$\underline{R}_g^{H,max}$
تعداد سناریو پیشامدهای شبکه	N_ω	تعداد تولید کنندگان توان خورشیدی	N_{SO}

ج) متغیرهای پیوسته

عنوان	متغیر	عنوان	متغیر
رزرو افزایشی برنامه ریزی شده، فراهم شده توسط شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{h,\omega}^{M,S}$	توان برنامه ریزی شده مصرفی بار j در ساعت h در سناریوی ω	$p_{j,h,\omega}^{D,S}$
رزرو کاهش یافته برنامه ریزی شده، فراهم	$\underline{r}_{h,\omega}^{M,S}$	توان زمان حقیقی مصرفی بار j در ساعت h	$p_{j,h,\omega}^D$

شده توسط شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω		تحت سناریوی ω	
رزرو افزایشی فراهم شده توسط شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{h,\omega}^M$	توان تأمین نشده از بار j در ساعت t در سناریوی ω	$p_{j,h,\omega}^{D,sh}$
رزرو کاهشی فراهم شده توسط شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{h,\omega}^M$	انرژی تأمین نشده روزانه از بار j در سناریوی ω	$e_{j,\omega}^{D,sh}$
رزرو ارائه شده توسط شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω	$r_{h,\omega}^M$	رزرو افزایشی برنامه‌ریزی شده، فراهم شده از بار j در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{j,h,\omega}^{D,S}$
توان برنامه‌ریزی تأمین شده توسط واحد ذخیره i در ساعت h	$p_{i,h}^{ST,S,out}$	رزرو کاهشی برنامه‌ریزی شده، فراهم شده از بار j در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{j,h,\omega}^{D,S}$
توان برنامه‌ریزی ذخیره شده در واحد ذخیره i در ساعت h	$p_{i,h,\omega}^{ST,S,in}$	رزرو افزایشی زمان حقیقی فراهم شده از بار j در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{j,h,\omega}^D$
توان تأمین شده توسط واحد ذخیره i در ساعت h	$p_{i,h,\omega}^{ST,out}$	رزرو کاهشی زمان حقیقی فراهم شده از بار j در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{j,h,\omega}^D$
توان ذخیره شده در واحد ذخیره i در ساعت h	$p_{i,h,\omega}^{ST,in}$	رزرو برنامه‌ریزی شده، فراهم شده از بار j در زمان h و سناریوی ω	$r_{j,h,\omega}^{D,S}$
انرژی خالص ذخیره شده برنامه‌ریزی شده در واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω	$e_{i,h,\omega}^{ST,S}$	توان زمان حقیقی تولیدی توسط واحد حرارتی g در ساعت h و سناریوی ω	$p_{g,h,\omega}^H$
انرژی خالص ذخیره شده در واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω	$e_{i,h,\omega}^{ST}$	توان تولیدی برنامه‌ریزی شده واحد حرارتی g در ساعت h و سناریوی ω	$p_{g,h,\omega}^{H,S}$
رزرو افزایشی برنامه‌ریزی شده، فراهم شده از واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,S}$	رزرو افزایشی فراهم شده توسط واحد حرارتی g در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{g,h,\omega}^H$
رزرو کاهشی برنامه‌ریزی شده، فراهم شده از واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,S}$	رزرو کاهشی فراهم شده توسط واحد حرارتی g در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{g,h,\omega}^H$
رزرو افزایشی زمان حقیقی، فراهم شده از واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω	$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST}$	رزرو افزایشی برنامه‌ریزی شده فراهم شده توسط واحد حرارتی g در ساعت h	$\bar{r}_{g,h,\omega}^{H,S}$
رزرو کاهشی زمان حقیقی، فراهم شده از واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST}$	رزرو کاهشی برنامه‌ریزی شده، فراهم شده توسط واحد حرارتی g در ساعت h و سناریوی ω	$\underline{r}_{g,h,\omega}^{H,S}$
رزرو برنامه‌ریزی شده فراهم شده توسط	$r_{i,h,\omega}^{ST,S}$	رزرو برنامه‌ریزی شده، فراهم شده توسط	$r_{g,t,\omega}^{H,S}$

واحد ذخیره i در ساعت h و سناریوی ω		واحد حرارتی g در ساعت h و سناریوی ω	
توان انتقالی برنامه‌ریزی شده از خط k در ساعت h و سناریوی ω	$p_{k,h,\omega}^{L,S}$	هزینه راه اندازی واحد حرارتی g در ساعت h	$C_{g,h}^{H,su}$
توان انتقالی از خط k در ساعت h و سناریوی ω	$p_{k,h,\omega}^L$	هزینه خاموش شدن واحد حرارتی g در ساعت h	$C_{g,h}^{H,sd}$
زاویه ولتاژ زمان حقیقی باسی که خط k به آن وارد می‌شود در ساعت h	$\delta_{d(k),h,\omega}$	توان برنامه‌ریزی شده فروخته شده(منفی)/خریده شده(مثبت) به/از شبکه اصلی در ساعت h ، باس n و سناریوی ω	$p_{n,h,\omega}^{M,S}$
زاویه ولتاژ برنامه‌ریزی شده باسی که خط k به آن وارد می‌شود در ساعت h و سناریوی ω	$\delta_{d^S(k),h,\omega}^S$	توان زمان حقیقی فروخته شده(منفی)/خریده شده(مثبت) به/از شبکه اصلی در ساعت h ، باس n و سناریوی ω	$p_{n,h,\omega}^M$
زاویه ولتاژ زمان حقیقی باسی که خط k از آن خارج می‌شود در ساعت h و سناریوی ω	$\delta_{o(k),h,\omega}$	توان برنامه‌ریزی شده فروخته شده(منفی)/خریده شده(مثبت) به/از شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω	$p_{h,\omega}^{M,S}$
زاویه ولتاژ برنامه‌ریزی شده باسی که خط k از آن خارج می‌شود در ساعت h و سناریوی ω	$\delta_{o^S(k),h,\omega}^S$	توان زمان حقیقی فروخته شده(منفی)/خریده شده(مثبت) به/از شبکه اصلی در ساعت h و سناریوی ω	$p_{h,\omega}^M$
زاویه ولتاژ باس n در ساعت h و سناریوی ω	$\delta_{n,h,\omega}$	زاویه ولتاژ برنامه‌ریزی شده در باس n در ساعت h و سناریوی ω	$\delta_{n,h,\omega}^S$

د) متغیرهای تصادفی

عنوان	متغیر	عنوان	متغیر
قیمت انرژی شبکه در ساعت h	C_h^M	توان خورشیدی تولیدکننده i در ساعت h و سناریوی ω	$p_{i,h,\omega}^{SO}$

ه) متغیرهای باینری

عنوان	متغیر	عنوان	متغیر
وضعیت واحد(خاموش/روشن) در ساعت h در مرحله توزیع توان	$u_{g,h,\omega}^H$	وضعیت واحد(خاموش/روشن) در ساعت h در مرحله تصمیم‌گیری	$u_{g,h,\omega}^{H,S}$

و) مجموعه‌ها

عنوان	علامت	عنوان	علامت
مجموعه باس‌های متصل به شبکه اصلی	Ω^M	مجموعه باس‌ها	Ω^B
مجموعه واحدهای حرارتی واقع در باس n	θ_n^H	مجموعه واحدهای دارای تولید توان خورشیدی و سیستم ذخیره واقع شده در باس n	θ_n^{SS}
مجموعه باس‌های متصل به واحد حرارتی	Ω^H	مجموعه باس‌های دارای واحد ذخیره و تولیدکننده خورشیدی	Ω^{SS}
مجموعه واحدهای حرارتی در دسترس در زمان h و سناریوی ω	$M_G(t, \omega)$	مجموعه مصرف‌کنندگان واقع شده در باس n	θ_n^D
		مجموعه مصرف‌کننده‌های متصل به باس n	Ω_n^D

ز) علائم

عنوان	علامت	عنوان	علامت
مقدار کمیت در وضعیت افزایشی	\bar{X}	امیدریاضی مقدار متغیر	$\{ \}$
مقدار کمیت در وضعیت کاهش	\underline{X}	مجموعه اعداد	$[]$

۳-۳ تشریح مسئله

مسئله، مدیریت انرژی زمان حقیقی برای یک نیروگاه مجازی شامل واحدهای تولید پراکنده از جمله ایستگاه خورشیدی، واحد تولیدی-حرارتی، واحد ذخیره انرژی و بارهای انعطاف‌پذیر می‌باشد. این مجموعه به شبکه اصلی نیز متصل می‌باشد و قابلیت خرید/فروش انرژی از/به شبکه اصلی را دارا می‌باشد. عدم قطعیت‌های حاکم بر شبکه ناشی از تولید توان خورشیدی، قیمت انرژی و دسترس‌پذیری اجزای شبکه می‌باشد. همچنین برای مدیریت پیشامد و غلبه بر عدم قطعیت، در سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی ارائه شده، رزرو چرخان نیز در نظر گرفته شده است. بارهای انعطاف‌پذیر در پاسخ به قیمت انرژی، میزان مصرف خود را تغییر می‌دهند و همچنین قابلیت جابجایی مصرف خود را در زمان (شیفت زمانی) دارا می‌باشند.

انرژی موردنیاز متقاضیان می‌تواند از طریق منابع تولید پراکنده موجود در نیروگاه مجازی و همچنین شبکه اصلی تأمین می‌شود. با توجه به قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در نیروگاه مجازی، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی، در زمان‌هایی که قیمت انرژی شبکه پایین می‌باشد، از شبکه انرژی خریداری می‌کند و علاوه بر تأمین متقاضیان خود، مازاد انرژی را ذخیره می‌نماید و در صورت بالا رفتن قیمت انرژی شبکه اصلی، از ذخیره خود استفاده می‌نماید. همچنین با توجه به اینکه نیروگاه مجازی در بازار انرژی شرکت می‌نماید، علاوه بر تأمین بار متقاضیان، به دنبال سود نیز می‌باشد، از این رو با بالا رفتن قیمت انرژی شبکه اصلی در طول روز، به شبکه اصلی انرژی می‌فروشد. قیمت انرژی براساس قیمت اعلام شده انرژی شبکه اصلی می‌باشد و نیروگاه مجازی در تعیین قیمت نقشی ندارد. مالکیت سیستم ذخیره انرژی، تولید خورشیدی و واحد حرارتی در اختیار نیروگاه مجازی می‌باشد و متقاضیان هزینه‌ای بابت تأمین انرژی از این منابع پرداخت نمی‌کنند. تنها تأمین هزینه سوخت برای واحد حرارتی به عهده متقاضیان انرژی نیروگاه مجازی می‌باشد.

با در نظر گرفتن رزرو چرخان در نیروگاه مجازی، انعطاف‌پذیری سیستم ارتقا می‌یابد. بدین صورت که منابع رزرو این امکان را دارند که رزرو دو جهته (افزایشی/کاهشی) برای سیستم ایجاد نمایند و در صورت لزوم میزان تولیدی/مصرفی که برای آن‌ها برنامه‌ریزی شده، کاهش یا افزایش دهند. منابع رزرو در نظر گرفته شده عبارتند از: بار، واحد حرارتی، شبکه اصلی و واحد ذخیره‌ساز انرژی [۲۰، ۳۹، ۴۰]. مفهوم رزرو افزایشی و کاهشی در هریک از منابع رزرو بیان شده، با یکدیگر متفاوت است، بدین صورت که:

۱. بار در وضعیت رزرو افزایشی، میزان توان مصرفی را که برای آن در نظر گرفته شده، کاهش می‌دهد و در وضعیت رزرو کاهشی، میزان توان مصرفی خود را افزایش می‌دهد.
۲. واحد حرارتی میزان توان تولیدی خود را در رزرو افزایشی/کاهشی، افزایش/کاهش می‌دهد.

۳. منظور از رزرو افزایشی برای شبکه اصلی، افزایش/کاهش مقدار توان خریداری شده از/فروخته شده به شبکه اصلی می باشد و در رزرو کاهشی، کم تر/بیش تر از میزان توان برنامه ریزی شده از/به شبکه اصلی خریداری/فروخته می شود.

۴. در رزرو افزایشی/کاهشی خروجی برای سیستم ذخیره انرژی، میزان توان خروجی از ذخیره ساز، افزایش/کاهش می یابد و در رزرو افزایشی/کاهشی ورودی، میزان توان ورودی به ذخیره ساز افزایش/کاهش می یابد.

با تجهیز سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی به فناوری شبکه هوشمند، امکان ارتباط دوطرفه میان تولید کنندگان انرژی و متقاضیان با سیستم مدیریت انرژی فراهم شده است. دقایقی پیش از تصمیم گیری، اطلاعات قیمت و میزان تولید انرژی مربوط به تأمین کنندگان انرژی به صورت ساعتی در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می گیرد. همچنین مصرف کنندگان نیز اطلاعات مربوط به میزان مصرف و مطلوبیت خود را در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می دهند. سیستم مدیریت انرژی با توجه به این اطلاعات، مقدار بهینه تولید، مصرف، تبادل با شبکه و همچنین میزان انرژی ذخیره را تعیین می کند. از آنجا که سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی به ابزار پیش بینی قیمت و پیش بینی توان خورشیدی مجهز می باشد، هنگام توزیع انرژی و اجرای تصمیمات در ساعت t ، افق ساعت های آینده را نیز برنامه ریزی می کند. عبارت دیگر برای متغیرهای تصمیم ساعات پس از t همچون میزان تبادل با شبکه، میزان تقاضا، مقدار تولید واحد حرارتی و همچنین مقدار رزرو مورد نیاز برنامه ریزی می کند و دیدی از آینده به دست می دهد. سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی با تکیه بر فناوری شبکه هوشمند، با نظارت بر اجزای شبکه و پایش وضعیت شبکه به صورت زمان حقیقی و همچنین اطلاع از قیمت انرژی شبکه اصلی و تولید خورشیدی در ساعت پیش رو، در مورد میزان مصرف متقاضیان، میزان تولید واحد حرارتی، مقدار توان ذخیره شده/تأمین شده در/از واحد ذخیره انرژی، میزان تبادل انرژی با شبکه اصلی و همچنین مقادیر رزرو تأمینی از منابع رزرو تصمیم گیری می نماید

و تصمیم‌هایی را که از قبل برای ساعت جاری برنامه‌ریزی نموده، به روز می‌نماید. جهت گیری تصمیمات سیستم مدیریت انرژی به گونه‌ای می‌باشد که با حداقل نمودن تفاضل هزینه و مطلوبیت مصرف‌کنندگان در نهایت منجر به حداکثر نمودن رفاه اجتماعی مصرف‌کنندگان انرژی شود.

در صورت وقوع پیشامد و از دست دادن یکی از مولفه‌های شبکه، سیستم مدیریت انرژی در ابتدای ساعت توزیع توان از آن مطلع شده و تصمیمات قبلی خود را برپایه اطلاعات جدید اصلاح می‌نماید. فرض بر این است در صورتیکه پیشامدی رخ دهد، در ابتدای ساعت به وقوع بپیوندد. اطلاعات مربوط به شبکه و دسترس‌پذیری مولفه‌های آن به صورت ساعتی در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌گیرد.

۱-۳-۳ الگوریتم مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی

۱-۳-۳-۱ مرحله برنامه‌ریزی^۱

۱. چند دقیقه پیش از ساعت t ، قیمت انرژی ساعت t توسط شبکه اصلی تعیین می‌گردد، قیمت انرژی برای ساعت‌های قبل از t معلوم و برای ساعت‌های پس از t متغیری تصادفی است.

۲. چند دقیقه پیش از ساعت t ، میزان توان تولیدی توسط ایستگاه خورشیدی در ساعت t مشخص می‌شود، تولید خورشیدی برای ساعت‌های پس از t همچنان متغیری تصادفی است.

۳. متقاضیان انرژی، اطلاعات میزان مصرف و مطلوبیت خود را در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌دهند.

۴. سیستم مدیریت انرژی، مقدار متغیرهای تصادفی قیمت انرژی و تولید خورشیدی و همچنین پیشامدهای سیستم انرژی را برای ساعت‌های باقیمانده پس از t پیش‌بینی می‌نماید.

¹ Scheduling stage

۵. سیستم مدیریت انرژی، برای متغیرهای تصمیم ساعت t و ساعت‌های پس از آن، همچون میزان تبادل با شبکه اصلی، میزان تولید واحد حرارتی، مقدار مصرف متقاضیان، مقدار انرژی که باید در ذخیره‌ساز ذخیره شود یا از آن استخراج شود و همچنین میزان ظرفیت رزرو موردنیاز از منابع رزرو، تصمیم‌گیری می‌نماید.

۲-۱-۳-۳ مرحله توزیع^۱ و اجرای تصمیمات

سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی تا اینجا برای ساعت t برنامه‌ریزی کرده است و هیچ تصمیمی برای نیروگاه مجازی اجرایی نشده است. مرحله اجرای تصمیمات بدین صورت است:

۶. با آغاز ساعت t وضعیت شبکه در ساعت t برای سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی مشخص است و در صورت وقوع پیشامد، سیستم مدیریت انرژی به سرعت تصمیمات مرحله قبل را اصلاح می‌نماید، و کمیت‌های محاسبه شده در مرحله قبل به روز می‌شوند و توزیع توان در نیروگاه مجازی اجرا می‌شود.

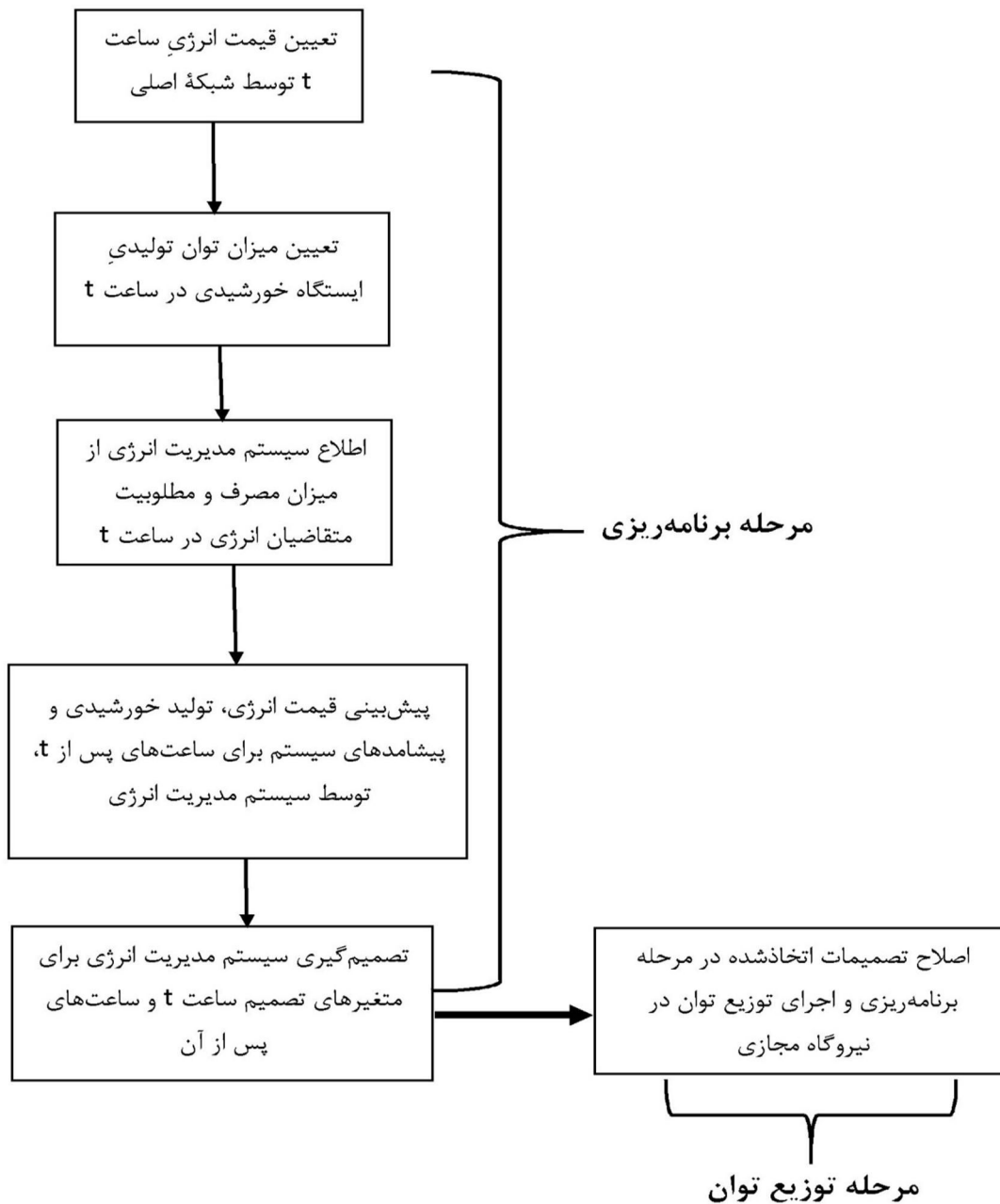
در حل مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی فرض می‌شود که:

- تنها یک پیشامد در طول دوره برنامه‌ریزی رخ می‌دهد.
- با وقوع پیشامد خروج یک المان در ساعت t ، تا انتهای دوره برنامه‌ریزی، المان به شبکه بر نمی‌گردد.
- پخش بار بکار رفته، مدل پخش بار مستقیم^۲ می‌باشد.
- ایستگاه خورشیدی و واحد ذخیره‌ساز متعلق به مجموعه نیروگاه مجازی می‌باشند، لذا متقاضیان هزینه‌ای بابت تأمین انرژی از این منابع نمی‌پردازند. بنابراین در تابع هدف هزینه‌ای برای انرژی و

¹ Dispatch stage

² DC load flow

رزرو این واحدها در نظر گرفته نمی‌شود. واحد حرارتی نیز تحت مالکیت نیروگاه مجازی می‌باشد و تنها هزینه سوخت این واحد در تابع هدف اثرگذار است.



شکل (۳-۱) روندنمای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در دو مرحله برنامه‌ریزی و توزیع توان

- از بین انواع تجهیزات ذخیره‌ساز همچون ذخیره‌سازهای تلمبه_ذخیره‌ای، چرخ طیاره‌های سرعت پایین، باتری های اسید_سرب، خازن‌های شیمیایی، هوای فشرده، آهنرباهای ابرسانا و سلول‌های سوختی، واحد ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری انتخاب شده است.
 - پیشامدهایی که ممکن است برای سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک به وقوع بپیوندد در قالب خروج المان‌های سیستم می‌باشد. طبق گزارش آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا، نرخ خروج ایستگاه خورشیدی صفر در نظر گرفته می‌شود [۴۱]. بنابراین پیشامدهایی که برای نیروگاه مجازی مدل می‌شوند از نوع خروج واحد حرارتی و خروج خطوط انتقال انرژی می‌باشد.
 - افق برنامه‌ریزی برای یک روز یعنی ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است.
- دو مرحله برنامه‌ریزی و توزیع توان در روندنمای شکل ۳-۱ نشان داده شده است.

۳-۴ مدل‌سازی ریاضی مسئله

مدل مسئله از نوع مدل قطعی می‌باشد. عدم قطعیت‌های ناشی از تولید خورشیدی و قیمت انرژی با استفاده از روش پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای^۱ مدل‌سازی شده‌اند. عدم قطعیت دسترس‌پذیری مولفه‌های سیستم با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر تولید سناریو برای پیشامدهای نیروگاه مجازی مدل‌سازی شده است. مدل پخش بار مسئله از نوع پخش بار بهینه مستقیم می‌باشد.

در ادامه، مدل مسئله و توضیحات آن ارائه می‌شود. سپس روش پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت تولید خورشیدی و قیمت انرژی بیان می‌شود و در نهایت روش تولید سناریو مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی پیشامدهای سیستم توضیح داده می‌شود.

¹ Single point forecast

۳-۴-۱ تابع هدف

$$\begin{aligned}
 Objective = \min & \left[\sum_{\omega=1}^{N_{\omega}} \rho_{\omega} \left\{ \left(C_t^M p_{t,\omega}^M \alpha + C_t^{M,R} r_{t,\omega}^{M,S} \alpha \right) + \sum_{i=1}^{N_{SO}} C_{i,t}^{SO} p_{i,t}^{SO} \alpha \right. \right. \\
 & + \sum_{g=1}^{N_H} \left(p_{g,t,\omega}^H (C_{g,t}^H + C_g^{H,o}) \alpha + C_{g,t}^{H,R} r_{g,t,\omega}^{H,S} \alpha + (c_{g,t}^{H,su} + c_{g,t}^{H,sd}) \right) \\
 & + \sum_{j=1}^{N_D} \left(C_{j,t}^{D,R} r_{j,t,\omega}^{D,S} \alpha + F^{sh} p_{j,t,\omega}^{D,sh} \alpha - U_{j,t}^D (p_{j,t,\omega}^D \alpha) \right) + \sum_{i=1}^{N_{ST}} (C_{i,t}^{ST,R} r_{i,t,\omega}^{ST,S}) \\
 & \left. + \sum_{j=1}^{N_D} F^{sh} e_{j,\omega}^{D,sh} \right\} \\
 & + \sum_{h=1}^{24-t} \left\{ \left(\{C_t^M\} p_{t+h,\omega}^M \alpha + C_{t+h}^{M,R} r_{t+h,\omega}^{M,S} \alpha \right) + \sum_{i=1}^{N_{SO}} C_{i,t+h}^{SO} \{p_{i,t+h}^{SO}\} \alpha \right. \\
 & + \sum_{g=1}^{N_{TH}} \left(p_{g,t+h,\omega}^H (C_{g,t+h}^H + C_g^{H,o}) \alpha + C_{g,t+h}^{H,R} r_{g,t+h,\omega}^{H,S} \alpha \right. \\
 & \left. \left. + (c_{g,t+h}^{H,su} + c_{g,t+h}^{H,sd}) \right) \right. \\
 & + \sum_{j=1}^{N_D} \left(C_{j,t+h}^{D,R} r_{j,t+h,\omega}^{D,S} \alpha + F^{sh} p_{j,t+h,\omega}^{D,sh} \alpha - U_{j,t}^D (p_{j,t+h,\omega}^D \alpha) \right) \\
 & \left. \left. + \sum_{i=1}^{N_{ST}} (C_{i,t}^{ST,R} r_{i,t,\omega}^{ST,S}) \right\} \right]
 \end{aligned}$$

(۳-۱)

تابع هدف ۱-۳ امیدریاضی هزینه تأمین انرژی منهای مطلوبیت به ازای تحقق سناریوها می‌باشد. این تابع هدف دارای دو بخش می‌باشد، که بخش اول مربوط به ساعت t و بخش دوم مربوط به 24-t ساعت باقیمانده روز می‌باشد.

بخش اول تابع هدف شامل هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی، هزینه رزرو شبکه اصلی، هزینه تأمین انرژی از ایستگاه‌های خورشیدی، هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری واحدهای حرارتی، هزینه

رزرو واحدهای حرارتی، هزینه روشن و خاموش شدن واحدهای حرارتی، هزینه رزرو تامینی از متقاضیان انرژی، هزینه بار تأمین نشده ساعتی و مطلوبیت متقاضیان انرژی می باشد. بخش دوم تابع هدف ۱-۳ دقیقاً شبیه بخش اول، برای $t-24$ ساعت باقیمانده روز می باشد. هزینه انرژی تأمین نشده روزانه نیز در تابع هدف گنجانده شده است.

تابع هدف ارائه شده در ۱-۳، به صورت کلی بیان شده است. عبارت دیگر هزینه مربوط به تأمین انرژی از ایستگاه خورشیدی، هزینه ظرفیت رزرو در نظر گرفته شده برای بار، واحد حرارتی و ذخیره ساز نیز در آن لحاظ شده است. در حالیکه در مسئله مورد بررسی، مالکیت ایستگاه خورشیدی در اختیار نیروگاه مجازی می باشد. پس بخش هزینه مربوط به تأمین انرژی از ایستگاه خورشیدی قابل صرف نظر کردن می باشد. همچنین هزینه های در نظر گرفته شده برای رزرو در این تابع هدف، هزینه ظرفیت رزرو می باشد نه انرژی رزرو، عبارت دیگر رزروهای قید شده در تابع هدف رزرو عملیاتی نمی باشند بلکه ظرفیت رزرو در نظر گرفته برای منابع رزرو می باشند و سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی هزینه ای بابت ظرفیت رزرو پرداخت نمی کند. از این رو این عبارت ها نیز قابل صرف نظر می باشند. بنابراین تابع هدف به صورت رابطه ۲-۳ در می آید.

در مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی، حداقل نمودن تفاضل هزینه و مطلوبیت متقاضیان یا به عبارت دیگر حداکثر نمودن رفاه اجتماعی برای متقاضیان انرژی در نیروگاه مجازی مورد توجه می باشد. تابع هدف اصلاح شده ۲-۳ نیز همانند ۱-۳ دارای دو بخش می باشد. بخش اول مربوط به برنامه ریزی برای ساعت t است و بخش دوم برنامه ریزی سیستم مدیریت انرژی برای ساعت های باقیمانده روز یعنی $t-24$ ساعت بعدی را نشان می دهد.

$$\begin{aligned}
Objective = \min \sum_{\omega=1}^{N_{\omega}} \rho_{\omega} & \left[\left(C_t^M p_{t,\omega}^M \alpha + C_t^{M,R} r_{t,\omega}^{M,S} \alpha \right) \right. \\
& + \sum_{g=1}^{N_H} \left(p_{g,t,\omega}^H (C_{g,t}^H + C_g^{H,o}) \alpha + (c_{g,t}^{H,su} + c_{g,t}^{H,sd}) \right) \\
& + \left. \sum_{j=1}^{N_D} \left(F^{sh} p_{j,t,\omega}^{D,sh} \alpha - U_{j,t}^D (p_{j,t,\omega}^D \alpha) \right) + \sum_{j=1}^{N_D} F^{sh} e_{j,\omega}^{D,sh} \right\} \\
& + \sum_{h=1}^{24-t} \left\{ \left(\{C_t^M\} p_{t+h,\omega}^M \alpha + C_{t+h}^{M,R} r_{t+h,\omega}^{M,S} \alpha \right) \right. \\
& + \sum_{g=1}^{N_{TH}} \left(p_{g,t+h,\omega}^H (C_{g,t+h}^H + C_g^{H,o}) \alpha + (c_{g,t+h}^{H,su} + c_{g,t+h}^{H,sd}) \right) \\
& + \left. \left. \sum_{j=1}^{N_D} \left(F^{sh} p_{j,t+h,\omega}^{D,sh} \alpha - U_{j,t}^D (p_{j,t+h,\omega}^D \alpha) \right) \right\} \right]
\end{aligned}
\tag{3-2}$$

در تابع هدف، برای بار تأمین نشده ساعتی $(p_{j,h,\omega}^{D,sh})$ و انرژی تأمین نشده روزانه $(e_{j,\omega}^{D,sh})$ ، ضریب جریمه بزرگی (F^{sh}) طراحی شده است که این ضریب صد برابر حداکثر مطلوبیت متقاضیان در نظر گرفته شده است تا مقادیر بار تأمین نشده ساعتی و انرژی تأمین نشده روزانه به حداقل برسد.

۳-۴-۲ قیود

۳-۴-۲-۱ مرحله اول؛ برنامه ریزی

در این مرحله، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی برای ساعت پیشرو (ساعت t) برنامه ریزی می‌کند. تصمیم‌هایی که سیستم مدیریت انرژی برای ساعت t اتخاذ می‌کند، در زمان تحویل توان در t به روز و عملیاتی می‌شوند. لازم به ذکر است برنامه ریزی صورت گرفته برای ساعت‌های بعد، تنها دیدی به سیستم مدیریت انرژی می‌دهد و اجرایی نمی‌شوند.

الف) برنامه‌ریزی بار

۱. قید حداقل و حداکثر تغییر ساعتی بار^۱

محدودیت تغییر ساعتی توان مصرفی متقاضیان با این قید بیان می‌شود. براساس این نامساوی، تفاضل مقدار بار در دو ساعت متوالی نمی‌تواند از حدی کم‌تر باشد، یا از حدی تجاوز نماید.

$$-RD_j^D \leq p_{j,h,\omega}^{D,S} - p_{j,h-1,\omega}^{D,S} \leq RD_j^U \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-3)$$

۲. قید حداقل و حداکثر میزان مصرف

با توجه به اینکه متقاضیان موجود در نیروگاه مجازی از نوع انعطاف‌پذیر می‌باشند، می‌توانند میزان مصرف خود را براساس وضعیت قیمت انرژی، تغییر دهند. اما مقدار مصرف برنامه‌ریزی‌شده برای بار دارای محدودیت‌هایی است که رابطه ۳-۴ این محدودیت را تحمیل می‌کند.

$$P_j^{D,min} \leq p_{j,h,\omega}^{D,S} \leq P_j^{D,max} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-4)$$

۳. محدودیت رزرو برنامه‌ریزی‌شده

محدودیت مقدار رزروهای افزایشی و کاهش‌ی برنامه‌ریزی‌شده برای بار، با استفاده از پارامترهایی اعمال می‌شود که در روابط ۳-۵ و ۳-۶ آمده‌اند.

$$\bar{r}_{j,h,\omega}^{D,S} \leq \bar{R}_j^{D,max} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-5)$$

$$\underline{r}_{j,h,\omega}^{D,S} \leq \underline{R}_j^{D,max} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-6)$$

۴. قیود پیش‌بینی‌ناپذیری^۲

¹ Ramp_up , Ramp_down

² Nonanticipativity

این قیود، به سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی کمک می کند با وجود سناریوهای مختلفی که ممکن است برای سیستم به وقوع بپیوندد، تصمیم واحدی را اتخاذ نماید. در واقع یگانگی تصمیمها برای سناریوهای مشترک، با استفاده از قیود پیش بینی ناپذیری محقق می شود.

$$p_{j,t,\omega}^{D,S} = p_{j,t,\omega'}^{D,S} \quad \forall j, \omega, \omega' \quad (3-7)$$

$$\bar{r}_{j,t,\omega}^{D,S} = \bar{r}_{j,t,\omega'}^{D,S} \quad \forall j, \omega, \omega' \quad (3-8)$$

$$\underline{r}_{j,t,\omega}^{D,S} = \underline{r}_{j,t,\omega'}^{D,S} \quad \forall j, \omega, \omega' \quad (3-9)$$

روابط ۳-۷، ۳-۸ و ۳-۹ قیود پیش بینی ناپذیری را به ترتیب برای توان بار برنامه ریزی شده، رزرو افزایشی برنامه ریزی شده و رزرو کاهشی برنامه ریزی شده تعریف می کند.

ب) برنامه ریزی ایستگاه خورشیدی

۱. محدودیت توان خورشیدی برنامه ریزی شده

توان خروجی برنامه ریزی شده برای ایستگاه خورشیدی در ساعت پیش رو (ساعت t)، طبق رابطه ۳-۱۰ نباید از میزان توان واقعی تولیدی بیش تر باشد.

$$p_{i,t,\omega}^{SO,S} \leq P_{i,t}^{SO} \quad \forall i, \omega \quad (3-10)$$

همچنین توان برنامه ریزی شده برای ساعات پس از t، نباید از امید ریاضی توان خورشیدی در این ساعتها بیش تر باشد. این مطلب در رابطه ۳-۱۱ آمده است.

$$p_{i,h,\omega}^{SO,S} \leq \{P_{i,h}^{SO}\} \quad \forall h \geq t + 1, i, \omega \quad (3-11)$$

۲. پیش بینی ناپذیری

پیش بینی ناپذیری و اتخاذ تصمیم واحد در سناریوهای مختلف، برای تولید برنامه ریزی شده ایستگاه خورشیدی، در رابطه ۳-۱۲ آمده است:

$$p_{i,t,\omega}^{SO,S} = p_{i,t,\omega'}^{SO,S} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-12)$$

ج) برنامه‌ریزی واحد حرارتی

۱. حداقل و حداکثر تولید

مقدار حداقل و حداکثر تولید توان حرارتی در مرحله برنامه‌ریزی، با استفاده از رابطه ۳-۱۳ محدود می‌شود. وجود متغیر باینری در این معادله تضمین می‌کند که واحد در صورت روشن بودن، باید میزان حداقلی از توان را تولید نماید.

$$u_{g,h}^{H,S} p_g^{H,min} \leq p_{g,h,\omega}^{H,S} \leq u_{g,h}^{H,S} p_g^{H,max} \quad \forall h \geq t, g, \omega \quad (3-13)$$

۲. محدودیت تغییرات تولید در ساعت‌های متوالی

مقدار تغییرات تولید توان واحد حرارتی در دو ساعت متوالی محدودیت‌هایی دارد که رابطه ۳-۱۴ مانع از تجاوز تغییرات از حد معینی می‌شود.

$$-RH_g^D \leq p_{g,h,\omega}^{H,S} - p_{g,h-1,\omega}^{H,S} \leq RH_g^U \quad \forall h \geq t, g, \omega \quad (3-14)$$

۳. قیود محدودیت رزرو برنامه‌ریزی

واحدی که روشن می‌باشد ($u_{g,h}^{H,S} = 1$) می‌تواند در تأمین رزرو چرخان شرکت نماید. رزرو برنامه‌ریزی شده نمی‌تواند از حد معینی تجاوز کند، که روابط ۳-۱۵ و ۳-۱۶ این محدودیت را به ترتیب بر رزرو افزایشی و کاهش‌ی اعمال می‌نمایند.

$$\bar{r}_{g,h,\omega}^{H,S} \leq u_{g,h}^{H,S} \bar{R}_g^{H,max} \quad \forall h \geq t, g, \omega \quad (3-15)$$

$$\underline{r}_{g,h,\omega}^{H,S} \leq u_{g,h}^{H,S} \underline{R}_g^{H,max} \quad \forall h \geq t, g, \omega \quad (3-16)$$

۴. قیود پیش‌بینی‌ناپذیری

سیستم مدیریت انرژی زمان‌حقیقی در نهایت باید در مورد میزان توان برنامه‌ریزی‌شده، رزرو افزایشی و رزرو کاهش‌ی واحد حرارتی در میان سناریوهای مختلف یک تصمیم واحد اتخاذ نماید.

پیش‌بینی‌ناپذیری تولید توان حرارتی برنامه‌ریزی‌شده در معادله ۳-۱۷، پیش‌بینی‌ناپذیری مربوط به رزرو افزایشی برنامه‌ریزی‌شده واحد حرارتی در معادله ۳-۱۸ و پیش‌بینی‌ناپذیری رزرو کاهش‌ی برنامه‌ریزی‌شده واحد حرارتی در معادله ۳-۱۹ بیان شده است.

$$p_{g,t,\omega}^{H,S} = p_{g,t,\omega'}^{H,S} \quad \forall g, \omega, \omega' \quad (3-17)$$

$$\bar{r}_{g,t,\omega}^{H,S} = \bar{r}_{g,t,\omega'}^{H,S} \quad \forall g, \omega, \omega' \quad (3-18)$$

$$\underline{r}_{g,t,\omega}^{H,S} = \underline{r}_{g,t,\omega'}^{H,S} \quad \forall g, \omega, \omega' \quad (3-19)$$

د) قیود برنامه‌ریزی شبکه اصلی^۱

سیستم مدیریت انرژی زمان‌حقیقی به منظور آمادگی شبکه اصلی برای تبادل با نیروگاه مجازی، در مرحله برنامه‌ریزی باید میزان تبادل با شبکه از جمله توان و ظرفیت رزرو را تعیین نماید.

۱. میزان تبادل توان با شبکه اصلی

مقدار توان برنامه‌ریزی‌شده، تأمین شده/فروخته شده از/به شبکه اصلی از معادله ۳-۲۰ بدست می‌آید.

$$p_{h,\omega}^{M,S} = \sum_{n \in \Omega^{MG}} p_{n,h,\omega}^{M,S} \quad \forall h \geq t, n, \omega \quad (3-20)$$

¹ Main grid

۲. محدودیت تبادل با شبکه اصلی

قید مربوط به محدودیت خرید/فروش توان برنامه‌ریزی شده از/به شبکه اصلی در رابطه ۳-۲۱ آمده است.

$$-P_n^{M,max} \leq p_{n,h,\omega}^{M,S} \leq P_n^{M,max} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^{MG} \quad (3-21)$$

۳. قیود رزرو برنامه‌ریزی شده

رزرو برنامه‌ریزی شده برای شبکه اصلی شامل دو مولفه افزایشی و کاهش می‌باشد که در رابطه ۳-۲۲ بیان شده است. در روابط ۳-۲۳ و ۳-۲۴ محدودیت رزرو برنامه‌ریزی شده از شبکه اصلی اعمال شده است.

$$r_{h,\omega}^{M,S} = \bar{r}_{h,\omega}^{M,S} + \underline{r}_{h,\omega}^{M,S} \quad \forall h \geq t, \omega \quad (3-22)$$

$$\bar{r}_{h,\omega}^{M,S} \leq \bar{R}^{M,max} \quad \forall h \geq t, \omega \quad (3-23)$$

$$\underline{r}_{h,\omega}^{M,S} \leq \underline{R}^{M,max} \quad \forall h \geq t, \omega \quad (3-24)$$

۴. پیش‌بینی ناپذیری

توان تبدالی برنامه‌ریزی شده با شبکه، همچنین رزروهای افزایشی و کاهش شبکه در ساعت پیش‌رو و در سناریوهای مختلف، در نهایت نیازمند تصمیم‌گیری واحدی می‌باشند که به ترتیب روابط ۳-۲۵ تا ۳-۲۷ آن را تضمین می‌کند.

$$p_{t,\omega}^{M,S} = p_{t,\omega'}^{M,S} \quad \forall \omega, \omega' \quad (3-25)$$

$$\bar{r}_{t,\omega}^{M,S} = \bar{r}_{t,\omega'}^{M,S} \quad \forall \omega, \omega' \quad (3-26)$$

$$\underline{r}_{t,\omega}^{M,S} = \underline{r}_{t,\omega'}^{M,S} \quad \forall \omega, \omega' \quad (3-27)$$

ه) قیود برنامه‌ریزی واحدهای ذخیره‌ساز

۱. انرژی ذخیره شده در باتری

مقدار انرژی ذخیره شده در باتری در ساعت h تابع میزان انرژی موجود در ساعت قبل ($h-1$)، مقدار انرژی ورودی به باتری و انرژی خروجی از باتری در ساعت h می‌باشد. مقدار انرژی برنامه‌ریزی شده موجود در باتری برای ساعت پیش‌رو و ساعات بعد، از معادله ۳-۲۸ محاسبه می‌شود.

$$e_{i,h,\omega}^{ST,S} = e_{i,h-1,\omega}^{ST,S} + \eta_i^{in} p_{i,h,\omega}^{ST,S,in} \alpha - \frac{p_{i,h,\omega}^{ST,S,out} \alpha}{\eta_i^{out}} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-28)$$

ذخیره انرژی در باتری و خروج انرژی از آن با تلفاتی همراه است که این تلفات در قالب بازدهی (η) در رابطه ۳-۲۸ بیان شده است.

۲. محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری

در مرحله برنامه‌ریزی، حداکثر انرژی ذخیره شده در باتری برای ساعت پیش‌رو و تمام ساعات باقیمانده روز برابر ظرفیت باتری می‌باشد. همچنین حداقل انرژی ذخیره شده نمی‌تواند از حد معینی کم‌تر باشد. این محدودیت‌ها در رابطه ۳-۲۹ بیان شده‌اند.

$$E_i^{ST,min} \leq e_{i,h,\omega}^{ST,S} \leq E_i^{ST,max} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-29)$$

۳. قیود رزرو

اعمال محدودیت رزروهای خروجی برنامه‌ریزی شده افزایشی و کاهش‌ی برای ذخیره‌ساز در ساعت پیش‌رو (t) و ساعات باقیمانده دوره برنامه‌ریزی، به ترتیب در روابط ۳-۳۰ و ۳-۳۱ آمده است. قیود مربوط به رزروهای افزایشی و کاهش‌ی ورودی برنامه‌ریزی شده برای واحد ذخیره‌ساز نیز در روابط ۳-۳۲ و ۳-۳۳ آمده است.

$$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,out} \leq \bar{R}_i^{ST,max} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-30)$$

$$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,out} \leq \underline{R}_i^{ST,max} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-31)$$

$$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,in} \leq \bar{R}_i^{ST,max} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-32)$$

$$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,in} \leq \underline{R}_i^{ST,max} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-33)$$

۴. پیش‌بینی ناپذیری

تصمیم‌گیری برای متغیرهای واحد ذخیره‌ساز در سناریوهای مختلف، با استفاده از معادلات ۳-۳۴ تا ۳-۳۹ صورت می‌پذیرد.

$$p_{i,t,\omega}^{ST,S,in} = p_{i,t,\omega'}^{ST,S,in} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-34)$$

$$p_{i,t,\omega}^{ST,S,out} = p_{i,t,\omega'}^{ST,S,out} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-35)$$

$$\bar{r}_{i,t,\omega}^{ST,S,out} = \bar{r}_{i,t,\omega'}^{ST,S,out} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-36)$$

$$\underline{r}_{i,t,\omega}^{ST,S,out} = \underline{r}_{i,t,\omega'}^{ST,S,out} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-37)$$

$$\bar{r}_{i,t,\omega}^{ST,S,in} = \bar{r}_{i,t,\omega'}^{ST,S,in} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-38)$$

$$\underline{r}_{i,t,\omega}^{ST,S,in} = \underline{r}_{i,t,\omega'}^{ST,S,in} \quad \forall i, \omega, \omega' \quad (3-39)$$

و) برنامه‌ریزی تعادل توان در نیروگاه مجازی

در هر یک از باس‌های مجموعه نیروگاه مجازی باید تعادل تولید و مصرف برقرار باشد. قید تعادل از مهم‌ترین قیود مسئله مدیریت انرژی در نیروگاه مجازی می‌باشد. عملکرد سیستم قدرت وابسته به برقراری پیوسته تعادل در باس‌های سیستم می‌باشد.

در مرحله برنامه‌ریزی نیز باید تعادل در نیروگاه مجازی در نظر گرفته شود. برنامه‌ریزی تعادل توان در باس‌های نیروگاه مجازی به ترتیب برای باس‌های متصل به شبکه اصلی و سایر باس‌ها در روابط ۳-۴۰ و ۳-۴۱ بیان شده است.

$$p_{n,h,\omega}^{M,S} - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h,\omega}^{L,S} + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h,\omega}^{L,S} = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h,\omega}^{D,S} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^M \quad (3-40)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \theta_n^{SS}} (p_{i,h,\omega}^{SO,S} + p_{i,h,\omega}^{ST,S,out}) + \sum_{g \in \theta_n^{TH}} p_{g,h,\omega}^{H,S} - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h,\omega}^{L,S} + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h,\omega}^{L,S} \\ = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h,\omega}^{D,S} + \sum_{i \in \theta_n^{SS}} p_{i,h,\omega}^{ST,S,in} \end{aligned} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^B \setminus n \in \Omega^M \quad (3-41)$$

ز) برنامه ریزی توان عبوری از خطوط

۱. توان عبوری از خطوط

از آنجا که پخش بار بکار رفته از نوع پخش بار مستقیم می باشد، توان عبوری از خطوط وابسته به سوسپتانس خطوط و زاویه ولتاژ باس های ابتدا و انتهای خط می باشد. توان عبوری از خطوط از رابطه ۳-۴۲ به دست می آید.

$$p_{k,h,\omega}^{L,S} = B_k (\delta_{o(k),h,\omega}^S - \delta_{d(k),h,\omega}^S) \quad \forall h \geq t, k \quad (3-42)$$

توان برنامه ریزی شده عبوری از خطوط در ساعت پیش رو و ساعات باقیمانده روز نباید از ظرفیت خطوط تجاوز نماید. این موضوع در رابطه ۳-۴۳ بیان شده است.

$$-P_k^{L,max} \leq p_{k,h,\omega}^{L,S} \leq P_k^{L,max} \quad \forall h \geq t, k, \omega \quad (3-43)$$

۲. زاویه ولتاژ باس

روابط ۳-۴۴ و ۳-۴۵ به ترتیب محدودیت زاویه ولتاژ باس و مقدار زاویه ولتاژ باس مرجع را بیان می نمایند.

$$-\pi \leq \delta_{n,h,\omega}^S \leq \pi \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^B \quad (3-44)$$

$$\delta_{n,h} = 0 \quad h \geq t, n: \text{reference bus} \quad (3-45)$$

۲-۲-۳-۴-۳ مرحله دوم؛ توزیع توان

در این مرحله، با رسیدن به ساعت توزیع توان (ساعت t)، در صورت وقوع پیشامد در این ساعت، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی از آن آگاه می‌شود و تصمیماتی را که در مرحله برنامه‌ریزی برای این ساعت گرفته است، اصلاح می‌کند و توزیع توان زمان حقیقی را در نیروگاه مجازی اجرا می‌کند.

الف) توزیع توان بار

۱. قید حداقل انرژی مصرفی روزانه

هر متقاضی در طول روز نمی‌تواند کم‌تر از حد معینی توان مصرف نماید که این مقدار حداقل در رابطه ۳-۴۶ تعیین می‌شود.

$$\sum_{h=1}^{t-1} p_{j,h}^D \alpha + p_{j,t,\omega}^D \alpha + \sum_{h=t+1}^{24} p_{j,h,\omega}^D \alpha \geq E_j^{D,min} - e_{j,\omega}^{D,sh} \quad \forall j, \omega \quad (3-46)$$

در رابطه ۳-۴۶ مقدار بار برای ساعات پیش از t مشخص می‌باشد. میزان انرژی مصرفی برای ساعت t تعیین می‌شود، همچنین سیستم مدیریت انرژی برای ساعات‌های پس از t ، تخمینی از بار را ارائه می‌دهد که این تخمین در هر ساعت به روز می‌شود.

۲. محدودیت تغییرات توان بار در ساعت‌های متوالی

اختلاف توان توزیع شده برای بار در ساعت t با توان توزیع شده در ساعت $t-1$ نمی‌تواند از حد معینی تجاوز نماید یا از حدی کم‌تر باشد. این محدودیت در رابطه ۳-۴۷ بیان شده است.

$$-RD_j^D \leq p_{j,h,\omega}^D - p_{j,h-1,\omega}^D \leq RD_j^U \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-47)$$

۳. محدودیت توان مصرفی بار

توان اختصاص داده شده به بار محدودیت‌هایی دارد که میزان حداقل و حداکثر آن در رابطه ۳-۴۸ تعیین می‌شود.

$$P_j^{D,min} - p_{j,h,\omega}^{D,sh} \leq p_{j,h,\omega}^D \leq P_j^{D,max} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-48)$$

میزان حداکثر مصرف هر متقاضی در مرحله توزیع توان مقداری محدود است که در رابطه ۳-۴۸ مشخص شده است ($P_j^{D,max}$). در این رابطه، برای حد پایین مصرف انرژی، مقدار توان تأمین نشده بار از حداقل انرژی مصرفی بار کم می‌شود ($P_j^{D,min} - p_{j,h,\omega}^{D,sh}$). کاهش غیر داوطلبانه بار، شرایط حفظ امنیت نیروگاه مجازی را مهیا می‌سازد.

۴. قیود توان تأمین نشده ساعتی و انرژی تأمین نشده روزانه

سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی برای عدم تأمین ساعتی بار محدودیت‌هایی در نظر می‌گیرد. رابطه ۳-۴۹ این محدودیت‌ها را اعمال می‌کند. همچنین رابطه ۳-۵۰ انرژی تأمین نشده روزانه را محدود می‌کند. بعبارت دیگر، میزان توان تأمین نشده بار در هر ساعت نمی‌تواند از حداقل توان مصرفی بار بیش‌تر باشد و انرژی تأمین نشده روزانه برای هر بار نیز نمی‌تواند از حداقل انرژی روزانه مورد نیاز برای آن بار تجاوز نماید.

$$0 \leq p_{j,h,\omega}^{D,sh} \leq P_j^{D,min} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-49)$$

$$0 \leq e_{j,\omega}^{D,sh} \leq E_j^{D,min} \quad \forall j, \omega \quad (3-50)$$

۵. محدودیت‌های رزرو

محدودیت رزروهای عملیاتی اختصاص داده شده به بار در قید ۳-۵۱ برای رزرو افزایشی و در قید ۳-۵۲ برای رزرو کاهش‌ی، پیاده‌سازی می‌شود.

$$\bar{r}_{j,h,\omega}^D \leq \bar{r}_{j,h,\omega}^{D,S} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-51)$$

$$\underline{r}_{j,h,\omega}^D \leq \underline{r}_{j,h,\omega}^{D,S} \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-52)$$

حداکثر میزان رزرو اجرایی در مرحله توزیع توان، برابر مقدار تعیین شده آن در مرحله برنامه‌ریزی می‌باشد.

۶. پیش‌بینی ناپذیری

پیش‌بینی ناپذیری در مرحله توزیع توان برای بار بدینصورت طراحی شده است که در صورت وقوع پیشامد، نیاز به رزرو و حذف بار می‌باشد. بعبارت دیگر تا پیش از وقوع پیشامد در نیروگاه مجازی، رزرو و حذف بار مورد نیاز نمی‌باشد. در روابط ۳-۵۳ تا ۳-۵۵ قیود پیش‌بینی ناپذیری برای بار بیان شده است.

$$\bar{r}_{j,h,\omega}^D = 0 \quad \forall h < \tau, j, \omega = (l, \tau) \quad (3-53)$$

$$\underline{r}_{j,h,\omega}^D = 0 \quad \forall h < \tau, j, \omega = (l, \tau) \quad (3-54)$$

$$p_{j,h,\omega}^{D,sh} = 0 \quad \forall h < \tau, j, \omega = (l, \tau) \quad (3-55)$$

τ زمان پیش از وقوع پیشامد می‌باشد.

ب) توزیع توان برای ایستگاه خورشیدی

۱. محدودیت تولید خورشیدی

توان تحویل داده شده توسط ایستگاه خورشیدی در زمان توزیع توان (ساعت t)، نمی‌تواند از مقدار حقیقی تولید خورشیدی بیش‌تر باشد. رابطه ۳-۵۶ محدودیت تولید ایستگاه خورشیدی را برای ساعت توزیع توان اعمال می‌نماید. برای ساعت‌های پس از t نیز، نباید از امید ریاضی پیش‌بینی تولید خورشیدی تجاوز نماید، بعبارت دیگر قید ۳-۵۷ باید برای ساعت‌های پس از t برقرار باشد.

$$p_{i,t,\omega}^{SO} \leq P_{i,t}^{SO} \quad \forall i, \omega \quad (3-56)$$

$$p_{i,h,\omega}^{SO} \leq \{P_{i,h}^{SO}\} \quad \forall h \geq t + 1, i, \omega \quad (3-57)$$

ج) توزیع توان برای واحد حرارتی

۱. محدودیت تولید واحد حرارتی

برای واحدهای در دسترس، یعنی واحدهایی که در زمان t و سناریوی ω موجود می‌باشند، داریم:

$$u_{g,h}^H P_g^{H,min} \leq p_{g,h,\omega}^H \leq u_{g,h}^H P_g^{H,max} \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-58)$$

حداکثر میزان تولید توان توسط واحد حرارتی برابر ظرفیت نامی این واحد می‌باشد. همچنین باتوجه به مسائل فنی، واحد حرارتی در صورت روشن شدن نمی‌تواند کم‌تر از حد معینی تولید توان داشته باشد. این محدودیت‌ها را رابطه ۳-۵۸ در سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی پیاده‌سازی می‌کند.

۲. محدودیت تغییرات ساعتی توان تولیدی

تفاضل توان تولیدی واحد حرارتی در دو ساعت متوالی نباید از محدوده معینی تجاوز نماید. این محدوده برای واحدهای در دسترس در رابطه ۳-۵۹ بیان شده است.

$$-RH_g^D \leq p_{g,h,\omega}^H - p_{g,h-1,\omega}^H \leq RH_g^U \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-59)$$

۳. هزینه روشن/خاموش شدن

برای واحدهایی که در سناریوی ω و زمان t در دسترس می‌باشند، هزینه روشن و خاموش شدن به ترتیب از روابط ۳-۶۰ و ۳-۶۱ محاسبه می‌شود.

$$(u_{g,h,\omega}^H - u_{g,h-1,\omega}^H)(C_{g,h}^{H,u}) \leq c_{g,h}^{H,su} \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-60)$$

$$(u_{g,h-1,\omega}^H - u_{g,h,\omega}^H)(C_{g,h}^{H,d}) \leq c_{g,h}^{H,sd} \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-61)$$

۴. محدودیت رزروهای عملیاتی

رزرو افزایشی و کاهششی فراهم شده توسط واحد حرارتی توسط مقادیر رزرو تعیین شده در مرحله برنامه‌ریزی محدود می‌شوند. روابط ۳-۶۲ و ۳-۶۳ این محدودیت‌ها را به ترتیب برای رزرو افزایششی و کاهششی واحدهای حرارتی اعمال می‌کند.

$$\bar{r}_{g,h,\omega}^H \leq \bar{r}_{g,h,\omega}^{H,S} \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-62)$$

$$\underline{r}_{g,h,\omega}^H \leq \underline{r}_{g,h,\omega}^{H,S} \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-63)$$

۵. پیش‌بینی ناپذیری

تا پیش از وقوع پیشامد، نیازی به تولید ظرفیت رزرو شده از واحدهای حرارتی در دسترس نمی‌باشد. این عدم نیاز به رزرو در معادلات ۳-۶۴ و ۳-۶۵ برآورده می‌شود.

$$\bar{r}_{g,h,\omega}^H = 0 \quad \forall h < \tau, g \in M_G(t, \omega), \omega = (l, \tau) \quad (3-64)$$

$$\underline{r}_{g,h,\omega}^H = 0 \quad \forall h < \tau, g \in M_G(t, \omega), \omega = (l, \tau) \quad (3-65)$$

د) قیود توزیع توان برای شبکه اصلی

۱. توان تبادلی با شبکه

مجموع توان خریداری شده/فروخته شده از/به شبکه اصلی بر روی باس‌های متصل به شبکه اصلی در مرحله توزیع توان، از رابطه ۳-۶۶ حاصل می‌شود.

$$p_h^M = \sum_{n \in \Omega^{MG}} p_{n,h,\omega}^M \quad \forall h \geq t, n, \omega \quad (3-66)$$

۲. محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی

توان تبادلی با شبکه اصلی نباید از ظرفیت در نظر گرفته شده برای این تبادل تجاوز نماید. قید ۳-۶۷ این قید را برآورده می‌سازد.

$$-P_n^{M,max} \leq p_{n,h,\omega}^M \leq P_n^{M,max} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^{MG} \quad (3-67)$$

۳. قیود رزرو

رزروهای تعیین شده برای شبکه اصلی در مرحله برنامه‌ریزی، حد بالای میزان رزرو عملیاتی در مرحله توزیع توان می‌باشند. این مطلب برای رزروهای افزایشی و کاهششی شبکه اصلی به ترتیب در روابط ۳-۶۸ و ۳-۶۹ بیان شده است.

$$\bar{r}_{h,\omega}^M \leq \bar{r}_{h,\omega}^{M,S} \quad \forall h \geq t, \omega \quad (3-68)$$

$$\underline{r}_{h,\omega}^M \leq \underline{r}_{h,\omega}^{M,S} \quad \forall h \geq t, \omega \quad (3-69)$$

۴. پیش‌بینی‌ناپذیری

در قیود پیش‌بینی‌ناپذیری برای شبکه اصلی در مرحله توزیع توان، همچون سایر منابع رزرو، تا قبل از وقوع پیشامد، رزروی از شبکه اصلی تهیه نمی‌شود. عبارت دیگر برای رزرو افزایشی و کاهششی شبکه اصلی، به ترتیب قیود ۳-۷۰ و ۳-۷۱ برقرار می‌باشد.

$$\bar{r}_{h,\omega}^M = 0 \quad \forall h < \tau, \omega = (l, \tau) \quad (3-70)$$

$$\underline{r}_{h,\omega}^M = 0 \quad \forall h < \tau, \omega = (l, \tau) \quad (3-71)$$

ه) توزیع توان برای واحد ذخیره‌ساز

۱. انرژی ذخیره شده در باتری

مقدار انرژی ذخیره شده در باتری در ساعت t به انرژی موجود در آن در ساعت قبل، همچنین مقدار توان ورودی و خروجی در ساعت t بستگی دارد. این مقدار از قید ۳-۷۲ حاصل می‌شود.

$$e_{i,h,\omega}^{ST} = e_{i,h-1,\omega}^{ST} + \eta_i^{in} p_{i,h,\omega}^{ST,in} \alpha - \frac{p_{i,h,\omega}^{ST,out} \alpha}{\eta_i^{out}} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-72)$$

۲. محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری

انرژی ذخیره شده در باتری در ساعت توزیع توان و ساعات بعد نباید از محدوده ای تجاوز نماید که این حدود در رابطه ۳-۷۳ مشخص می‌شود.

$$E_i^{ST,min} \leq e_{i,h,\omega}^{ST} \leq E_i^{ST,max} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-73)$$

تلفات ناشی از ورود و خروج توان به باتری، به ترتیب با استفاده از ضرایب بازدهی η_i^{in} و η_i^{out} مدل‌سازی شده‌اند.

۳. رزرو تأمین شده از ذخیره‌ساز

حدود رزرو تأمین شده از ذخیره‌ساز به کمک رزرو تعیین شده در مرحله برنامه‌ریزی، مشخص می‌شود. محدودیت رزروهای افزایشی و کاهش‌ی خروجی و ورودی واحد ذخیره‌ساز در مرحله توزیع توان به ترتیب به کمک روابط ۳-۷۴ تا ۳-۷۷ تعیین می‌گردد.

$$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,out} \leq \bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,out} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-74)$$

$$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,out} \leq \underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,out} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-75)$$

$$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,in} \leq \bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,in} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-76)$$

$$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,in} \leq \underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,S,in} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-77)$$

۴. پیش‌بینی ناپذیری

قیود پیش‌بینی ناپذیری برای ذخیره‌ساز، بیانگر این نکته می‌باشند که تا پیش از وقوع پیشامد نیازی به تولید رزرو توسط واحد ذخیره نمی‌باشد. روابط ۳-۷۸ تا ۳-۸۱ قیود پیش‌بینی ناپذیری مربوط به رزرو تأمینی از ذخیره‌ساز می‌باشند.

$$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,out} = 0 \quad \forall h < \tau, i, \omega = (l, \tau) \quad (3-78)$$

$$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,out} = 0 \quad \forall h < \tau, i, \omega = (l, \tau)$$

$$\bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,in} = 0 \quad \forall h < \tau, i, \omega = (l, \tau) \quad (3-79)$$

$$\underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,in} = 0 \quad \forall h < \tau, i, \omega = (l, \tau) \quad (3-80)$$

$$(3-81)$$

(و) تعادل تولید و تقاضا

تعادل توان همواره باید در باس‌های سیستم برقرار باشد. عبارتی، مقدار توان ورودی به هر باس باید برابر با مقدار بار مصرفی بر روی باس بعلاوه توان خروجی از آن باس باشد.

قید تعادل توان در ساعت توزیع توان و ساعت‌های پس از آن بر روی باس‌های متصل به شبکه اصلی در معادله ۳-۸۲ و همچنین تعادل بر روی سایر باس‌ها در معادله ۳-۸۳ برآورده می‌شود.

$$p_{n,h,\omega}^M - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h,\omega}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h,\omega}^L = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h,\omega}^D \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^M \quad (3-82)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \theta_n^{SS}} (p_{i,h,\omega}^{SO} + p_{i,h,\omega}^{ST,out}) + \sum_{g \in \theta_n^{TH}, g \in M_G(t,\omega)} p_{g,h,\omega}^H - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h,\omega}^L \\ + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h,\omega}^L = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h,\omega}^D + \sum_{i \in \theta_n^{SS}} p_{i,h,\omega}^{ST,in} \end{aligned} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^B \setminus n \in \Omega^M \quad (3-83)$$

(ز) توزیع توان خطوط

مقدار توان عبوری از خطوط و همچنین محدودیت آن‌ها در مرحله توزیع توان به ترتیب در روابط ۳-۸۴ و ۳-۸۵ بیان شده‌اند.

$$p_{k,h,\omega}^L = B_k (\delta_{o(k),h,\omega} - \delta_{d(k),h,\omega}) \quad \forall h \geq t, k, \omega \quad (3-84)$$

$$-P_k^{L,max} \leq p_{k,h,\omega}^L \leq P_k^{L,max} \quad \forall h \geq t, k, \omega \quad (3-85)$$

ح) زاویه ولتاژ باس

در روابط ۳-۸۶ و ۳-۸۷ به ترتیب محدودیت‌های زاویه ولتاژ باس و اندازه زاویه ولتاژ باس مرجع اعمال می‌شوند.

$$-\pi \leq \delta_{n,h,\omega} \leq \pi \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^B \quad (3-86)$$

$$\delta_{n,h} = 0 \quad h \geq t, n: \text{reference bus} \quad (3-87)$$

۳-۲-۴-۳ ارتباط مرحله برنامه‌ریزی با مرحله توزیع توان

تصمیمات گرفته‌شده توسط سیستم مدیریت انرژی زمان‌حقیقی نیروگاه مجازی در مرحله برنامه‌ریزی، باید نقش خود را در مرحله توزیع توان ایفا نمایند. بدین منظور از نظر ریاضی باید ارتباطی^۱ بین معادلات و روابط دو مرحله وجود داشته باشد. در ادامه به بیان این روابط پرداخته می‌شود.

۱. بار

تصمیم‌گیری صورت گرفته برای بار الکتریکی در مرحله تصمیم‌گیری در رابطه ۳-۸۸ اثرگذاری خود را در مرحله توزیع توان انجام می‌دهد.

$$p_{j,h,\omega}^D = p_{j,h,\omega}^{D,S} - \bar{r}_{j,h,\omega}^D + \underline{r}_{j,h,\omega}^D \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (3-88)$$

طبق معادله ۳-۸۸، توان مصرفی بار در مرحله توزیع توان، ترکیبی از توان برنامه‌ریزی شده برای بار در مرحله برنامه‌ریزی و رزروهای افزایشی و کاهش‌ی بار در مرحله توزیع توان می‌باشند.

¹ linking

۲. واحد حرارتی

پیوند متغیرهای برنامه‌ریزی و متغیرهای توزیع توان برای واحد حرارتی را معادله ۳-۸۹ محقق می‌سازد.

$$p_{g,h,\omega}^H = p_{g,h,\omega}^{H,S} + \bar{r}_{g,h,\omega}^H - \underline{r}_{g,h,\omega}^H \quad \forall h \geq t, \omega, g \in M_G(t, \omega) \quad (3-89)$$

۳. شبکه اصلی

برای تعیین میزان تبادل با شبکه اصلی در مرحله توزیع توان، معادله ۳-۹۰ اثرگذاری تصمیمات گرفته‌شده در مرحله برنامه‌ریزی را بر توزیع توان شبکه برای ساعت توزیع توان و ساعات بعد نشان می‌دهد.

$$p_{h,\omega}^M = p_{h,\omega}^{M,S} + \bar{r}_{h,\omega}^M - \underline{r}_{h,\omega}^M \quad \forall h \geq t, \omega \quad (3-90)$$

۴. ذخیره‌ساز انرژی

در توزیع توان برای ذخیره‌ساز، توان خروجی از باتری متأثر از توان خروجی برنامه‌ریزی‌شده و رزرو افزایشی/کاهشی در نظر گرفته‌شده برای باتری می‌باشد. همچنین توان ورودی در مرحله توزیع توان برابر مجموع توان ورودی برنامه‌ریزی‌شده و رزرو افزایشی/کاهشی باتری می‌باشد.

در معادلات ۳-۹۱ و ۳-۹۲ ارتباط مراحل برنامه‌ریزی و توزیع توان برای ذخیره‌ساز بیان می‌شود.

$$p_{i,h,\omega}^{ST,out} = p_{i,h,\omega}^{ST,S,out} + \bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,out} - \underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,out} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-91)$$

$$p_{i,h,\omega}^{ST,in} = p_{i,h,\omega}^{ST,S,in} - \bar{r}_{i,h,\omega}^{ST,in} + \underline{r}_{i,h,\omega}^{ST,in} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (3-92)$$

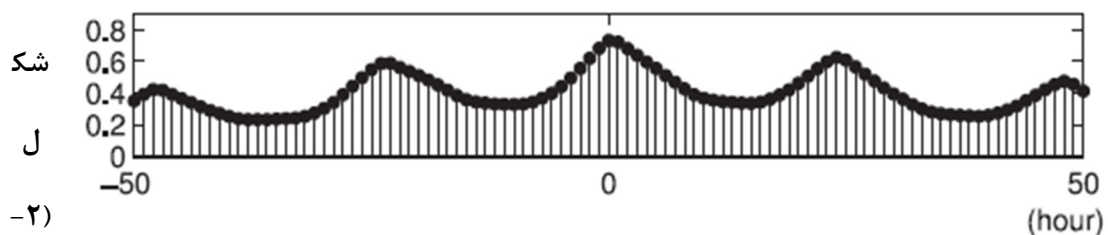
۵-۳ پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای

قیمت انرژی و میزان تولید خورشیدی برای سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی، دقایقی پیش از توزیع توان در ساعت پیش‌رو (ساعت t)، تقریباً قطعی می‌باشد اما برای ساعت‌های آینده عدم قطعیت

دارد. باتوجه به عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی تولید خورشیدی و قیمت انرژی در ساعت‌های آینده دوره برنامه‌ریزی، برای پیش‌بینی این متغیرها از روش پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای استفاده می‌شود.

۱-۵-۳ پیش‌بینی قیمت انرژی

باتوجه به همبستگی معنادار بین قیمت‌های بازار روز قبل و بازار زمان حقیقی، برای پیش‌بینی قیمت بازار زمان حقیقی، استفاده از اطلاعات قیمتی بازار روز قبل پیشنهاد می‌شود. استفاده از اطلاعات گذشته قیمت انرژی، منجر به پیش‌بینی دقیق‌تری می‌شود. همبستگی بین قیمت‌های بازار روز قبل و بازار زمان حقیقی برای بازار برق نیوانگلند ناحیه ماساچوست در شکل ۳-۲ نشان داده شده است [۲۲].



۳: همبستگی قیمت انرژی بازار روز قبل و بازار زمان حقیقی، ناحیه ماساچوست، نیوانگلند (مرجع: [۲۲])

برای پیش‌بینی قیمت زمان حقیقی انرژی، ابتدا یک مدل آریمای^۱ مناسب بر روی اختلاف بین اطلاعات گذشته قیمت‌های زمان حقیقی و قیمت بازار روز قبل اجرا می‌شود.

$$e_{hist}^{RT} = \lambda_{hist}^{RT} - \lambda_{hist}^{DA} \quad (۳-۹۳)$$

سپس برای ساعات باقیمانده روز، مقادیر این اختلاف تخمین زده می‌شود.

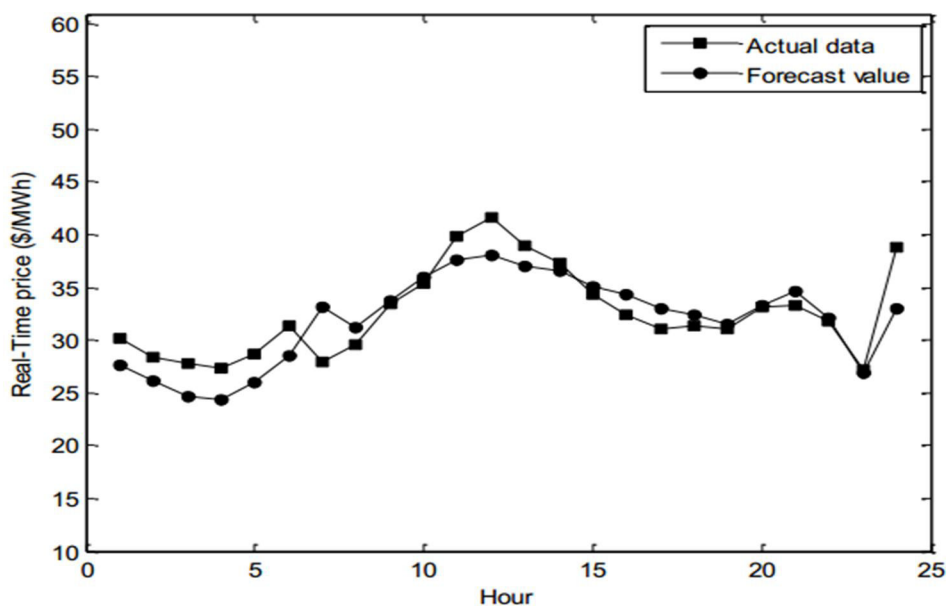
مقادیر پیش‌بینی شده قیمت‌های بازار زمان حقیقی برای هر ساعت با جمع اختلاف متناظر آن ساعت با قیمت متناظر بازار روز قبل حاصل می‌شود.

^۱ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

$$\{\lambda_h^{RT}\} = \lambda_h^{DA} + e_h^{RT} \quad (3-94)$$

برای پیش‌بینی قیمت بازار زمان حقیقی در ساعت $h+1$ ، اطلاعات قیمت بازار زمان حقیقی در ساعت h به اطلاعات قبلی افزوده می‌شود و این روند برای کل دوره برنامه‌ریزی انجام می‌شود.

شکل ۳-۳ پیش‌بینی تک نقطه‌ای قیمت بازار زمان حقیقی ناحیه نیوانگلند را با استفاده از مدل



ARIMA(3,0,2) برای ۲۴ ساعت پیش‌رو را در روز برنامه‌ریزی نشان می‌دهد.

شکل (۳-۳) پیش‌بینی تک نقطه‌ای قیمت انرژی بازار زمان حقیقی (مرجع [۴۶])

۲-۵-۳ پیش‌بینی تولید خورشیدی

برای پیش‌بینی توان تولیدی ایستگاه خورشیدی، از یک روش ترکیبی فازی^۱ و آرما^۲ استفاده

می‌شود. تولید توان خورشیدی تابعی از تابش خورشید می‌باشد [۲۱]؛

$$p_{solar} = f(Irr) \quad (3-95)$$

¹ fuzzy

² Autoregressive Moving Average (ARMA)

به منظور پیش‌بینی تولید توان خورشیدی، از یک مدل فازی مناسب برای تخمین تابع f استفاده می‌شود. سپس مدل فازی بر روی اطلاعات گذشته تابش خورشید پیاده‌سازی می‌شود.

اختلاف بین مقدار واقعی تولید توان خورشیدی در دسترس ($P^{solar,real}$) و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل فازی ($\hat{P}^{solar,fuzzy}$) محاسبه می‌شود:

$$e = P^{solar,real} - \hat{P}^{solar,fuzzy} \quad (3-96)$$

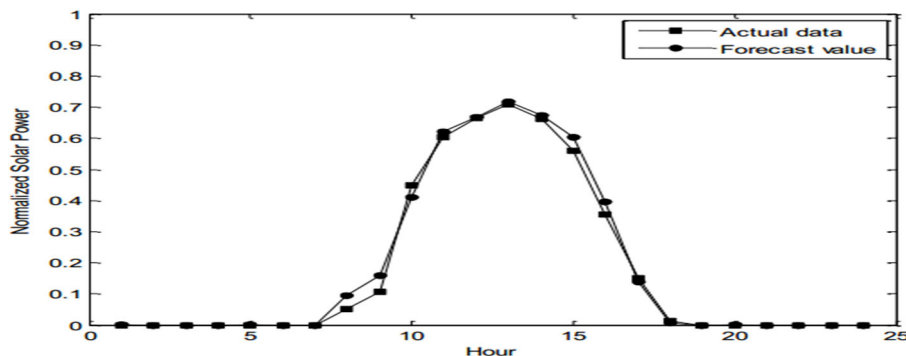
یک مدل آرما مناسب بر روی این اختلافات گذشته (e) اجرا می‌شود.

مقدار توان پیش‌بینی شده برای ایستگاه خورشیدی (\hat{P}^{solar}) برای ساعات پیش‌رو، از جمع توان خورشیدی پیش‌بینی شده از روش فازی ($\hat{P}^{solar,fuzzy}$) و خطاهای (اختلافات) پیش‌بینی شده

$$\hat{P}^{solar} = \hat{P}^{solar,fuzzy} + \hat{e} \quad (3-97)$$

توسط مدل آرما (\hat{e}) بدست می‌آید.

پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای تولید توان خورشیدی در ایستگاه دانشگاه هاروارد با استفاده از مدل $ARIMA(2,0,2)(1,0,1)$ برای ۲۴ ساعت پیش‌رو در روز برنامه‌ریزی در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای تولید خورشیدی (مرجع [۴۶])

۳-۶ مدل سازی عدم قطعیت پیشامدهای سیستم

از مدل سازی تصادفی مبتنی بر تولید سناریو برای مدل سازی پیشامدهای سیستم استفاده می شود. فرض می شود در طول دوره برنامه ریزی، تنها امکان وقوع یک پیشامد وجود دارد. پیشامدهای نیروگاه مجازی از نوع خروج خطوط یا واحدهای حرارتی موجود در سیستم می باشد.

احتمال دسترس پذیری مولفه های سیستم برابر است با [۴۲]:

$$P_{Available} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (3-98)$$

همچنین احتمال خرابی یا عدم دسترس پذیری به مولفه های سیستم عبارتست از [۴۲]:

$$P_{Unavailable} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (3-99)$$

λ نرخ خرابی^۱ المان های سیستم است و t زمان مورد مطالعه است. و μ نرخ تعمیرات^۲ می باشد.

از میان المان های سیستم، احتمال خروج برای خطوط انتقال و واحدهای حرارتی وجود دارد. در مسئله برنامه ریزی سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی فرض می شود در صورت خروج هر یک از المان های نیروگاه مجازی، امکان تعمیر آنها تا پایان دوره برنامه ریزی وجود ندارد. از این رو $\mu = 0$ و در نتیجه احتمال در دسترس بودن مولفه های سیستم به صورت زیر می باشد:

$$P_{Available} = e^{-\lambda t} \quad (3-100)$$

احتمال وقوع پیشامد k در دوره زمانی τ عبارتست از:

$$P[A(k, \tau)] = e^{-\lambda k \tau} (e^{\lambda k} - 1) \quad (3-101)$$

احتمال اینکه پیشامد k در طول دوره برنامه ریزی رخ ندهد:

¹ Failure rate

² Repair rate

$$P[B(k)] = e^{-\lambda_k T} \quad (3-102)$$

که T طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد.

همچنین احتمال اینکه در طول روز برنامه‌ریزی، پیشامد k در سیستم رخ ندهد و تمام المان‌های سیستم در طول افق برنامه‌ریزی T در دسترس باشند از ضرب احتمالات $P[B(k)]$ حاصل می‌شود که در رابطه ۳-۱۰۳ آمده است [۵۴]:

$$P_0 = \prod_{k=1}^K P[B(k)] = \prod_{k=1}^K e^{-\lambda_k T} \quad (3-103)$$

احتمال اینکه پیشامد k در طول دوره زمانی τ رخ دهد و در تمام طول دوره برنامه‌ریزی دیگر اجزای سیستم در دسترس باشند، با استفاده از رابطه ۳-۱۰۴ محاسبه می‌شود:

$$P(k, \tau) = P[A(k, \tau)] \prod_{\substack{y=1 \\ y \neq k}}^K P[B(y)] = e^{-\lambda_k \tau} (e^{\lambda_k} - 1) \prod_{\substack{y=1 \\ y \neq k}}^K e^{-\lambda_y T} \quad (3-104)$$

T طول دوره برنامه‌ریزی است و در هر ساعت برنامه‌ریزی t مقدار جدیدی به خود می‌گیرد که بدینصورت محاسبه می‌شود:

$$T = 24 - t + 1 \quad \forall t = 1, \dots, 24 \quad (3-105)$$

τ ساعتی است که در آن پیشامد رخ می‌دهد.

نکته اینکه مجموع احتمالات P و P_0 برابر یک نمی‌باشد، زیرا پیشامدهای همزمان (مثلاً خروج بیش از یک المان به صورت همزمان) در نظر گرفته نمی‌شود. به همین دلیل احتمالات P باید نرمالایز شوند. به همین منظور، احتمال وقوع هر پیشامد بر مجموع احتمالات تقسیم می‌شود.

$$P(k, \tau) = \frac{P(k, \tau)}{\sum_k P(k, \tau) + P_0} \quad (3-106)$$

$$P_0 = \frac{P_0}{\sum_k P(k, \tau) + P_0} \quad (3-107)$$

۳-۷ جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل، ساختار مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی برای نیروگاه مجازی ارائه شد. مسئله، در قالب برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی شد و تابع هدف و قیود بطور کامل معرفی شدند. مراحل بهینه‌سازی در مدل ارائه شده برای مدیریت انرژی زمان-حقیقی شامل دو بخش می‌باشد، بخش اول برنامه‌ریزی و بخش دوم توزیع توان. در این فصل ضمن معرفی کامل این دو بخش، نحوه ارتباط بین برنامه‌ریزی و توزیع توان نیز بیان شد. در انتها نیز روش مدل‌سازی عدم قطعیت‌های تولید خورشیدی و قیمت انرژی و همچنین پیشامدهای سیستم ارائه شد.

فصل چهارم

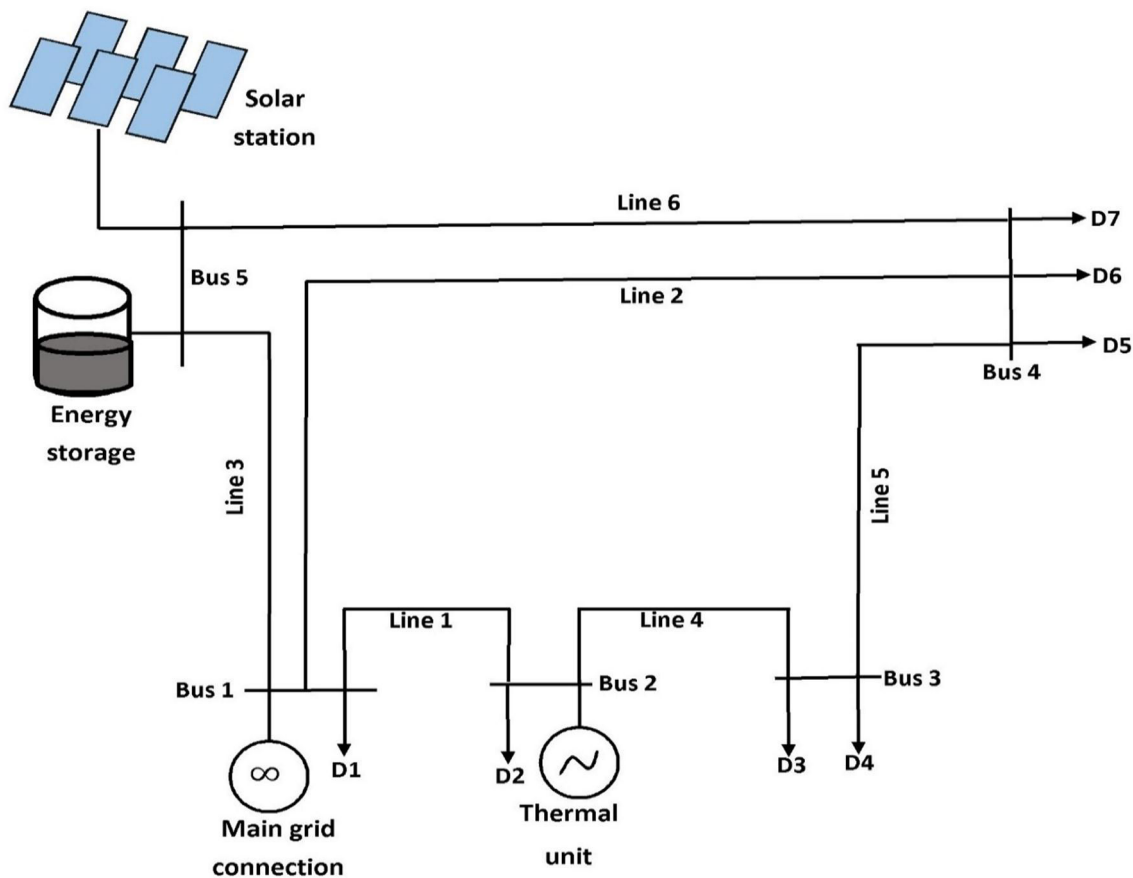
شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمه

شبیه‌سازی و بررسی نتایج مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی در این فصل انجام می‌شود. در ادامه، اطلاعات فنی مسئله ارائه می‌شود. سپس در بخش‌های بعدی نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف آورده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در نهایت نتیجه‌گیری از مباحث فصل بیان می‌شود.

۴-۲ مشخصات سیستم

مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی با وجود رزرو چرخان در پیشامدهای شبکه، در یک سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. شبکه نیروگاه مجازی تحت مطالعه در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱): شبکه نیروگاه مجازی مورد مطالعه

این شبکه دارای ۷ بار می‌باشد، که این بارها در ۵ باس موجود در سیستم واقع شده‌اند.

۶ خط انتقال، بارها و باس‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند.

منابع تولیدی شبکه تحت مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

یک ایستگاه تولید خورشیدی و یک ذخیره‌ساز (باتری) در باس ۵ واقع شده‌اند.

یک واحد تولیدی حرارتی، تولید خود را از طریق باس ۲ به شبکه تزریق می‌کند.

شبکه مورد مطالعه از طریق باس شماره یک به شین بی نهایت (شبکه اصلی) متصل است.

۳-۴ اطلاعات فنی و اقتصادی سیستم

الف) متقاضیان

شبکه انرژی مورد مطالعه دارای ۷ متقاضی انرژی می‌باشد. مشخصات این بارها شامل حداقل انرژی

مصرفی روزانه، حداقل و حداکثر توان مصرفی، حداکثر افزایش و کاهش ساعتی بار، توان مصرفی اولیه

و نیز موقعیت هر یک از متقاضیان در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول (۴-۱): مشخصات فنی متقاضیان شبکه (مرجع [۴۵])

توان مصرفی اولیه [MW]	حداکثر کاهش ساعتی بار [MW/h]	حداکثر افزایش ساعتی بار [MW/h]	حداقل توان مصرفی بار [MW]	حداکثر توان مصرفی بار و ظرفیت رزرو افزایشی/کاهش [MW]	حداقل انرژی مصرفی روزانه [MWh]	باس	شماره بار
۶	۶	۶	۲/۳	۱۰	۱۰۰	۱	۱
۶	۶	۶	۲/۳	۱۰	۱۰۰	۲	۲
۳۰	۴۰	۴۰	۴/۶	۷۰	۵۰۰	۳	۳
۲۶	۴۵	۴۵	۴/۶	۷۰	۶۰۰	۳	۴
۷۸	۱۰۰	۱۰۰	۴۶	۱۵۰	۱۲۰۰	۴	۵
۷۹	۹۰	۹۰	۹۲	۱۵۰	۱۰۰۰	۴	۶
۸۹	۱۱۰	۱۱۰	۹۲	۲۰۰	۱۵۰۰	۴	۷

جدول (۲-۴): تابع مطلوبیت متقاضیان انرژی نیروگاه مجازی (مرجع [۴۵])

مطلوبیت [\$/MW]	بلوک های بار [MW]	شماره بار
۴۴، ۴۱، ۳۶، ۳۳	۵۰، ۵۰، ۵۰، ۵۰	۱
۴۵، ۴۲، ۳۶، ۳۲	۵۰، ۵۰، ۵۰، ۵۰	۲
۵۴، ۵۰، ۴۴، ۳۷	۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵	۳
۵۴، ۵۱، ۴۴، ۳۶	۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵	۴
۵۵، ۵۲، ۴۵، ۳۵	۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵	۵
۵۱، ۴۹، ۴۴، ۳۶	۶/۲۵، ۶/۲۵، ۶/۲۵، ۶/۲۵	۶
۵۶، ۵۲، ۴۶، ۳۷	۲۵، ۲۵، ۲۵، ۲۵	۷

باتوجه به تغییرات قیمت انرژی، متقاضیان، قابلیت پاسخگویی به این تغییرات را دارند و با تغییر مطلوبیت خود این کار را انجام می دهند. در جدول ۲-۴، تابع مطلوبیت متقاضیان انرژی ارائه شده است. در این مسئله، تغییر مطلوبیت بار به صورت زیر انجام می پذیرد:

- بلوک مطلوبیت متقاضیان ۱ تا ۴، از ساعت ۱ تا ۸ در ۱ ضرب می شود (بدون تغییر)، از ساعت ۹ تا ۱۶ نیز بدون تغییر باقی می ماند، اما از ساعت ۱۷ تا ۲۴ در ۱/۱ ضرب می شود.
- بلوک مطلوبیت متقاضیان ۵ تا ۷، از ساعت ۱ تا ۸ در ۱ ضرب می شود، از ساعت ۹ تا ۱۶ در ۰/۹ ضرب می شود و در بقیه ساعات روز یعنی از ۱۷ تا ۲۴ در ۱ ضرب می شود.

ب) خطوط انتقال

شبکه نیروگاه مجازی دارای ۶ خط با مشخصات بیان شده در جدول ۳-۴ می باشد.

جدول (۳-۴): مشخصات خطوط انتقال (مرجع [۴۵])

شماره خط	از باس	به باس	ظرفیت [MW]	راکتانس (X) [Ω]
۱	۱	۲	۲۵۰	۰/۰۲۸۱
۲	۱	۴	۱۵۰	۰/۰۳۰۴
۳	۱	۵	۴۰۰	۰/۰۰۶۴
۴	۲	۳	۳۵۰	۰/۰۱۰۸
۵	۳	۴	۲۴۰	۰/۰۲۹۷
۶	۴	۵	۲۴۰	۰/۰۲۹۷

در صورتی که در نتایج شبیه‌سازی، توان انتقالی از خط عددی منفی باشد به این معناست که جهت توان در آن خط، معکوس جهت ارائه شده در جدول ۴-۳ می‌باشد.

ج) ایستگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز

مشخصات ایستگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز در جدول ۴-۴ آمده است. حداقل انرژی قابل ذخیره در باتری برابر ۱۰٪ ظرفیت باتری در نظر گرفته شده است. بازده ذخیره انرژی در باتری ۰/۹ می‌باشد.

جدول (۴-۴): مشخصات ایستگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز (مرجع [۴۶])

ایستگاه خورشیدی یا ذخیره‌ساز	باس	ظرفیت ایستگاه خورشیدی [MW]	حداقل انرژی ذخیره شده در باتری [MWh]	ظرفیت باتری [MWh]
۱	۵	۱۱۲/۵	۲۰	۲۰۰

د) واحد حرارتی

واحد حرارتی در صورت روشن شدن، نمی‌تواند کم‌تر از ۲۵ مگاوات توان تولید نماید. بعبارت دیگر حداقل توان تولیدی این واحد برابر ۲۵ مگاوات می‌باشد. مشخصات فنی این واحد در جدول ۴-۵ آمده است.

جدول (۴-۵): مشخصات فنی واحد حرارتی (مرجع [۴۳])

شماره واحد	حداقل توان تولیدی (PH.min) [MW]	حداکثر توان تولیدی (PH.max) [MW]	حداکثر افزایش ساعتی تولید (RH ^U) [MW/h]	حداکثر کاهش ساعتی تولید (RH ^D) [MW/h]	حداکثر ظرفیت رزرو افزایشی [MW]	حداکثر ظرفیت رزرو کاهش‌شی [MW]
۱	۲۵	۸۵	۳۰	۳۰	۸۵	۸۵

مالکیت واحد حرارتی در اختیار متقاضیان انرژی نیروگاه مجازی می‌باشد، از این‌رو، هزینه‌ای بابت تأمین انرژی از واحد حرارتی نمی‌پردازند. هزینه‌ای که واحد حرارتی برای نیروگاه مجازی دارد عبارتست از: هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری.

مشخصات اقتصادی واحد حرارتی در جدول ۴-۶ آمده است [۴۳].

شماره واحد	هزینه تولید تا ۵۰ مگاوات [\$/MWh]	هزینه تولید از ۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات [\$/MWh]	هزینه روشن شدن [\$]	هزینه تعمیر و نگهداری [\$/MWh]
۱	۲۷/۸۱۹	۲۷/۸۹۸	۲۶۰	۲۱

جدول (۴-۶): مشخصات اقتصادی واحد حرارتی (مرجع [۴۳])

با توجه به اینکه هزینه تولید واحد حرارتی تا ۵۰ مگاوات و از ۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات، اختلاف ناچیزی دارند، و این اختلاف تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج شبیه‌سازی ندارد، در شبیه‌سازی برای هر دو پله تولید از یک مقدار هزینه استفاده می‌شود.

ه) شبکه اصلی

نیروگاه مجازی در باس ۱ به شبکه اصلی متصل است و قابلیت تبادل توان تا ۴۰۰ مگاوات را با شبکه اصلی دارد.

۴-۴ مشخصات پارامترهای غیرقطعی

پیشامدهایی که بر سیستم وارد می‌شود از نوع خروج خطوط انتقال یا خروج واحد حرارتی می‌باشند. نرخ خروج خطوط انتقال حدود یک خروج در ۱۰۰۰۰ ساعت کار می‌باشد. بعبارت دیگر برای خطوط انتقال $\lambda = \frac{1}{10000}$ می‌باشد. برای واحد حرارتی، نرخ خروج، یک خروج در ۵۰۰ ساعت کار گزارش شده است، که در اینصورت برای واحد حرارتی $\lambda = \frac{1}{500}$ [۴۲].

برای پیش‌بینی پارامترهای غیرقطعی قیمت انرژی و تولید خورشیدی از اطلاعات روز ۱۰ آگوست سال ۲۰۰۹ استفاده شده است [۴۴].

روش پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای برای پیش‌بینی این مقادیر بکار رفته است. قبل از ورود به اولین ساعت برنامه‌ریزی، اطلاعات مربوط به قیمت انرژی و تولید خورشیدی برای این ساعت و همچنین اطلاعات روز قبل برای سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی مشخص است. بنابراین با استفاده از این اطلاعات، پیش‌بینی برای ۲۳ ساعت آینده انجام می‌شود.

جدول (۷-۴): اطلاعات پارامترهای غیرقطعی روز دهم آگوست ۲۰۰۹ (قیمت انرژی و تولید خورشیدی)

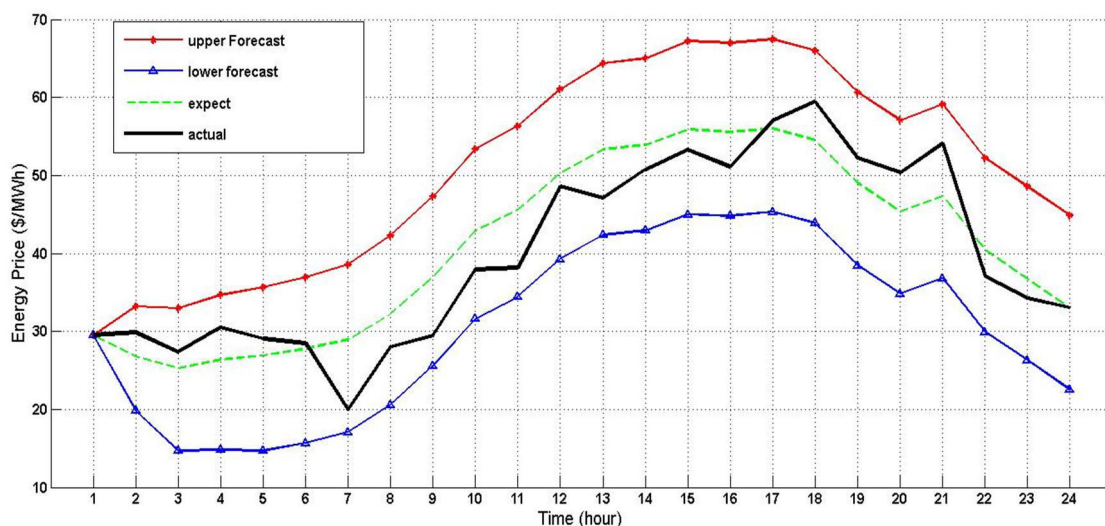
ساعت	حد پایین قیمت انرژی [\$ /MWh]	حد بالای قیمت انرژی [\$ /MWh]	میانگین قیمت انرژی [\$ /MWh]	قیمت حقیقی انرژی [\$ /MWh]	حد پایین تولید خورشیدی [pu]	حد بالای تولید خورشیدی [pu]	میانگین تولید خورشیدی [pu]	توان واقعی خورشیدی [pu]
۱	۲۹/۵	۲۹/۵	۲۹/۵	۲۹/۵	.	.	.	.
۲	۱۹/۸۱۷۵	۳۳/۲	۲۶/۸۰۷۰	۲۹/۸۸	.	.	.	.
۳	۱۴/۷۰۴۶	۳۲/۹۶	۲۵/۲۸۲۹	۲۷/۳۴	.	.	.	.
۴	۱۴/۸۳۲۲	۳۴/۶۷۳۵	۲۶/۳۵۲۶	۳۰/۵	.	.	.	.
۵	۱۴/۷۱۷۳	۳۵/۶۵۸۸	۲۶/۹۲۱۷	۲۹/۰۵	.	.	.	.
۶	۱۵/۶۷۵	۳۶/۹۴۰۷	۲۷/۷۹۱۱	۲۸/۴۹	.	.	.	.
۷	۱۷/۰۹۸۹	۳۸/۵۹۶۹	۲۸/۹۴۹۲	۱۹/۹۱	۰/۰۱۳۲	.	۰/۰۰۹۵	.
۸	۲۰/۶۱۶۴	۴۲/۲۷۳۰	۳۲/۲۳۳۵	۲۷/۹۹	۰/۱۴۳۹	۰/۱۱۳۷	۰/۱۳۳۳	.
۹	۲۵/۵۸۸۶	۴۷/۲۹۱۱	۳۶/۹۵۰۲	۲۹/۴۹	۰/۵۱۸۴	۰/۳۴۱۵	۰/۳۷۹۳	.
۱۰	۳۱/۶۳	۵۳/۴۲۲۸	۴۲/۸۶۹۲	۳۷/۹۲	۰/۳۴۸۸	۰/۵۶۰۰	۰/۵۰۷۵	.
۱۱	۳۴/۴۴۶۵	۵۶/۲۹۰۷	۴۵/۵۵۶۱	۳۸/۱۶	۰/۵۷۷۷	۰/۷۴۸۶	۰/۶۱۲۳	۰/۶۷۰۱
۱۲	۳۹/۲۶۱۰	۶۱/۰۵۶۰	۵۰/۲۳۴۴	۴۸/۶۱	۰/۵۷۷۷	۰/۷۴۲۵	۰/۶۱۰۸	۰/۶۸۴۴
۱۳	۴۲/۳۸۹۳	۶۴/۳۷۱۹	۵۳/۳۳	۴۷/۱۱	۰/۳۲۷۹	۰/۴۸۹۴	۰/۳۶۰۱	۰/۴۲۸۳
۱۴	۴۲/۹۴۴۰	۶۵/۰۲۲۳	۵۳/۹	۵۰/۷۴	۰/۴۱۳۵	۰/۵۶۷۶	۰/۴۴۴۳	۰/۵۲۶۷
۱۵	۴۴/۹۹۲۹	۶۷/۲۰۵۲	۵۵/۸۹	۵۳/۲۴	۰/۱۹۲۸	۰/۴۱۲۷	۰/۲۴۵۳	۰/۲۴۴۷
۱۶	۴۴/۸۰۸۵	۶۶/۹۹۵۸	۵۵/۵۸	۵۱/۱۲	۰/۱۸۳۷	۰/۴۹۵۰	۰/۲۸۳۱	۰/۲۷۶۳
۱۷	۴۵/۳۶۰۰	۶۷/۴۵۱۷	۵۶/۰۱	۵۷/۰۲	۰/۳۲۷۹	۰/۴۸۴۴	۰/۳۵۹۳	۰/۳۹۱۲
۱۸	۴۳/۸۷۸۱	۶۶/۰۰۶۴	۵۴/۴۹۷۶	۵۹/۴۶	۰/۰۸۸۸	۰/۱۸۰۶	۰/۰۹۰۴	۰/۱۱۵۳
۱۹	۳۸/۴۳۲۶	۶۰/۶۱۵۲	۴۹/۰۱۲۵	۵۲/۱۶	.	۰/۰۳۰۵	.	۰/۰۰۱۳
۲۰	۳۴/۸۳۷۴	۵۷/۰۷۵۴	۴۵/۳۸۵۹	۵۰/۲۹	.	.	.	.
۲۱	۳۶/۸۳۵۷	۵۹/۱۲۱۱	۴۷/۳۹۲۲	۵۴/۰۹	.	.	.	.
۲۲	۲۹/۹۴۱۷	۵۲/۱۹۶۳	۴۰/۴۳	۳۷/۰۸	.	.	.	.
۲۳	۲۶/۲۸۹۲	۴۸/۵۵۹۲	۳۶/۷۲۹۱	۳۴/۲۳	.	.	.	.
۲۴	۲۲/۵۳۱۶	۴۴/۸۵۲۱	۳۲/۹۵	۳۳/۰۳	.	.	.	.

با رسیدن به ساعت ۲، سیستم مدیریت انرژی از اطلاعات این ساعت نیز مطلع می‌شود و اطلاعات این ساعت به سایر اطلاعات نیز افزوده می‌شود و پیش‌بینی برای ۲۲ ساعت باقیمانده روز انجام

می‌شود. به همین ترتیب تا آخرین ساعت افق برنامه‌ریزی این‌روند ادامه می‌یابد و در ساعت آخر (ساعت ۲۴) اطلاعات تمام روز مشخص می‌شود، به همین خاطر در این ساعت مقادیر پیش‌بینی با مقادیر واقعی برابر می‌باشد. در واقع در هر ساعت اطلاعات سیستم مدیریت انرژی به روز می‌شود و پیش‌بینی قیمت انرژی و تولید خورشیدی برای ساعات باقیمانده انجام می‌شود. به‌علت حجم بالای اطلاعات، تنها پیش‌بینی‌های انجام شده برای ساعت یک از روز برنامه‌ریزی در جدول ۴-۷ آورده شده است.

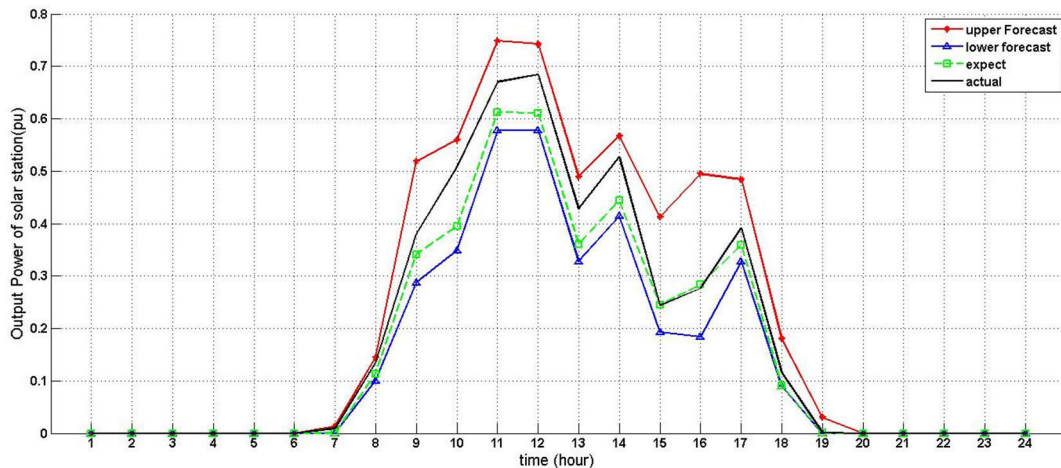
اطلاعات این جدول مربوط به قیمت انرژی و تولید خورشیدی شامل مواردی همچون حداقل و حداکثر پیش‌بینی قیمت انرژی و تولید توان خورشیدی، متوسط قیمت انرژی و متوسط توان تولیدی خورشیدی و همچنین مقادیر واقعی آن‌ها می‌باشد.

تولید توان خورشیدی از ساعت ۷ صبح با مقدار کمی آغاز می‌شود و در اواسط روز به اوج خود می‌رسد. پیش‌بینی‌های انجام گرفته برای روز دهم آگوست، پیش‌بینی‌های قابل قبولی است و از نوع پیش‌بینی‌ها خوب می‌باشد زیرا مقادیر واقعی نزدیک به مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.



شکل (۲-۴): پیش‌بینی حد پایین و بالا، میانگین و مقادیر واقعی قیمت انرژی شبکه اصلی در اولین ساعت روز برنامه‌ریزی

در شکل ۴-۲، پیش‌بینی انجام گرفته برای قیمت انرژی در روز برنامه‌ریزی نشان داده شده است. پیش‌بینی انجام گرفته برای تولید خورشیدی به همراه مقادیر واقعی و امید ریاضی پیش‌بینی در شکل ۴-۳ آمده است.



شکل (۴-۳) پیش‌بینی حد بالا و پایین و مقادیر واقعی و میانگین تولید توان خورشیدی در اولین ساعت از روز برنامه‌ریزی

همانطور که در شکل ۴-۳ دیده می‌شود، پیش‌بینی انجام گرفته برای تولید توان خورشیدی به مقادیر واقعی بسیار نزدیک می‌باشد.

۴-۵ نتایج شبیه‌سازی

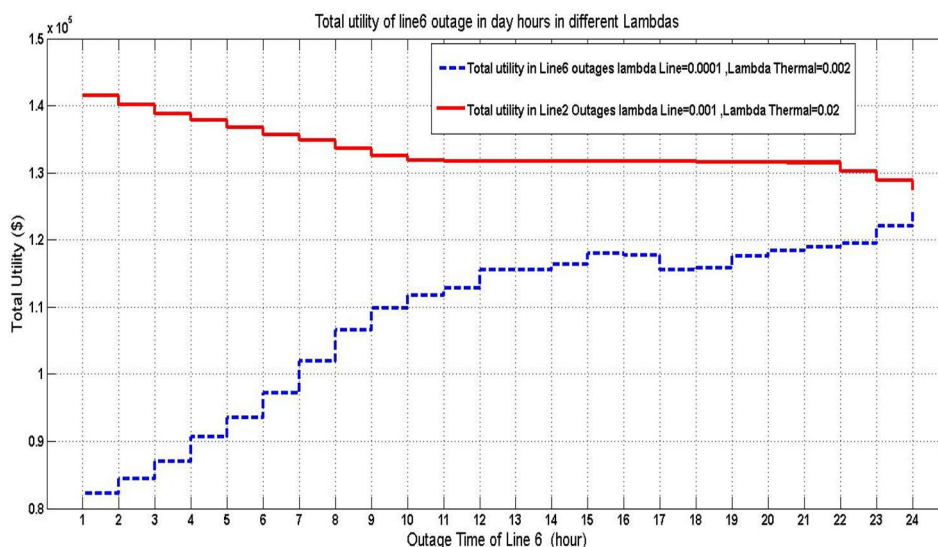
پاسخ سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی به شرایط مختلف شبکه و پیشامدهایی که بر آن وارد می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تعیین کننده نحوه مدیریت و کارایی سیستم می‌باشد. در شرایط مختلف شبکه، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی، تصمیم‌های متفاوتی اتخاذ می‌نماید که این تصمیم‌های مختلف، منجر به پاسخ‌های متفاوتی نیز می‌شود. پیشامدهای مختلف، اثرات متفاوتی بر سیستم اعمال می‌کنند که این امر ناشی از اهمیت خاص هر المان شبکه می‌باشد. با وقوع هر پیشامد، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی، قابلیت اصلاح سریع تصمیمات را در مرحله توزیع توان دارا می‌باشد و به محض اطلاع از تغییر وضعیت شبکه در مرحله توزیع توان، تصمیمات را اصلاح و توزیع توان را اجرا می‌کند.

نحوه عملکرد سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی در شرایط مختلف شبکه در این بخش بررسی می‌شود و شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

در این بخش، از بین تمام پیشامدهای ممکن، دومورد از آنها تحت شرایط مختلف بهره‌برداری مورد بررسی قرار می‌گیرد. پیشامدهای مورد بررسی عبارتست از: خروج یک خط انتقال در ساعاتی مختلف و خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف دوره برنامه‌ریزی. شبیه‌سازی انجام شده در درجه‌های متفاوت آسیب‌پذیری شبکه (λ های متفاوت) پیاده‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۴-۵-۱ خروج خطوط انتقال در ساعات مختلف در نرخ خروج پایه

نرخ خروج پایه برای خطوط انتقال برابر 0.0001 و برای واحد حرارتی 0.002 است. خروج هر یک از المان‌های شبکه، اثرات متفاوتی بر سود نیروگاه مجازی دارد. به طوری که با خروج برخی خطوط سود نیروگاه مجازی کاهش می‌یابد و پیشامد خروج برخی خطوط نیز باعث افزایش سود می‌شود. بعنوان مثال، خروج خط ۶ باعث وارد آمدن ضرر به نیروگاه مجازی می‌شود و با خروج خط ۲، سود نیروگاه مجازی افزایش می‌یابد و وجود این خط باعث ضرر نیروگاه مجازی می‌شود. مقایسه روند سود روزانه در پیشامدهای خروج خطوط ۲ و ۶ در شکل ۴-۴ آمده است.



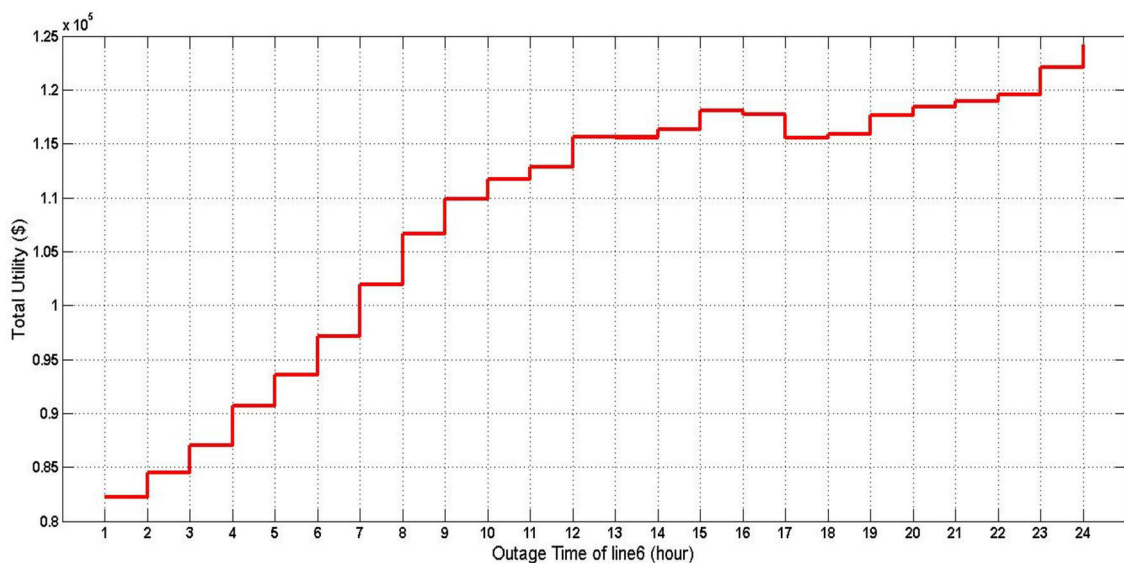
شکل (۴-۴) روند مجموع سود روزانه در پیشامدهای خروج خطوط ۲ و ۶

همانطور که از شکل ۴-۴ قابل مشاهده است، هرچه خط ۲ زودتر از مدار خارج شود، سود نیروگاه مجازی بیشتر می‌باشد و وجود این خط، سود نیروگاه مجازی را کاهش می‌دهد. به علت اهمیت وجود خط ۶ برای نیروگاه مجازی، شبیه‌سازی برای پیشامدهای خروج این خط انجام می‌شود.

۱-۱-۵-۴ اثر خروج خط ۶ بر روی میزان سود نیروگاه مجازی در نرخ خروج پایه

جهت انتقال توان در خط ۶، از باس ۴ به باس ۵ و ظرفیت این خط برابر ۲۴۰ مگاوات می‌باشد. با خروج خط ۶ در ساعت ۱ (اولین ساعت در دوره برنامه‌ریزی)، حدود $244 \$/mwh$ از انرژی موردنیاز روزانه تأمین نمی‌شود و سیستم مدیریت انرژی متقاضیان را مجبور می‌کند که مصرف خود را حدود ۱۴۲ مگاوات کاهش دهند (رزرو افزایشی).

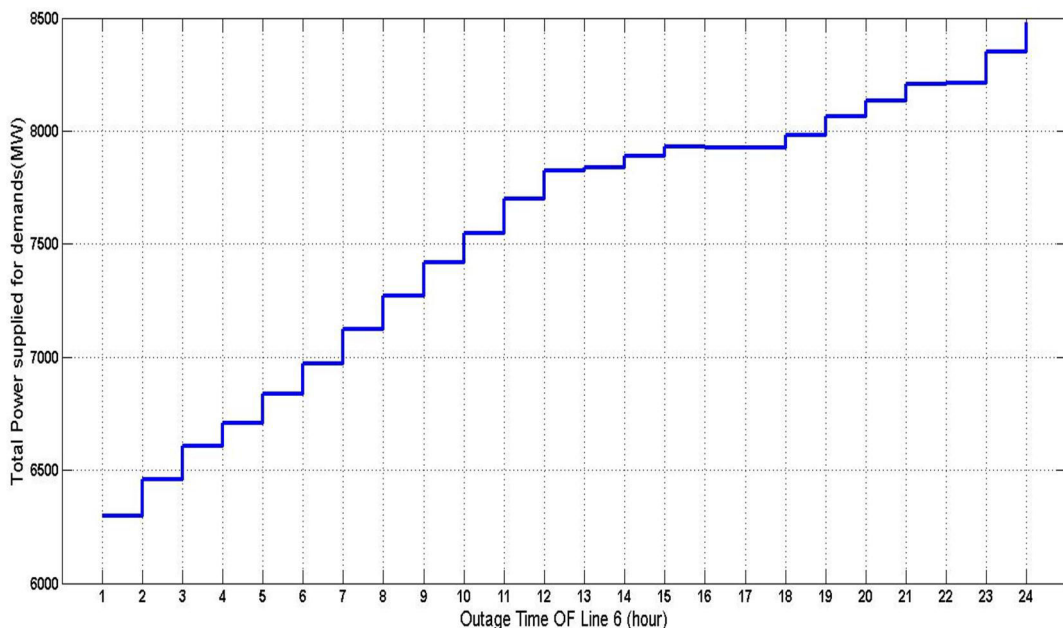
همانطور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود، هرچه خط ۶ در ساعات دیرتری از مدار خارج می‌شود، سود شبکه بیشتر می‌شود، به‌طوری‌که که در پیشامد خروج این خط در ساعات پایانی روز، سود به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که وجود خط ۶ برای سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک تحت مطالعه، ضروری می‌باشد.



شکل (۴-۵): مجموع سود روزانه در پیشامد خروج خط ۶ در ساعات مختلف؛ نرخ خروج خط = 0.0001 ، نرخ خروج واحد حرارتی = 0.002

باخروج خط ۶ در ساعت اول، سود سیستم انرژی برابر ۰/۰۶۱۰۶۲۲۴۶ دلار می‌باشد، در حالیکه در وضعیت خروج این خط در ساعت ۲۴ (آخرین ساعت دوره برنامه‌ریزی) سود به ۰/۱۱۱۲۴۲۱۱ دلار می‌رسد. با توجه به شکل ۴-۵، تغییر صعودی سود در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت‌های ۷ و ۸ نسبت به سایر ساعات، بیش‌تر می‌باشد. بعبارت دیگر با خروج خط ۶ در این ساعت‌ها، جهش میزان سود نسبت به سایر ساعات قابل توجه می‌باشد. زیرا در این دو ساعت، قیمت انرژی شبکه در کم‌ترین مقدار خود در طول روز می‌باشد، همچنین در ساعت‌های ۷ و ۸ بار تأمین شده نسبت به سایر ساعات افزایش بیش‌تری دارد. در شکل ۴-۶، نمودار بار تأمین شده بر حسب ساعت خروج خط ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، خط ۶ در تأمین بار نیروگاه مجازی نیز نقش مهمی ایفا می‌نماید. هرچه خروج خط ۶ به تاخیر بیفتد، بار تأمین شده متقاضیان افزایش می‌یابد و در نتیجه سود نیروگاه مجازی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۴-۶، روند افزایش تأمین بار با خروج خط ۶ در ساعت‌های ۱۶ و ۱۷ متوقف شده و حتی اندکی نیز کاهش می‌یابد، این کاهش بار تأمینی باعث کاهش سود در این ساعت‌ها می‌شود، در شکل ۴-۵ این کاهش سود قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۴-۶): مجموع توان بار تأمین شده روزانه در وضعیت خروج خط ۶ در ساعات مختلف روز برنامه‌ریزی؛ نرخ خروج خط = ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی = ۰/۰۰۲.

یکی دیگر از دلایل افزایش سود که با تاخیر در خروج خط ۶ رخ می‌دهد این است که هرچه پیشامد خروج این خط دیرتر رخ دهد، در ساعت‌هایی از خروج خط ۶ که قیمت انرژی شبکه کم‌تر از هزینه سوخت واحد حرارتی است، میزان تولید واحد حرارتی کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه سوخت کاهش یافته و میزان سود افزایش می‌یابد. با خروج خط ۶ در ساعت اول، تولید توان واحد حرارتی حدود ۱۹۶۰ مگاوات می‌باشد، این مقدار با خروج خط ۶ در ساعت ۵ به ۱۷۲۸ و در ساعت ۱۰ به ۱۳۵۳ مگاوات می‌رسد. با خروج خط ۶ در ساعت ۱۵، واحد حرارتی ۱۲۷۸ مگاوات توان تولید می‌کند، این روند کاهشی تولید واحد حرارتی ادامه یافته و اگر پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۲۰ رخ دهد، واحد حرارتی ۱۲۴۸ مگاوات توان تولید می‌نماید و در نهایت اگر این خط در ساعت پایانی روز خارج شود تولید توان واحد حرارتی به ۱۰۵۳ مگاوات کاهش می‌یابد.

۲-۱-۵-۴ اثر خروج خط ۶ بر روی بار و انرژی تأمین نشده

جهت جریان توان در خط ۶ در تمام ساعات روز، معکوس جهت تعیین شده برای آن است، بعبارت دیگر این خط توان را از باس ۵ به باس ۴ منتقل می‌نماید و بارهای ۵، ۶ و ۷ را تأمین می‌کند. با خروج این خط، حذف بار و انرژی تأمین نشده بر روی این بارها تحمیل می‌شود. با خروج خط ۶ در ساعات ابتدایی روز، حذف بار و انرژی تأمین نشده روزانه مقدار نسبتاً بالایی دارد. مقادیر این پارامترها در جدول ۴-۸ آورده شده‌اند. در حالتی که خط ۶ در ساعات ابتدایی روز خارج شود، انرژی تأمین نشده روزانه قابل توجه می‌باشد، زیرا با وقوع پیشامد در ساعات ابتدایی روز، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی فرصتی برای تأمین کل انرژی روزانه ندارد و مقداری از انرژی موردنیاز روزانه را تأمین نمی‌کند. همانطور که در جدول ۴-۸ آمده است، در وضعیت خروج خط ۶ در ساعت ۲، انرژی تأمین نشده روزانه به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به ساعت اول کاهش می‌یابد. این کاهش انرژی تأمین نشده ادامه یافته به طوری که با خروج خط ۶ در ساعت ۶، به صفر می‌رسد. وقتی خط ۶ در ساعت ۷ تا ۱۹ خارج می‌شود، انرژی تأمین نشده روزانه به صفر می‌رسد، چون توان خورشیدی از ساعت ۷ تا ۱۹

تولید می‌شود(با توجه به وضعیت تابش خورشید) و با وقوع پیشامد در این ساعات، باتوجه به تولید

توان خورشیدی، سیستم مدیریت انرژی توانایی تأمین کل انرژی موردنیاز روزانه را دارا می‌باشد.

جدول (۸-۴): میزان حذف بار و انرژی تأمین نشده روزانه در زمان‌های مختلف خروج خط ۶؛ نرخ خروج

خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲

انرژی تأمین نشده روزانه [\$/MWh]				حذف بار [MW]				ساعت خروج خط ۶
جمع	بار ۷	بار ۶	بار ۵	جمع	بار ۷	بار ۶	بار ۵	
۲۴۴/۹۳	۷/۱۳	۲۳۷/۸	۰	۳۰/۷۰	۰	۱۷	۱۳/۷۰	۱
۱۶۶/۸۱	۰	۱۶۶/۸۱	۰	۱۷/۳۱	۰	۱۷	۰/۳۱	۲
۱۰۹/۶۰	۰	۱۰۹/۶۰	۰	۱۱/۳۳	۰	۱۱/۳۳	۰	۳
۸۲/۹۰	۰	۸۲/۹۰	۰	۳۱/۹۳	۰	۱۷	۱۴/۹۳	۴
۳۷/۹۲	۰	۳۷/۹۲	۰	۳۲/۰۰	۰	۱۷	۱۵/۰۰	۵
۰	۰	۰	۰	۳۹/۱۲	۰	۴/۵۲	۳۴/۶	۶
۰	۰	۰	۰	۴۴/۱۷	۰	۰	۴۴/۱۷	۷
۰	۰	۰	۰	۴۴/۱۷	۰	۰	۴۴/۱۷	۸
۰	۰	۰	۰	۳۸/۰۱	۰	۰	۳۸/۰۱	۹
۰	۰	۰	۰	۸۴/۸۲	۵/۱۶	۲۲/۷۱	۵۶/۹۴	۱۰
۰	۰	۰	۰	۶۱/۵۹	۰	۱۵/۵۹	۴۶	۱۱
۰	۰	۰	۰	۰/۴۴	۰	۰	۰/۴۴	۱۲
۰	۰	۰	۰	۲۹/۷۴	۰	۰	۲۹/۷۴	۱۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷
۳/۰۵	۰	۳/۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۸
۱۵/۲۱	۰	۱۵/۲۱	۰	۴۶	۰	۰	۴۶	۱۹
۲۲/۳۴	۰	۲۲/۳۴	۰	۴۶	۰	۰	۴۶	۲۰
۳۶/۱۱	۶/۹۹	۲۹/۱۲	۰	۴۶	۰	۰	۴۶	۲۱
۶۱/۴۰	۳۲/۲۸	۲۹/۱۲	۰	۴۶	۰	۰	۴۶	۲۲
۴۱/۹۴	۲۷/۷۴	۱۴/۱۹	۰	۴۶	۰	۰	۴۶	۲۳
۰	۰	۰	۰	۴۶	۰	۰	۴۶	۲۴

همچنین باتوجه به توانایی مصرف‌کنندگان برای تأمین رزرو موردنیاز شبکه، انرژی تأمین نشده

کم‌تری به سیستم تحمیل می‌شود و متقاضیان با کاهش بخشی از مصرف خود(رزرو افزایشی) میزان

بار را کاهش داده و در نتیجه انرژی تأمین نشده روزانه و همچنین قطع بار کاهش می‌یابد. در ساعات

پایانی روز، ایستگاه خورشیدی توان تولید نمی‌کند، و با خروج خط در این ساعات همچنان بخشی از انرژی موردنیاز روزانه تأمین نمی‌شود، اما میزان عدم تأمین انرژی در این حالت بسیار کم‌تر از ساعات ابتدایی روز است، زیرا با وقوع پیشامد در ساعات پایانی، سیستم مدیریت انرژی، فرصت کافی برای مدیریت تأمین انرژی روزانه را دارد.

۳-۱-۵-۴ رزرو تأمین شده از منابع رزرو در پیشامدهای خروج خط ۶

اطلاعات مربوط به تأمین رزرو از متقاضیان انرژی در جدول ۴-۹ آمده است. مقادیر منفی، رزرو کاهشی و مقادیر مثبت، رزرو افزایشی می‌باشند. هنگام خروج خط ۶ در ساعت اول، بارها مجموعاً حدود ۱۴۲ مگاوات از توان مصرفی خود را در قالب رزرو افزایشی، کاهش می‌دهند، که در نتیجه این کاهش مصرف، نیروگاه مجازی قادر خواهد بود پیشامد خروج خط را مدیریت نماید.

نتایج نشان می‌دهد که با خروج خط ۶، بارهای الکتریکی ۱ و ۲ در تأمین رزرو افزایشی شرکت نمی‌کنند، زیرا توان عبوری از خط ۶ به صورت مستقیم بر روی بارهای ۳ تا ۷ اثرگذار است.

تأثیر خروج خط ۶ بر روی بارهای ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ قابل توجه می‌باشد. بارهای مذکور با شرکت در تأمین رزرو افزایشی، مقدار مصرف توان خود را کاهش داده و به توزیع توان بهینه و جلوگیری از قطع بار کمک می‌کنند. بطوریکه در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۱۰، ۲۱ و ۲۲ بار ۵ تمام ظرفیت مصرفی خود را به رزرو افزایشی اختصاص می‌دهد و هیچ مصرفی ندارد. در پیشامدهای خروج خط ۶، بارهای ۱ و ۲ تنها رزرو کاهشی ایجاد می‌نمایند.

با خروج خط ۶، شبکه اصلی تنها رزرو کاهشی ایجاد می‌نماید. اگر خط ۶ از ساعت اول تا ساعت ۹ از روز برنامه‌ریزی از مدار خارج شود، رزرو تأمینی از شبکه اصلی از نوع کاهشی می‌باشد، اما با خروج خط از ساعت ۱۰ تا ساعت ۲۱، شبکه اصلی هیچگونه رزروی تولید نمی‌نماید و در صورت وقوع پیشامد خروج خط ۶ از ساعت ۲۲ تا آخرین ساعت از روز برنامه‌ریزی، مجدداً شبکه اصلی در تأمین رزرو کاهشی مشارکت دارد.

جدول (۹-۴): تأمین رزرو توسط متقاضیان انرژی در ساعت‌های خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط = ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی = ۰/۰۰۲

تفاضل رزرو افزایشی و کاهش متقاضیان انرژی [MW]	رزرو بارها [MW]							ساعت خروج خط ۶
	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۴۲/۸۸	۲۰/۱۱	۳۷/۵	۴۲/۷	۲۰/۷۸	۲۷/۱	-۲/۸۲	-۲/۵	۱
۱۳۷/۲۳	۱۶/۸۶	۳۷/۵	۲۹/۳۱	۲۳/۶۸	۳۵	-۰/۱۲	-۵	۲
۱۲۰/۴۱	۲۵/۲۱	۳۱/۸۳	۲۹	۱۵/۶۶	۱۰/۶۶	۰	-۵	۳
۱۳۹/۴	۱۰/۶۸	۳۷/۵	۴۳/۹۳	۲۰/۱۹	۳۲/۱	۰	-۵	۴
۱۳۹/۳۵	۱۰/۶۸	۳۷/۵	۴۴/۰۰	۲۰/۰۶	۳۲/۱۱	۰	-۵	۵
۱۳۳/۰۱	۱۰/۶۸	۲۰/۰۲	۶۳/۶	۱۴/۶	۲۷/۴	-۳/۳	-۵	۶
۱۳۱/۷۲	۱۱/۲۲	۲۰/۵	۷۳/۱۷	۱۴/۶	۱۹/۷۳	-۵	-۲/۵	۷
۱۳۹/۲۶	۱۸/۷۶	۲۰/۵	۷۳/۱۷	۱۴/۶	۱۹/۷۳	-۵	-۲/۵	۸
۱۴۲/۴۳	۱۵/۸۴	۲۰/۵	۶۷/۰۱	۱۷/۵	۲۴/۰۸	۰	-۲/۵	۹
۱۰۱/۱۲	۱۳/۱۶	۲۲/۹۶	۷۵	۰	۰	-۵	-۵	۱۰
۱۰۰/۵۲	۸	۲۲/۵۲	۷۵	۰	۰	۰	-۵	۱۱
۵۵/۴۴	۰	۰	۰/۴۴	۲۹/۶۱	۲۵/۳۸	۰	۰	۱۲
۵۴/۷۴	۰	۰	۲۹/۷۴	۷/۵	۱۷/۵	۰	۰	۱۳
۳۸/۲۸	۰	۰	۰	۲۵/۳۸	۱۲/۹	۰	۰	۱۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶
۳۴/۱۱	۰	۰	۰	۱۶/۶۱	۱۷/۵	۰	۰	۱۷
۵۲/۲۵	۳/۰۵	۰	۰	۲۷/۹	۲۷/۱	۰	-۵/۸	۱۸
۳۶/۹۵	۸	۰	۴۶	-۸/۴	۳/۳۵	-۶	-۶	۱۹
۳۶/۹۴	۱/۳۵	۰	۴۶	۰	۱/۵۹	-۶	-۶	۲۰
۱۱/۹۵	۰	۰	۴۶	-۱۴/۶	-۷/۰۵	-۶/۲	-۶/۲	۲۱
۱۳۳/۹۹	۲۲/۱۱	۱۴/۹۲	۷۳/۶۸	۱۲/۳۸	۱۷/۵	-۳/۳	-۳/۳	۲۲
۱۳۴/۵۳	۲۱/۵۲	۱۴/۱۹	۷۵	۱۷/۵	۱۳/۰۶	-۴/۲۴	-۲/۵	۲۳
۱۵۲/۵۸	۱۲/۶۱	۰	۷۵	۳۵	۳۵/۲۶	-۲/۷۹	-۲/۵	۲۴

واحد حرارتی نیز با خروج خط ۶ در ساعت ۳۰۲ در تأمین رزرو افزایشی شرکت می‌نماید و با خروج این خط در ساعات پایانی، واحد حرارتی مقداری از توان تولیدی خود را در قالب رزرو کاهش، کاهش می‌دهد.

در جدول ۴-۱۰، مقدار رزرو تأمین شده از هر یک از منابع رزرو آمده است. مقادیر منفی نشان دهنده کاهش بودن رزرو می‌باشد و مقادیر مثبت معرف رزرو افزایشی هستند. با توجه به جدول ۴-۱۰، شبکه اصلی فقط رزرو کاهش ایجاد می‌کند و توان تأمینی برنامه‌ریزی شده از شبکه اصلی، در مرحله توزیع توان در قالب رزرو کاهش، کاهش می‌یابد.

جدول (۱۰-۴): رزرو فراهم شده از منابع رزرو در ساعت‌های مختلف پیشامد خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱،
نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲

رزرو ورودی ذخیره‌ساز [MW]	رزرو خروجی ذخیره‌ساز [MW]	رزرو واحد حرارتی [MW]	رزرو شبکه اصلی [MW]	تفاضل رزرو افزایشی و کاهشی بارها [MW]	ساعت خروج خط ۶
۰	۰	۰	-۸۳/۳۲	۱۴۲/۸۸	۱
-۷۵/۷۸	۰	۲۱/۶۳	-۸۳/۰۹	۱۳۷/۲۳	۲
-۲۸/۹۶	۰	۴۳/۳۶	-۱۲۱/۷۷	۱۲۰/۴۱	۳
-۳۱/۵۵	۰	۰	-۱۰۷/۸۷	۱۳۹/۴	۴
-۳۲/۳۵	۰	۰	-۱۰۷/۰۱	۱۳۹/۳۵	۵
-۲۶/۰۰	۰	۰	-۱۰۷/۰۱	۱۳۳/۰۱	۶
-۲۳/۲۹	۰	۰	-۱۰۷/۰۱	۱۳۱/۷۲	۷
-۴۷/۲۸	۰	۰	-۷۱/۹۸	۱۳۹/۲۶	۸
۰	۰	۰	-۸۵/۵۴	۱۴۲/۴۳	۹
۰	۰	-۲۵	۰	۱۰۱/۱۲	۱۰
۰	۰	۰	۰	۱۰۰/۵۲	۱۱
۰	۰	۰	۰	۵۵/۴۴	۱۲
۰	۰	۰	۰	۵۴/۷۴	۱۳
۰	۰	۰	۰	۳۸/۲۸	۱۴
۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
۰	۰	۰	۰	۰	۱۶
۰	۰	۰	۰	۳۴/۱۱	۱۷
-۱۰/۷۵	-۲۴/۲	۰	۰	۵۲/۲۵	۱۸
-۶/۷۴	۰	-۳۰	۰	۳۶/۹۵	۱۹
-۶/۹۴	۰	-۳۰	۰	۳۶/۹۴	۲۰
-۶/۹۴	۰	-۵	۰	۱۱/۹۵	۲۱
-۱۸/۲۷	۰	۰	-۱۱۵/۷۳	۱۳۳/۹۹	۲۲
-۷/۰۸	۰	۰	-۱۲۷/۴۶	۱۳۴/۵۳	۲۳
۰	۰	۰	-۱۵۲/۵۸	۱۵۲/۵۸	۲۴

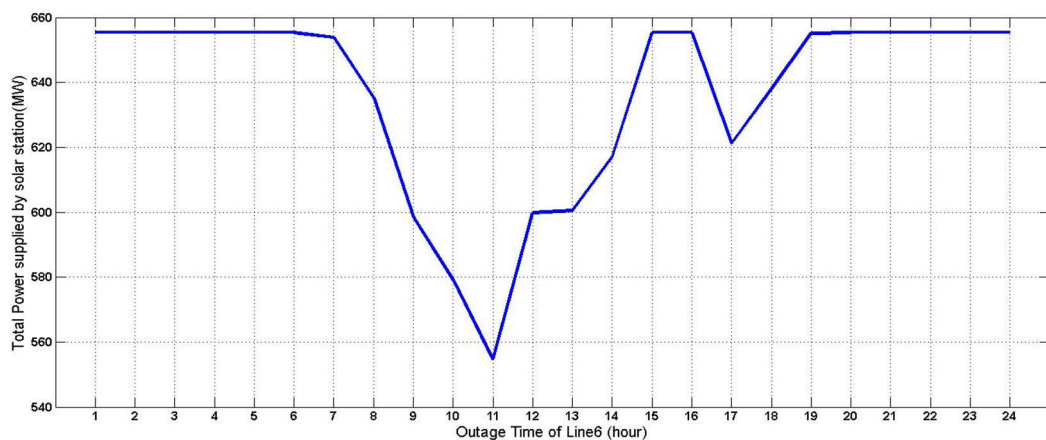
خروج خط ۶ در ساعات ابتدایی روز، رزرو افزایشی نسبتاً قابل توجهی را بر منابع رزرو نیروگاه مجازی تحمیل می‌نماید. همانطور که از جدول ۴-۱۰ قابل مشاهده است، با خروج خط ۶ در ساعات ابتدایی روز، واحد ذخیره‌ساز تنها رزرو کاهشی ورودی ایجاد می‌نماید که این به معنی کاهش انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز در مرحله توزیع توان می‌باشد و این نوع رزرو برای نیروگاه مجازی، رزرو افزایشی به حساب می‌آید.

با وقوع پیشامد در ساعت‌های پایانی روز، نیاز کم‌تری به رزرو افزایشی می‌باشد، زیرا در ساعات پایانی، هزینه انرژی شبکه مجدداً کاهش می‌یابد و توان بیش‌تری از شبکه دریافت می‌شود و نیاز به رزرو کاهش می‌یابد. همچنین با تاخیر در خروج خط انتقال، سیستم مدیریت انرژی فرصت بیش‌تری برای مقابله با پیشامد دارد.

۴-۱-۵-۴ خروج خط ۶ و اثر آن بر توان تأمین شده از ایستگاه خورشیدی

عدم وجود خط ۶، توان تأمین شده از ایستگاه خورشیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نیروگاه مجازی نمی‌تواند از تمام ظرفیت تولید خورشیدی بهره‌برد، زیرا با خروج خط ۶، توانایی عبور توان برای شبکه محدود می‌شود و مقداری از توان تولیدی توسط ایستگاه خورشیدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. عدم استفاده از بخشی از توان تولیدی خورشیدی در ساعت‌هایی از خروج خط ۶ رخ می‌دهد که در آن زمان‌ها ایستگاه خورشیدی توان تولید می‌کند.

با توجه به شکل ۴-۷، با خروج خط ۶ در هر یک از ساعت‌های تولید توان خورشیدی (ساعت ۷ تا ۱۹)، نیروگاه مجازی از بخشی از توان تولیدی خورشیدی استفاده نمی‌کند. در روز موردنظر، ایستگاه خورشیدی مجموعاً ۶۵۵ مگاوات توان تولید می‌نماید. پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۱۱، منجر به عدم استفاده از حدود ۱۰۰ مگاوات از مجموع تولید روزانه توان خورشیدی می‌شود.



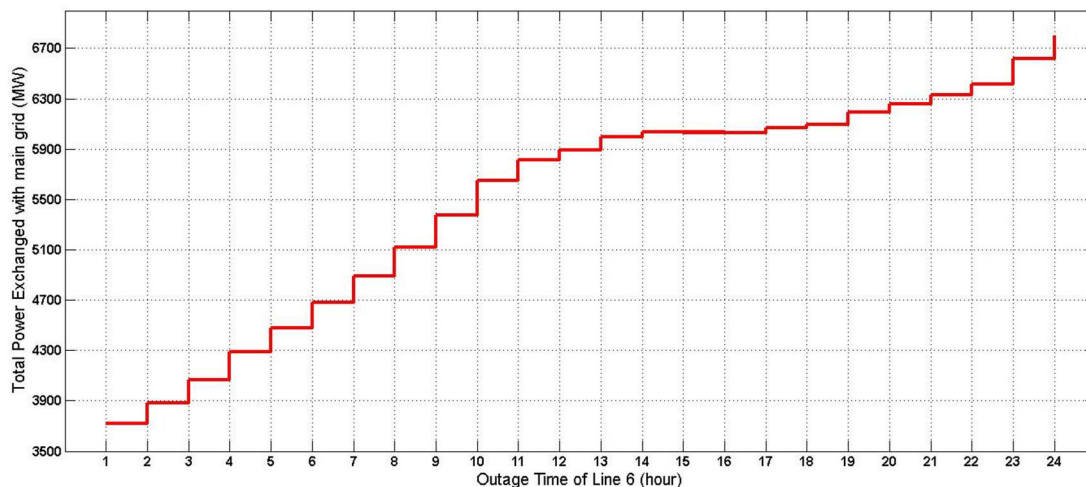
شکل (۴-۷): مجموع توان روزانه تأمین شده از ایستگاه خورشیدی در ساعات مختلف خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط = 0.0001 ، نرخ خروج واحد حرارتی = 0.002 .

۵-۱-۴ اثر پیشامدهای خروج خط ۶ بر تبادل توان با شبکه اصلی

زمان وقوع پیشامد بر تبادل توان با شبکه اصلی نیز تأثیرگذار است. باتوجه به مطالب گفته شده، اهمیت خط ۶ برای شبکه مشخص می‌باشد و در نتیجه با پیشامد خروج این خط، نیروگاه مجازی توان بیشتری از شبکه خریداری می‌نماید. اگر خط در ساعات ابتدایی روز از مدار خارج شود، مقدار توان خریداری شده از شبکه نسبت به حالتی که خط در ساعات انتهایی روز خارج شود، کم‌تر می‌باشد. چون در وضعیتی که خط ۶ در ساعات اولیه از مدار خارج می‌شود، سیستم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با احتیاط بیشتری توزیع توان را برای بارهای مجموعه انجام می‌دهد و در این وضعیت باتوجه به پاسخگویی بارها، بار نسبتاً کمی را تأمین می‌کند، بعبارت دیگر با خروج خط ۶ در ساعت ۱، نیروگاه مجازی مجموعاً حدود ۶۲۹۷ مگاوات بار را تأمین می‌کند در حالیکه در وضعیت خروج خط در ساعت ۲۴، مقدار بار تأمین به حدود ۸۴۶۸ مگاوات می‌رسد.

خروج خط ۶ در ساعت ۱ منجر به خرید حدود ۳۷۲۰ مگاوات توان از شبکه می‌شود در حالیکه توان خریداری شده از شبکه با خروج خط ۶ در ساعت ۲۴ به ۶۷۹۸ مگاوات می‌رسد.

همانطور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود، توان تبدالی با شبکه اصلی در ساعات خروج ۱۴ تا ۱۷ مقدار تقریباً ثابتی دارد که دلیل آن ثابت بودن تقاضا در این ساعات می‌باشد.

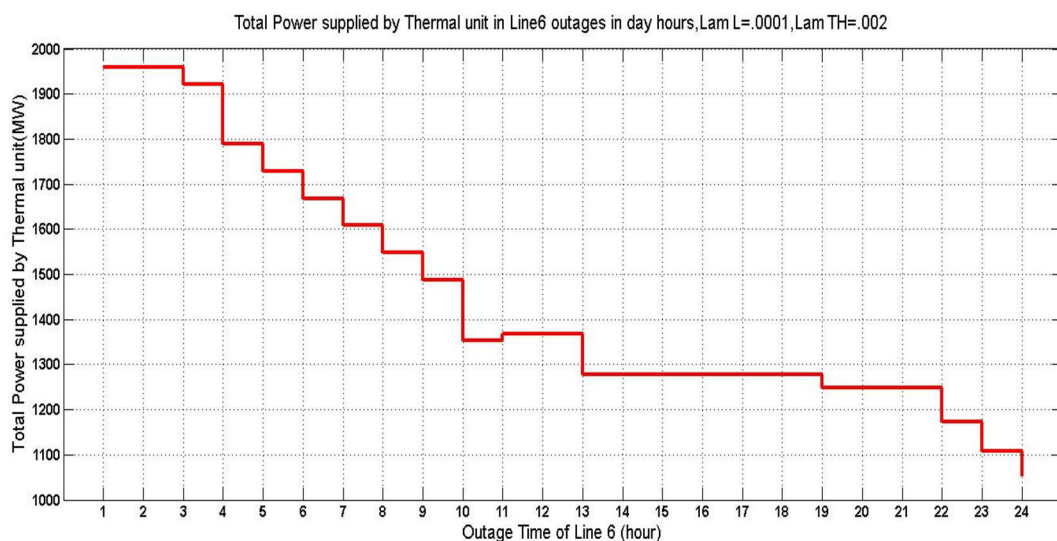


شکل (۴-۸): مجموع روزانه توان تبدالی با شبکه در وضعیت خروج خط ۶ در ساعات مختلف؛ نرخ خروج خط = ۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی = ۰/۰۰۲

۶-۱-۵-۴ توان تولیدی واحد حرارتی در پیشامدهای خروج خط ۶

از آنجا که تولید توان واحد حرارتی برای نیروگاه مجازی هزینه‌بر می‌باشد، در وضعیت خروج خط ۶ در ساعات پایانی روز، تولید این واحد نسبت به حالتی که خط در ساعات اولیه از مدار خارج می‌شود، کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود، هرچه خروج خط ۶ به تاخیر بیفتد، مجموع توان روزانه تأمین شده از واحد حرارتی کاهش می‌یابد زیرا باتوجه به قیمت انرژی شبکه، باتاخیر خروج خط ۶، توان بیش‌تری از شبکه اصلی تأمین می‌شود و در نتیجه توان تولیدی واحد حرارتی کاهش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد هرچه پیشامد دیرتر رخ دهد، مدیریت توزیع توان بهتر صورت می‌پذیرد و حذف بار و عدم تأمین انرژی کم‌تری بر شبکه تحمیل می‌شود. بعبارت دیگر عملکرد سیستم مدیریت انرژی بگونه‌ای است که در ساعات ابتدایی روز، تخمین نسبتاً دقیقی از انرژی موردنیاز روزانه به دست می‌آورد و اگر در این ساعات پیشامدی رخ ندهد، توزیع انرژی را طوری مدیریت می‌نماید که انرژی موردنیاز روزانه تأمین شود و حتی اگر پیشامدی در ساعات بعدی رخ دهد، سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی آمادگی مقابله با آن را خواهد داشت.



شکل (۴-۹): مجموع توان تولیدی توسط واحد حرارتی در طول روز در پیشامدهای مختلف خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۰۲

۷-۱-۵-۴ تأثیر خروج خط ۶ بر توان انتقالی خطوط

با خروج خط ۶، توان انتقالی خطوط ۱ و ۴ کاهش می‌یابد، زیرا بارهای ۳ و ۴ توسط خط ۴ تأمین می‌شوند و در اکثر حالت‌های خروج خط ۶، این بارها رزرو افزایشی دارند یعنی مصرف خود را کاهش می‌دهند (جدول ۴-۹)، بنابراین با خروج خط ۶، خطوط ۱ و ۴ بار کم‌تری را تأمین می‌نمایند از این‌رو توان انتقالی توسط آن‌ها کاهش می‌یابد.

قبل از پیشامد خروج خط ۶، خط ۲ در حداکثر ظرفیت خود انتقال توان را انجام می‌دهد، با وقوع پیشامد نیز توان انتقالی خط ۲ تغییری نمی‌کند زیرا پیش از خروج خط ۶، خط ۲ به همراه خط ۵ و ۶، تأمین بارهای ۵، ۶ و ۷ را انجام می‌دادند، با خروج خط ۶، خط ۲ باید در حداکثر ظرفیت خود کار کند تا پاسخگوی بارهای واقع در باس ۴ باشد.

با وقوع پیشامد خروج خط ۶، جهت عبور توان در خط ۳ معکوس می‌شود و این خط توان تولیدی خورشیدی را از باس ۵ به باس ۲ منتقل می‌کند تا توان موردنیاز برای تأمین بارهای ۵، ۶ و ۷ فراهم شده و از طریق خط ۲ انتقال داده شود.

جهت عبور توان در خط ۵، از باس ۳ به ۴ می‌باشد. با خروج خط ۶، تأمین بارهای روی باس ۴ از طریق دو خط ۲ و ۵ انجام می‌پذیرد، در نتیجه پس از وقوع پیشامد، توان انتقالی توسط خط ۵ افزایش می‌یابد تا پاسخگوی بارهای موجود در باس ۴ باشد.

۲-۵-۴ خروج خط ۶ در ساعات مختلف در نرخ خروج بالاتر

طرح دیگری از شبیه‌سازی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، بررسی رفتار سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی در وضعیتی است که آسیب‌پذیری شبکه نیروگاه مجازی افزایش می‌یابد. در این حالت، نرخ خروج المان‌های شبکه یعنی خط و واحد حرارتی به ۱۰ برابر حالت قبل افزایش

می‌یابد، بعبارت دیگر با در نظر گرفتن نرخ خروج برای خطوط ۰/۰۰۱ و برای واحد حرارتی ۰/۰۲، پاسخ سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با افزایش آسیب‌پذیری شبکه نیروگاه مجازی، احتمال وقوع پیشامدها افزایش می‌یابد و شبکه در مقابل پیشامدها، ضعیف‌تر عمل می‌کند.

در این بخش نیز با شرایط فوق، خروج خط ۶ و تأثیر آن‌ها بر سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج با حالت قبل که نرخ خروج خط و واحد حرارتی به ترتیب ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۲ بود، مقایسه می‌شود.

۱-۲-۵-۴ اثر خروج خط ۶ در نرخ خروج های متفاوت بر سود نیروگاه مجازی

به منظور سادگی در بیان نتایج و تحلیل آن‌ها، بجای بیان مقدار نرخ خروج خط و واحد حرارتی، عبارت های "نرخ خروج پایین‌تر" و "نرخ خروج بالاتر" به کار برده می‌شود.

نرخ خروج پایین‌تر: نرخ خروج خط برابر ۰/۰۰۰۱ و نرخ خروج واحد حرارتی برابر ۰/۰۰۲

نرخ خروج بالاتر: نرخ خروج خط برابر ۰/۰۰۱ و نرخ خروج واحد حرارتی برابر ۰/۰۲

همانطور که در بخش قبل بررسی شد، وجود خط ۶ تأثیر زیادی بر روی سود نیروگاه مجازی دارد و هرچه این خط دیرتر از مدار خارج شود، برای نیروگاه مجازی مطلوب‌تر است. با توجه به شکل ۱۰-۴، با تاخیر در خروج خط ۶، میزان سود نیروگاه مجازی برای نرخ خروج خط و واحد حرارتی به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۰۲، همچنان روند صعودی دارد، اما با افزایش نرخ خروج، سود نیروگاه مجازی نسبت به نرخ خروج پایین‌تر، کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، در همه حالت‌های خروج خط ۶، میزان سود نیروگاه مجازی در نرخ خروج بالاتر همواره کم‌تر از میزان سود در نرخ خروج پایین‌تر است.

بررسی‌ها نتایج نشان می‌دهد، در زمان‌هایی که قیمت انرژی شبکه پایین است (ساعات ۱ تا ۱۴) نیروگاه مجازی در نرخ خروج بالاتر نسبت به نرخ خروج پایین‌تر، توان کم‌تری از شبکه اصلی دریافت می‌کند، و در این ساعت‌ها در نرخ خروج بالاتر، توان تولیدی واحد حرارتی بیش‌تر از حالتی است که

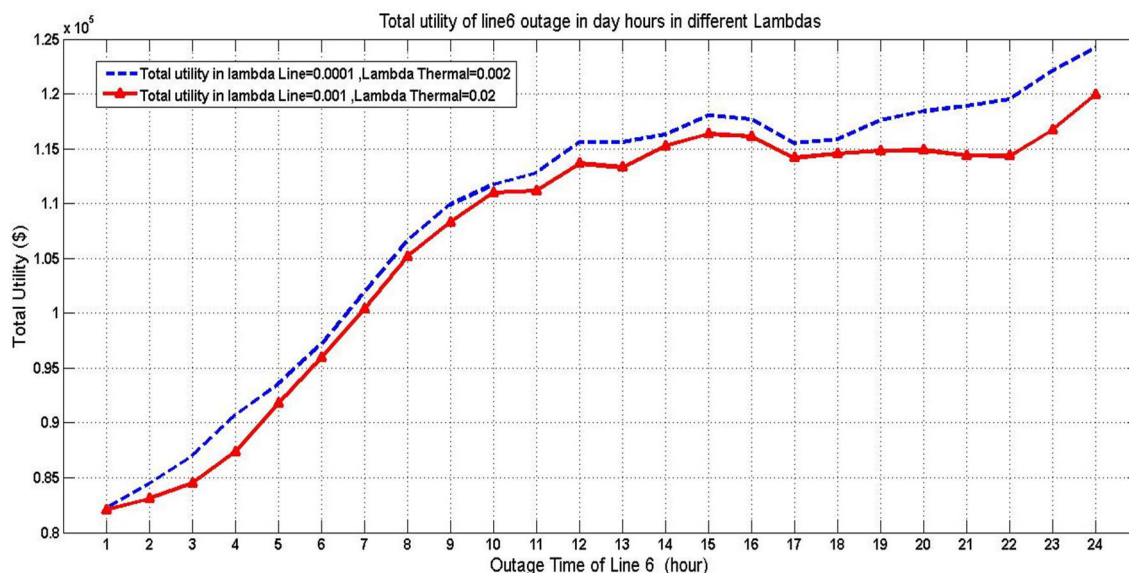
نرخ خروج پایین تر می باشد. بعبارت دیگر وقتی نرخ خروج المان ها بالاست، در ساعت های ارزانی قیمت انرژی شبکه، توان بیشتری از واحد حرارتی گرفته می شود در حالی که در این ساعت ها، هزینه سوخت واحد حرارتی بیش تر از قیمت انرژی شبکه می باشد، بنابراین سود نیروگاه مجازی در نرخ خروج بالاتر، کاهش می یابد.

باتوجه به شکل ۴-۱۰، اختلاف سود در زمان هایی که قیمت انرژی شبکه پایین است (ساعت

۱ تا ۴)،

کم می باشد به طوری که در ساعت های ۷ تا ۱۰، اختلاف سود به حداقل میزان خود می رسد، زیرا در

این ساعت ها قیمت انرژی شبکه به کم ترین میزان خود در طول روز می رسد.



شکل (۴-۱۰): مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی؛ نرخ خروج خط ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی ۰/۰۰۲، ۰/۰۲

در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت اول، و در نرخ خروج پایین تر، سود نیروگاه مجازی برابر ۸۲۲۴۶ دلار می باشد، و در نرخ خروج بالاتر، میزان سود برابر ۸۲۰۸۲ دلار می باشد. در وضعیت خروج خط در ساعت های ۱ و ۲، اختلاف سود بین دو حالت اندک است، اما در ساعت ۴ اختلاف سود بیش تر می شود، زیرا پیشامد خروج خط در این ساعت در نرخ خروج پایین تر، منجر به تولید ۱۷۸۸ مگاوات توان توسط واحد حرارتی می شود، در حالیکه در نرخ خروج بالاتر، واحد حرارتی ۱۸۵۶ مگاوات توان تولید می نماید. علت دیگر این موضوع در اختلاف بار تأمین شده می باشد. بعبارت دیگر، در وضعیت

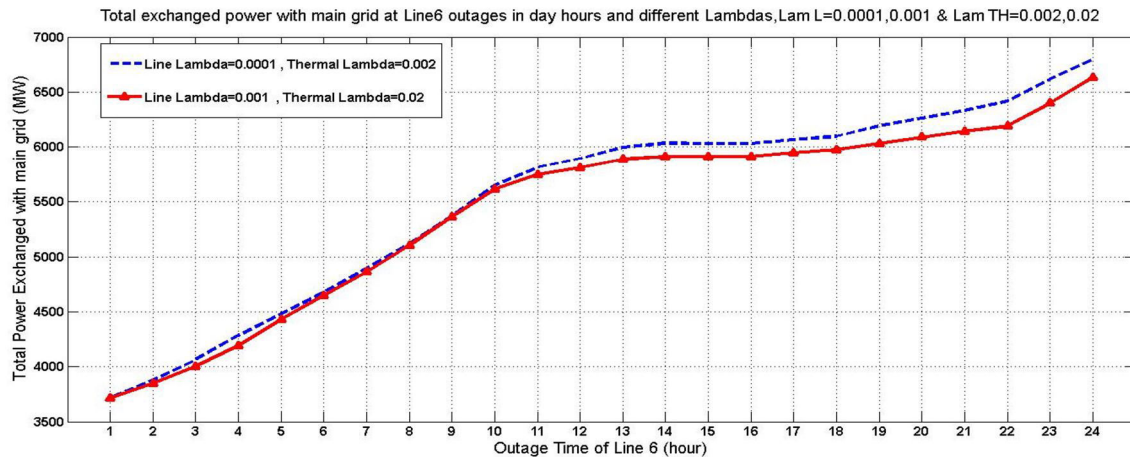
نرخ خروج پایین تر، بار تأمین شده از وضعیت نرخ خروج بالاتر، بیش تر می باشد، بطوریکه در نرخ خروج پایین، بار تأمینی در پیشامد ساعت ۴ برابر ۶۶۹۱ مگاوات و بار تأمینی در نرخ خروج بالا برابر ۶۶۶۵ مگاوات می باشد.

اختلاف سود بین دو نرخ خروج متفاوت، در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۲۲ به اوج خود می رسد، به طوری که در نرخ خروج بالاتر میزان سود برابر ۱۱۴۳۱۵ دلار بوده در حالیکه مقدار سود در نرخ خروج پایین تر برابر ۱۱۹۵۲۴ دلار می باشد. با خروج خط ۶ در ساعت ۲۲، در نرخ خروج بالاتر میزان توان تأمین شده برای متقاضیان انرژی برابر ۸۰۷۷ مگاوات می باشد و بار تأمین شده در نرخ خروج پایین تر، ۸۲۰۴ مگاوات است. در نرخ خروج بالاتر، میزان توان گرفته شده از شبکه اصلی در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۲۲، حدود ۶۱۸۸ مگاوات می باشد و توان تولیدی واحد حرارتی نیز ۱۲۷۵ مگاوات است. در حالیکه در نرخ خروج پایین تر که میزان بار ۸۲۰۴ مگاوات است، ۶۴۱۶ مگاوات از شبکه اصلی تأمین می شود و ۱۱۷۳ مگاوات نیز از واحد حرارتی گرفته می شود. در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۲۲، اختلاف توان تأمین شده از واحد حرارتی در دو نرخ خروج متفاوت، نسبت به سایر ساعت ها بیش تر می باشد، از این رو در این ساعت، سود نرخ خروج بالاتر، افت قابل توجهی نسبت به نرخ خروج پایین تر دارد.

۲-۲-۵-۴ توان تبادلی با شبکه اصلی با خروج خط ۶ در نرخ خروج های متفاوت

همانطور که بیان شد، در نرخ خروج های بالاتر که آسیب پذیری سیستم افزایش می یابد، سیستم مدیریت انرژی در زمان های ارزانی قیمت انرژی شبکه، توان کمتری نسبت به نرخ خروج پایین، از شبکه دریافت می نماید. به همین دلیل با افزایش نرخ خروج المان های نیروگاه مجازی، توان تبادلی با شبکه تحت تأثیر قرار می گیرد.

باتوجه به شکل ۴-۱۱، با وقوع پیشامد خروج خط ۶، اختلاف توان تأمینی از شبکه اصلی در دو حالت نرخ خروج، تا ساعت ۱۰ اندک می‌باشد و اگر خط ۶ از این ساعت به بعد از مدار خارج شود، اختلاف بیش‌تر شده تا در ساعت ۲۲ این اختلاف به حداکثر مقدار خود می‌رسد. زیرا با وقوع پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۲۲، در نرخ خروج بالاتر، توان بیش‌تری از واحد حرارتی تأمین می‌شود.

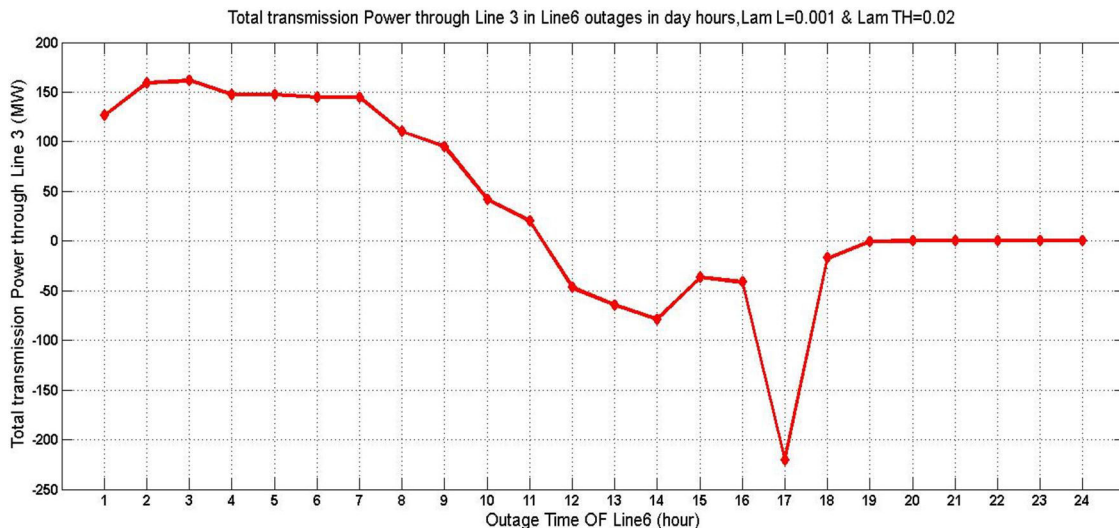


شکل (۴-۱۱): مجموع توان تبادل روزانه با شبکه اصلی در پیشامد خروج خط ۶ در ساعات مختلف؛ نرخ خروج خط = 0.0001 و 0.001 ، نرخ خروج واحد حرارتی = 0.002 و 0.02

۳-۲-۴-۵ اثر خروج خط ۶ بر توان عبوری از خطوط

خطوط انتقال ۳ و ۶ در باس ۵ واقع شده‌اند. این باس، یک باس تولیدی است و بار الکتریکی در این باس وجود ندارد. در وضعیت عملکرد عادی شبکه، خط ۶ توان را از باس ۵ به باس ۴ انتقال می‌دهد، و جهت جریان توان در خط ۳ از باس ۵ به باس ۱ می‌باشد. با خروج خط ۶ از مدار، تنها خطی که می‌تواند توان تولیدی خورشیدی را که در باس ۵ تولید می‌شود، انتقال دهد، خط ۳ می‌باشد. بنابراین در پیشامد خروج خط ۶ از مدار، جهت عبور توان در خط ۳ در ساعات‌هایی که توان خورشیدی تولید می‌شود، معکوس شده و این خط توان را از باس ۵ به باس ۱ انتقال می‌دهد. به‌عنوان نمونه، عملکرد خط ۳ در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۱۲ در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.

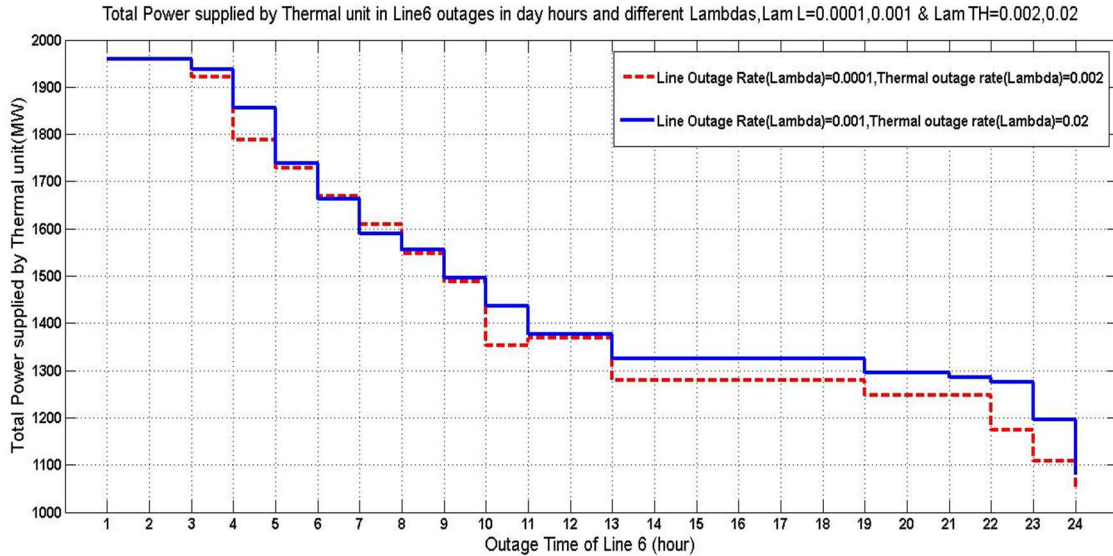
باتوجه به شکل ۴-۱۲، تا پیش از وقوع پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۱۲، خط ۳ توان را در جهت طراحی شده برای آن عبور می‌دهد، در ساعت ۱۲ که خط ۶ از مدار خارج می‌شود، بلافاصله جهت توان در خط ۳ معکوس شده تا توان تولیدی خورشیدی را به باس ۱ منتقل نماید. در ساعت ۱۹ که تولید توان خورشیدی به صفر می‌رسد، توان عبوری از خط ۳ نیز صفر می‌شود.



شکل (۴-۱۲): عملکرد خط ۳ در پیشامد خروج خط ۶ در ساعت ۱۲، نرخ خروج خط = 0.001 ، نرخ خروج واحد حرارتی = 0.02

بارهای واقع در باس ۴ از طریق خطوط ۲ و ۵ و ۶ تأمین می‌شوند، خط ۲ معمولاً در حداکثر ظرفیت خود توان را انتقال می‌دهد، با خروج خط ۶، برای تأمین بارهای ۵،۶ و ۷ توان عبوری از خط ۵، تا ۳ برابر حالت عادی افزایش می‌یابد.

در نرخ خروج بالاتر نسبت به نرخ خروج پایین‌تر، در ساعاتی مختلف خروج خط ۶، واحد حرارتی توان بیشتری تولید می‌کند. با توجه به شکل ۴-۱۳ اختلاف توان تولیدی واحد حرارتی در دو نرخ خروج متفاوت، در ساعاتی که هزینه انرژی شبکه بالاتر از هزینه سوخت واحد حرارتی می‌باشد، بیش‌تر است. میانگین هزینه انرژی تأمین‌کننده از شبکه اصلی در طول روز پایین‌تر از هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری واحد حرارتی می‌باشد، در حالیکه در نرخ خروج بالاتر نسبت به نرخ خروج پایین‌تر، واحد حرارتی توان بیشتری تولید می‌کند، که این امر باعث کاهش سود نیروگاه مجازی در نرخ خروج بالاتر می‌شود.



شکل (۱۳-۴): مجموع توان تأمین شده روزانه از واحد حرارتی در پیشامدهای خروج خط ۶؛ نرخ خروج خط $0.0001, 0.001$ و نرخ خروج واحد حرارتی $0.002, 0.02$

۳-۵-۴ خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف در نرخ خروج بالاتر

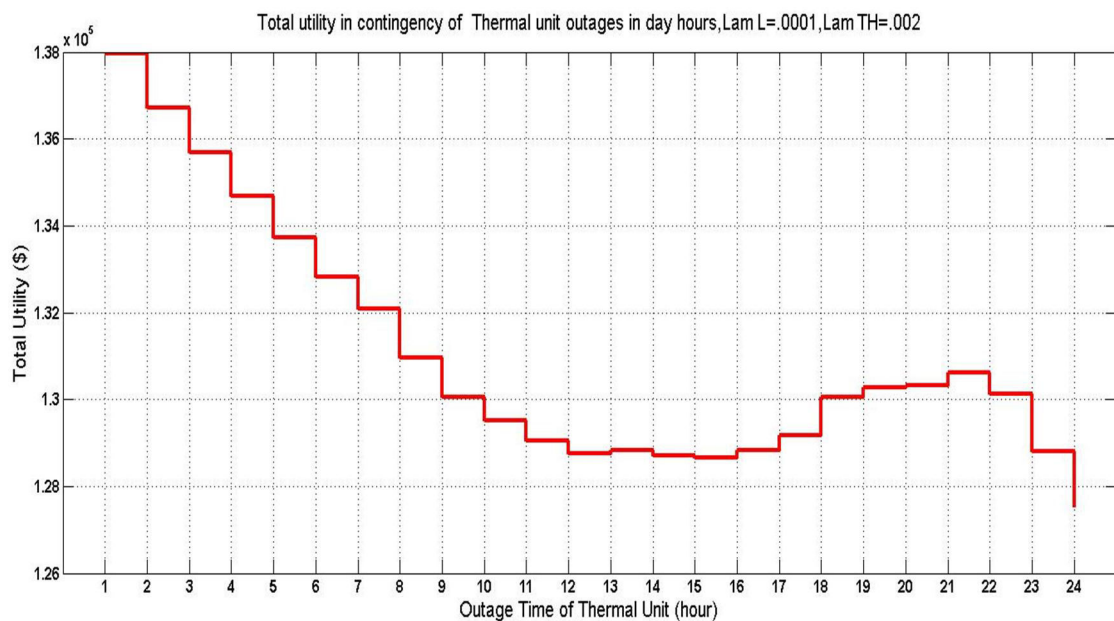
۳-۵-۳-۱ اثر خروج واحد حرارتی بر روی سود نیروگاه مجازی

واحد حرارتی با ظرفیت تولید توان ۸۵ مگاوات در باس ۲ واقع می‌باشد. متقاضیان انرژی نیروگاه مجازی، هزینه‌ای برای تأمین انرژی از این واحد نمی‌پردازند اما هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری این واحد به‌عهده آنان می‌باشد، از این رو با خروج این واحد در ساعات ابتدایی، سود بیش‌تری نصیب نیروگاه مجازی می‌شود. زیرا هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری و همچنین هزینه روشن شدن^۱ واحد حرارتی در ساعات ابتدایی روز از هزینه انرژی شبکه اصلی بیش‌تر می‌باشد، بنابراین اگر در این زمان‌ها واحد حرارتی از مدار خارج شود، نیروگاه مجازی توان بیش‌تری از شبکه اصلی خریداری می‌نماید و با توجه به پایین بودن قیمت انرژی شبکه اصلی در این ساعات، صرفه اقتصادی بیش‌تری برای نیروگاه مجازی در بر خواهد داشت. همانطور که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است، با خروج واحد حرارتی در ساعات میانی روز، سود نیروگاه مجازی تغییرات اندکی دارد، زیرا قیمت انرژی شبکه در این ساعت‌ها، تقریباً با میانگین هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری واحد حرارتی برابر می‌شود و با خروج واحد در این زمان‌ها، نیروگاه مجازی برای تأمین توان از دست رفته، از شبکه اصلی توان خریداری

¹ Start-Up Cost

می‌نماید و در این ساعات هزینه تأمین انرژی از شبکه اصلی تقریباً به اندازه هزینه سوخت واحد حرارتی می‌باشد.

با توجه به شکل ۴-۱۴، روند نزولی سود نیروگاه مجازی با خروج واحد حرارتی از اولین ساعت روز برنامه‌ریزی تا خروج واحد در ساعت ۱۶ ادامه می‌یابد، و با توجه به اینکه هزینه تأمین انرژی از شبکه اصلی در ساعات ۱۵ تا ۲۱ از هزینه سوخت واحد حرارتی بیشتر می‌باشد، بنابراین در این ساعات (۲۱ تا ۱۵) هرچه خروج واحد حرارتی به تاخیر بیفتد، برای نیروگاه مجازی مطلوب‌تر می‌باشد، زیرا توان کم‌تری از شبکه خریداری نموده و در نتیجه سود آن بیشتر خواهد شد. بنابراین با خروج واحد حرارتی از ساعت ۱۶ تا ۲۱، روند نزولی مجموع سود روزانه معکوس شده و صعودی می‌شود.



شکل (۴-۱۴): مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی در زمان‌های مختلف خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج خط = 0.0001 ؛ نرخ خروج واحد حرارتی = 0.002

در حالتی که واحد حرارتی در ساعت ۱۵ از مدار خارج می‌شود، مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی برابر ۱۲۸۶۴۶ دلار بوده درحالی‌که با خروج این واحد در ساعت ۱۶، مجموع سود نیروگاه مجازی برابر ۱۲۸۸۲۶ دلار می‌باشد. این روند صعودی ادامه یافته و در ساعت ۲۱ به ۱۳۰۶۱۲ دلار می‌رسد. همچنین با خروج واحد در ساعت ۱۵، نیروگاه مجازی مجموعاً ۷۶۱۶ مگاوات از توان موردنیاز خود را

از شبکه اصلی تأمین می‌کند؛ در حالیکه در وضعیت خروج واحد در ساعت ۲۱، تأمین توان نیروگاه مجازی از شبکه اصلی به ۶۹۸۸ مگاوات می‌رسد.

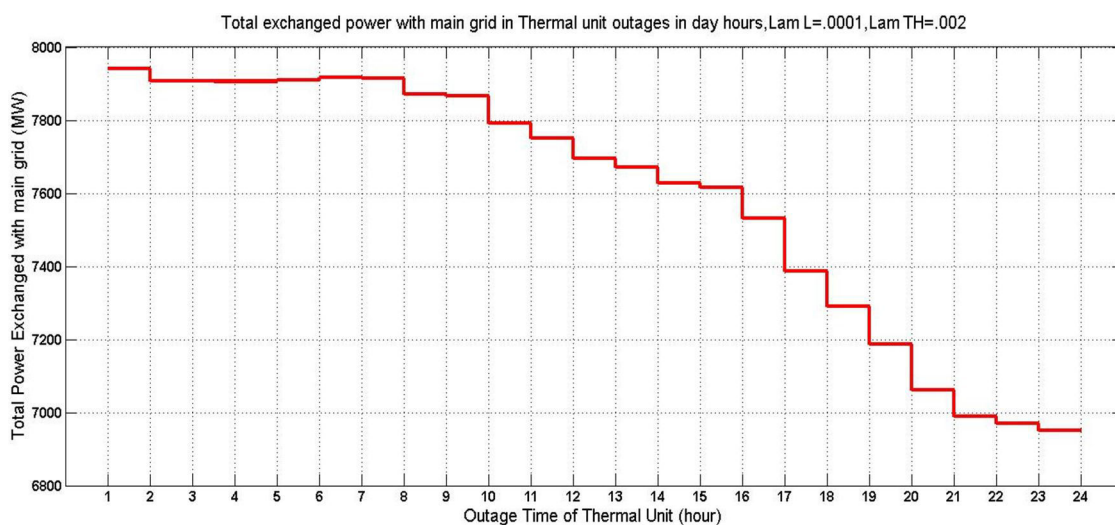
ساعات ۲۲ تا ۲۴ نیز قیمت انرژی شبکه کم‌تر از هزینه سوخت واحد حرارتی می‌باشد، بنابراین با خروج واحد حرارتی در ساعت‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ خرید انرژی از شبکه اصلی برای نیروگاه مجازی صرفه اقتصادی بیشتری دارد و در این ساعت‌ها توان تأمین شده از شبکه اصلی افزایش می‌یابد و در نتیجه مجموع روزانه توان تولیدی واحد حرارتی کاهش می‌یابد.

۲-۳-۴-۵ تبادلی توان با شبکه اصلی در پیشامدهای خروج واحد حرارتی

هرچه خروج واحد حرارتی به تاخیر بیفتد، توان خریداری شده از شبکه کاهش می‌یابد، زیرا با وجود واحد حرارتی، بخشی از توان موردنیاز نیروگاه مجازی توسط این واحد تأمین می‌شود.

شکل ۴-۱۵ مجموع توان تبادلی روزانه با شبکه اصلی را در زمان‌های مختلف خروج واحد حرارتی نشان می‌دهد. با خروج واحد حرارتی ۸۵ مگاواتی در ساعت اول، نیروگاه مجازی در طول روز ظرفیت تولیدی روزانه حدود ۲۰۰۰ مگاواتی را از دست داده، که بخشی از این توان از دست رفته توسط شبکه اصلی تأمین می‌شود. به همین خاطر، در وضعیت خروج واحد در ساعات اولیه، توان تأمینی نیروگاه مجازی توسط شبکه اصلی، بیش‌تر از حالتی است که واحد حرارتی در ساعات میانی و پایانی روز از مدار خارج می‌شود، زیرا با خروج واحد حرارتی در ساعات میانی و پایانی، نیروگاه مجازی بخشی از ظرفیت روزانه این واحد را در اختیار دارد.

همانطور که در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود، با خروج واحد حرارتی در ساعت‌های ۱۵ تا ۲۱، توان خریداری شده از شبکه اصلی نسبت به پیشامد خروج واحد در ساعات قبل، کاهش قابل توجهی دارد، زیرا در این ساعات قیمت انرژی شبکه نسبت به هزینه سوخت واحد حرارتی بالاتر می‌باشد و واحد حرارتی در این ساعات در حداکثر ظرفیت خود توان تولید می‌کند.



شکل (۱۵-۴): مجموع توان تبادلی روزانه با شبکه اصلی با خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف: نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱، نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲

پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت اول، منجر به خرید ۷۹۴۱ مگاوات توان توان از شبکه اصلی می‌شود. با خروج واحد در ساعت‌های بعد تا ساعت ۷ این مقدار تقریباً ثابت می‌ماند. روند نزولی تأمین توان از شبکه اصلی ادامه می‌یابد و در وضعیت خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۵، با اختلاف حدود ۳۰۰ مگاوات نسبت به ساعت اول، توان تأمین شده از شبکه اصلی به ۷۶۱۶ مگاوات می‌رسد. در حالیکه در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۶، توان خریداری شده از شبکه اصلی نسبت به پیشامد ساعت قبل، حدود ۸۵ مگاوات کاهش می‌یابد و با خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۶، ۷۵۳۱ مگاوات توان از شبکه تأمین می‌شود. این روند نزولی همچنان ادامه یافته و در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت ۲۱، نیروگاه مجازی ۶۹۸۸ مگاوات از توان موردنیاز خود را از طریق شبکه اصلی تأمین می‌کند. در پیشامدهای ساعات ۲۲، ۲۳ و ۲۴ همچنان توان تأمینی از شبکه اصلی روند نزولی دارد اما با اختلاف بسیار کم. توان تولیدی توسط واحد حرارتی در ساعت‌های پس از ۲۲، در حداکثر ظرفیت نمی‌باشد و علت این امر بالاتر بودن هزینه سوخت این واحد نسبت به قیمت انرژی شبکه در این ساعات می‌باشد، بعبارت دیگر وقتی واحد حرارتی در ساعت‌های پس از ۲۲ از مدار خارج می‌شود، خرید انرژی از شبکه اصلی برای نیروگاه مجازی از نظر اقتصادی به صرفه تر می‌باشد.

۳-۵-۴ تأمین رزرو در پیشامدهای خروج واحد حرارتی

با وقوع پیشامد خروج واحد حرارتی، از بین منابع رزرو، متقاضیان انرژی (بارها) و واحد ذخیره انرژی در تأمین رزرو موردنیاز نیروگاه مجازی شرکت می‌کنند. اطلاعات مربوط به تأمین رزرو چرخان در پیشامدهای خروج واحد حرارتی در جدول ۴-۱۱ آمده است. در این جدول، علامت منفی نشان دهنده کاهش بودن رزرو می‌باشد و علامت مثبت، معرف رزرو افزایشی است.

در وضعیت عادی شبکه و در حالی که هیچ پیشامدی بر سیستم واقع نشود، واحد حرارتی در تمام طول دوره برنامه‌ریزی روشن می‌باشد، اما در ساعت‌هایی که هزینه سوخت واحد حرارتی از قیمت انرژی شبکه بالاتر است، این واحد در حداقل ظرفیت خود توان تولید می‌کند و زمانیکه هزینه سوخت از قیمت انرژی شبکه کم‌تر می‌شود، واحد حرارتی در حداکثر ظرفیت خود توان تولید می‌کند، اما با توجه به محدودیت‌های حداکثر افزایش/کاهش ساعتی تولید توان در این واحد، به یکبار نمی‌تواند ظرفیت خود را به حداکثر برساند. به‌عنوان مثال در ساعت ۱۲ قیمت انرژی شبکه اندکی بیش‌تر از هزینه سوخت واحد حرارتی می‌شود، بنابراین در وضعیت عملکرد عادی نیروگاه مجازی، در این ساعت واحد حرارتی تولید خود را تا حد ممکن (حداکثر ۳۰ مگاوات افزایش توان) افزایش می‌دهد و از ۲۵ مگاوات ساعت ۱۱ به ۵۵ مگاوات در ساعت ۱۲ می‌رساند. مجدداً در ساعت ۱۳ قیمت انرژی شبکه کم‌تر از هزینه سوخت شده و واحد حرارتی تولید خود را در این ساعت کاهش می‌دهد و در ساعت‌های ۱۴ تا ۲۱ هزینه سوخت واحد حرارتی از قیمت انرژی شبکه پایین‌تر است، بنابراین انتظار می‌رود این واحد در ساعات ۱۴ تا ۲۱ با حداکثر ظرفیت کار کند، اما چون در ساعت ۱۳ واحد حرارتی در کم‌ترین مقدار توان تولید می‌کند (۲۵ مگاوات) بنابراین در ساعت ۱۴ واحد حرارتی می‌تواند حداکثر ۳۰ مگاوات توان خود را اضافه نماید (جدول ۴-۵)، از این‌رو در ساعت ۱۴ این واحد ۵۵ مگاوات توان تولید می‌کند و در نهایت در ساعت ۱۵ در حداکثر ظرفیت خود یعنی ۸۵ مگاوات توان تولید می‌کند و تا ساعت ۲۱ در حداکثر ظرفیت خود کار می‌کند.

واحد حرارتی در ساعت اول ۳۰ مگاوات توان تولید می‌کند که با خروج آن در ساعت اول، ۳۰ مگاوات توان از دست می‌رود. در این وضعیت، رزرو افزایشی بار به کمک نیروگاه مجازی آمده و مجموعه بارها ۳۰ مگاوات از توان مصرفی خود را کاهش می‌دهند. به همین ترتیب، با خروج واحد حرارتی در ساعات بعد، تا ساعت ۱۳ روز برنامه‌ریزی، متقاضیان انرژی در قالب رزرو افزایشی، با کاهش توان مصرفی خود، توان از دست رفته را جبران می‌کنند. با وجود اینکه خروج واحد در ساعت ۱۲، منجر به از دست رفتن ۵۵ مگاوات از توان تولیدی واحد حرارتی می‌شود، بازهم مجموعه بارها این مقدار کمبود تولید را جبران می‌نمایند. در ساعات ۱۴ تا ۲۱ واحد حرارتی در حداکثر ظرفیت خود توان تولید می‌کند (توضیح داده شد)، بنابراین وقوع پیشامد برای واحد حرارتی در این ساعات منجر به از دست رفتن توان قابل توجهی از نیروگاه مجازی می‌شود، (در ساعت ۱۴، ۵۵ مگاوات و در ساعات ۱۵ تا ۲۱، در هر ساعت ۸۵ مگاوات). با خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۴، بخشی از ۵۵ مگاوات توان از دست رفته این واحد را رزرو افزایشی متقاضیان انرژی و بخشی دیگر را رزرو افزایشی خروجی واحد ذخیره انرژی جبران می‌کند.

همانطور که در جدول ۴-۱۱ آمده است، پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۵ و ۱۶ را واحد ذخیره با رزرو افزایشی خروجی جبران می‌نماید. چون در این ساعت‌ها، مطلوبیت متقاضیان بالا می‌باشد و کاهش مصرف توان متقاضیان برای نیروگاه مجازی ضرر اقتصادی دارد، از این رو در این ساعات، کل جبران کمبود توان بر عهده واحد ذخیره می‌باشد.

برای جبران اثر پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۷، بارها و واحد ذخیره، رزرو افزایشی تولید می‌نمایند و کل ۸۵ مگاوات توان از دست رفته واحد حرارتی را جبران می‌نمایند. با خروج واحد حرارتی در ساعات ۱۸ تا ۲۱، کل رزرو افزایشی تولیدی بر عهده بارها می‌باشد و با وقوع پیشامد در این ساعات، واحد ذخیره رزروی ایجاد نمی‌کند.

در واقع با توجه به اینکه تأمین توان از واحد ذخیره با تلفات همراه است، تأمین رزرو از این منبع با محدودیت همراه بوده و در مواقع ضروری رزرو تحویل شبکه می‌دهد.

با توجه به جدول ۴-۱۱، در اکثر پیشامدهای خروج واحد حرارتی، بارهای ۳ و ۴ در تأمین رزرو افزایشی شرکت می‌کنند و توان مصرفی خود را کاهش می‌دهند. زیرا بارهای ۳ و ۴ در باس ۳ می‌باشند و خطوط ۴ و ۵ به این باس‌ها متصل می‌باشند، اما جهت توان در خط ۵ از باس ۳ به باس ۴ می‌باشد و تنها خط ۴ توان را از باس ۲ به باس ۳ منتقل می‌نماید، که با وقوع پیشامد بر روی واحد حرارتی، توان عبوری از خط ۴ کاهش می‌یابد و در نتیجه توان ورودی به باس ۳ کاهش یافته، از این رو بارهای ۳ و ۴ بیش‌ترین مشارکت را در رزرو افزایشی دارند و مجبور به کاهش توان مصرفی خود می‌باشند.

جدول (۱۱-۴): رزرو ایجاد شده توسط منابع رزرو در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱؛ نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۰۲

رزرو ورودی واحد ذخیره [MW]	رزرو خروجی واحد ذخیره [MW]	رزرو بار [MW]							ساعت خروج واحد حرارتی
		۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۰	۰	۵/۸	۰	۰	۱۴/۶	۹/۶	۰	۰	۱
۳/۰۷	۰	۰/۲۸	۰	۰	۱۷/۵	۱۷/۵	۰	۰	۲
۱۷/۹۳	۰	۰	۷/۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۱۰/۰۹	۰	۰	۰	۰	۰/۲۸	۱۴/۶۱	۰	۰	۴
۱۰/۰۹	۰	۰	۰	۰	۰/۲۸	۱۴/۶۱	۰	۰	۵
۱۰/۰۹	۰	۰	۰	۰	۱۴/۶	۰/۳۰	۰	۰	۶
۲۰/۹۸	۰	۳/۲۲	۶/۵۸	۰	-۲/۹	-۲/۸۸	۰	۰	۷
۰	۰	۰	۰	۰	۱۴/۶	۱۰/۴	۰	۰	۸
۲۰/۹۸	۰	۷/۸۴	۱/۹۵	۰	۰	-۵/۷۸	۰	۰	۹
۰	۰	۰	۰/۲۴	۰	۱۴/۶	۱۰/۱۵	۰	۰	۱۰
۰	۰	۰	۶/۹۳	۰	۳/۴۵	۱۴/۶۱	۰	۰	۱۱
۰	۰	۰	۰	۰	۲۹/۶۱	۲۵/۳۸	۰	۰	۱۲
۰	۰	۰	۰	۰	۷/۵	۱۷/۵	۰	۰	۱۳
۰	۱۱/۷	۰	۰	۰	۳۰/۴	۱۲/۹	۰	۰	۱۴
۰	۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
۰	۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶
۰	۲۴/۲	۰	۰	۰	۳۰/۴	۳۰/۴	۰	۰	۱۷
۰	۰	۳/۰۵	۰	۰	۴۱/۵۴	۴۰	۰/۲	۰/۲	۱۸
۰	۰	۸	۰	۰	۳۶/۶	۴۰	۰/۲	۰/۲	۱۹
۰	۰	۱/۳۵	۰	۰	۴۵	۳۸/۲۴	۰/۲	۰/۲	۲۰
۰	۰	۰	۰	۰	۳۰/۴	۲۹/۶	۰	۰	۲۱
۰	۳۰	۰	۶/۳	۲۵/۸۷	-۲/۱۷	۰	۰	۰	۲۲
۰	۰	۰	۱۳/۵۲	۱۱/۴۷	۰	۰	۰	۰	۲۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴

۴-۵-۴ خروج واحد حرارتی در ساعات مختلف در نرخ خروج بالاتر

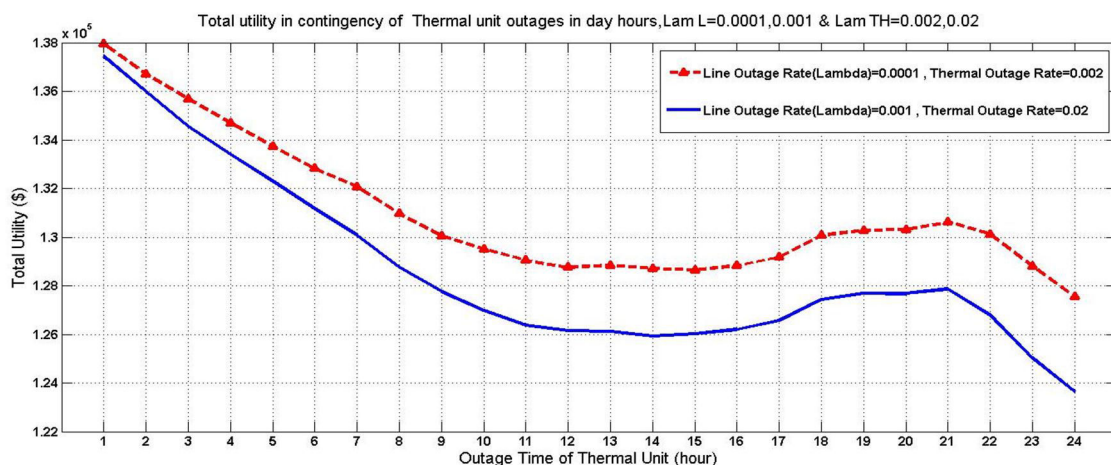
۴-۵-۴-۱ اثر خروج واحد حرارتی در نرخ خروج های متفاوت بر سود نیروگاه مجازی

با افزایش آسیب پذیری شبکه نیروگاه مجازی در پیشامدهای خروج واحد حرارتی، سود مجموعه

تحت تأثیر قرار می گیرد. وقتی نرخ خروج المان های سیستم افزایش می یابد، با خروج واحد حرارتی،

سود نیروگاه مجازی کاهش می‌یابد. کاهش سود در نرخ خروج بالاتر در پیشامدهایی که در آن‌ها واحد حرارتی از ساعات میانی روز تا پایان روز برنامه‌ریزی از مدار خارج می‌شود، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

خروج واحد حرارتی در نرخ خروج بالاتر در ساعات میانی تا پایانی روز برنامه‌ریزی که قیمت انرژی شبکه افزایش می‌یابد، افت شدید سود را به همراه خواهد داشت، به طوری که در نرخ خروج پایین‌تر، با خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۱، سود نیروگاه مجازی برابر ۱۲۹۰۴۱ دلار بوده در حالیکه در نرخ خروج بالاتر، این سود به ۱۲۶۳۷۷ دلار می‌رسد. نمودار سود نیروگاه مجازی در هر دو نرخ خروج برای پیشامد خروج واحد حرارتی در شکل ۴-۱۶ قابل مشاهده می‌باشد.



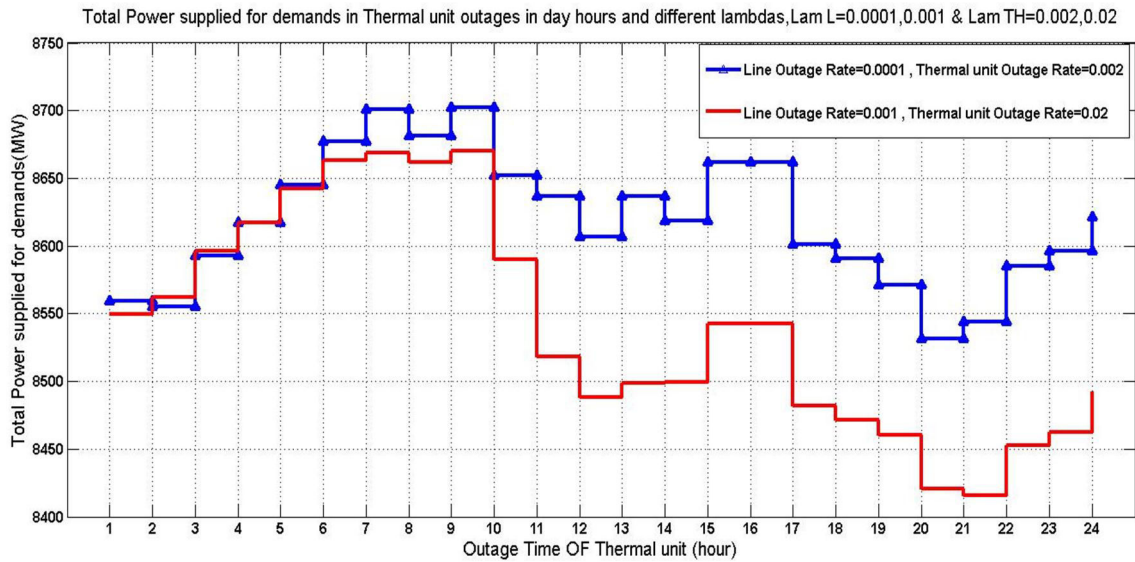
شکل (۱۶-۴): مجموع سود روزانه نیروگاه مجازی در پیشامد خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج خط = $0.0001, 0.001$ ، نرخ خروج واحد حرارتی = $0.002, 0.02$

۲-۴-۵-۴ توان بار تأمین شده با خروج واحد حرارتی در نرخ خروج های

متفاوت

با خروج واحد حرارتی در نرخ خروج بالاتر، توان تأمین شده متقاضیان کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت ۲۴ در نرخ خروج پایین‌تر، مجموع بار تأمین شده روزانه برابر ۸۶۳۱ مگاوات بوده، اما خروج واحد حرارتی در ساعت ۲۴ در نرخ خروج بالاتر، منجر به تأمین توان بار ۸۴۹۷ مگاوات می‌شود. همانطور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود، اختلاف توان

تأمینی بار در نرخ خروج بالا و پایین، با خروج واحد حرارتی در ساعات میانی روز به حداکثر مقدار می‌رسد، در حالیکه در این ساعت‌ها، مطلوبیت متقاضیان بالا می‌باشد و تأمین کم‌تر بار در این زمان‌ها، منجر به سود کم‌تر نیروگاه مجازی می‌شود.



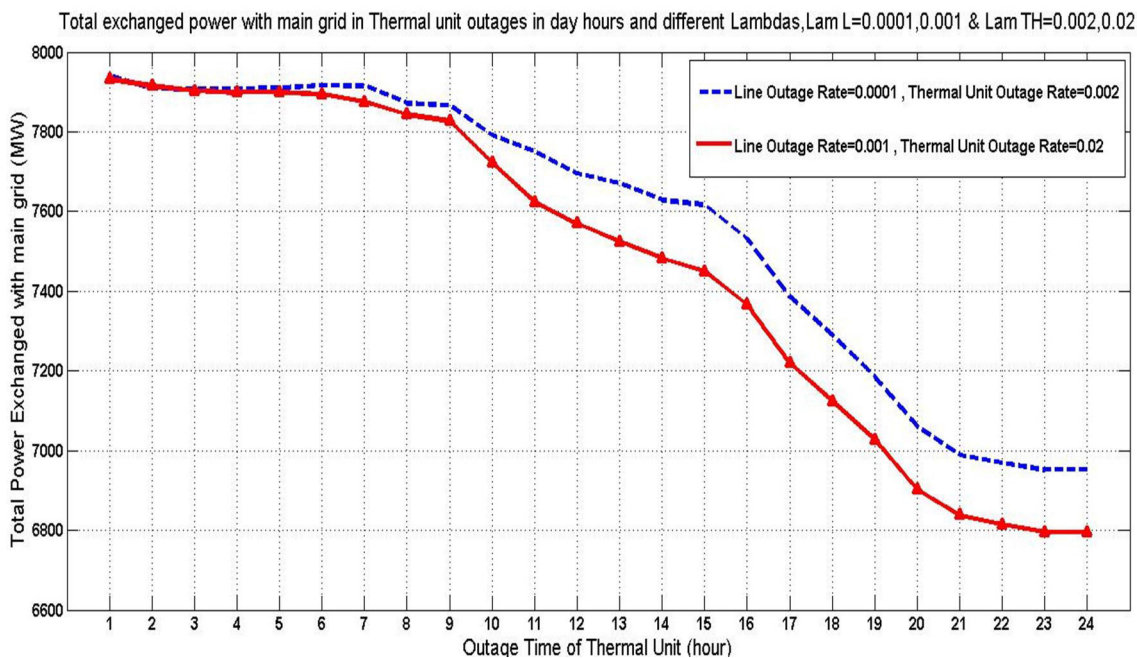
شکل (۱۷-۴): مجموع بار تأمین شده روزانه در پیشامد خروج واحد حرارتی، نرخ خروج خط = $0.0001, 0.0001$ ،
نرخ خروج واحد حرارتی = $0.002, 0.02$

با خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۲، در نرخ خروج پایین‌تر، مجموع توان بار روزانه تأمین شده برابر ۸۶۰۷ مگاوات و می‌باشد، اما در نرخ خروج بالاتر، بار تأمین شده روزانه برابر ۸۴۸۷ مگاوات می‌باشد. همچنین اختلاف بار تأمین شده در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۶ بین نرخ خروج بالا و پایین برابر ۱۱۹ مگاوات می‌باشد، بعبارت دیگر در نرخ خروج پایین‌تر در این ساعت، ۱۱۹ مگاوات توان بار بیش‌تری تأمین شده که با توجه به بالا بودن مطلوبیت بار در این ساعت، سود نیروگاه مجازی در نرخ خروج بالاتر، کم‌تر از سود آن نسبت به نرخ خروج پایین‌تر می‌باشد.

با مقایسه شکل های ۱۶-۴ و ۱۷-۴، می‌توان دریافت که در ساعت‌هایی از خروج واحد حرارتی که اختلاف توان تأمینی بار بین نرخ خروج بالاتر و پایین‌تر، بیش‌تر است، سود نیروگاه مجازی نیز کاهش بیش‌تری از خود نشان می‌دهد.

۳-۴-۵-۴ توان تبادلی باشبکه در خروج واحد حرارتی در نرخ خروج های متفاوت

کاهش توان تأمینی روزانه بار در نرخ خروج بالاتر که در پیشامد خروج واحد حرارتی رخ می دهد، خرید کم تر توان از شبکه اصلی را منجر می شود. این موضوع در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. در پیشامد خروج واحد حرارتی در ساعات ابتدایی روز، در نرخ خروج بالاتر و پایین تر، توان تأمینی بار روزانه اختلاف ناچیزی دارد، به همین دلیل توان تبادلی با شبکه در این ساعات نیز در دو نرخ خروج، تفاوت چندانی ندارد، ولی با افزایش بار تأمینی در ساعات میانی روز در نرخ خروج پایین تر، اختلاف توان تبادلی با شبکه نیز در دو حالت بیان شده، بیش تر می شود.



شکل (۴-۱۸): مجموع توان روزانه تبادلی با شبکه اصلی در پیشامد خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱ و نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱

با خروج واحد حرارتی در نرخ خروج بالاتر، آسیب پذیری سیستم افزایش یافته و رزرو عملیاتی تأمین شده از منابع رزرو افزایش می یابد. در جدول ۴-۱۲ مقادیر رزرو تأمین شده از منابع رزرو در دو نرخ خروج متفاوت در پیشامد خروج واحد حرارتی ارائه شده است. با خروج واحد حرارتی، تنها ذخیره ساز و متقاضیان انرژی نیروگاه مجازی در تأمین رزرو شرکت می کنند.

جدول (۱۲-۴): مقادیر رزرو تأمین شده از منابع رزرو در پیشامد خروج واحد حرارتی؛ نرخ خروج خط=۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۱. نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۰۲ و ۰/۰۲

نرخ خروج خط=۰/۰۰۱ نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۲			نرخ خروج خط=۰/۰۰۱ نرخ خروج واحد حرارتی=۰/۰۲			ساعت خروج واحد حرارتی
رزرو خروجی ذخیره‌ساز [MW]	رزرو ورودی ذخیره‌ساز [MW]	مجموع رزرو بار [MW]	رزرو خروجی ذخیره‌ساز [MW]	رزرو ورودی ذخیره‌ساز [MW]	مجموع رزرو بار [MW]	
۰	۰	۳۰	۰	۰	۳۰	۱
۰	۳۳/۲۸	۱۳/۰۹	۰	۳/۰۷	۳۵/۲۸	۲
۰	۱۷/۹۳	۷/۰۶	۰	۱۷/۹۳	۷/۰۶	۳
۰	۹/۱۹	۱۵/۸۰	۰	۱۰/۰۹	۱۴/۹	۴
۰	۱۷/۵۸	۷/۴۲	۰	۱۰/۰۹	۱۴/۹	۵
۰	۲۰/۹۸	۴/۱	۰	۱۰/۰۹	۱۴/۹	۶
۰	۱۷/۹۳	۷/۰۶	۰	۲۰/۹۸	۴/۱	۷
۰	۰	۲۵	۰	۰	۲۵	۸
۰	۱۴/۸۸	۱۰/۱۱	۰	۲۰/۹۸	۴/۱	۹
۰	۰	۲۵	۰	۰	۲۵	۱۰
۰	۰	۲۵	۰	۰	۲۵	۱۱
۰	۰	۵۵	۰	۰	۵۵	۱۲
۰	۰	۴۴/۶۱	۰	۰	۲۵	۱۳
۳۱/۳۱	۰	۴۳/۳	۱۱/۷	۰	۴۳/۳	۱۴
۸۵	۰	۰	۸۵	۰	۰	۱۵
۸۵	۰	۰	۸۵	۰	۰	۱۶
۲۴/۲	۰	۶۰/۸	۲۴/۲	۰	۶۰/۸	۱۷
۰	۰	۸۵	۰	۰	۸۵	۱۸
۰	۰	۸۵	۰	۰	۸۵	۱۹
۰	۰	۶۰	۰	۰	۸۵	۲۰
۰	۰	۶۰	۰	۰	۶۰	۲۱
۰	۰	۳۰	۰	۰	۳۰	۲۲
۰	۰	۳۰	۰	۰	۲۵	۲۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴

۴-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی در شرایط مختلف سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عملکرد سیستم مدیریت انرژی طراحی شده، در پیشامدهای یک سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک تجزیه و تحلیل شد.

مجموعه پیشامدهای ممکن که بر سیستم وارد می‌شوند عبارتند از خروج خط انتقال انرژی و خروج واحد حرارتی. از بین این مجموعه پیشامد، شبیه‌سازی برای پیشامد خروج یک خط و خروج واحد حرارتی انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی برای میزان سود، تبادل با شبکه اصلی، رزرو اختصاص داده شده برای جبران اثر پیشامد، توان عبوری از خطوط انتقال، توان تولیدی واحد حرارتی، توان تأمین شده از ایستگاه خورشیدی و تأمین بار متقاضیان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و اثر وقوع پیشامد بر هر یک از این موارد بررسی شد.

در بخش دیگری از شبیه‌سازی، به تحلیل اثر افزایش نرخ خروج المان‌های سیستم پرداخته شد و شبیه‌سازی برای حالتی که نرخ خروج خطوط انتقال و واحد حرارتی به ۱۰ برابر افزایش یافته، انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی برای دو نرخ خروج متفاوت با یکدیگر مقایسه شد و اثر افزایش آسیب‌پذیری سیستم مورد تحلیل قرار گرفت.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مروری بر مطالب ارائه شده در پایان نامه

در این پایان نامه سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن رزرو چرخان مورد بررسی قرار گرفت و اثر پیشامدهای مختلف بر پاسخ سیستم مطالعه شد.

در فصل دوم، مفاهیم و تعاریف مربوط به مدیریت انرژی بیان شد. نیروگاه مجازی، بارهای پاسخگو و منابع تولید پراکنده مورد بررسی قرار گرفته و دلایل و اهمیت گرایش به سمت منابع تولید پراکنده تصادفی همچون تولید خورشیدی و بادی ارائه شد. در این فصل، ساختار و اجزای ریزشبکه‌های هوشمند و معماری تبادل هوشمند اطلاعات در این شبکه‌ها بیان شد. پیشامد و دلایل وقوع آن‌ها در سیستم قدرت و عدم قطعیت و منابع ایجاد عدم قطعیت‌ها نیز از دیگر مطالبی بود که در فصل دوم ارائه شد. سپس کارهای انجام گرفته در زمینه موضوع، مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مختلف در نظر گرفتن پیشامدهای ریزشبکه‌های هوشمند و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم در کارهای انجام گرفته، تحلیل شد و مشکلات و نواقص آن‌ها بیان شد.

الگوریتم سیستم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی زمان حقیقی در دو مرحله برنامه‌ریزی و توزیع توان در فصل سوم بیان شد. در این فصل، به بیان مدل‌سازی ریاضی مسئله پرداخته شد و تابع هدف و قیود در هر دو مرحله برنامه‌ریزی و توزیع توان به صورت جداگانه تشریح شد. در پایان این فصل نیز روش‌های پیش‌بینی پارامترهای غیر قطعی مسئله همچون تولید توان خورشیدی و قیمت انرژی ارائه شد و در نهایت روش مدل‌سازی عدم قطعیت پیشامدهای سیستم بیان شد.

در فصل چهارم، شبیه‌سازی سیستم مدیریت انرژی زمان حقیقی انجام گرفت. در این فصل، نتایج شبیه‌سازی پیشامدهای خروجی‌ها برای یک سیستم انرژی الکتریکی اندازه کوچک که دارای منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد و قابلیت تبادل توان با شبکه اصلی را دارد، ارائه شد و نحوه مدیریت سیستم در این پیشامدها مورد بررسی قرار گرفت. از بین پیشامدهای ممکن، خروجی یک خط و خروجی واحد حرارتی بررسی شد و پارامترهایی همچون میزان سود نیروگاه مجازی، تبادل با شبکه

اصلی، مقادیر رزرو چرخان و میزان بار تأمین شده در این پیشامدها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین با اعمال پیشامدهای خروج خط و خروج واحد حرارتی برای حالتی که آسیب‌پذیری سیستم افزایش می‌یابد، پاسخ سیستم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج دو نرخ خروج بالاتر و پایین‌تر با یکدیگر مقایسه شد.

۲-۵ نتایج

از این پایان‌نامه، نتایج زیر قابل استنباط است:

۱. زمان حقیقی بودن مدیریت انرژی در این کار مورد بررسی قرار گرفته است، عبارتی سیستم مدیریت انرژی ارائه شده به صورت زمان حقیقی برای توزیع انرژی ساعت پیش‌رو تصمیم‌گیری می‌نماید و با در نظر گرفتن رزرو چرخان، امنیت سیستم ارتقا داده شده است که تاکنون به آن پرداخته نشده است.

۲. با توجه به ساختار ارائه شده، می‌توان مدیریت انرژی را برای زمان‌های کوتاه‌تر از ساعت نیز انجام داد. همچنین، مدل، قابلیت استفاده در دوره‌های زمانی بلندتر را دارا می‌باشد.

۳. با وقوع رزرو چرخان در نیروگاه مجازی، رزرو چرخان طراحی شده به سیستم کمک می‌کند تا پیشامد را مدیریت کند و با کم‌ترین میزان حذف بار و انرژی تأمین نشده روزانه، توزیع انرژی را انجام دهد.

۴. رزرو تأمینی می‌تواند از دو منبع تولیدی و مصرفی باشد. منابع تولید انرژی با افزایش/کاهش تولید در تأمین رزرو افزایشی/کاهشی شرکت می‌کنند. متقاضیان انرژی نیز با افزایش/کاهش مصرف خود به تأمین رزرو کاهشی/افزایشی کمک می‌کنند.

۵. خروج هریک از المان‌های سیستم اثرات متفاوتی بر سیستم مدیریت انرژی دارد، همچنین زمان وقوع پیشامد در عملکرد سیستم مدیریت انرژی موثر است.

۶. سیستم مدیریت انرژی طراحی شده، علاوه بر سیستم‌های انرژی الکتریکی اندازه کوچک و ریزشکه‌ها، برای مدیریت انرژی در سیستم‌های الکتریکی اندازه بزرگ، با همین ساختار ارائه شده، قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

۷. در سیستم‌های انرژی شعاعی و نیز در عملکرد جزیره‌ای سیستم انرژی، مدل ارائه شده قابل استفاده می‌باشد.

۸. با وجود ارزان بودن تولید انرژی از ایستگاه خورشیدی، برخی پیشامدها می‌تواند منجر به عدم استفاده از تمام ظرفیت تولید خورشیدی شود که این امر موجب کاهش سود نیروگاه مجازی می‌شود.

۹. دو عامل در میزان سود نیروگاه مجازی تأثیر زیادی دارد. یکی قیمت انرژی شبکه و دیگری مطلوبیت متقاضیان انرژی. بنابراین در دو حالت سود نیروگاه مجازی افزایش می‌یابد؛ یکی بالا بودن مطلوبیت متقاضیان در زمان‌های پایین بودن قیمت انرژی، و دیگری پایین بودن مطلوبیت متقاضیان در هنگام بالا بودن قیمت انرژی شبکه.

۳-۵ پیشنهادات

مسئله ارائه شده برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی زمان حقیقی را می‌توان ارتقا بخشید. از جمله مواردی که برای این منظور پیشنهاد می‌شود عبارتند از:

- اضافه نمودن کنترل عدم قطعیت قیمت انرژی و نیز کنترل عدم قطعیت توان خورشیدی به مدل مسئله.
- در نظر گرفتن شاخص ریسک به منظور جلوگیری از ریسک وقوع سود با مقادیر کم و مقادیر منفی.
- مدل‌سازی وقوع پیشامدهای همزمان به منظور نزدیک‌تر نمودن مسئله به شرایط واقعی.
- استفاده از مدل پخش بار متناوب و در نظر گرفتن تلفات توان.

- در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هایی همچون خطا در قطع و وصل بریکرهای سیستم.
- در مسئله مدیریت انرژی ارائه شده در این پایان‌نامه، المان خارج شده از سیستم تا پایان روز برنامه‌ریزی، به مدار برنمی‌گردد. با در نظر گرفتن نرخ تعمیر کوتاه‌تر برای المان‌ها، می‌توان مسئله را برای حالاتی در نظر گرفت که المان خارج شده تا قبل از پایان دوره برنامه‌ریزی، به مدار برگردد. در صورت برنامه‌ریزی در دوره‌های بلندتر از یک روز، برگشت المان‌های خارج شده تا پیش از اتمام دوره برنامه‌ریزی، ضرورت بیش‌تری می‌یابد.

مراجع

- [1] B. Jiang and Y. Fei, "Smart home in smart microgrid: A cost-effective energy ecosystem with intelligent hierarchical agents," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 3-13, no. 1, January 2015.
- [2] C. Vivekananthan, Y. Mishra, G. Ledwich, and F. Li, "Demand response for residential appliances via customer reward scheme," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 5, pp. 809-820, no. 2, March 2014.
- [3] B. Moradzadeh and K. Tomsovic, "Two-stage residential energy management considering network operational constraints," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 2339-2346, no. 4, December 2013.
- [4] J. H. Yoon, R. Baldick, and A. Novoselac, "Dynamic demand response controller based on real-time retail price for residential buildings," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 121-129, no. 1, January 2014.
- [5] W. Kahlenborn, S. Kabisch, J. Klein, I. Richter, and S. Schürmann, "Energy management systems in practice, ISO-50001: a guide for companies and organisations. Federal Ministry for the Environment," *Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) and Federal Environment Agency (UBA)*, 2012.
- [6] W.-J. Lee and R. Kenarangui, "Energy management for motors, systems, and electrical equipment," *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 38, pp. 602-607, no. 2, March/April 2002.
- [7] S. Doty and W. C. Turner, *Energy management handbook*. CRC Press, 2004.
- [8] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 949-956, no. 2, May 2011.
- [9] J. M. Morales, A. J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, and M. Zugno, *Integrating renewables in electricity markets: operational problems* vol. 205: Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] J. Barbosa, R. Leão, C. Lima, M. Rego, and F. Antunes, "Decentralised energy management system to virtual power plants," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*, March 2010.
- [11] G. Chicco and P. Mancarella, "Distributed multi-generation: a comprehensive view," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, pp. 535-551, 2009.
- [12] X. Geng and P. P. Khargonekar, "Electric vehicles as flexible loads: Algorithms to optimize aggregate behavior," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), IEEE Third International Conference on*, pp. 430-435, 2012.

- [13] C.-C. Chu and H. H.-C. Iu, "Complex Networks Theory For Modern Smart Grid Applications: A Survey," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, April 2017.
- [14] S. Islam, "Digital applications in implementation of smart grid," in *Accessibility to Digital World (ICADW)*, *International Conference on*, pp. 3-7, 2016.
- [15] M. I. U. Khan and M. Riaz, "Various Types of Smart Grid Techniques: A Review." pp. 535-551, vol. 7, no.8 ,December 2016.
- [16] F. Farzan, "*Towards uncertainty in micro-grids: planning, control and investment*": Rutgers The State University of New Jersey-New Brunswick, January 2013.
- [17] Q. Hu, "*Distribution network contingency analysis and contingency detection with the consideration of load models*": The University of Texas at Arlington, 2010.
- [18] A. Khodaei, S. Bahramirad, and M. Shahidehpour, "Microgrid planning under uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 2417-2425, September 2014.
- [19] M. Q. Wang and H. Gooi, "Spinning reserve estimation in microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 1164-1174,no.3 August 2011.
- [20] J. H. Eto, "Demand response spinning reserve demonstration--phase 2 findings from the summer of 2008," *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2010.
- [21] S. Kaabe, M. Rahimiyan, and M. A. Latify, "Impact of forecast accuracy on energy management of a virtual power plant," in *Smart Grid Conference (SGC), 2014*, pp. 1-6, 2014.
- [22] M. Rahimiyan and L. Baringo, "Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 2676-2687,September 2015.
- [23] M. Giuntoli and D. Poli, "Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 942-955,no.2 June 2013.
- [24] A. Thavlov and H. W. Bindner, "Utilization of flexible demand in a virtual power plant set-up," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 640-647,no.2 March 2015.
- [25] J. Byun, I. Hong, and S. Park, "Intelligent cloud home energy management system using household appliance priority based scheduling based on prediction of renewable energy capability," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, no.4 ,November 2012.

- [26] H. Kanchev, D. Lu, F. Colas, V. Lazarov, and B. Francois, "Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 58, pp. 4583-4592, no. 10, October 2011.
- [27] S. Lee, B. Kwon, and S. Lee, "Joint energy management system of electric supply and demand in houses and buildings," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 2804-2812, no. 6, November 2014.
- [28] M. Humayun, A. Safdarian, M. Z. Degefa, and M. Lehtonen, "Demand response for operational life extension and efficient capacity utilization of power transformers during contingencies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 2160-2169, September 2014.
- [29] H. Jia, W. Qi, Z. Liu, B. Wang, Y. Zeng, and T. Xu, "Hierarchical risk assessment of transmission system considering the influence of active distribution network," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 1084-1093, September 2014.
- [30] S.-J. Chen, T.-S. Zhan, C.-H. Huang, J.-L. Chen, and C.-H. Lin, "Nontechnical loss and outage detection using fractional-order self-synchronization error-based fuzzy petri nets in micro-distribution systems," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 6, pp. 411-420, August 2015.
- [31] M. Rastegar and M. Fotuhi-Firuzabad, "Outage management in residential demand response programs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1453-1462, no. 3, May 2015.
- [32] R. Karki and R. Billinton, "Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, pp. 368-373, no. 4, December 2001.
- [33] Z. Li, Y. Yuan, and F. Li, "Evaluating the reliability of islanded microgrid in an emergency mode," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, pp. 1-5, September 2010.
- [34] A. Bidram, M.-e. Hamedani-golshan, and A. Davoudi, "Capacitor design considering first swing stability of distributed generations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 1941-1948, no. 4, November 2012.
- [35] J. Rocabert, G. M. Azevedo, A. Luna, J. M. Guerrero, J. I. Candela, and P. Rodríguez, "Intelligent connection agent for three-phase grid-connected microgrids," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 26, pp. 2993-3005, no. 10, October 2011.

[36] کعبه پهنه‌کلای س، رحیمیان م، "مدیریت انرژی نیروگاه مجازی بر پایه بهینه‌سازی مقاوم با پایش پیشامدهای ریزش‌بکه: مطالعه موردی خروج تکی خط"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۶۱-۲۴۹، بهار ۱۳۹۶

- [37] M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 114-124, no. 1, February 2009.
- [38] L. E. Luna-Ramírez, H. Torres-Sánchez, and F. A. Pavas-Martínez, "Spinning reserve analysis in a microgrid," *Dyna*, vol. 82, pp. 85-93, June 2015.
- [39] L. E. L. Ramirez, "Integration of photovoltaic generation in a microgrid: spinning reserve analysis," in *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica-SICEL*, p. 7, 2013.
- [40] H. Bai, S. Miao, X. Ran, and C. Ye, "Optimal dispatch strategy of a virtual power plant containing battery switch stations in a unified electricity market," *Energies*, vol. 8, pp. 2268-2289, March 2015.
- [41] V. Black, "Cost and performance data for power generation technologies," *Prepared for the National Renewable Energy Laboratory*, 2012.
- [42] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, "Decision making under uncertainty in electricity markets" vol. 1: Springer, 2010.
- [43] M. Govardhan and R. Roy, "Economic analysis of unit commitment with distributed energy resources," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 71, pp. 1-14, January 2015.
- [44] "ISO New England, US. [Online]. Available: <http://www.iso-ne.com>."
- [45] M. Rahimiyan and L. Baringo, "Energy management of a cluster of interconnected price-responsive demands," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 645-655, no. 2, March 2014.

[46] کعبه، س، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه ارشد، "مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزشبکه"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Abstract

In this thesis, a stochastic model is proposed for modeling real-time energy management of virtual power plant (VPP). This VPP consists of distributed generation resources (e.g., solar power station and thermal unit), energy storage units and price-responsive demands, which are connected through a small size electric energy system. Additionally, the VPP can exchange energy with main grid. The proposed model maintains system security in an appropriate level by scheduling energy and spinning reserve capacity. Uncertainties in solar power production and energy price are presented through single-point forecast. Uncertainty in availability of network equipment is modeled by scenarios. The stochastic model is implemented in a small size electric energy system with different degrees of system vulnerability. Results show the good performance of the model in the system contingencies.

Keywords: energy management, virtual power plant, smart grid, contingency, spinning reserve.



Faculty of Electrical Engineering and Robotic
M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

**Smart Energy Management of Virtual Power Plant
considering Spinning Reserve**

By: Mojtaba Koulivand

Supervisor:

Dr. Morteza Rahimiyan

August 2017