

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق

گروه قدرت

عنوان :

مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزش شبکه

دانشجو :

سهیل کعبه پهنه کلائی

استاد راهنما :

دکتر مرتضی رحیمیان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۴

تقدیم به

ستون‌های استوار هدایت، ائمه بزرگوار اسلام

به ویژه امام رضا (ع) و حضرت ولی عصر (عج)

پدر و مادر عزیز و مادر بزرگ مهربانم

پروردگارا!

نه می‌توانم مویشتان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه‌بسته‌تان که ثمره‌ی

تلاش برای پیشرفت من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده تا قدر تک تک لحظه‌های بودن در

کنارشان را بدانم و بتوانم گوشه‌ای از فداکاری‌هایشان را جبران نمایم..

تقدیر و تشکر:

حمایت‌های بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گران‌قدر و دلسوز جناب آقای دکتر مرتضی رحیمیان، همواره شامل حال این‌جانب بوده است. لذا بر خود لازم می‌دانم سپاسگزاری صمیمانه خود را خدمت این استاد عزیز نثار کنم و سلامتی، طول عمر، موفقیت و سرفرازی ایشان را از خداوند مسئلت نمایم.

همچنین از همه دوستان و عزیزانی که در طول دوره کارشناسی ارشد به شیوه‌های گوناگون محبت، راهنمایی‌ها و حمایت‌های خود را از بنده دریغ نکردند، لحظاتی خوش و ماندگار برای من ایجاد کردند، به‌صورت ویژه تشکر می‌کنم و بهترین آرزوها را در تمامی مراحل زندگی برای آن‌ها خواستارم.

درپیش دوست تحفه جان بس محقر است

در خاک پای یار سراز خاک کمتر است

تعهد نامه

اینجانب سهیل کعبه پهنه کلائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/ قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزش شبکه 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 پژوهش های 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 بافت های آن ها) 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 است) 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 فارسی:

مدیریت هماهنگ منابع تولید پراکنده و متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت در قالب نیروگاه مجازی در صنعت برق مورد توجه قرار گرفته است. وجود عدم قطعیت در منابع تولید پراکنده تصادفی، قیمت انرژی و دسترس‌پذیری اجزای ریزشبکه موجب شده است که مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی پیچیده شود. با مجهز کردن ریزشبکه به فناوری شبکه هوشمند، امکان پایش نزدیک به زمان حقیقی وضعیت ریزشبکه و اصلاح تصمیم‌های مدیریت انرژی برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها فراهم می‌گردد. در این پایان‌نامه، به منظور مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی یک بهینه‌سازی مقاوم تصادفی ارائه می‌گردد. این نیروگاه مجازی شامل ایستگاه‌های خورشیدی، واحدهای ذخیره‌ساز و متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت می‌باشد که به وسیله یک ریزشبکه به یکدیگر متصل هستند. در این راستا، عدم قطعیت در متغیرهای تصادفی پیوسته (مانند قیمت انرژی و تولید خورشیدی) و گسسته (مانند دسترس‌پذیری اجزای ریزشبکه) به ترتیب به کمک روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر بازه و سناریو مدل‌سازی می‌شوند. عملکرد بهینه‌سازی مقاوم تصادفی ارائه‌شده به وسیله یک ریزشبکه نمونه بررسی و با روش‌های قطعی و مقاوم مقایسه می‌شود. نتایج، اجراپذیر بودن و عملکرد خوب بهینه‌سازی مقاوم تصادفی را تأیید می‌کند، به ویژه در مواردی که پیشامد در روزهایی با تغییرات زیاد قیمت انرژی رخ می‌دهد.

کلید-واژه: مدیریت انرژی، نیروگاه مجازی، شبکه هوشمند، بهینه‌سازی مقاوم، برنامه‌ریزی تصادفی، پیشامد.

لیست مقالات مستخرج:

۱- سهیل کعبه، مرتضی رحیمیان، "مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزشبکه هوشمند"، کنفرانس شبکه‌های هوشمند، تهران، ۱۳۹۴.

۲- سهیل کعبه، مرتضی رحیمیان، "مدیریت انرژی مقاوم نیروگاه مجازی در شبکه هوشمند با پایش پیشامدهای ریزشبکه" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز. [تحت داوری]

- 3- 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*.
- 4- S. Kaabe, M. Rahimiyan, "Robust Energy Management of a Virtual Power Plant with Stochastic Security", *Power Systems, IEEE Transactions on* [Underway].
- 5- S. Kaabe, M. Rahimiyan, "Stochastic Energy Management in Smart Grid: Security Constraints of Virtual Power Plant", *Smart Grid, IEEE Transactions on* [Underway].

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: پیشگفتار ۱
- ۱-۱ انگیزه تحقیق ۲
- ۲-۱ هدف تحقیق ۴
- ۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه ۵
- ۲- فصل دوم: پیش‌درآمد موضوع و مروری بر کارهای گذشته ۷
- ۱-۲ مقدمه ۸
- ۲-۲ نیروگاه مجازی ۸
- ۱-۲-۲ منابع تولید پراکنده ۱۰
- ۲-۲-۲ بار پاسخگو ۱۱
- ۳-۲ شبکه هوشمند ۱۲
- ۴-۲ مدیریت انرژی ۱۴
- ۱-۴-۲ اهمیت مدیریت انرژی ۱۵
- ۲-۴-۲ عدم قطعیت ۱۶
- ۳-۴-۲ مروری بر سابقه موضوع ۱۶
- ۵-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۳
- ۳- فصل سوم: مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی ۲۵
- ۱-۳ مقدمه ۲۶

۲۷	۲-۳ فهرست علائم و اختصارات
۳۰	۳-۳ تشریح مسئله
۳۵	۴-۳ مدل قطعی
۳۵	۱-۴-۳ فرمول بندی
۴۰	۲-۴-۳ مدل سازی عدم قطعیت
۴۴	۵-۳ مدل مقاوم
۴۴	۱-۵-۳ فرمول بندی
۴۷	۲-۵-۳ پیش بینی بازه‌ای
۴۹	۶-۳ مدل مقاوم تصادفی
۵۱	۱-۶-۳ فرمول بندی
۵۶	۲-۶-۳ مدل سازی عدم قطعیت
۵۸	۷-۳ جمع بندی و نتیجه گیری
۵۹	۴- فصل چهارم: شبیه سازی مدیریت انرژی نیروگاه مجازی
۶۰	۱-۴ مقدمه
۶۰	۲-۴ اطلاعات
۶۱	۱-۲-۴ اطلاعات فنی اقتصادی سیستم
۶۴	۲-۲-۴ اطلاعات مرتبط با پارامترهای غیرقطعی
۷۰	۳-۴ نتایج شبیه سازی
۹۰	۴-۴ جمع بندی و نتیجه گیری

۹۳۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۹۴۵-۱ مروری بر کارهای انجام‌شده

۹۵۵-۲ نتایج

۹۶۵-۳ پیشنهادات

۹۹۶- مراجع

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱: اطلاعات فنی مربوط به بارها ۶۲
- جدول ۴-۲: اطلاعات مربوط به بلوک‌های تابع مطلوبیت ۶۳
- جدول ۴-۳: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های خورشیدی و واحدهای ذخیره ۶۳
- جدول ۴-۴: اطلاعات فنی مربوط به ریزش‌بکه ۶۴
- جدول ۴-۵: بخشی از اطلاعات مربوط به پارامترهای غیرقطعی در روز ۱۰ آگوست ۲۰۰۹ ۶۶
- جدول ۴-۶: بخشی از اطلاعات مربوط به پارامترهای غیرقطعی در روز ۲۱ اکتبر ۲۰۰۹ ۶۷
- جدول ۴-۷: خلاصه نتایج مقایسه مدل‌های مقاوم و قطعی ۷۶
- جدول ۴-۸: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازار خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد) ۷۷
- جدول ۴-۹: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازار خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد) ۷۸
- جدول ۴-۱۰: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازار خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد) ۷۹
- جدول ۴-۱۱: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازار خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد) ۷۹
- جدول ۴-۱۲: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازار خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد) ۷۹
- جدول ۴-۱۳: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازار خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد) ۸۰
- جدول ۴-۱۴: میزان افزایش سود مدل‌ها نسبت به مدل قطعی در یک هفته (برحسب درصد) ۹۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۱: ضرایب همبستگی متقابل میان قیمت انرژی بازار روز قبل و بازار زمان حقیقی ۴۱
- شکل ۳-۲: پیش‌بینی نقطه‌ای قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی ۴۲
- شکل ۳-۳: پیش‌بینی نقطه‌ای تولید توان خورشیدی ۴۴
- شکل ۳-۴: پیش‌بینی بازه‌ای قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی ۴۹
- شکل ۳-۵: پیش‌بینی بازه‌ای تولید توان خورشیدی ۴۹
- شکل ۴-۱: ساختار نیروگاه مجازی مورد مطالعه ۶۱
- شکل ۴-۲: پیش‌بینی‌های مربوط به روز ۱۰ آگوست ۲۰۰۹ (الف و ب) قیمت انرژی الکتریکی، ج و د) تولید توان خورشیدی ۶۸
- شکل ۴-۳: پیش‌بینی‌های مربوط به روز ۲۱ اکتبر ۲۰۰۹ (الف و ب) قیمت انرژی الکتریکی، ج و د) تولید توان خورشیدی ۶۹
- شکل ۴-۴: اثر خروج خطوط ریزشبه در ساعت ۶ بر سود نیروگاه مجازی در روز ۱۰ آگوست در مدل قطعی ۷۰
- شکل ۴-۵: اثر خروج خطوط ریزشبه در ساعت ۶ بر سود نیروگاه مجازی در روز ۲۱ اکتبر در مدل قطعی ۷۱
- شکل ۴-۶: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست و مقادیر مختلف Γ^{MG} ۷۲
- شکل ۴-۷: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست و مقادیر مختلف Γ^{MG} ۷۲
- شکل ۴-۸: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء وضعیت سالم ریزشبه روز ۱۰ آگوست و مقادیر مختلف Γ^{MG} ۷۳

- شکل ۴-۹: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر و مقادیر مختلف Γ^{MG} ۷۳
- شکل ۴-۱۰: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر و مقادیر مختلف Γ^{MG} ۷۴
- شکل ۴-۱۱: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء وضعیت سالم روز ۲۱ اکتبر و مقادیر مختلف Γ^{MG} ۷۴
- شکل ۴-۱۲: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست ۷۷
- شکل ۴-۱۳: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست ۷۸
- شکل ۴-۱۴: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازاء وضعیت سالم ریزش شبکه در روز ۱۰ آگوست ۷۸
- شکل ۴-۱۵: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر ۷۹
- شکل ۴-۱۶: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر ۸۰
- شکل ۴-۱۷: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازاء وضعیت سالم ریزش شبکه روز ۲۱ اکتبر ۸۰
- شکل ۴-۱۸: انرژی توافق شده برای مبادله با شبکه اصلی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست، الف) مدل مقاوم تصادفی، ب) مدل قطعی، ج) مدل مقاوم ۸۴
- شکل ۴-۱۹: انرژی توافق شده برای مبادله با شبکه اصلی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر، الف) مدل مقاوم تصادفی، ب) مدل قطعی، ج) مدل مقاوم ۸۵
- شکل ۴-۲۰: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست. ۸۶

- شکل ۴-۲۱: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست . ۸۶
- شکل ۴-۲۲: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء وضعیت سالم ریزش شبکه روز ۱۰ آگوست ۸۶
- شکل ۴-۲۳: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر ۸۷
- شکل ۴-۲۴: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر ۸۷
- شکل ۴-۲۵: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء وضعیت سالم ریزش شبکه روز ۲۱ اکتبر ۸۷
- شکل ۴-۲۶: مقایسه سود مدل های مدیریت انرژی در یک هفته ۸۹

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ انگیزه تحقیق

سیستم قدرت از گذشته با مشکلات متعددی مانند میزان بالای تولید آلاینده‌ها، بهره‌وری پایین، استفاده نادرست از منابع، اتلاف سرمایه و انرژی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری ناصحیح روبه‌رو بوده است. افزایش چشمگیر مصرف انرژی الکتریکی به‌ناچار رشد تولید این انرژی را در پی داشته است، که این رشد، به معنای افزایش وابستگی به منابع فسیلی که سهم بزرگی از این تولید را بر عهده دارند (بیش از ۷۸٪ در سال ۲۰۱۳) و افزایش تولید آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. این مسائل در کنار نیاز به تغییر در روند مصرف انرژی، پاسخگو کردن بارها و افزایش بهره‌وری در سمت تولید و تقاضا، مسئله مدیریت انرژی را به عنوان یک راهکار مناسب مطرح کرده است.

در سال‌های اخیر هم‌زمان با تجدید ساختار سیستم قدرت میزان مشارکت منابع تولید پراکنده شامل منابع فسیلی و تجدید پذیر در تولید انرژی الکتریکی افزایش یافته است. تغییرات قیمت حامل‌های انرژی، مشکلات زیست‌محیطی و دلایل اقتصادی و فنی موجب توسعه نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی بادی، انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی در سیستم قدرت شده است، به گونه‌ای که در سال ۲۰۱۴، نزدیک به ۲۳٪ کل انرژی الکتریکی در دنیا توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین شده است. لذا این منابع تبدیل به بخش جدایی‌ناپذیر سیستم قدرت شده‌اند و در نظر گرفتن آن‌ها در مطالعه، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت ضروری به نظر می‌رسد.

با توسعه نفوذ منابع تولید پراکنده، مدیریت متمرکز و هماهنگ این منابع و متقاضیان پاسخ‌گو^۱ به قیمت در ریزش‌بکه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. مجموعه واحدهای تولید پراکنده، متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت و سیستم‌های ذخیره‌ساز که به صورت یک نهاد واحد بهره‌برداری می‌شوند را نیروگاه مجازی^۲ می‌نامند. مقدار بهینه تولید، مصرف، ذخیره و خرید و فروش انرژی نیروگاه مجازی توسط سیستم

¹ Responsive Demands

² Virtual Power Plant (VPP)

مدیریت انرژی^۳ تعیین می‌گردد.

مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با چالش‌های اساسی مواجه است که موجب پیچیده شدن این موضوع می‌شوند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به عدم قطعیت^۴ در میزان تولید، مصرف، قیمت انرژی و دسترس‌پذیری اجزای شبکه اشاره کرد. به علت ماهیت متغیر منابع تولید پراکنده به‌ویژه منابع انرژی بادی و خورشیدی، و وابستگی آن‌ها به شرایط جوی، آگاهی از میزان دقیق و قطعی تولید آن‌ها دشوار است. انتظار می‌رود عدم قطعیت در پی توسعه نفوذ این منابع، افزایش یابد. تغییر در قیمت حامل‌های انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین در میزان تولید و تقاضا، منجر به تغییرات بعضاً ناگهانی و زیاد در قیمت انرژی می‌شود. عدم قطعیت قیمت انرژی در بازار زمان حقیقی به مراتب بیشتر از بازار روز قبل می‌باشد. مدل‌سازی عدم قطعیت در این موارد باید در مسائل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت لحاظ شوند.

از طرفی خطوط انتقال و منابع تولید انرژی در اثر بروز پیشامدهای مختلف مانند وقوع خرابی‌ها، حوادث طبیعی و غیرطبیعی از دسترس خارج می‌شوند. به علت تعداد محدود خطوط انتقال و منابع تولید در ریزشکده‌ها و همچنین شعاعی بودن برخی ریزشکده‌ها، وقوع پیشامد و خروج مؤلفه‌ها در ریزشکده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نظر گرفتن این پیشامدها در مدیریت انرژی موجب افزایش بهره‌وری و بهبود کیفیت خدمات‌رسانی به متقاضیان در ریزشکده می‌شود.

شبکه هوشمند یکی از فناوری‌های جدید در سیستم قدرت می‌باشد که توانایی سیستم مدیریت انرژی را برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها افزایش داده است. شبکه هوشمند با پایش و اندازه‌گیری پیوسته وضعیت بهره‌برداری شبکه، اطلاعات لحظه‌ای ارزشمندی از وضعیت شبکه مانند میزان تولید، مصرف،

³ Energy Management System

⁴ Uncertainty

توان خطوط و دسترس‌پذیری مؤلفه‌های شبکه در اختیار بهره‌برداران قرار می‌دهد. همچنین با ایجاد ارتباط دوسویه میان سیستم مدیریت انرژی و کاربران ریزشبکه مانند تولیدکنندگان و متقاضیان انرژی، بستری مناسب جهت بهره‌برداری کارا تر از نیروگاه مجازی را فراهم می‌آورد.

۲-۱ هدف تحقیق

هدف از این تحقیق مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی شامل منابع تولید پراکنده، واحدهای ذخیره‌ساز انرژی و متقاضیان پاسخگو به قیمت با توجه به امکان وقوع پیشامد در ریزشبکه می‌باشد. ریزشبکه دارای قابلیت تبادل انرژی (خریدوفروش) با شبکه اصلی است. عدم قطعیت در قیمت انرژی، تولیدهای تصادفی و خروج اجزای ریزشبکه در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت در متغیرهای تصادفی پیوسته (مانند قیمت انرژی و تولیدهای تصادفی) و گسسته (مانند خروج اجزای ریزشبکه) به ترتیب به کمک روش‌های مبتنی بر بازه و سناریو مدل‌سازی می‌شوند. با مجهز کردن ریزشبکه به فناوری شبکه هوشمند، امکان پایش سیستم و اصلاح تصمیم‌های مدیریت انرژی برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها فراهم می‌گردد.

در این تحقیق تلاش شده است مدل مدیریت انرژی کارا با در نظر گرفتن پیشرفت فناوری شبکه هوشمند در آینده، ارائه شود. آینده‌ای که در آن با استفاده بهینه و مطمئن از انرژی الکتریکی، افزایش سود و رفاه کاربران سیستم همراه با کاهش اتلاف سرمایه، انرژی و آلاینده‌ها میسر خواهد بود. همچنین در این پایان‌نامه به سؤالات زیر پاسخ داده می‌شود:

۱- مدیریت انرژی در افزایش بهره‌وری انرژی چه نقشی دارد؟

۲- چگونه می‌توان از منابع تولید انرژی پراکنده و بارهای پاسخگو در استفاده بهینه از انرژی

الکتریکی بهره برد؟

۳- نحوه استفاده از شبکه هوشمند در سیستم مدیریت انرژی به چه صورت است؟

۴- تأثیر پیشامدها در مدیریت انرژی نیروگاه مجازی چیست؟

۵- چگونه باید پیشامدها را در مسئله مدیریت انرژی مدل سازی کرد؟

۱-۳ مروری بر فصل های پایان نامه

فصل های بعدی این پایان نامه بدین شرح است. در فصل دوم به بررسی سابقه موضوع مدیریت انرژی نیروگاه مجازی پرداخته می شود. ابتدا فناوری های مرتبط با مدیریت انرژی و دلایل پیدایش آن -ها معرفی می گردند. سپس تعریف و اهمیت مدیریت انرژی، سابقه آن و کارهای انجام شده در این حوزه مورد بحث قرار می گیرد. در فصل سوم، الگوریتم مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی تشریح و بر اساس روش های مدل سازی عدم قطعیت در سه مدل قطعی^۵، مقاوم^۶ و مقاوم تصادفی^۷ فرمول بندی می گردد. در فصل چهارم، مدل های ارائه شده در فصل سوم شبیه سازی و نتایج به دست آمده تحلیل می شوند. در فصل پنجم، به طور مختصر، مروری بر کارهای انجام شده در این تحقیق صورت می گیرد، نتایج جمع بندی می شوند و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه می گردد.

⁵ Deterministic

⁶ Robust

⁷ Stochastic Robust

فصل دوم

پیش درآمد موضوع و مروری بر

کارهای گذشته

۲-۱ مقدمه

مشکلات اقتصادی (مانند افزایش قیمت حامل‌های انرژی)، زیست‌محیطی (مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای) و فنی (مانند مشکلات بهره‌برداری و بهره‌وری پایین) موجب تغییرات ساختاری، ظهور، پیشرفت و گسترش استفاده از فناوری‌های گوناگون در سیستم قدرت شده است. هدف از این تغییرات (مانند تجدید ساختار سیستم‌های قدرت) و استفاده از فناوری‌های نوین (مانند منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخگو و شبکه هوشمند)، تبدیل سیستم قدرت به یک سیستم پویاتر، ایمن‌تر، کاراتر و با آلاینده‌گی کمتر می‌باشد [۴-۱].

در این فصل برخی مفاهیم و فناوری‌های نوین معرفی می‌گردند. در ابتدا مفهوم نیروگاه مجازی و فناوری‌های مرتبط بیان می‌شود. سپس فناوری شبکه هوشمند معرفی می‌گردد. اهمیت مدیریت انرژی، چالش‌های پیش روی آن و مروری بر سابقه موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرند، و در انتها خلاصه‌ای از مباحث مرور می‌شود.

۲-۲ نیروگاه مجازی

گسترش منابع تولید پراکنده موجب تغییر در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت گردیده است. این تغییرات چالش‌هایی مانند مشکلات حفاظتی، عدم اطلاع از میزان دقیق تولید و امکان وقوع انحراف در انرژی تولیدی منابع تولید پراکنده تصادفی، برای بهره‌برداران ایجاد می‌کند [۵]. سیاست توسعه منابع تولید پراکنده بر اساس نصب و استفاده از انرژی تولیدی آن‌ها بدون در نظر گرفتن اثرات فنی بر روی شبکه و نحوه برنامه‌ریزی آن‌ها می‌باشد. اتصال هرچه بیشتر این منابع بدون توجه به رفتار و برنامه‌ریزی آن‌ها، اثرات منفی بر روی امنیت سیستم قدرت خواهد داشت. با ادامه این سیاست، مبتنی بر روش "Fit & Forget"، به عنوان یکی از ویژگی‌های شبکه‌های غیرفعال، منابع تولید پراکنده به علت کوچک بودن و تعداد بسیار زیاد آن‌ها توسط سیستم قابل مشاهده و مدیریت نیستند و در حالی که می‌توانند جایگزین تولید انرژی منابع متمرکز باشند، فاقد قابلیت پشتیبانی از

سیستم و انجام فعالیت‌های مرتبط با امنیت شبکه می‌باشند [۶, ۷].

مفهوم نیروگاه مجازی نخست در سال ۱۹۹۷ میلادی با اهداف رویت‌پذیری منابع تولید پراکنده، فراهم آوردن رابط مناسب برای مؤلفه‌های محلی، فعال‌سازی راهبردهای کنترل پراکنده و استفاده بهینه از ظرفیت موجود، ارائه شد [۸]. طبق تعریف پروژه فنی‌کس^۸ اتحادیه اروپا، نیروگاه مجازی نهادی است که ظرفیت منابع تولید پراکنده گوناگون را تجمیع می‌کند و با ترکیب پارامترهای خاص تولید هر منبع، یک مشخصه بهره‌برداری واحد را شکل می‌دهد که می‌تواند اثر شبکه را با منابع تولید پراکنده به هم پیوسته^۹، ترکیب کند [۹]. نیروگاه مجازی شامل دو نوع تجاری و فنی می‌باشد. نیروگاه مجازی تجاری^{۱۰} به عنوان یک شرکت‌کننده در بازار معامله می‌کند (مانند تبادل توان در بازار عمده-فروشی انرژی^{۱۱}) و نیروگاه مجازی فنی^{۱۲} در زمینه مدیریت و پشتیبانی سیستم (مانند ذخیره، تنظیم فرکانس و ولتاژ) به ارائه خدمات می‌پردازد. هر نیروگاه مجازی می‌تواند به‌طور هم‌زمان بخشی از دو نوع تجاری و فنی باشد [۶, ۹].

مراجع جدید با افزودن سیستم‌های ذخیره انرژی و بارهای پاسخگو، قابلیت نیروگاه مجازی را افزایش دادند و تعریف جدیدی از آن ارائه کردند. به مجموعه واحدهای تولید پراکنده، بارهای پاسخگو و سیستم‌های ذخیره انرژی که به صورت یک نهاد واحد بهره‌برداری می‌شوند، نیروگاه مجازی می‌گویند. با استفاده از مزایای منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخگو و سیستم ذخیره‌ساز انرژی یک نیروگاه مجازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های مرسوم فسیلی باشد [۱۰, ۱۱].

⁸ Flexible Electricity Networks to Integrate the expected Energy Evolution (FENIX) project

⁹ Aggregate Distributed Energy Resources

¹⁰ Commercial VPP

¹¹ Wholesale Energy Market

¹² Technical VPP

۱-۲-۲ منابع تولید پراکنده

برای مدت‌زمان طولانی انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کنندگان در حجم انبوه در نیروگاه‌های متمرکز تولید و سپس از طریق خطوط انتقال و توزیع انرژی به متقاضیان تحویل داده شده است. از آنجایی که به‌طور معمول این واحدهای عظیم نیروگاهی به دلیل مسائل اقتصادی و فنی نزدیک به محل انرژی اولیه (مانند گاز، ذغال سنگ، آب و...) و دور از مکان متقاضیان ساخته می‌شوند، انتقال انرژی از طریق خطوط طولانی و پرهزینه صورت می‌گیرد که موجب اتلاف انرژی و مصرف سوخت بیشتر برای جبران انرژی هدررفته می‌شود، که این مصرف، افزایش تولید آلاینده‌ها را در پی خواهد داشت. از سوی دیگر با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، نیاز به ساخت واحدهای نیروگاهی بزرگ و نصب خطوط جدید انتقال انرژی افزایش می‌یابد که یک فرآیند پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. استفاده از منابع تولید پراکنده به عنوان یک راهکار برای غلبه بر این مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه شده است [۱۲، ۱۳].

تاکنون تعاریف گوناگونی برای تولید پراکنده ارائه شده‌اند. آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، تولید پراکنده را واحدی توصیف کرده است که انرژی الکتریکی مورد نیاز متقاضیان را در محل مصرف تأمین نماید و یا به عنوان پشتیبان به شبکه توزیع متصل باشد. IEEE تولید انرژی الکتریکی با استفاده از امکانات به اندازه کافی کوچک‌تر از نیروگاه‌های متمرکز به گونه‌ای که می‌تواند به هر نقطه از سیستم قدرت متصل شود را تولید پراکنده معرفی کرده است. CIGRE تولید پراکنده را به واحد-های متصل به شبکه توزیع اطلاق می‌کند که حداکثر ظرفیت آن‌ها بین ۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات است و به صورت متمرکز برنامه‌ریزی و بهره‌برداری نمی‌شوند [۱۴، ۱۵].

منابع تولید پراکنده دارای انواع مختلفی اعم از منابع فسیلی و تجدیدپذیر مانند موتورهای رفت و برگشتی، توربین‌های گازی، توربین‌های آبی کوچک، پیل‌های سوختی، سیستم‌های فتوولتائیک، بادی،

زمین‌گرمایی^{۱۳}، خورشیدگرمایی^{۱۴} و زیست‌توده^{۱۵} می‌باشد [۱۲]. از جمله مزایای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مناسب از منابع تولید پراکنده در یک نیروگاه مجازی می‌توان به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و افزایش بهره‌وری انرژی اشاره کرد [۸، ۱۲].

۲-۲-۲ بار پاسخگو^{۱۶}

سیستم قدرت از ابتدای پیدایش خود، همواره با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی مواجه بوده است. در پاسخ به این افزایش، توسعه و ساخت واحدهای تولید انرژی الکتریکی به عنوان یک راهکار اولیه مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر بخش بزرگی از این واحدهای تولیدی جدید به‌جز در ساعات اوج مصرف، (که بخش کوچکی در بازه زمانی بهره‌برداری است) در باقی ساعات مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. نگرانی‌های زیست‌محیطی، دلایل اقتصادی و فنی موجب پیدایش راهکارهای جایگزین برای توسعه و ساخت واحدهای جدید شده است. نیاز به اصلاح، تغییر و جابه‌جایی مصرف انرژی الکتریکی، پاسخگویی بار (یا به عبارت دیگر، پاسخگویی تقاضا)^{۱۷} را به عنوان یک راهکار کارآمد در سیستم قدرت مورد توجه قرار داده است [۱۶].

طبق تعریف وزارت انرژی آمریکا، بار پاسخگو متقاضی‌ای است که میزان مصرف انرژی را در پاسخ به تغییر در قیمت انرژی الکتریکی در طی زمان یا هزینه‌های تشویقی تعیین‌شده برای کاهش مصرف انرژی، در ساعاتی که قیمت برق در بازار زیاد یا قابلیت اطمینان سیستم در خطر است، از مقدار عادی الگوی مصرف خود تغییر دهد [۱۷].

¹³ Geothermal

¹⁴ Solar Thermal

¹⁵ Biomass

¹⁶ Responsive Load

¹⁷ Load Response or Demand Response

اهداف و مزایای استفاده از بار پاسخگو را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد [۱۶]:

۱- اقتصاد بازار: هدف در این قسمت کاهش هزینه‌های تأمین انرژی، افزایش حاشیه رزرو و کاهش

نوسان قیمت با استفاده از پاسخگویی هوشمند به وضعیت بازار انرژی الکتریکی می‌باشد.

۲- زیست‌محیطی: بار پاسخگو در این قسمت اهداف زیست‌محیطی و یا اجتماعی را از طریق

تعریف تعهد واحدهای ناسازگار با محیط‌زیست، بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش گازهای

گلخانه‌ای برآورده می‌سازد.

۳- شبکه: بار پاسخگو در این قسمت اهداف امنیتی شبکه را مانند حفظ تعادل، قابلیت اطمینان

سیستم و مدیریت ریسک از طریق کاهش و یا افزایش تقاضا در یک دوره زمانی کوتاه و

کاهش توسعه ظرفیت تولید و انتقال اضافی دنبال می‌کند.

استفاده از بارهای پاسخگو یک راه برای افزایش نفوذ و یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده در

سیستم قدرت در قالب نیروگاه مجازی است و به عنوان ابزاری در جهت تسهیل مدیریت انرژی برای

غلبه بر چالش‌های ناشی از ماهیت تصادفی منابع انرژی تجدیدپذیر مطرح می‌باشد [۱۶، ۱۷].

۲-۳ شبکه هوشمند

شبکه الکتریکی موجود، شبکه‌ای بسیار بزرگ و پیچیده می‌باشد که از نیروگاه‌های متمرکز، خطوط

انتقال و شبکه‌های توزیع تشکیل شده است و توانایی تأمین و انتقال حجم بالایی از توان الکتریکی را

دارا می‌باشد. در این شبکه بهره‌بردار توانایی مدیریت بار اوج را ندارد، میزان قطعی برق مشترکین در

طول سال رقمی قابل توجه است، متقاضیان غیرفعال و نقشی در مدیریت شبکه ندارند، انتقال اطلاعات

در یک جهت است و امکان پایش آنی وضعیت شبکه وجود ندارد. انتقال انرژی از یک سمت صورت

می‌گیرد و به کارگیری منابع تولید پراکنده در سطح گسترده امکان‌پذیر نیست. روند تحویل انرژی با

چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه است و بهبود امنیت و قابلیت اطمینان سیستم با توجه

خاموشی‌های گسترده اخیر در آن ضروری است [۱۸].

موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا^{۱۸}، شبکه هوشمند را یک سیستم تحویل انرژی الکتریکی نوین معرفی می‌کند، به گونه‌ای که عملکرد اجزا متصل به خود را پایش، محافظت و به صورت خودکار بهینه می‌کند [۱۹]. بنیاد فناوری اروپا^{۱۹}، آن را شبکه‌ای می‌داند که عملکرد همه استفاده‌کنندگان متصل به آن را به‌طور هوشمندانه به گونه‌ای تجمیع می‌کند که انرژی الکتریکی را به صورت پایدار، اقتصادی و امن عرضه کند [۲۰]. در واقع شبکه هوشمند یک سیستم الکتریکی می‌باشد که فناوری ارتباطات و اطلاعات دوسویه سایبری امن و هوش محاسباتی را در قالب یک رویکرد جامع در تمامی مراحل تولید، انتقال، تبدیل، توزیع و مصرف انرژی الکتریکی برای رسیدن به یک سیستم پاک، امن، ایمن، قابل اطمینان، انعطاف‌پذیر و پایدار به کار می‌گیرد [۲۱].

چشم‌انداز و نقشه راهی که گروه انرژی ایالت کالیفرنیا برای آینده سیستم قدرت به عنوان یک شبکه هوشمند در نظر گرفته است در چهار محور زیر گنجانده می‌شود [۲۲]:

۱- توانمندسازی مصرف‌کنندگان برای شرکت در بازار آزاد: ابزار و اطلاعات کافی برای ایفای نقش فعال در بازار انرژی الکتریکی به منظور افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و پیاده‌سازی کامل پاسخگویی بار، در اختیار متقاضیان قرار می‌گیرد.

۲- استفاده گسترده از منابع تولید تجدیدپذیر: با به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته، شبکه هوشمند قادر خواهد بود با درصد نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر به صورت مطمئن عمل کند. این فناوری‌ها شامل مدیریت فعال شبکه دربرگیرنده منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره با قابلیت پاسخگویی پویا و جابه‌جایی انرژی در سطح انتقال و توزیع و ترکیب پاسخگویی بار و کنترل مصرف به عنوان ابزاری

¹⁸ US National Institute of Standards and Technology

¹⁹ European Technology Platform

برای جبران تغییرپذیری منابع تجدیدپذیر می‌شوند.

۳- حفظ و یا افزایش قابلیت اطمینان شبکه، انعطاف‌پذیری، امنیت و بهره‌وری در برابر افزایش پیچیدگی: ابزارهای تحلیلی پیشرفته به همراه حسگرهای گسترده با فراهم آوردن اطلاعات مناسب از طریق پایش عملکرد و وضعیت شبکه، به برنامه‌ریزان و بهره‌برداران در بهبود عملکرد و وضعیت سیستم یاری می‌رسانند. فناوری‌های خودکارسازی شبکه توزیع تلفات سیستم را کاهش می‌دهد، شارش توان منابع تولید پراکنده را مدیریت می‌کند، زمان خروج را حداقل می‌سازد و سرعت ترمیم شبکه را افزایش می‌دهد. پایش، کنترل و حفاظت پیشرفته شبکه انتقال احتمال وقوع خرابی‌های آبشاری که منجر به خاموشی گسترده می‌شود را کاهش می‌دهد. به‌طور مشابه، اقدامات امنیتی مقاوم، از شانس بروز خطاهای فاجعه‌بار و گسترده سیستم قدرت ناشی از عوامل انسانی و بلایای طبیعی می‌کاهد.

۴- افزایش ایمنی و بهره‌وری نیروی انسانی: توسعه و عملکرد مناسب شبکه هوشمند به نیروی کار ماهر و آموزش‌دیده مجهز به ابزار و فناوری مناسب به منظور پشتیبانی از توسعه زیرساخت، بهره‌برداری و نگهداری شبکه وابسته است که ایمنی و بهره‌وری نیروی انسانی را بهبود می‌بخشد. شبکه هوشمند توانایی سیستم مدیریت انرژی را در زمینه‌های تجمیع منابع تجدیدپذیر، پاسخگویی بار، پایش و کنترل شبکه افزایش می‌دهد.

۲-۴ مدیریت انرژی

مدیریت انرژی یک مفهوم عام و بسیار گسترده و شامل همه اقداماتی است که برای تضمین مصرف حداقل میزان انرژی در فعالیتهای مختلف برنامه‌ریزی و اجرا می‌شود [۲۳]. مدیریت انرژی شامل مهندسی، طراحی، کاربرد، بهره‌برداری و نگهداری سیستم قدرت به منظور مصرف بهینه انرژی الکتریکی می‌باشد. بهینه در اینجا به معنای طراحی یا اصلاح یک سیستم به منظور استفاده از حداقل

انرژی ممکن به گونه‌ای که صرفه‌جویی انرژی توجیه اقتصادی داشته باشد. هر فرآیند نیازمند مصرف یک حداقل میزان انرژی مشخص می‌باشد، برای مصرف انرژی فراتر از این میزان باید یک ارزیابی اقتصادی میان هزینه استفاده از شیوه‌های کاراتر در برابر هزینه تأمین انرژی انجام پذیرد [۲۴، ۲۵].

۲-۴-۱ اهمیت مدیریت انرژی

تجارت، صنعت و سازمان‌ها در دو دهه اخیر تحت فشار زیاد اقتصادی و زیست‌محیطی بوده‌اند. رقابت اقتصادی در بازار جهانی و افزایش وضع قوانین و استانداردهای زیست‌محیطی به منظور کاهش آلاینده‌های آب‌وهوا مهم‌ترین عوامل لحاظ شده در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری همه سازمان‌ها بوده است. مدیریت انرژی یک ابزار مهم در کمک به نهادهای گوناگون برای کاهش هزینه‌ها در جهت برآورده کردن این اهداف ضروری به منظور بقا و موفقیت بلندمدت می‌باشد [۲۵، ۲۶].

مدیریت انرژی اثرات قابل توجه زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی دارد. سیستم قدرت برای تولید انرژی الکتریکی به سوخت‌های فسیلی وابستگی شدیدی دارد و نیروگاه‌های فسیلی سهم قابل توجهی در تولید این انرژی دارند. مدیریت انرژی با کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی الکتریکی، از لحاظ زیست‌محیطی موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، باران‌های اسیدی و تخریب لایه اوزون می‌شود و با کاهش هزینه‌های تأمین انرژی موجب کاهش قیمت تمام‌شده کالاها، افزایش فروش و رقابت‌پذیری بیشتر صنایع از نظر اقتصادی می‌شود. کاهش وابستگی به واردات انرژی و حامل‌های آن و افزایش صادرات را در پی دارد که از یک‌سو موجب افزایش میزان سرمایه‌گذاری در بخش تولید و اشتغال‌زایی می‌شود و از سوی دیگر در روابط و مناسبات سیاسی میان کشورها تأثیرگذار است [۲۶]. مدیریت انرژی نقش اساسی در حرکت به سوی اقتصاد انرژی کارآمد دارد به همین علت جزء اولویت‌های چشم‌انداز آینده سیستم قدرت در اروپا و آمریکا به حساب می‌آید [۲۰، ۲۲].

۲-۴-۲ عدم قطعیت

به علت ماهیت متغیر منابع تولید پراکنده تصادفی مانند منابع انرژی بادی و خورشیدی و وابستگی آن‌ها به شرایط جوی، آگاهی از میزان دقیق و قطعی تولید آن‌ها دشوار است. مصرف انرژی الکتریکی با توجه به شرایط جوی، اقتصادی و اجتماعی در طول زمان متغیر می‌باشد. تغییر در قیمت حامل‌های انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین در میزان تولید و تقاضا، منجر به تغییر در قیمت انرژی می‌شود. خطوط انتقال و منابع تولید انرژی در اثر بروز پیشامدهای مختلف مانند وقوع خرابی‌ها، حوادث طبیعی و غیرطبیعی از دسترس خارج می‌شوند. بنابراین میزان تولید، مصرف و قیمت انرژی الکتریکی به همراه دسترس‌پذیری اجزای شبکه، از جمله عدم قطعیت‌هایی هستند که سیستم مدیریت انرژی با آن‌ها مواجه است.

با توجه به نوع متغیر غیرقطعی در مقالات گوناگون روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت معرفی و استفاده شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های پیش‌بینی نقطه‌ای [۲۷، ۲۸]، پیش‌بینی بازه‌ای (احتمالی) [۲۹، ۳۰] و روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر تولید سناریو اشاره کرد [۳۱، ۳۲].

۲-۴-۳ مروری بر سابقه موضوع

از ابتدای پیدایش سیستم قدرت نیاز به بهبود بهره‌وری انرژی و افزایش بازدهی و سود احساس شده است. در جهت نیل به این هدف، فناوری‌های مختلفی در این سیستم به کار گرفته شده‌اند. در این راستا، مدیریت انرژی از گذشته به عنوان یک ابزار کارآمد و مؤثر در کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری انرژی مورد نظر بوده است [۳۳، ۳۴].

در واقع آنچه اهمیت بیش‌تر مدیریت انرژی برای نهادها، صنایع و سازمان‌ها و به‌طور عام مصرف‌کنندگان انرژی را به دنبال دارد، میزان هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و یا سیاسی تأمین و مصرف انرژی می‌باشد. انرژی ارزان موجب کم‌رنگ شدن هزینه‌های هدر رفت و استفاده ناصحیح از انرژی

می‌شود. با بروز بحران جهانی انرژی در اواخر دهه هفتاد میلادی و افزایش شدید قیمت‌ها، بار دیگر مدیریت انرژی به عنوان راهکاری برای مقابله با این بحران‌ها در صورت وقوع موارد مشابه در آینده مورد توجه قرار گرفت، مقالات منتشرشده در این سال‌ها به ارائه الگوریتم و یا فناوری‌های پیشرفته برای مدیریت انرژی نمی‌پردازند، بلکه به پیشنهاد توصیه‌هایی برای کاهش مصرف و تلفات از طریق اندازه‌گیری، پایش و یافتن منابع هدررفت و تعریف جدول زمان‌بندی مصرف بسنده می‌کنند و از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر به عنوان یک جایگزین در تأمین انرژی نام می‌برند [۲۶، ۳۵].

در ابتدای کار، بارها و صنایع بزرگ مانند صنایع سیمان و فولاد و... مورد توجه بوده‌اند. چراکه با توجه به میزان بالای مصرف انرژی، کاهش هزینه‌ها از طریق مدیریت انرژی در این صنایع رقم قابل توجهی می‌باشد [۳۶]. در کنار آن تلاش برای توسعه سخت‌افزار و نرم‌افزارهای لازم برای پیاده‌سازی مدیریت انرژی، در دهه‌های بعدی ادامه پیدا کرد به گونه‌ای که قابلیت‌های سیستم مدیریت انرژی در پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار و برنامه‌ریزی تجهیزات افزایش یافت [۳۷].

با تجدید ساختار سیستم قدرت و ایجاد بازارهای آزاد انرژی، همچنین گسترش شبکه اینترنت، مدیریت انرژی در بارهای کوچک‌تر مانند ساختمان‌ها و منازل هم مورد توجه قرار گرفت که ایده آن بر اساس استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی چند لایه شکل گرفت. در این ساختار، سیستم‌های مدیریت انرژی پراکنده در لایه‌های پایین با سیستم مدیریت انرژی مرکزی در لایه‌های بالا در ارتباط می‌باشند [۳۸].

با گسترش مفاهیم و فناوری‌هایی مانند تولیدات پراکنده، پاسخگویی بار، شبکه هوشمند و نیروگاه مجازی در اواخر دهه اول قرن بیست و یکم میلادی، موضوعات متنوعی در حوزه مدیریت انرژی با استفاده از یک یا چند فناوری ذکرشده، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به تعریف ارائه‌شده از نیروگاه مجازی، مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی را می‌توان در دو بخش مدیریت انرژی خانه-

های هوشمند و ریزشبکه‌های هوشمند تقسیم‌بندی کرد.

خانه‌های هوشمند

بیشتر کارهای انجام‌شده در این حوزه با توجه به مفهوم پاسخگویی بار در مدیریت انرژی بر تدوین جدول زمان‌بندی استفاده از وسایل درون ساختمان تمرکز داشته‌اند.

مرجع [۳۹] نحوه شرکت خانه هوشمند در بازار خدمات جانبی را بررسی کرده است. این خانه مجهز به سیستم فتوولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی می‌باشد و در آن برای مدل‌سازی عدم قطعیت از روش پیش‌بینی نقطه‌ای استفاده شده است. به منظور حداکثر کردن درآمد حاصل از شرکت در بازار خدمات جانبی از برنامه‌ریزی خطی مخلوط عدد-صحیح در این مدل استفاده شده است. در مرجع [۴۰] مدلی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مخلوط-عدد صحیح به منظور کاهش هزینه‌ها و آلودگی ارائه شده است که می‌تواند در چارچوب برنامه‌ریزی زمان حقیقی، مؤلفه‌های یک خانه هوشمند شامل وسایل هوشمند، سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و تولیدات پراکنده را مدیریت نماید.

در مرجع [۴۱] برنامه‌ریزی انرژی مصرف‌کنندگان خانگی دارای سیستم فتوولتائیک بدون استفاده از سیستم ذخیره‌ساز تحت سیاست‌های مختلف قیمت‌گذاری انجام شده است. الگوریتم مدیریت انرژی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی فرمول‌بندی شده است که در آن عدم قطعیت منبع خورشیدی به شیوه پیش‌بینی نقطه‌ای مدل شده است. در مرجع [۴۲] با در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان مصرف متقاضیان، تلاش شده است الگوریتمی ارائه شود که امید ریاضی میزان هزینه پرداختی برای تأمین انرژی حداقل شود. برای مدل‌سازی عدم قطعیت از روش تولید سناریو استفاده شده است. در تابع هدف علاوه بر هزینه تأمین انرژی در ساعت فعلی، هزینه پرداختی در ساعات بعد نیز در نظر گرفته شده است. مسئله مقید به قیود بارهای مختلف شامل گروه‌های غیرقابل قطع کنترل‌پذیر، قابل قطع

کنترل‌پذیر و غیر منعطف می‌باشد.

با استفاده از برنامه‌ریزی مربعی تصادفی، در مرجع [۴۳] موضوعاتی مانند کنترل حرارت، تهویه هوا، وسایل شوینده و خودروهای الکتریکی را در یک خانه هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی مصرف ساختمان با توجه به اطلاعات حرارتی آن و وضعیت آب و هوایی منطقه مورد نظر، شناسایی شده است. در این مدل قیودی مانند میزان بودجه متقاضی در یک دوره مشخص برای پرداخت هزینه تأمین انرژی، محدودیت‌های زمانی برای مصرف که از سوی شبکه اعمال می‌شود و قیود دینامیکی حرارت در نظر گرفته شده‌اند که تابع هدف آن حداکثر کردن رضایت متقاضی می‌باشد.

ریزشبکه‌های هوشمند

در حوزه ریزشبکه‌های هوشمند با توجه به نفوذ منابع تولید پراکنده، به ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های ذخیره و بارهای پاسخگو به منظور مدیریت ماهیت متغیر تولید این منابع مورد توجه قرار گرفته است.

تأثیر استفاده از شبکه هوشمند بر روی سیستم مدیریت انرژی در مراجع [۴۴, ۴۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۴۴] یک مسئله برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت انرژی بار پاسخگو ارائه شده است. با استفاده از فناوری شبکه هوشمند، سیستم مدیریت انرژی به صورت ساعتی از قیمت انرژی آگاه می‌شود. مسئله مدیریت انرژی شامل حداقل انرژی مصرف روزانه، محدودیت ساعتی افزایش و کاهش میزان انرژی مصرفی می‌باشد. تابع هدف بر اساس تابع منفعت متقاضیان و پیش‌بینی قیمت در ساعات پیش رو تعیین می‌شود. عدم قطعیت موجود در قیمت انرژی الکتریکی انرژی به وسیله روش بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی می‌شود. با توسعه مدل ارائه شده توسط مرجع [۴۴]، در مرجع [۴۵] الگوریتم مدیریت انرژی برای یک نیروگاه مجازی مطرح گردیده است. این نیروگاه شامل

مجموعه بارهای پاسخگو، منابع تولید پراکنده شامل مزارع بادی و سیستم‌های ذخیره‌ساز می‌باشد که از طریق یک ریزشبه به هم متصل می‌باشند. این ریزشبه به شبکه اصلی متصل است و می‌تواند با آن انرژی مبادله نماید. سیستم مدیریت انرژی مسئولیت تأمین تقاضای انرژی بارهای پاسخگو را بر عهده دارد. با استفاده از فناوری شبکه هوشمند بارهای پاسخگو اطلاعات مربوط به مصرف خود را برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌کنند، همچنین اطلاعات مربوط به تولید منابع بادی و قیمت انرژی الکتریکی به صورت ساعتی توسط سیستم مدیریت انرژی دریافت می‌گردد. این سیستم با توجه به وضعیت قیمت انرژی الکتریکی و تولید توان منابع پراکنده تصادفی در ساعات آینده، به صورت ساعتی میزان مصرف انرژی الکتریکی هر یک از بارها و همین‌طور سهم شبکه اصلی، منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز در تأمین انرژی را مشخص می‌کند. متقاضیان انرژی مالک سیستم‌های ذخیره‌ساز هستند. و بر اساس وضعیت قیمت، سیستم مدیریت انرژی در ساعاتی که قیمت پایین است انرژی را ذخیره و در ساعاتی که قیمت انرژی گران است، انرژی ذخیره‌شده را به شبکه اصلی می‌فروشد. محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز، تولید تصادفی منابع پراکنده، قیود مربوط به شبکه انتقال انرژی و بارهای پاسخگو در این مدل لحاظ شده‌اند. عدم قطعیت موجود در قیمت انرژی الکتریکی و تولید مزارع بادی به وسیله روش بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شده‌اند. برای پیاده‌سازی الگوریتم مدیریت انرژی از برنامه‌ریزی خطی و پخش بار بهینه مستقیم استفاده شده است. در سیستم مدیریت انرژی ارائه‌شده، محدودیت‌های امنیتی شبکه مانند وقوع پیشامدهای ریزشبه لحاظ نشده‌اند.

با توجه به مفهوم بارهای پاسخگو در مرجع [۴۶] مدلی برای مدیریت انرژی یک ریزشبه هوشمند شامل بارهای پاسخگو، منابع تولید پراکنده، باتری‌ها و خودروهای الکتریکی ارائه شده است. با استفاده از جابه‌جایی بار، تلاش می‌شود تا تراکم در خطوط برطرف شود. عدم قطعیت‌های موجود در قیمت انرژی الکتریکی و میزان تولید منابع انرژی نو به وسیله تعداد محدودی سناریو مدل‌سازی می‌شود. قیودی مانند محدودیت ظرفیت باتری‌ها، قیود مربوط به خودروهای الکتریکی، بارهای الکتریکی و

منابع گوناگون تولید به منظور حداکثر کردن امید ریاضی سود ریز شبکه به وسیله برنامه‌ریزی خطی مخلوط-عدد صحیح مدل‌سازی می‌شوند. اگرچه این مدل توانسته به خوبی مسئله پاسخگویی و مدیریت بار را مدل‌سازی کند اما قیود فنی مربوط به خطوط انتقال انرژی در نظر گرفته نشده است. همچنین، تولید تعداد بسیار محدود سناریو نمی‌تواند به خوبی عدم قطعیت‌های موجود را مدل کند.

از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند در مراجع [۴۷، ۴۸] برای یافتن نقطه عملکرد بهینه منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز نیروگاه مجازی به منظور کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌ها در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. مدیریت عملکرد منابع تولید بادی در کنار سایر منابع تولید پراکنده در مرجع [۴۷] مورد بررسی قرار گرفته است. با فرض مشخص بودن تولید سایر منابع مانند توربین گازی، پیل سوختی و صفحات خورشیدی، عدم قطعیت موجود در سرعت باد به وسیله شبکه عصبی چندلایه پیش‌بینی و مدل‌سازی شده است. همچنین به منظور مقابله با تغییرات در تولید توان بادی از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. ریزشبکه مورد نظر قابلیت تبادل توان با شبکه اصلی را دارد. با توجه میزان تولید و مصرف انرژی، در ساعتی که قیمت انرژی گران است انرژی الکتریکی را به شبکه می‌فروشد و در ساعتی که قیمت انرژی ارزان است، از آن می‌خرد. در این مدل نیز قیود مربوط به خطوط انتقال انرژی لحاظ نشده است و عدم قطعیت تولید صفحات خورشیدی مدل‌سازی نشده است. همچنین عدم اطمینان از یافتن نقطه بهینه سراسری یکی از نقاط ضعف استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد. یک الگوریتم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه دارای واحدهای ترکیبی برق و حرارت در مرجع [۴۸] ارائه شده است. ریزشبکه مورد نظر دارای تولیدات پراکنده، واحدهای حرارتی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و انرژی گرمایی می‌باشد. عدم قطعیت در تولید منابع انرژی تجدیدپذیر به وسیله پیش‌بینی نقطه‌ای مدل‌سازی شده‌اند و به منظور یافتن نقطه عملکرد بهینه سیستم الکتریکی گرمایی از چندین سناریو مربوط به هزینه‌های

تولید استفاده شده است. همچنین قیود بین زمانی مربوط به واحدهای روشن و خاموش شدن منابع تولید، محدودیت‌های سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و گرمایی در آن لحاظ شده‌اند، اما از قیود مربوط به خطوط انتقال انرژی الکتریکی و شبکه گرمایی صرف‌نظر شده است.

در مرجع [۴۹] رفتار تصادفی متغیرهای غیرقطعی^{۲۰} نیروگاه مجازی به وسیله روش پیش‌بینی دونقطه‌ای مدل می‌شوند. به این صورت که متغیر غیرقطعی به وسیله دو نقطه در دو طرف مقدار میانگین تابع توزیع مربوط به آن متغیر جایگزین می‌شوند. یکی از مزایای این روش کاهش حجم محاسبات می‌باشد. ریز شبکه مورد نظر دارای منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی می‌باشد و از طریق اتصال به شبکه اصلی می‌تواند با آن انرژی مبادله کند. هدف مدیریت انرژی کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه خاموش و روشن شده واحدهای تولید، هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی و هزینه سوخت برای واحدهای فسیلی می‌باشد. محدودیت‌های شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز، قیود حداکثر و حداقل تولید واحدهای تولیدی و قید تعادل توان تولید و مصرف، قیود مسئله مدیریت انرژی هستند. به منظور حل این مسئله بهینه‌سازی غیرخطی از الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح‌شده استفاده شده است. برای بررسی تأثیر واحدهای تولید پراکنده، دو سناریو برای وضعیت بهره‌برداری آن‌ها در بازه برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. در مدل ارائه‌شده قیود شبکه انتقال انرژی در نظر گرفته نشده است. همچنین از معایب برنامه‌ریزی غیرخطی و به دنبال آن استفاده از روش‌های هوشمند در حل، به دام افتادن در نقاط بهینه محلی و زمان محاسبات بالا می‌باشد.

در مرجع [۵۰] یک الگوریتم تبرید فلزات اصلاح‌شده به منظور یافتن راهبردهای مدیریت انرژی بهینه برای حداکثر کردن درآمد یک نیروگاه مجازی معرفی شده است. نیروگاه مجازی شامل منبع تولید انرژی خورشیدی به همراه سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد که علاوه بر شبکه اصلی به چندین

²⁰ Uncertain

نیروگاه مجازی مشابه دیگر متصل است و با آنها به تبادل انرژی می پردازد. سیستم مدیریت انرژی وظیفه تعیین میزان تبادلات انرژی با شبکه اصلی و نیروگاه‌های مجازی همسایه را با سه هدف حداکثر کردن سود ناشی از تبادل انرژی، تأمین انرژی بارها، استفاده از تمام انرژی تولیدشده توسط صفحات خورشیدی بر عهده دارد. عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی و تولید انرژی خورشیدی به وسیله تولید سناریوهای مختلف مدل سازی می شود. نحوه عملکرد الگوریتم بدین نحو است که مشخصات بار، وضعیت انرژی موجود در سیستم‌های ذخیره ساز و پیش بینی میزان تولید انرژی خورشیدی به سیستم مدیریت انرژی ارسال می گردد و با توجه سناریوهای مختلف انرژی خورشیدی تصمیمات لازم اتخاذ می شود. این الگوریتم در برخی از موارد توانسته است مشکل به دام افتادن در نقطه عملکرد بهینه محلی را برطرف نماید. در این مدل از قیود مربوط به سیستم‌های ذخیره ساز و خطوط انتقال صرف نظر شده است.

۲-۵ جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل مفاهیم و فناوری‌های مختلف مرتبط با مدیریت انرژی در سیستم قدرت معرفی شدند. هدف از ایجاد و توسعه این فناوری‌ها و چشم انداز پیش روی آنها بازگو گردید. مدل‌های مختلفی در حوزه مدیریت انرژی بررسی شدند. در اکثر مدل‌های ارائه شده برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی، محدودیت‌های مربوط به خطوط انتقال انرژی و قیود امنیتی شبکه مورد توجه قرار نگرفته است. اگرچه در برخی از مراجع محدودیت‌های فنی خطوط شبکه در نظر گرفته شده‌اند ولی در هیچ کدام از آنها قیود امنیتی شبکه مانند وقوع پیشامد برای مؤلفه‌های شبکه لحاظ نشده‌اند. در این پایان نامه پیشامدهای ریز شبکه در نظر گرفته و عدم قطعیت موجود در دسترس پذیری مؤلفه‌های ریز شبکه مدل سازی می شود.

فصل سوم

مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه

مجازی

۳-۱ مقدمه

با افزایش توجه به موضوع بهره‌وری انرژی، توسعه منابع تجدیدپذیر و فناوری شبکه هوشمند، تعداد متقاضیانی که نقش فعال‌تری در بازار برق خواهند داشت، رو به گسترش می‌باشد. سیستم مدیریت انرژی هوشمند یک جزء مهم شبکه هوشمند در خانه‌ها، ساختمان‌ها و واحدهای صنعتی است. متقاضیان قادر هستند با استفاده از سیستم مدیریت انرژی به گونه مؤثرتری مصرف انرژی خود را پایش و مدیریت کنند.

در چشم‌انداز سیستم قدرت، تأسیسات آینده، ریزشبکه‌های هوشمندی هستند که در قالب نیروگاه مجازی قادر خواهند بود با استفاده از منابع تولید پراکنده انرژی الکتریکی را با شبکه مبادله کنند و با به‌کارگیری بارهای پاسخگو به صورت مؤثری مصرف خود را کاهش دهند یا جابه‌جا نمایند تا اهداف مورد نظر خود مانند کاهش هزینه‌ها، افزایش سود، کاهش تولید آلاینده‌گی و ... را تأمین نمایند.

مدیریت انرژی نیروگاه مجازی یک مسئله بهینه‌سازی می‌باشد که با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده یک نیروگاه مجازی و با توجه به تابع هدف و محدودیت‌های در نظر گرفته شده، تولید، ذخیره، مصرف و تبادل بهینه انرژی آن را تعیین می‌کند.

در این فصل از پایان‌نامه، مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزشبکه تشریح و به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شود. در مدل‌سازی ریاضی مسئله مدیریت انرژی، به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی می‌شود. قیود مربوط به متقاضیان مانند حداقل انرژی مصرفی روزانه، حداقل و حداکثر سطح بار ساعتی، قیود مربوط به کاهش و یا افزایش ساعتی مصرف، محدودیت‌های خطوط انتقال و سیستم ذخیره‌ساز انرژی، دسترس‌پذیری مؤلفه‌های شبکه شامل واحدهای تولید و خطوط انتقال، میزان انرژی در دسترس شبکه اصلی و منابع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به روش‌های مختلف استفاده‌شده در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، مدل‌های مدیریت انرژی در سه مدل قطعی، مقاوم و مقاوم تصادفی ارائه شده است.

در بخش دوم، فهرست علائم و اختصارات مورد استفاده در مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی ارائه می‌شود. در بخش سوم، الگوریتم مدیریت انرژی استفاده‌شده تشریح می‌گردد. مدل‌های قطعی، مقاوم و مقاوم تصادفی به ترتیب در بخش‌های چهارم، پنجم و ششم توضیح داده می‌شود. در نهایت یک جمع‌بندی از مطالب گفته‌شده در بخش هفتم ارائه می‌شود.

۲-۳ فهرست علائم و اختصارات

فهرست علائم و اختصارات استفاده‌شده در این فصل از پایان‌نامه به صورت زیر می‌باشد.

اندیس‌ها

۱. n : شاخص باس‌ها.
۲. k : شاخص خطوط.
۳. i : شاخص ایستگاه‌های خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی.
۴. j : شاخص متقاضیان.
۵. h, h', t : شاخص ساعت.
۶. ω, ω' : شاخص سناریو.

پارامترها

۱. η_i^{out} : بازده تبدیل انرژی خروجی از واحد ذخیره‌ساز i .
۲. η_i^{in} : بازده تبدیل انرژی ورودی به واحد ذخیره‌ساز i .

۳. N_D : تعداد متقاضیان در ارتباط با سیستم مدیریت انرژی.
۴. N_{SO} : تعداد ایستگاه‌های خورشیدی.
۵. X_k : راکتانس خط k .
۶. $U_{j,h}^D$: تابع مطلوبیت متقاضی j در ساعت h .
۷. $E_j^{D,min}$: حداقل انرژی مصرفی موردنیاز روزانه متقاضی j .
۸. α : ضریب زمان (برحسب ساعت).
۹. R_j^U : حد بالای تغییرات توان مصرفی بار j .
۱۰. R_j^D : حد بالای تغییرات توان مصرفی بار j .
۱۱. $o(k)$: باسی که خط k از آن خارج می‌شود.
۱۲. $d(k)$: باسی که خط k به آن وارد می‌شود.
۱۳. $P_n^{MG,max}$: محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی در باس n .
۱۴. $P_k^{L,max}$: ظرفیت خط k .
۱۵. $P_j^{D,min}$: حداقل توان مصرفی متقاضی j .
۱۶. $P_j^{D,max}$: حداکثر توان مصرفی متقاضی j .
۱۷. $E_i^{ST,min}$: حداقل انرژی قابل ذخیره در واحد ذخیره i .
۱۸. $E_i^{ST,max}$: حداکثر انرژی قابل ذخیره در واحد ذخیره i .
۱۹. F^{shed} : ضریب جریمه کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه و حداقل توان مصرفی ساعتی.

متغیرهای تصادفی

۱. C_h^{MG} : قیمت انرژی شبکه اصلی در ساعت h .
۲. $P_{i,h}^{SO}$: توان در دسترس ایستگاه خورشیدی i در ساعت h .
۳. τ_h : ساختار شبکه در ساعت h .

متغیرها

۱. $p_t^{MG,dec}$: توان تبادلی با شبکه اصلی که در مرحله تصمیم‌گیری ساعت t تعیین می‌شود.
۲. $p_{i,h}^{SO}$: توان تولید ایستگاه خورشیدی i در ساعت h .
۳. $p_{j,h}^D$: توان مصرفی بار j در ساعت h .
۴. p_h^{MG} : توان فروخته‌شده به (منفی)/خریده شده از (مثبت) شبکه اصلی در ساعت h .
۵. $p_{i,h}^{ST,out}$: توان تولیدشده توسط واحد ذخیره‌ساز در ساعت h .
۶. $p_{i,h}^{ST,in}$: توان ذخیره‌شده توسط واحد ذخیره در ساعت h .
۷. $p_{n,h}^{MG}$: توان فروخته‌شده به (منفی)/خریده شده از (مثبت) شبکه اصلی در ساعت h در باس n .
۸. $p_{k,h}^L$: توان انتقالی از خط k در ساعت h .
۹. $e_{i,h}^{ST}$: انرژی خالص ذخیره‌شده در واحد ذخیره i در ساعت h .
۱۰. $\delta_{k(a),h}$: زاویه ولتاژ باسی که خط k به آن وارد می‌شود در ساعت h .
۱۱. $\delta_{o(k),h}$: زاویه ولتاژ باسی که خط k از آن خارج می‌شود در ساعت h .
۱۲. $\delta_{n,h}$: زاویه ولتاژ باس n در ساعت h .
۱۳. $e_j^{D,shed}$: میزان انرژی کاهش‌یافته از حداقل انرژی مصرفی روزانه متقاضی j .
۱۴. $l_{j,h}^{shed}$: میزان توان کاهش‌یافته از حداقل توان مصرفی متقاضی j در ساعت h .

مجموعه‌ها

۱. Ω^B : مجموعه باس‌ها.
۲. Ω^{MG} : مجموعه باس‌های متصل به شبکه اصلی.
۳. Ω^{SS} : مجموعه باس‌های دارای ایستگاه خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز.

۴. θ_n^{SS} : مجموعه واحدهای دارای تولید ایستگاه خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز واقع شده در

باس n .

۵. θ_n^D : مجموعه متقاضیان واقع شده در باس n .

توابع

۱. $f^{SO}(\cdot)$: تابع میزان تولید توان از تابش خورشیدی.

۲. ψ_N : تابع توزیع تجمعی نرمال تجربی^{۲۱}.

نشانه‌ها

~ : نشان دهنده مقدار واقعی متغیر است.

{ } : نشان دهنده امید ریاضی مقدار متغیر است.

- : نشان دهنده مقدار نامی متغیر تصادفی که برابر با متوسط کران بالا و پایین پیش‌بینی است.

^ : نشان دهنده اختلاف مقدار نامی متغیر تصادفی از کران بالا یا پایین پیش‌بینی است.

۳-۳ تشریح مسئله

نیروگاه مجازی شامل مجموعه‌ای از بارهای پاسخگو، منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی می‌باشد که در یک ریزشبه‌مجهز به فناوری شبکه هوشمند واقع شده‌اند. بارهای پاسخگو به عنوان متقاضیان انرژی مانند یک شهرک صنعتی، دانشکده‌های یک دانشگاه و یا یک ناحیه مسکونی می‌توانند در پاسخ به تغییر قیمت انرژی، مصرف انرژی خود را تغییر دهند.

مسئولیت تأمین انرژی متقاضیان بر عهده سیستم مدیریت انرژی می‌باشد. سیستم مدیریت انرژی

²¹ Empirical normal cumulative distribution function

می‌تواند انرژی مورد نیاز متقاضیان را از طریق شبکه اصلی و ایستگاه‌های خورشیدی به عنوان منبع تولید پراکنده تصادفی تأمین نماید. این ایستگاه‌ها می‌توانند دارای مالکیت مستقل باشند یا توسط متقاضیان در برخی از نقاط شبکه نصب شده باشند. در کنار هر یک از آن‌ها یک سیستم ذخیره انرژی وجود دارد که سیستم مدیریت انرژی را قادر می‌سازد بر اساس دلایل فنی و اقتصادی انرژی الکتریکی را در مواقع مورد نیاز ذخیره یا استفاده کند. مجموعه بارهای پاسخگو، منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره در قالب نیروگاه مجازی، قابلیت خرید انرژی از شبکه اصلی در ساعات ارزان قیمت انرژی و فروش به آن در ساعات گران را دارا می‌باشند.

نیروگاه مجازی در تعیین قیمت بازار نقشی ندارد و پذیرنده قیمت^{۲۲} انرژی لحاظ می‌شود. سیستم مدیریت انرژی با بازار عمده‌فروشی انرژی الکتریکی در ارتباط است و قیمت انرژی اعلام‌شده توسط شبکه اصلی به عنوان قیمت بازار در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که متقاضیان مالک ایستگاه‌های خورشیدی می‌باشند، برای دریافت انرژی خورشیدی هزینه‌ای پرداخت نمی‌کنند.

با استفاده از فناوری شبکه هوشمند، ارتباط دوسویه زمان حقیقی میان سیستم مدیریت انرژی و کاربران در ریزشبکه (مانند متقاضیان و منابع تأمین انرژی) وجود دارد. سیستم مدیریت انرژی اطلاعات مربوط به تأمین‌کنندگان انرژی (شامل قیمت انرژی و میزان تولید) را به صورت ساعتی چندین دقیقه پیش از تصمیم‌گیری دریافت می‌کند. متقاضیان مطابق با تابع مطلوبیت^{۲۳} اطلاعات مربوط به مصرف در ساعات پیش رو (شامل میزان مصرف و سطح مطلوبیت) را برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌کنند. همچنین سیستم مدیریت انرژی مجهز به ابزار پیش‌بینی قیمت انرژی و میزان تولید منابع تولید پراکنده در ساعات پیش رو می‌باشد. بر پایه این اطلاعات، سیستم مدیریت انرژی میزان بهینه مصرف، ذخیره و تبادل انرژی را برای هر ساعت t و ساعات پس از آن تعیین می‌کند و

²² Price-Taker

²³ Utility Function

تصمیمات اتخاذ شده را برای متقاضیان و تأمین کنندگان انرژی ارسال می کند. این تصمیمات به گونه ای اتخاذ می شوند که رفاه اجتماعی²⁴ نیروگاه مجازی (شامل تفاضل هزینه تأمین انرژی از درآمد متقاضیان) حداکثر شود. دقت شود که تنها تصمیمات اتخاذ شده برای ساعت t ، اجرایی می شوند و تصمیمات ساعات بعدی تنها یک دید مناسب نسبت به آینده برای عملکرد بهتر در ساعت t به سیستم مدیریت انرژی می دهد.

اطلاعات مربوط وضعیت دسترس پذیری مؤلفه های ریزشکه شامل منابع تولید و خطوط انتقال به صورت ساعتی در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار داده می شود. در صورت وقوع پیشامد، سیستم مدیریت انرژی تصمیمات اتخاذ شده در مرحله قبل را جهت توزیع توان اصلاح می کند. در جهت مقابله با اثرات وقوع پیشامد مانند عدم تعادل ایجاد شده، سیستم مدیریت انرژی در همه مدل ها دارای ابزار لازم برای قطع و جابه جایی بار می باشد. در مدل های قطعی و مقاوم سیستم مدیریت انرژی پس از بروز پیشامد، از وقوع آن مطلع می گردد اما در مدل مقاوم تصادفی، عدم قطعیت در دسترس پذیری مؤلفه های ریزشکه به وسیله تولید سناریو مدل می شود، به همین دلیل سیستم مدیریت انرژی با توجه به پیش بینی وقوع پیشامد تصمیم گیری می کند. فرض می شود که پیشامدهای شبکه در ابتدای ساعت برنامه ریزی رخ دهند. در دوره زمانی مورد نظر برای برنامه ریزی، اطلاعات شبکه و تصمیمات سیستم مدیریت انرژی به صورت ساعتی بروز رسانی می شود.

در صورت وقوع پیشامد و در مدل مقاوم تصادفی عدم قطعیت در دسترس پذیری مؤلفه های ریزشکه به وسیله تولید سناریو مدل سازی می شود. به همین جهت این مدل

نحوه عملکرد سیستم مدیریت انرژی برای برنامه ریزی نیروگاه مجازی در دوره زمانی روزانه به صورت زیر می باشد:

²⁴ Social Welfare

۱. قیمت انرژی در ساعت t ، بیست دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی توسط شبکه اصلی مشخص می‌گردد. در حالی که قیمت انرژی در ساعات پیش از t ، برای سیستم مدیریت انرژی شناخته شده هستند، برای $t-24$ ساعت پیش رو دارای عدم قطعیت می‌باشند.
۲. میزان تولید انرژی خورشیدی بیست دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی در ساعت t تعیین می‌شود. در حالی که تولید انرژی خورشیدی در ساعات پیش از t ، برای سیستم مدیریت انرژی شناخته شده هستند، برای $t-24$ ساعت پیش رو دارای عدم قطعیت می‌باشند.
۳. متقاضیان بر اساس تابع مطلوبیت خود اطلاعات مربوط به مصرف (شامل میزان مصرف و سطح مطلوبیت) را بیست دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی در ساعت t برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌کنند.
۴. با استفاده از ابزار پیش‌بینی قیمت انرژی، میزان تولید منابع تولید پراکنده و وقوع پیشامد در ساعات پیش رو تخمین زده می‌شود.
۵. سیستم مدیریت انرژی میزان انرژی مصرفی هر متقاضی، میزان تبادل انرژی با شبکه اصلی، توان ایستگاه خورشیدی و سیستم ذخیره در ساعت t و ساعات پس از آن را تعیین می‌کند. همچنین سیستم مدیریت انرژی مشخص می‌سازد که چه میزان از انرژی به شبکه اصلی فروخته شود و چه میزان در واحدهای ذخیره‌ساز ذخیره شود.
۶. تصمیمات اتخاذ شده مربوط به ساعت t پنج دقیقه قبل از تبادل انرژی، برای تأمین‌کنندگان انرژی و متقاضیان ارسال می‌شود.
۷. وضعیت شبکه مانند خروج خطوط انتقال و خروج واحدهای تولیدی توسط سیستم پایش می‌شود و اطلاعات آن برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌گردد.
۸. در صورت وقوع پیشامد، سیستم مدیریت انرژی در حداقل زمان ممکن تصمیمات گام قبل را اصلاح می‌نماید و تصمیمات جدید را برای تأمین‌کنندگان انرژی و متقاضیان ارسال می‌کند.

فرضیات

در ادامه برخی فرضیات برای درک بهتر مسئله و ساده‌سازی در شبیه‌سازی به شرح زیر ارائه می‌-

شوند:

- مالکیت ایستگاه‌های خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بر عهده متقاضیان می‌باشد و متقاضیان هزینه‌ای برای تأمین انرژی از این واحدها پرداخت نمی‌کنند. لذا هزینه تولید ایستگاه‌های خورشیدی از تابع هدف حذف و تولید آن‌ها به عنوان بار منفی در نظر گرفته می‌شود.
- سیستم‌های ذخیره‌ساز دارای انواع مختلفی مانند ذخیره‌سازهای تلمبه-ذخیره‌ای، هوای فشرده، باتری‌ها و ابررساناها می‌باشند. در این میان باتری‌ها به عنوان سیستم ذخیره انرژی در نظر گرفته می‌شوند. با فرض سرعت و حجم مناسب باتری‌ها برای ذخیره و تبادل انرژی، از محدودیت سرعت ذخیره و یا آزادسازی انرژی صرف نظر شده است [۵۱].
- پیشامدهای شبکه به دو بخش تقسیم می‌شود، بخش اول خرابی قسمتی از واحدهای تولید می‌باشد. به عنوان مثال در یک ایستگاه خورشیدی چندین صفحه خورشیدی به علت خرابی از مدار خارج شوند، این نوع خرابی مانند عدم قطعیت موجود در تابش خورشید عمل می‌کند و در میزان ظرفیت در دسترس واحد اثر می‌گذارد. به همین علت از بررسی جداگانه آن خودداری می‌شود. بخش دیگر پیشامدها خروج واحدهای تولید و یا خطوط انتقال انرژی الکتریکی از مدار می‌باشد. این نوع پیشامدها در نوع مدل‌سازی تفاوتی ندارند اما از آنجا که طبق گزارش آزمایشگاه ملی انرژی نو آمریکا نرخ خروج اجباری ایستگاه‌های خورشیدی صفر می‌باشد [۵۲]، تنها خروج خطوط انتقال انرژی پیاده‌سازی می‌شوند.
- در صورت وقوع پیشامد فرض می‌شود اقدامات اولیه برای پایداری گذرای سیستم انجام

شود و پایداری گذرا در این مدل لحاظ نمی‌شود.

- قیمت انرژی بازار زمان حقیقی در شبکه اصلی به عنوان قیمت انرژی الکتریکی در نظر گرفته می‌شود.
- دوره زمانی مورد نظر برای برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت یک روز در نظر گرفته شده است و فرمول‌بندی‌های ارائه شده بر اساس آن نوشته شده‌اند، اما با توجه به نیازهای احتمالی بهره‌بردار، بدون تغییر در قالب فرمول‌بندی‌ها، مدل‌ها می‌تواند برای دوره‌های زمانی کوچک‌تر در حد چند دقیقه نیز به کار برده شوند.
- از همبستگی میان تولید ایستگاه خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی صرف نظر شده است.

۳-۴ مدل قطعی

در این بخش مدل قطعی مدیریت انرژی نیروگاه مجازی ارائه می‌شود. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از روش پیش‌بینی نقطه‌ای استفاده شده است. همچنین احتمال خروج اجزای شبکه قبل از وقوع در نظر گرفته نشده است و سیستم مدیریت انرژی پس از اطلاع از وقوع پیشامد، اقدامات اصلاحی مورد نیاز را انجام می‌دهد. به منظور افزایش سرعت الگوریتم از پخش بار بهینه مستقیم^{۲۵} در فرمول‌بندی استفاده شده است. در زیربخش اول فرمول‌بندی مسئله همراه با توضیحات مربوطه ارائه خواهد شد و در زیربخش بعدی روش استفاده شده در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها شرح داده خواهد شد.

۳-۴-۱ فرمول‌بندی

مدل قطعی مدیریت انرژی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

²⁵ DC Optimal Power Flow

$$\begin{aligned}
Min_{\Omega} f &= [A] + [B] + C \\
&= \left[\tilde{C}_t^{MG} p_t^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,t}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,t}^D(p_{j,t}^D \alpha) \right] \\
&+ \sum_{h=t+1}^{24} \left[\{C_h^{MG}\} p_h^{MG} + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,h}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,h}^D(p_{j,h}^D \alpha) \right] \quad (1-3) \\
&+ \sum_{j=1}^{N_D} e_j^{D,shed} F^{shed}
\end{aligned}$$

مقيد به:

$$\sum_{h=1}^{t-1} \tilde{p}_{j,h}^D \alpha + p_{j,t}^D \alpha + \sum_{h=t+1}^{24} p_{j,h}^D \alpha \geq (E_j^{D,min} - e_j^{D,shed}), \forall j \quad (2-3)$$

$$-R_j^D \leq p_{j,h}^D - p_{j,h-1}^D \leq R_j^U, \forall j, h = t, \dots, 24 \quad (3-3)$$

$$P_j^{D,min} - l_{j,h}^{shed} \leq p_{j,h}^D \leq P_j^{D,max}, \forall j, h = t, \dots, 24 \quad (4-3)$$

$$p_{n,h}^{MG} - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \Theta_n^D} p_{j,h}^D, \forall n \in \Omega^{MG}, h = t, \dots, 24 \quad (5-3)$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{i \in \Theta_n^{SS}} (p_{i,h}^{SO} + p_{i,h}^{ST,out}) - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L \\
&= \sum_{j \in \Theta_n^D} p_{j,h}^D + \sum_{i \in \Theta_n^{SS}} p_{i,h}^{ST,in}, \forall n \in \Omega^{SS}, h = t, \dots, 24 \quad (6-3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \Theta_n^D} p_{j,h}^D, \forall n \in \Omega^B \setminus n \in \Omega^{SS}, \Omega^{MG}, h \\
&= t, \dots, 24, \quad (7-3)
\end{aligned}$$

$$p_h^{MG} = \sum_{n \in \Omega^{MG}} p_{n,h}^{MG}, h = t, \dots, 24 \quad (8-3)$$

$$-P_n^{MG,max} \leq p_{n,h}^{MG} \leq P_n^{MG,max}, \forall n \in \Omega^{MG}, h = t, \dots, 24 \quad (9-3)$$

$$p_{k,h}^L = \frac{1}{X_k} (\delta_{o(k),h} - \delta_{d(k),h}), \forall k, h = t, \dots, 24 \quad (10-3)$$

$$-P_k^{L,max} \leq p_{k,h}^L \leq P_k^{L,max}, \forall k, h = t, \dots, 24 \quad (11-3)$$

$$-\pi \leq \delta_{n,h} \leq \pi, \forall n \in \Omega^B, h = t, \dots, 24 \quad (12-3)$$

$$\delta_{n,h} = 0, n: \text{reference bus}, h = t, \dots, 24 \quad (13-3)$$

$$e_{i,h}^{ST} = e_{i,h-1}^{ST} + \eta_i^{in} p_{i,h}^{ST,in} \alpha - \frac{p_{i,h}^{ST,out} \alpha}{\eta_i^{out}}, \forall i, h = t, \dots, 24 \quad (14-3)$$

$$E_i^{ST,min} \leq e_{i,h}^{ST} \leq E_i^{ST,max}, \forall i, h = t, \dots, 24 \quad (15-3)$$

$$p_{i,t}^{SO} \leq \tilde{P}_{i,t}^{SO}, \forall i \quad (16-3)$$

$$p_{i,h}^{SO} \leq \{P_{i,h}^{SO}\}, \forall i, h = t + 1, \dots, 24 \quad (17-3)$$

$$p_{j,h}^D, p_{i,h}^{SO}, p_{i,h}^{ST,out}, p_{i,h}^{ST,in} \geq 0, \forall i, h = t, \dots, 24 \quad (18-3)$$

هدف سیستم مدیریت انرژی، بیشینه کردن سود متقاضیان می باشد. بنابراین، تابع هدف (۱-۳) از سه بخش A، B و C تشکیل شده است که به ترتیب نشان دهنده سود متقاضیان در ساعت t (شامل هزینه تأمین انرژی از شبکه اصلی و هزینه کاهش حداقل توان مصرفی ساعتی $(l_{j,h}^{shed})$ و درآمد حاصل از فروش انرژی به شبکه اصلی و درآمد ناشی از مصرف انرژی بر اساس تابع مطلوبیت)، سود متقاضیان در $t - 24$ ساعت بعدی (با مؤلفه های مشابه بخش A) و هزینه کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه متقاضیان $(e_j^{D,shed})$ تعریف شده است. برای کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه و کاهش حداقل توان مصرفی ساعتی یک ضریب جریمه (F^{shed}) به اندازه کافی بزرگ

(صد برابر گران‌ترین مقدار قیمت انرژی در بازار روز قبل^{۲۶}) در نظر گرفته شده است تا میزان این کاهش کمترین مقدار ممکن باشد. یک مصرف‌کننده در روز نمی‌تواند از مقدار معینی انرژی کمتر مصرف کند که قید (۲-۳) این محدودیت را اعمال می‌کند. قید (۳-۳) محدودیت تغییر توان مصرفی متقاضیان در هر ساعت را نشان می‌دهد و قید (۴-۳) بیشینه و کمینه توان مصرفی آن‌ها را مشخص می‌سازد. قیود (۵-۳)، (۶-۳) و (۷-۳) تعادل توان را به ترتیب در باس‌های متصل به شبکه اصلی، دارای ایستگاه خورشیدی و واحد ذخیره و سایر باس‌ها برقرار می‌سازند. در معادله (۸-۳) توان فروخته‌شده به (منفی) و یا خریده شده از (مثبت) شبکه اصلی به دست می‌آید. محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی نیز در (۹-۳) نشان داده شده است. با استفاده از رابطه (۱۰-۳) توان انتقالی خطوط محاسبه می‌شود. قید (۱۱-۳) محدودیت ظرفیت خطوط را اعمال می‌کند. قید (۱۲-۳) محدودیت زاویه ولتاژ باس‌ها را مشخص می‌کند و معادله (۱۳-۳) زاویه ولتاژ باس مرجع را برابر صفر قرار می‌دهد. معادله (۱۴-۳) میزان انرژی ذخیره‌شده در سیستم ذخیره را نشان می‌دهد و (۱۵-۳) محدودیت‌های این سیستم را اعمال می‌نماید. قیود (۱۶-۳) و (۱۷-۳) کران بالای تولید خورشیدی هر ایستگاه را مشخص می‌کنند، فرض بر این است که میزان تولید واقعی ایستگاه خورشیدی در ساعت t ($\bar{P}_{i,t}^{SO}$) مشخص است. ولی تولید خورشیدی در $24 - t$ ساعت بعدی دارای عدم قطعیت است و مقادیر پیش‌بینی‌شده ($\{P_{i,h}^{SO}\}$) جایگزین شده‌اند. در انتها، قید (۱۸-۳) کران پایین متغیرهای نامنفی را اعمال می‌کند.

مرحله توزیع توان:

در مدل قطعی میان مدل مرحله تصمیم‌گیری و مرحله توزیع توان تفاوت زیادی وجود ندارد. در صورت وقوع پیشامد، سیستم مدیریت انرژی از مدل یکسان برای اصلاح تصمیمات خود بهره می‌برد. رابطه‌های (۲-۳) و (۴-۳) این امکان را به سیستم مدیریت انرژی می‌دهند که در صورت نیاز برای

²⁶ Day-ahead Market

حفظ تعادل شبکه در برابر وقوع پیشامد، حداقل انرژی مصرفی روزانه و حداقل توان مصرفی ساعتی متقاضیان را کاهش دهد. محاسبه کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه در پایان روز انجام می‌گیرد به این صورت که ممکن است برحسب نیاز در ساعتی از مقدار حداقل انرژی مصرفی اعلام شده توسط متقاضی کاسته شود ولی در ساعات دیگر با مصرف انرژی این کاهش جبران شود. اما کاهش حداقل توان مصرفی ساعتی به که به صورت ساعتی انجام می‌گیرد به معنای قطع بار می‌باشد. از آنجایی که این راهکار موجب کاهش رضایت‌مندی مشتری می‌شود با انتخاب یک ضریب جریمه بزرگ در تابع هدف، تلاش می‌شود که در حداقل میزان ممکن اجرا شود.

نیروگاه مجازی طرف قرارداد با شرکت توزیع می‌باشد. شرکت توزیع باید با کمترین میزان انحراف در بازارهای برق شرکت کند. با وقوع پیشامد ممکن است در مرحله توزیع توان نیروگاه مجازی نتواند به تعهدات خود در تبادل انرژی با شبکه اصلی عمل نماید. در این وضعیت شرکت توزیع به دو صورت با این انحراف برخورد می‌کند، اگر نیروگاه مجازی در حالت خرید از شبکه اصلی باشد و پیشامدی رخ دهد که منجر به انحراف از قرارداد شود، شرکت توزیع این امکان را به نیروگاه مجازی می‌دهد تا به میزان کمتر از مقدار توافق شده برق وارد نماید اما نیروگاه مجازی ملزم است که طبق میزان انرژی توافق شده به شرکت توزیع پول پرداخت کند $(C^{MG} p_h^{MG,dec})$.

$$0 \leq p_h^{MG,dis} \leq p_h^{MG,dec}, \forall h = t, \dots, 24 \quad (19-3)$$

اگر نیروگاه مجازی در حالت فروش به شبکه اصلی باشد، شرکت توزیع این امکان را به نیروگاه مجازی می‌دهد تا به میزان کمتر از مقدار توافق شده برق صادر نماید اما شرکت توزیع به دلیل وجود سیاست‌های تشویقی برای تولید انرژی و فروش آن، نیروگاه مجازی را جریمه نمی‌کند و طبق میزان انرژی فروخته شده به شبکه اصلی به نیروگاه مجازی پول پرداخت می‌کند $(C^{MG} p_h^{MG,dis})$. دقت شود که در اینجا فرض شده است که شرکت توزیع توانایی مدیریت عدم تعادل ایجاد شده چه در حالت

خرید و در حالت فروش را دارا می‌باشد.

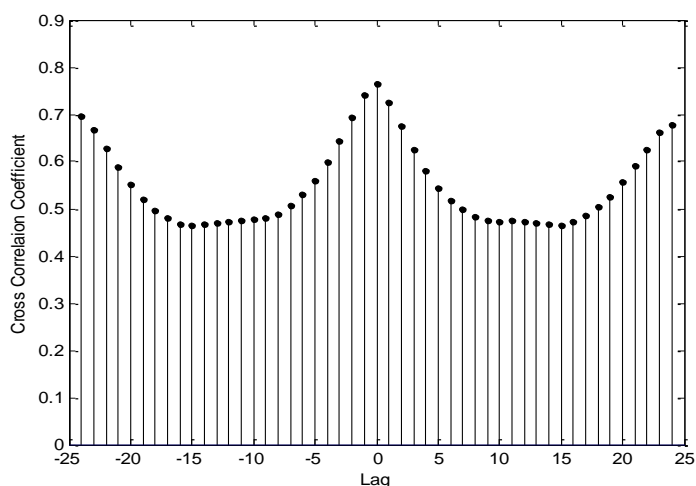
$$p_h^{MG,dec} \leq p_h^{MG,dis} \leq 0, \forall h = t, \dots, 24 \quad (20-3)$$

۳-۴-۲ مدل سازی عدم قطعیت

قیمت انرژی الکتریکی و میزان تولید تولیدکنندگان خورشیدی در ساعات آتی مقادیری متغیر و نامشخص می‌باشند. عدم قطعیت موجود در این متغیرها، مدیریت انرژی را پیچیده‌تر می‌نماید. در این بخش برای مدل سازی عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی و تولید خورشیدی از روش پیش‌بینی نقطه‌ای استفاده می‌شود و عدم قطعیت دسترس‌پذیری مؤلفه‌های شبکه مدل نمی‌شود. ذکر این نکته لازم است که مقدار حاصل از پیش‌بینی نقطه‌ای همان مقدار امید ریاضی پیش‌بینی متغیر غیرقطعی می‌باشد.

قیمت انرژی الکتریکی

قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی دارای ماهیتی متغیر است و افزایش و یا کاهش ناگهانی جزء ویژگی‌های آن می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی دقیق قیمت انرژی بازار زمان حقیقی دشوار است. از آنجایی که قیمت انرژی بازار روز قبل در همه ساعات روز مورد نظر برای برنامه‌ریزی مشخص است و با توجه به همبستگی معنادار میان قیمت انرژی بازار روز قبل با قیمت انرژی بازار زمان حقیقی، به منظور پیش‌بینی بهتر قیمت انرژی بازار زمان حقیقی می‌توان از قیمت انرژی بازار روز قبل استفاده نمود [۳۱، ۵۳]. شکل ۳-۱ همبستگی قیمت این دو بازار را بر اساس اطلاعات بازار زمان حقیقی و بازار روز قبل ناحیه نیوانگلند در سال ۲۰۰۹، نشان می‌دهد [۵۴].



شکل ۳-۱: ضرایب همبستگی متقابل میان قیمت انرژی بازار روز قبل و بازار زمان حقیقی

اطلاعات گذشته مربوط به قیمت انرژی بازار زمان حقیقی و روز قبل تا ساعت t ، در دسترس هستند. روش پیش‌بینی نقطه‌ای قیمت انرژی بازار زمان حقیقی برای ساعات پس از t به صورت زیر است:

۱. ابتدا سری زمانی اختلاف میان اطلاعات گذشته قیمت این دو بازار به دست آورده می‌شود.

$$e_{hist}^{MG} = C_{hist}^{MG,RT} - C_{hist}^{MG,DA} \quad (21-3)$$

۲. سپس بر روی سری زمانی اختلاف یک مدل آریمای^{۲۷} مناسب پیاده‌سازی می‌شود و مقادیر

این اختلاف برای ساعات پس از t تخمین زده می‌شود ($\{e_h^{MG}\}$).

۳. مقدار پیش‌بینی قیمت انرژی زمان حقیقی ساعات پس از t ، از جمع قیمت انرژی بازار روز

قبل متناظر با مقدار پیش‌بینی شده اختلاف به دست می‌آید.

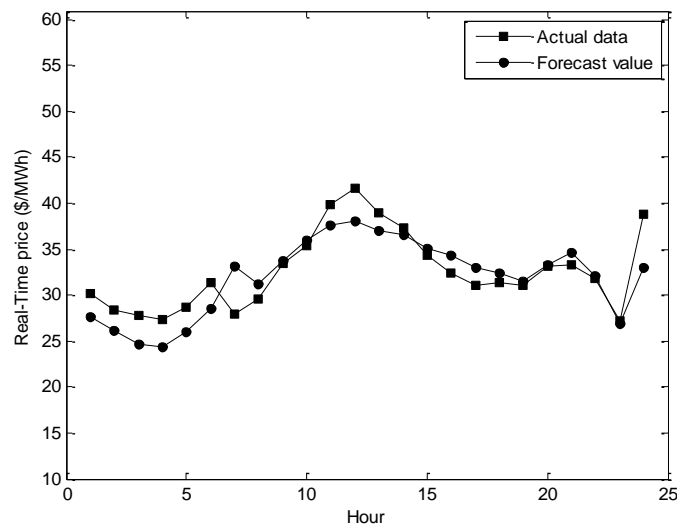
$$\{C_h^{MG,RT}\} = C_h^{MG,DA} + \{e_h^{MG}\} \quad (22-3)$$

۴. سپس در ساعت $t + 1$ اطلاعات مربوط قیمت انرژی آن ساعت نیز به اطلاعات گذشته افزوده

²⁷ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

می‌شود و مراحل ۱ تا ۳ تکرار می‌گردد. این روند به صورت ساعتی تا اتمام ساعات دوره برنامه‌ریزی ادامه می‌یابد.

شکل ۲-۳ پیش‌بینی نقطه‌ای قیمت بازار زمان حقیقی ناحیه نیوانگلند [۵۴]، با استفاده از مدل $ARIMA(3,0,2)$ برای ۲۴ ساعت پیش رو را در روز ۵ می سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: پیش‌بینی نقطه‌ای قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی

تولید توان خورشیدی

در این بخش برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در تولید خورشیدی در ساعات پس از t از پیش‌بینی نقطه‌ای مبتنی بر یک روش ترکیبی آریما-فازی استفاده شده است [۵۳، ۵۵]. روش پیش‌بینی به شرح زیر است:

۱. اطلاعات گذشته مربوط به تابش^{۲۸} و تولید توان خورشیدی تا ساعت t در دسترس هستند. با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی، توان خورشیدی به صورت تابعی از تابش خورشید $(f^{SO}(\cdot))$ تخمین زده می‌شود.

²⁸ Irradiance

$$p^{solar} = f^{so}(Irr) \quad (23-3)$$

۲. خطای باقی مانده با استفاده از محاسبه اختلاف میان اطلاعات حقیقی توان خورشیدی و توان پیش‌بینی شده توسط تابع تخمینی به دست می‌آید.

$$e^{solar} = p^{solar,real} - \{p^{solar,fuzzy}\} \quad (24-3)$$

۳. تابع توزیع تجمعی تجربی $F(.)$ برای اطلاعات خطای باقی مانده به دست می‌آید. با ترکیب توابع توزیع تجمعی $F(.)$ و معکوس تابع توزیع تجمعی نرمال، خطای باقی مانده به حوزه نرمال منتقل می‌شود.

$$e_N^{solar} = \psi_N^{-1}(F(e^{solar})) \quad (25-3)$$

۴. یک مدل آریمای مناسب بر روی خطاهای نرمال شده پیاده‌سازی می‌شود و مقادیر خطا برای ساعت‌های پس از t پیش‌بینی می‌شود.

۵. خطای پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه زیر به حوزه حقیقی منتقل می‌شود.

$$\{e^{solar}\} = F^{-1}(\psi_N(\{e_N^{solar}\})) \quad (26-3)$$

۶. مقدار پیش‌بینی شده توان خورشیدی برای ساعات پس از t ، از جمع توان پیش‌بینی شده توسط مدل فازی با خطای پیش‌بینی شده توسط مدل آریما به دست می‌آید.

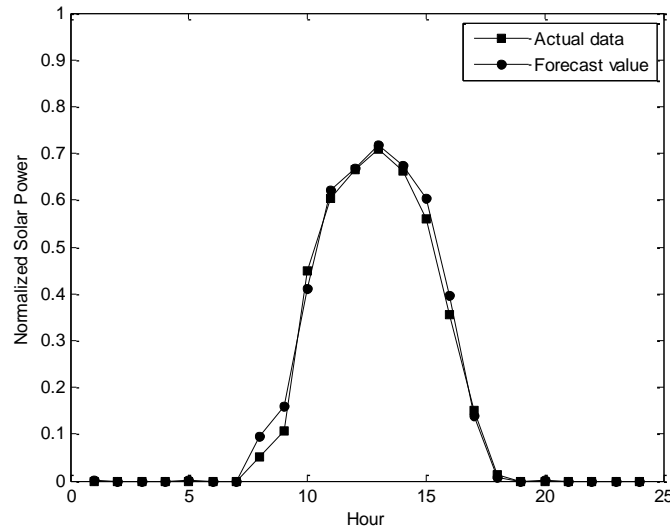
$$\{p^{solar}\} = \{p^{solar,fuzzy}\} + \{e^{solar}\} \quad (27-3)$$

۷. سپس در ساعت $t + 1$ اطلاعات مربوط به آن ساعت نیز به اطلاعات گذشته افزوده می‌شود و مراحل ۱ تا ۶ تکرار می‌شود. این روند تا اتمام ساعات دوره برنامه‌ریزی ادامه می‌یابد.

شکل ۳-۳ پیش‌بینی نقطه‌ای تولید توان توسط ایستگاه خورشیدی دانشگاه هاروارد [۵۶]، با

استفاده از مدل $ARIMA(2,0,2)(1,0,1)$ برای ۲۴ ساعت پیش رو در روز ۲۶ سپتامبر سال ۲۰۰۹

نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳: پیش‌بینی نقطه‌ای تولید توان خورشیدی

۳-۵ مدل مقاوم

مدل مقاوم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی مبتنی بر پیش‌بینی بازه‌ای عدم قطعیت‌ها عمل می‌کند. در این بخش نیز احتمال خروج اجزای شبکه قبل از وقوع در نظر گرفته نشده است و سیستم مدیریت انرژی با اطلاع از وقوع پیشامد اقدامات اصلاحی مورد نیاز را انجام می‌دهد. مزیت استفاده از مدل مقاوم این است که در صورت انحراف پارامترهای غیرقطعی در بازه پیش‌بینی تصمیم اتخاذشده قابل اجرا می‌باشد. در ادامه، ابتدا فرمول‌بندی مدل مورد نظر ارائه می‌شود. سپس مدل‌سازی عدم قطعیت تشریح خواهد شد.

۳-۵-۱ فرمول‌بندی

مدل مقاوم مدیریت انرژی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned}
& \text{Min}_{\Omega} \left[\tilde{C}_t^{MG} p_t^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,t}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,t}^D(p_{j,t}^D \alpha) \right] \\
& + \sum_{h=t+1}^{24} \left[\bar{C}_h^{MG} p_h^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,h}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,h}^D(p_{j,h}^D \alpha) \right] \quad (28-3) \\
& + \sum_{j=1}^{N_D} e_j^{D,shed} F^{shed} + \Gamma^{MG} \varphi^{MG} + \sum_{h=t+1}^{24} \mu_h^{MG}
\end{aligned}$$

مقيد به:

$$\sum_{h=1}^{t-1} \tilde{p}_{j,h}^D \alpha + p_{j,t}^D \alpha + \sum_{h=t+1}^{24} p_{j,h}^D \alpha \geq (E_j^{D,min} - e_j^{D,shed}), \forall j \quad (29-3)$$

$$-R_j^D \leq p_{j,h}^D - p_{j,h-1}^D \leq R_j^U, \forall h \geq t, j \quad (30-3)$$

$$p_j^{D,min} - l_{j,h}^{shed} \leq p_{j,h}^D \leq p_j^{D,max}, \forall h \geq t, j \quad (31-3)$$

$$p_{n,h}^{MG} - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h}^D, \forall h \geq t, n \in \Omega^{MG} \quad (32-3)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in \theta_n^{SS}} (p_{i,h}^{SO} + p_{i,h}^{ST,out}) - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L \\
& = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h}^D + \sum_{i \in \theta_n^{SS}} p_{i,h}^{ST,in}, \forall h \geq t, n \in \Omega^{SS} \quad (33-3)
\end{aligned}$$

$$- \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h}^D, \forall h \geq t, n \in \Omega^B \setminus n \in \Omega^{SS}, \Omega^{MG} \quad (34-3)$$

$$p_h^{MG} = \sum_{n \in \Omega^{MG}} p_{n,h}^{MG}, \forall h \geq t \quad (35-3)$$

$$-P_n^{MG,max} \leq p_{n,h}^{MG} \leq P_n^{MG,max}, \forall h \geq t, n \in \Omega^{MG} \quad (36-3)$$

$$p_{k,h}^L = \frac{1}{X_{k,h}} (\delta_{o(k),h} - \delta_{d(k),h}), \forall h \geq t \quad (37-3)$$

$$-P_{k,h}^{L,max} \leq p_{k,h}^L \leq P_{k,h}^{L,max}, \forall h \geq t, k \quad (38-3)$$

$$-\pi \leq \delta_{n,h} \leq \pi, \forall n \in \Omega^B, h \geq t, k \quad (39-3)$$

$$\delta_{n,h} = 0, \forall h \geq t, n: \text{reference bus} \quad (40-3)$$

$$e_{i,h}^{ST} = e_{i,h-1}^{ST} + \eta_i^{in} p_{i,h}^{ST,in} \alpha - \frac{p_{i,h}^{ST,out} \alpha}{\eta_i^{out}}, \forall h \geq t, i \quad (41-3)$$

$$E_i^{ST,min} \leq e_{i,h}^{ST} \leq E_i^{ST,max}, \forall h \geq t, i \quad (42-3)$$

$$p_{j,h}^D, \forall h \geq t, j; p_{i,h}^{SO}, p_{i,h}^{ST,out}, p_{i,h}^{ST,in} \geq 0, \forall h \geq t, i \quad (43-3)$$

$$p_{i,t}^{SO} \leq \bar{P}_{i,t}^{SO}, \forall i \quad (44-3)$$

$$p_{i,h}^{SO} + \Gamma_{i,h}^{SO} \varphi_{i,h}^{SO} + \mu_{i,h}^{SO} \leq \bar{P}_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (45-3)$$

$$\varphi_{i,h}^{SO} + \mu_{i,h}^{SO} \geq \hat{P}_{i,h}^{SO} z_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (46-3)$$

$$1 \leq z_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (47-3)$$

$$\varphi_{i,h}^{SO}, \mu_{i,h}^{SO}, z_{i,h}^{SO} \geq 0, \forall h > t, i \quad (48-3)$$

$$\varphi_h^{MG} + \mu_h^{MG} \geq \hat{C}_h^{MG} z_h^{MG}, \forall h > t \quad (49-3)$$

$$-z_h^{MG} \leq p_h^{MG} \alpha \leq z_h^{MG}, \forall h > t \quad (50-3)$$

$$\varphi_h^{MG}, \mu_h^{MG}, z_h^{MG} \geq 0, \forall h > t \quad (51-3)$$

تابع هدف مدل مقاوم مشابه تابع هدف مدل قطعی می باشد. عبارت افزوده شده به تابع هدف

(28-3) و قیود (49-3) تا (51-3) کنترل عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی و قیود (45-3) تا

(48-3) کنترل عدم قطعیت تولید خورشیدی را به شیوه بهینه سازی مقاوم امکان پذیر می کند. سایر

قیود (29-3) تا (44-3) مشابه قیود مدل قطعی می باشد. تابع هدف (28-3) از سه بخش تشکیل شده

است و به دنبال حداقل کردن بدترین شرایطی است که با توجه به داده‌های غیرقطعی ممکن است روی دهد. بخش اول مربوط به قرینه سود متقاضیان در ساعت t می‌باشد. بخش دوم مقادیر نامی قرینه سود متقاضیان در ساعات پیش رو است که از مقدار متوسط پیش‌بینی قیمت بازار زمان حقیقی به دست می‌آید و بخش سوم مربوط به بدترین شرایط انحراف هزینه می‌باشد که نتیجه انحراف قیمت‌های بازار زمان حقیقی از مقادیر نامی است. φ^{MG} و μ_h^{MG} متغیرهای دوگان مرتبط با عدم قطعیت قیمت انرژی و $\varphi_{i,h}^{SO}$ و $\mu_{i,h}^{SO}$ متغیرهای دوگان مرتبط با عدم قطعیت تولید خورشیدی هستند. در واقع φ^{MG} و $\varphi_{i,h}^{SO}$ هزینه‌های در نظر گرفتن انحراف پارامترهای غیرقطعی از مقدار نامی آن‌ها هستند. پارامترهای Γ^{MG} و $\Gamma_{i,h}^{SO}$ به منظور تنظیم درجه مقاومت پاسخ مسئله در مقابل عدم قطعیت‌های موجود در تولید خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی استفاده شده‌اند. این دو پارامتر تعیین می‌کنند انحراف چه تعداد از پارامترهای غیرقطعی از مقدار نامی آن‌ها در نظر گرفته شوند. پارامتر Γ^{MG} می‌تواند مقداری در بازه $[0, 24 - t]$ اختیار می‌کند. اگر این پارامتر صفر انتخاب شود، تأثیر انحراف قیمت انرژی الکتریکی از مقدار نامی بر روی تابع هدف نادیده گرفته می‌شود. اگر تحت یک تصمیم محتاطانه، کران بالای بازه انتخاب شود، تأثیر انحراف‌های همه قیمت‌ها بر روی تابع هدف منظور می‌شود. $\Gamma_{i,h}^{SO}$ سطح محافظت قید (۳-۱۷) را در برابر عدم قطعیت تولید خورشیدی تعیین می‌کند. این پارامتر می‌تواند مقداری در بازه $[0, 1]$ اختیار کند. z_h^{MG} و $z_{i,h}^{SO}$ به عنوان متغیرهای کمکی به منظور خطی‌سازی مسئله استفاده شده‌اند.

ساختار کلی روبه تصمیم‌گیری و توزیع توان مشابه ساختار پیشنهادی در زیربخش ۳-۴-۱ می‌باشد.

۳-۵-۲ پیش‌بینی بازه‌ای

در این بخش برای مدل‌سازی عدم قطعیت پیش‌بینی بازه‌ای متغیرهای پیوسته مانند تولید

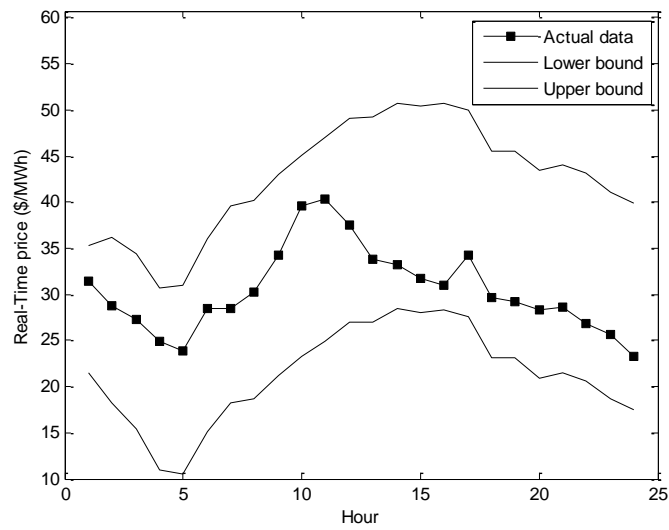
خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی از روش پیش‌بینی بازه‌ای استفاده شده است. لازم به ذکر است، متغیرهای تصادفی پیوسته را می‌توان با پیش‌بینی سناریو مدل‌سازی کرد و از روش برنامه‌ریزی تصادفی جهت تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت استفاده نمود. برخی از معایب برنامه‌ریزی تصادفی به شرح زیر است [۵۷]:

۱. در شرایطی که تابع چگالی احتمال متغیر به صورت دقیق مشخص نیست، تولید سناریوها در عمل امکان‌پذیر نیست.

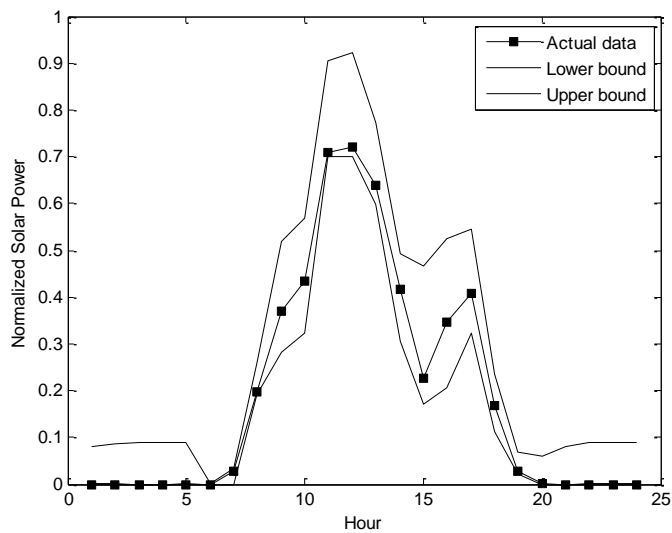
۲. اندازه مدل بهینه‌سازی به‌طور مستقیم تابعی از تعداد سناریوهاست که موجب می‌شود محاسبات بسیار زمان‌بر، دشوار و در برخی موارد ناممکن شود.

بنا بر این در این پایان‌نامه، مدل مقاوم جهت غلبه بر متغیرهای تصادفی پیوسته استفاده می‌شود. با تعریف یک سطح اطمینان، با استفاده از روش‌های پیش‌بینی در بخش ۳-۴-۲ یک کران بالا و پایین برای پیش‌بینی تولید خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی به دست می‌آید. سپس با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی دوگان مدل قطعی به صورت مدل مقاوم نوشته می‌شود. با بروز انحراف مقدار واقعی پارامترهای غیرقطعی از مقدار نامی پیش‌بینی شده، همچنان پاسخ مسئله بهینه و شدنی خواهد بود [۵۸].

شکل ۳-۴ پیش‌بینی بازه‌ای قیمت بازار زمان حقیقی ناحیه نیوانگلند [۵۴]، با استفاده از مدل $ARIMA(3,0,2)$ و سطح اطمینان ۰/۹، برای ۲۴ ساعت پیش‌رو را در روز ۳۱ جولای سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد. شکل ۳-۵ پیش‌بینی بازه‌ای تولید توان توسط ایستگاه خورشیدی دانشگاه هاروارد [۵۶]، با استفاده از مدل $ARIMA(2,0,2)(1,0,1)$ و سطح اطمینان ۰/۹، برای ۲۴ ساعت پیش‌رو در روز ۶ آگوست سال ۲۰۰۹ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: پیش‌بینی بازه‌ای قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی



شکل ۳-۵: پیش‌بینی بازه‌ای تولید توان خورشیدی

۳-۶ مدل مقاوم تصادفی

در مدل‌های قطعی و مقاوم ارائه‌شده در بخش‌های قبل، وقوع پیشامد در مرحله تصمیم لحاظ نمی‌شد و تنها پس از وقوع آن، تصمیمات در مرحله توزیع برحسب نیاز تغییر داده می‌شد. در این دو مدل، شبکه از پیش آمادگی لازم برای مقابله با پیشامدهای رخ داده را ندارد. در مدل مقاوم تصادفی احتمال خروج خط بر اساس سناریو مدل می‌شود و سیستم مدیریت انرژی با در نظر گرفتن سناریو-

های مختلف، تصمیم‌گیری می‌کند. سپس در مرحله توزیع بر اساس اطلاعات جدید دریافت‌شده از ساختار شبکه (وقوع یا عدم وقوع پیشامد) با حذف سناریوهای نامرتبط، بر اساس باقی سناریوها تصمیمات جدید را اتخاذ و برای مؤلفه‌های شبکه ارسال می‌کند.

الگوریتم مدیریت انرژی بر اساس مدل مقاوم تصادفی به صورت زیر است:

۱. قیمت انرژی در ساعت t ، بیست دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی توسط شبکه اصلی مشخص می‌گردد. در حالی که قیمت انرژی در ساعات پیش از t ، برای سیستم مدیریت انرژی شناخته شده هستند، برای $t-24$ ساعت پیش رو دارای عدم قطعیت می‌باشند.
۲. میزان تولید انرژی خورشیدی بیست دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی در ساعت t تعیین می‌شود. در حالی که تولید انرژی خورشیدی در ساعات پیش از t ، برای سیستم مدیریت انرژی شناخته شده هستند، برای $t-24$ ساعت پیش رو دارای عدم قطعیت می‌باشند.
۳. متقاضیان بر اساس تابع مطلوبیت خود اطلاعات مربوط به مصرف (شامل میزان مصرف و سطح مطلوبیت) را بیست دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی در ساعت t برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌کنند.
۴. با استفاده از ابزار پیش‌بینی مناسب، سیستم مدیریت انرژی وضعیت پارامترهای غیرقطعی قیمت انرژی، میزان تولید منابع تولید پراکنده و آرایش ریزشبکه را در ساعات پیش رو تخمین می‌زند و مرحله تصمیم‌گیری مدل مقاوم تصادفی را برای هر یک از سناریوها اجرا می‌کند.
۵. سیستم مدیریت انرژی میزان انرژی مصرفی هر متقاضی به همراه میزان انرژی تأمین‌شده از شبکه اصلی، ایستگاه خورشیدی و سیستم ذخیره مربوط به هر سناریو را در ساعت t و ساعات پس از آن را بر پایه اطلاعات دریافتی از منابع انرژی، متقاضیان و با توجه به پیش‌بینی پارامترهای غیرقطعی تعیین می‌کند. همچنین سیستم مدیریت انرژی مشخص

می‌سازد که در هر سناریو چه میزان از انرژی به شبکه اصلی فروخته شود و چه میزان در واحدهای ذخیره‌ساز ذخیره شود.

۶. تصمیمات اتخاذشده مربوط به ساعت t پنج دقیقه قبل از تبادل انرژی، برای تأمین-کنندگان انرژی و متقاضیان ارسال می‌شود.

۷. آرایش ریزش‌بکه توسط سیستم مدیریت انرژی پایش می‌شود. با توجه با اطلاعات دریافتی سیستم مدیریت انرژی، سناریوهایی که با وضعیت شبکه همخوانی ندارند حذف می‌کند و احتمال وقوع هر سناریو را اصلاح می‌کند. مرحله توزیع توان مدل مقاوم تصادفی را برای سناریوهای باقی‌مانده اجرا می‌کند.

۸. سیستم مدیریت انرژی در حداقل زمان ممکن تصمیمات گام قبل را اصلاح می‌نماید و تصمیمات جدید را برای تأمین‌کنندگان انرژی و متقاضیان ارسال می‌کند.

۳-۶-۱ فرمول‌بندی

به علت استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی، برخلاف مدل‌های قبل فرمول‌بندی مرحله تصمیم-گیری و توزیع مدل مقاوم تصادفی یکسان نمی‌باشند. مسئله مدیریت انرژی از مرحله تصمیم‌گیری به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

مرحله تصمیم‌گیری:

$$\begin{aligned}
\text{Min}_{\Omega} \sum_{\omega} \text{prob}_{\omega} & \left[\left[\tilde{C}_t^{MG} p_t^{MG}(\omega) \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,t}^{shed}(\omega) \alpha] F^{shed} \right. \right. \\
& \left. \left. - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,t}^D(p_{j,t}^D(\omega) \alpha) \right] \right. \\
& + \sum_{h=t+1}^{24} \left[\bar{C}_h^{MG} p_h^{MG}(\omega) \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,h}^{shed}(\omega) \alpha] F^{shed} \right. \\
& \left. \left. - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,h}^D(p_{j,h}^D(\omega) \alpha) \right] + \sum_{j=1}^{N_D} e_j^{D,shed}(\omega) F^{shed} + \Gamma^{MG} \varphi^{MG}(\omega) \right. \\
& \left. + \sum_{h=t+1}^{24} \mu_h^{MG}(\omega) \right] - \beta \left(\rho - \frac{1}{1-\zeta} \sum_{\omega} \text{prob}_{\omega} \gamma(\omega) \right)
\end{aligned} \tag{52-3}$$

مقيد به:

$$\sum_{h=1}^{t-1} \tilde{p}_{j,h}^D \alpha + p_{j,t}^D(\omega) \alpha + \sum_{h=t+1}^{24} p_{j,h}^D(\omega) \alpha \geq (E_j^{D,min} - e_j^{D,shed}(\omega)), \forall j, \omega \tag{53-3}$$

$$-R_j^D \leq p_{j,h}^D(\omega) - p_{j,h-1}^D(\omega) \leq R_j^U, \forall h \geq t, j, \omega \tag{54-3}$$

$$P_j^{D,min} - l_{j,h}^{shed}(\omega) \leq p_{j,h}^D(\omega) \leq P_j^{D,max}, \forall h \geq t, j, \omega \tag{55-3}$$

$$\begin{aligned}
p_{n,h}^{MG}(\omega) - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L(\omega) + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L(\omega) & = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h}^D(\omega), \forall h \geq t, n \\
& \in \Omega^{MG}, \omega
\end{aligned} \tag{56-3}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i \in \theta_n^{SS}} (p_{i,h}^{SO}(\omega) + p_{i,h}^{ST,out}(\omega)) - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L(\omega) + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L(\omega) \\
= \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h}^D(\omega) + \sum_{i \in \theta_n^{SS}} p_{i,h}^{ST,in}(\omega), \forall h \geq t, n \in \Omega^{SS}, \omega
\end{aligned} \tag{57-3}$$

$$- \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L(\omega) + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L(\omega) = \sum_{j \in \theta_n^D} p_{j,h}^D(\omega), \forall h \geq t, n \in \Omega^B \setminus n \in \Omega^{SS}, \Omega^{MG}, \omega \quad (58-3)$$

$$p_h^{MG}(\omega) = \sum_{n \in \Omega^{MG}} p_{n,h}^{MG}(\omega), \forall h \geq t, \omega \quad (59-3)$$

$$-P_n^{MG,max} \leq p_{n,h}^{MG}(\omega) \leq P_n^{MG,max}, \forall h \geq t, n \in \Omega^{MG}, \omega \quad (60-3)$$

$$p_{k,h}^L(\omega) = \frac{1}{X_{k,h}(\omega)} \left(\delta_{o(k),h}(\omega) - \delta_{d(k),h}(\omega) \right), \forall h \geq t, \omega \quad (61-3)$$

$$-P_{k,h}^{L,max}(\omega) \leq p_{k,h}^L(\omega) \leq P_{k,h}^{L,max}(\omega), \forall h \geq t, \omega \quad (62-3)$$

$$-\pi \leq \delta_{n,h}(\omega) \leq \pi, \forall n \in \Omega^B, h \geq t, \omega \quad (63-3)$$

$$\delta_{n,h}(\omega) = 0, \forall h \geq t, \omega, n: \text{reference bus} \quad (64-3)$$

$$e_{i,h}^{ST}(\omega) = e_{i,h-1}^{ST}(\omega) + \eta_i^{in} p_{i,h}^{ST,in}(\omega) \alpha - \frac{p_{i,h}^{ST,out}(\omega) \alpha}{\eta_i^{out}}, \forall h \geq t, i, \omega \quad (65-3)$$

$$E_i^{ST,min} \leq e_{i,h}^{ST}(\omega) \leq E_i^{ST,max}, \forall h \geq t, i, \omega \quad (66-3)$$

$$p_{j,h}^D(\omega), \forall h \geq t, j, \omega; p_{i,h}^{SO}(\omega), p_{i,h}^{ST,out}(\omega), p_{i,h}^{ST,in}(\omega) \geq 0, \forall h \geq t, i, \omega \quad (67-3)$$

$$p_{i,t}^{SO}(\omega) \leq \tilde{P}_{i,t}^{SO}, \forall i, \omega \quad (68-3)$$

$$p_{i,h}^{SO}(\omega) + \Gamma_{i,h}^{SO} \varphi_{i,h}^{SO}(\omega) + \mu_{i,h}^{SO}(\omega) \leq \bar{P}_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (69-3)$$

$$\varphi_{i,h}^{SO}(\omega) + \mu_{i,h}^{SO}(\omega) \geq \hat{P}_{i,h}^{SO} z_{i,h}^{SO}(\omega), \forall h > t, i, \omega \quad (70-3)$$

$$1 \leq z_{i,h}^{SO}(\omega), \forall h > t, i, \omega \quad (71-3)$$

$$\varphi_{i,h}^{SO}(\omega), \mu_{i,h}^{SO}(\omega), z_{i,h}^{SO}(\omega) \geq 0, \forall h > t, i, \omega \quad (72-3)$$

$$\varphi_h^{MG}(\omega) + \mu_h^{MG}(\omega) \geq \hat{C}_h^{MG} z_h^{MG}(\omega), \forall h > t, \omega \quad (73-3)$$

$$-z_h^{MG}(\omega) \leq p_h^{MG}(\omega)\alpha \leq z_h^{MG}(\omega), \forall h > t, \omega \quad (74-3)$$

$$\varphi^{MG}(\omega), \mu_h^{MG}(\omega), z_h^{MG}(\omega) \geq 0, \forall h > t, \omega \quad (75-3)$$

$$p_t^{MG}(\omega) = p_t^{MG}(\omega'), \forall \omega, \omega' \quad (76-3)$$

$$p_h^{MG}(\omega) = p_h^{MG}(\omega'), \forall h > t, \omega, \omega': \tau_{h'}(\omega) = \tau_{h'}(\omega') \quad h' = t, \dots, h-1 \quad (77-3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{c}_t^{MG} p_t^{MG}(\omega)\alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,t}^{shed}(\omega)\alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,t}^D(p_{j,t}^D(\omega)\alpha) \\ + \sum_{h=t+1}^{24} \left[\bar{c}_h^{MG} p_h^{MG}(\omega)\alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,h}^{shed}(\omega)\alpha] F^{shed} \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,h}^D(p_{j,h}^D(\omega)\alpha) \right] \quad (78-3) \\ + \sum_{j=1}^{N_D} e_j^{D,shed}(\omega) F^{shed} + \Gamma^{MG} \varphi^{MG}(\omega) + \sum_{h=t+1}^{24} [\mu_h^{MG}(\omega)] + \rho \\ - \gamma(\omega) \leq 0, \forall \omega \end{aligned}$$

$$\gamma(\omega) \geq 0, \forall \omega \quad (79-3)$$

تابع هدف (۵۲-۳) امید ریاضی سود متقاضیان در سناریوها در ساعت t و $24-t$ ساعت بعدی می باشد که در آن علاوه بر تابع هدف مدل مقاوم، شاخص ریسک (CVaR)^{۲۹} نیز افزوده شده است. قیود (۵۳-۳) تا (۷۵-۳) همان قیود مدل مقاوم می باشند که در هر سناریو اعمال می شوند. قید (۷۶-۳) مربوط به برقراری شرط پیش بینی ناپذیری^{۳۰} در همه سناریوها برای متغیر توان مبادله شده با شبکه اصلی در ساعت t می باشد. قید (۷۷-۳) مربوط به برقراری شرط پیش بینی ناپذیری برای متغیر توان مبادله شده با شبکه اصلی در ساعات h پس از t ، در آن دسته از سناریوهایی است که تا ساعت $h-1$ دارای ساختار شبکه یکسان می باشند. قیود (۷۸-۳) و (۷۹-۳) مربوط به شاخص ریسک می-

²⁹ Conditional Value at Risk

³⁰ Nonanticipativity

باشند.

پیش‌بینی ناپذیری از مفاهیم برنامه‌ریزی تصادفی خصوصاً در برنامه‌های دارای چند گام می‌باشد که طبق آن تصمیماتی که در ساعت t اتخاذ می‌شوند و مربوط به گام اول هستند باید از سناریوهای گام بعدی مستقل باشند. به همین صورت متغیرهای گام دوم مستقل از سناریوهای گام بعدی می‌باشند [۵۹].

شاخص ریسک (CVaR)

شاخص امید ریاضی سود متقاضیان به عنوان تابع هدف مدل مقاوم تصادفی دارای مزیت‌هایی زیادی است. اما توزیع سود در آن نادیده گرفته شده است، به همین علت میزان پراکندگی سود را نشان نمی‌دهد که موجب می‌شود ریسک وقوع سود با مقادیر کم یا سودهای منفی (زیان‌ها) لحاظ نشود [۱۰].

به منظور محاسبه ریسک، از شاخص CVaR با سطح اطمینان ζ استفاده شده است که در مسائل بهینه‌سازی خطی به کار می‌رود. اگر هدف بیشینه‌سازی سود با یک توزیع گسسته باشد، CVaR به صورت امید ریاضی سود $100\%(1 - \zeta)$ سناریوهای دارای کمترین مقدار سود تعریف می‌شود [۳۱]. $\beta \in [0, \infty)$ یک ضریب وزنی می‌باشد که در CVaR ضرب می‌شود تا میان سود مورد انتظار و میزان ریسک تعادل برقرار نماید. با دیدگاه محافظه‌کارانه، هر چه مقدار β بیش‌تر لحاظ شود، تأثیر ریسک نیز افزایش خواهد یافت. زمانی که ریسک لحاظ نشود (موردهای بدون ریسک) مقدار β صفر در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای ρ و γ به منظور محاسبه CVaR در توزیع سود استفاده می‌شوند.

مرحله توزیع توان:

در این گام تصمیمات اتخاذشده در گام قبلی با توجه به اطلاعات جدید دریافتی از وضعیت شبکه

اصلاح و اجرا می‌شود. تابع هدف و قیود این مرحله شامل معادلات (۳-۵۲) تا (۳-۷۹) به علاوه قیود زیر می‌باشد:

$$p_{j,t}^D(\omega) = p_{j,t}^D(\omega'), \forall j, \omega, \omega' \quad (۳-۸۰)$$

$$p_{j,h}^D(\omega) = p_{j,h}^D(\omega'), \forall h > t, j, \omega, \omega': \tau_{h'}(\omega) = \tau_{h'}(\omega') \quad h' = t, \dots, h-1 \quad (۳-۸۱)$$

$$p_{i,t}^{SO}(\omega) = p_{i,t}^{SO}(\omega'), \forall i, \omega, \omega' \quad (۳-۸۲)$$

$$p_{i,h}^{SO}(\omega) = p_{i,h}^{SO}(\omega'), \forall h > t, i, \omega, \omega': \tau_{h'}(\omega) = \tau_{h'}(\omega') \quad h' = t, \dots, h-1 \quad (۳-۸۳)$$

$$p_{i,t}^{ST,in}(\omega) = p_{i,t}^{ST,in}(\omega'), \forall i, \omega, \omega' \quad (۳-۸۴)$$

$$p_{i,h}^{ST,in}(\omega) = p_{i,h}^{ST,in}(\omega'), \forall h > t, \forall i, \forall \omega, \omega': \tau_{h'}(\omega) = \tau_{h'}(\omega') \quad h' = t, \dots, h-1 \quad (۳-۸۵)$$

$$p_{i,t}^{ST,out}(\omega) = p_{i,t}^{ST,out}(\omega'), \forall i, \forall \omega, \omega' \quad (۳-۸۶)$$

$$p_{i,h}^{ST,out}(\omega) = p_{i,h}^{ST,out}(\omega'), \forall h > t, \forall \omega, \omega': \tau_{h'}(\omega) = \tau_{h'}(\omega') \quad h' = t, \dots, h-1 \quad (۳-۸۷)$$

$$l_{j,t}^{shed}(\omega) = l_{j,t}^{shed}(\omega'), \forall i, \forall \omega, \omega' \quad (۳-۸۸)$$

$$l_{j,h}^{shed}(\omega) = l_{j,h}^{shed}(\omega'), \forall h > t, \forall \omega, \omega': \tau_{h'}(\omega) = \tau_{h'}(\omega') \quad h' = t, \dots, h-1 \quad (۳-۸۹)$$

قیود (۳-۸۰) تا (۳-۸۹) به ترتیب مربوط اعمال شرط پیش‌بینی ناپذیری در ساعت t و ساعات پس از آن بر روی متغیرهای انرژی مصرفی متقاضیان، توان تولیدی خورشیدی، انرژی ذخیره‌شده و آزادشده توسط سیستم ذخیره و کاهش حداقل توان مصرفی ساعتی متقاضیان می‌باشد.

۳-۶-۲ مدل‌سازی عدم قطعیت

مدل‌سازی عدم قطعیت در قیمت انرژی الکتریکی و تولید خورشیدی در این مدل مشابه مدل مقاوم می‌باشد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت در دسترس‌پذیری مؤلفه‌های سیستم، از روش تولید سناریو برای وقوع پیشامدها، مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده است.

احتمال دسترس پذیری و یا خرابی هر یک از مؤلفه‌های سیستم به صورت زیر است [۶۰]:

$$P^{up}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (90-3)$$

$$P^{down}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (91-3)$$

فرض می‌شود که از میان مؤلفه‌های سیستم تنها برای خطوط انتقال انرژی امکان وقوع پیشامد وجود داشته باشد و بر اساس ضابطه $n - 1$ در دوره برنامه‌ریزی تنها یک پیشامد رخ می‌دهد و با خروج خط از مدار، امکان تعمیر آن تا پایان روز تعمیر وجود ندارد ($\mu = 0$). با این فرض احتمال دسترس پذیری هر خط برابر است با:

$$P^{up}(t) = e^{-\lambda t} \quad (92-3)$$

احتمال اینکه هیچ پیشامدی در شبکه رخ ندهد و ساختار شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی (T) سالم باشد به صورت زیر است:

$$P_0 = \prod_{k=1}^K e^{-\lambda_k T} \quad (93-3)$$

همچنین احتمال وقوع پیشامد k در بازه τ ، به گونه‌ای که سایر مؤلفه‌های سیستم در دسترس باشند برابر است با:

$$P(k, \tau) = e^{-\lambda_k \tau} (e^{\lambda_k} - 1) \prod_{\substack{z=1 \\ z \neq k}}^K e^{-\lambda_z T} \quad (94-3)$$

از آنجایی که این مدل به صورت ساعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، طول دوره برنامه‌ریزی در هر ساعت اصلاح و احتمالات جدید بر حسب آن به دست می‌آید.

$$T = 24 - t, \forall t = 1, \dots, 24 \quad (95-3)$$

با فرض احتمال وقوع تنها یک پیشامد، جمع احتمالات برابر یک نمی‌شود چراکه احتمال بروز همه پیشامدها در این جمع، در نظر گرفته نشده است. با تقسیم احتمال وقوع هر پیشامد بر مجموع همه احتمالات، احتمال اصلاح شده به دست می‌آید.

$$P(k, \tau) = \frac{P(k, \tau)}{\sum_k P(k, \tau) + P_0} \quad (96-3)$$

$$P_0 = \frac{P_0}{\sum_k P(k, \tau) + P_0} \quad (97-3)$$

دقت شود که فرمول‌بندی ارائه شده یک فرمول‌بندی جامع برای در نظر گرفتن تمام پیشامدهای ممکن در شبکه می‌باشد و فرضیات انجام گرفته در مدل‌سازی عدم قطعیت دسترس‌پذیری مؤلفه‌های سیستم، در تعداد سناریوها مؤثر است و خللی در فرمول‌بندی مدل مقاوم تصادفی وارد نمی‌کند.

۳-۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به تشریح مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریز شبکه پرداخته شد. با توجه به روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت، سه مدل قطعی، مقاوم و مقاوم تصادفی برای این مسئله ارائه گردید. در مدل قطعی از روش پیش‌بینی نقطه‌ای و در مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی از روش پیش‌بینی بازه‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی و تولید خورشیدی استفاده شد. همچنین در مدل مقاوم تصادفی از روش تولید سناریو برای مدل‌سازی دسترس‌پذیری مؤلفه‌های سیستم استفاده گردید.

فصل چهارم

شبیه‌سازی مدیریت انرژی نیروگاه

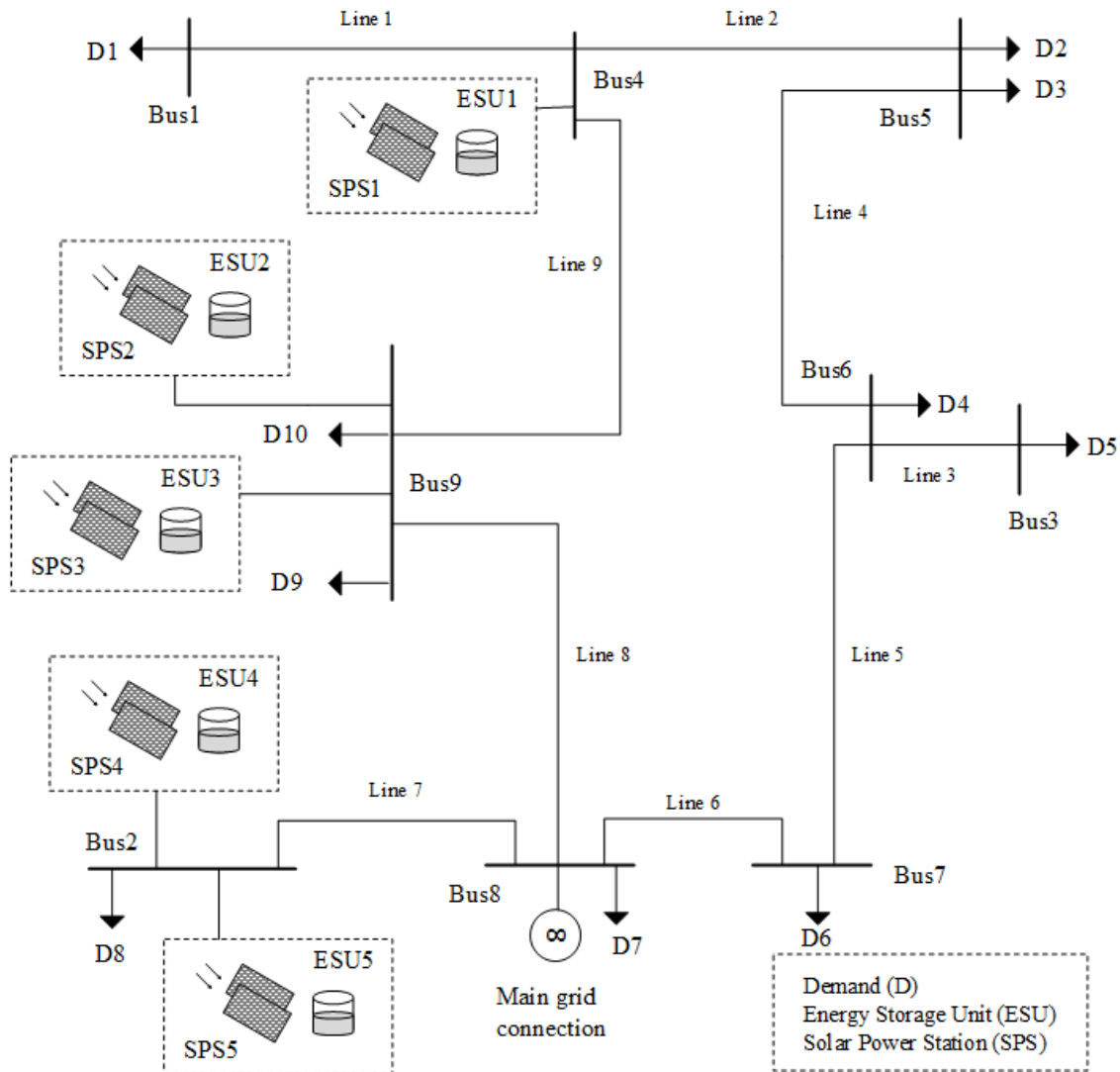
مجازی

۴-۱ مقدمه

در این فصل عملکرد الگوریتم‌های مدیریت انرژی ارائه شده برای نیروگاه مجازی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن از اطلاعات واقعی قیمت انرژی الکتریکی، تابش و تولید توان خورشیدی استفاده شده است. در ابتدا اطلاعات مربوط به بخش فنی اقتصادی و متغیرهای غیرقطعی شبکه تشریح می‌شود. سپس شبیه‌سازی‌های انجام گرفته ارائه و تحلیل می‌شود.

۴-۲ اطلاعات

نیروگاه مجازی شبیه‌سازی شده دارای ۱۰ متقاضی، ۵ ایستگاه خورشیدی و واحد ذخیره انرژی می‌باشد که از طریق یک ریزشبه به یکدیگر متصل می‌باشند. شبکه استاندارد ۹ باس IEEE به عنوان ریزشبه نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. این ریزشبه ساختار شعاعی-حلقوی دارد و خروج برخی از خطوط موجب می‌شود تا بخشی از سیستم از آن جدا و به صورت مستقل (حالت جزیره‌ای) بهره‌برداری شود. ساختار نیروگاه مجازی مورد مطالعه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. نیروگاه مجازی از طریق باس ۸ به شبکه اصلی متصل است. ایستگاه‌های خورشیدی به همراه واحدهای ذخیره‌ساز در باس‌های ۲، ۴ و ۹ نصب شده‌اند و باس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به وسیله خطوط انتقال ۱، ۳ و ۷ به سایر باس‌ها متصل هستند که در صورت بروز پیشامد برای این خطوط، این باس از بدنه اصلی جدا و ریزشبه به حالت جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود. اطلاعات مربوط به قیمت انرژی الکتریکی از بازار زمان حقیقی ناحیه نیوانگلند آمریکا در سال ۲۰۰۹ [۵۴] و اطلاعات مربوط به تابش و تولید خورشیدی در آن سال از ایستگاه خورشیدی دانشگاه هاروارد [۵۶]، که در همان ناحیه واقع می‌باشد، گرفته شده است.



شکل ۴-۱: ساختار نیروگاه مجازی مورد مطالعه

۴-۲-۱ اطلاعات فنی اقتصادی سیستم

در این زیربخش، اطلاعات فنی و اقتصادی مؤلفه‌های نیروگاه مجازی شامل بارها، ایستگاه‌های خورشیدی، واحدهای ذخیره انرژی و خطوط انتقال انرژی ارائه می‌گردد. در جدول ۴-۱، اطلاعات فنی مربوط به بارها، شامل محل اتصال به ریزشبهه، حد بالا و پایین تغییرات توان، بیشینه و کمینه توان مصرفی در هر ساعت، حداقل انرژی مصرفی روزانه و توان مصرفی در آخرین ساعت روز قبل نشان داده شده است. جدول ۴-۲، تابع مطلوبیت متقاضیان و بلوک‌های مربوط به آن را نشان می‌دهد. فرض شده است که هر متقاضی با ۴ بلوک که هر یک به اندازه ۲۵٪ بیشینه توان مصرفی ساعتی می‌باشند،

میزان خرید انرژی الکتریکی را پیشنهاد دهد. همچنین با توجه تغییرات قیمت انرژی الکتریکی، بار پاسخگو می‌تواند، مقادیر تابع مطلوبیت خود را در طول روز تغییر دهد.

جدول ۴-۱: اطلاعات فنی مربوط به بارها

متقاضی	باس	حد بالا و پایین تغییرات توان [MW/h]	بیشینه توان مصرفی ساعتی [MW]	کمینه توان مصرفی ساعتی [MW]	حداقل انرژی مصرفی روزانه [MWh]	توان مصرفی ابتدایی [MW]
۱	۱	۲۰۰	۲۰۰	۴۰	۱۰۵۶	۱۰۰
۲	۵	۱۰۰	۲۰۰	۴۰	۱۰۵۶	۱۰۰
۳	۵	۷۵	۱۵۰	۳۰	۷۹۲	۷۵
۴	۶	۱۰۰	۱۲۰	۲۴	۶۳۳/۶	۶۰
۵	۳	۱۵	۱۵	۱	۲۶/۴	۷/۵
۶	۷	۲۵	۲۵	۲	۵۲/۸	۱۲/۵
۷	۸	۱۵	۱۵	۱	۲۶/۴	۷/۵
۸	۲	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	۵۲۸	۵۰
۹	۹	۴۰	۷۵	۱۵	۳۹۶	۳۷/۵
۱۰	۹	۷۰	۱۰۰	۲۰	۵۲۸	۵۰

این کار به کمک ضرب ضرایب ۱/۱، ۰/۸۵ و ۱ برای بارهای ۴ تا ۶ و ۱/۱، ۰/۹ و ۱ برای سایر بارها به ترتیب در ساعات ۱ الی ۱۰، ۱۱ الی ۲۰ و ۲۱ الی ۲۴ در مقادیر مربوط به تابع مطلوبیت انجام می‌شود. در جدول ۴-۳، ظرفیت ایستگاه‌های خورشیدی، ظرفیت واحدهای ذخیره و محل اتصال آن‌ها نشان داده شده است. فرض شده است که واحدهای ذخیره نمی‌توانند از یک میزان مشخص (۱۰٪ ظرفیت) انرژی خود را کاهش دهند. همچنین بازده تبدیل انرژی ورودی و خروجی همه واحدهای ذخیره ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۲: اطلاعات مربوط به بلوک‌های تابع مطلوبیت

مطلوبیت [\$/MWh]	بار [MW]	متقاضی
۳۵، ۴۵، ۵۲، ۵۵	۵۰، ۵۰، ۵۰، ۵۰	۱
۳۷، ۴۶، ۵۲، ۵۶	۵۰، ۵۰، ۵۰، ۵۰	۲
۳۷، ۴۴، ۵۰، ۵۴	۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵	۳
۳۶، ۴۴، ۵۱، ۵۴	۳۰، ۳۰، ۳۰، ۳۰	۴
۳۳، ۳۶، ۴۱، ۴۴	۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵	۵
۳۲، ۳۶، ۴۲، ۴۵	۶/۲۵، ۶/۲۵، ۶/۲۵، ۶/۲۵	۶
۳۳، ۳۶، ۴۱، ۴۴	۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵	۷
۳۶، ۴۴، ۴۹، ۵۱	۲۵، ۲۵، ۲۵، ۲۵	۸
۳۷، ۴۳، ۴۸، ۵۱	۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵	۹
۳۶، ۴۴، ۴۹، ۵۱	۲۵، ۲۵، ۲۵، ۲۵	۱۰

جدول ۴-۳: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های خورشیدی و واحدهای ذخیره

انرژی ذخیره شده در آخرین ساعت روز قبل [MWh]	حداقل انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره [MWh]	ظرفیت واحد ذخیره [MWh]	ظرفیت ایستگاه خورشیدی [MW]	باس	ایستگاه یا واحد
۱۸	۱۸	۱۸۰	۱۱۲/۵	۴	۱
۱۲	۱۲	۱۲۰	۷۵	۹	۲
۹	۹	۹۰	۵۶/۲۵	۹	۳
۶	۶	۶۰	۳۷/۵	۸	۴
۳	۳	۳۰	۱۸/۷۵	۸	۵

اطلاعات فنی مربوط به ریزشبه شامل شماره خطوط، نحوه اتصال، ظرفیت و راکتانس مرتبط با هر خط در جدول ۴-۴ نمایش داده شده است. این ریزشبه از طریق باس ۸ به شبکه اصلی متصل است. محدودیت توان مبادله شده با شبکه ۵۰ MW در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۴: اطلاعات فنی مربوط به ریزش شبکه

شماره خط	باس ابتدا	باس انتها	ظرفیت [MW]	راکتانس [pu]
۱	۱	۴	۲۵۰	۰/۰۵۶۷
۲	۴	۵	۲۵۰	۰/۰۹۲۰
۳	۵	۶	۱۵۰	۰/۱۷۰۰
۴	۳	۶	۳۰۰	۰/۰۵۸۶
۵	۶	۷	۱۵۰	۰/۱۰۰۸
۶	۷	۸	۲۵۰	۰/۰۷۲۰
۷	۸	۲	۲۵۰	۰/۰۶۲۵
۸	۸	۹	۲۵۰	۰/۱۶۱۰
۹	۹	۴	۲۵۰	۰/۰۸۵۰

۴-۲-۲ اطلاعات مرتبط با پارامترهای غیرقطعی

در این زیربخش اطلاعات مرتبط با پارامترهای غیرقطعی مانند قیمت انرژی الکتریکی و توان تولیدی ایستگاه‌های انرژی خورشیدی ارائه می‌شود. با در نظر گرفتن نرخ خروج خطوط $\lambda = \frac{1}{500 h}$ و استفاده روابط ارائه شده در فصل قبل، سناریوهای خروج خطوط و احتمال متناظر با آن‌ها تولید می‌شود. به علت محدودیت فضا، تنها بخشی از این اطلاعات نشان داده می‌شود و همچنین از ارائه اطلاعات مربوط به سناریوهای خروج خطوط و احتمال متناظر با آن‌ها خودداری شده است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های مدیریت انرژی ارائه شده، دو روز مختلف در سال انتخاب می‌شوند. در جدول ۴-۵، بخشی از اطلاعات مربوط به پیش‌بینی بازه‌ای و نقطه‌ای انجام گرفته در ساعت ۱ روز ۱۰ آگوست ۲۰۰۹ برای ۲۳ ساعت پیش رو نشان داده شده است. ذکر این نکته لازم است که مقادیر حاصل از پیش‌بینی نقطه‌ای با امید ریاضی مقادیر پیش‌بینی شده برابر است و مقادیر مرتبط با پیش‌بینی بازه‌ای مربوط به سطح اطمینان ۰/۸۵ می‌باشد. همچنین مقادیر واقعی این پارامترها در آن روز نیز ارائه گردیده است. به طور مشابه در جدول ۴-۶، بخشی از اطلاعات مربوط به پیش‌بینی بازه‌ای و

نقطه‌ای انجام‌گرفته در ساعت ۱ روز ۲۱ اکتبر ۲۰۰۹ برای ۲۳ ساعت پیش رو نشان داده شده است. سیستم مدیریت انرژی در هر ساعت از مقادیر واقعی قیمت انرژی و تولید ایستگاه‌های خورشیدی مربوط به آن ساعت و ساعات قبل از آن مطلع است و بر اساس اطلاعات بروز شده، پیش‌بینی مقادیر ساعات پیش رو را اصلاح می‌کند. به همین دلیل مقادیر کران بالا و پایین و امید ریاضی حاصل از پیش‌بینی بازه‌ای و نقطه‌ای در آن ساعت و ساعات قبل از آن با مقدار واقعی برابر است (در این جدول‌ها در ساعت ۱).

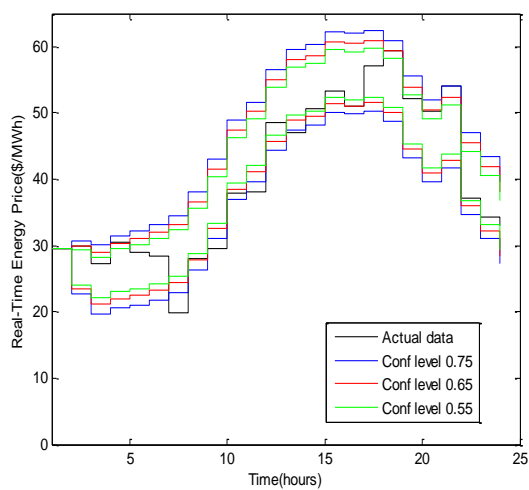
شکل ۲-۴، مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌های قیمت انرژی الکتریکی و تولید توان خورشیدی مربوط به روز ۱۰ آگوست ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد. این پیش‌بینی‌ها به دو روش بازه‌ای در پنج سطح اطمینان ۰/۱۵۵، ۰/۱۶۵، ۰/۱۷۵، ۰/۱۸۵ و ۰/۱۹۵ و نقطه‌ای انجام گرفته است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده بود، این شکل‌ها مربوط به پیش‌بینی‌های انجام‌شده در ساعت ۱ روز مورد نظر می‌باشند و در هر ساعت سیستم مدیریت انرژی با دریافت اطلاعات جدید، پیش‌بینی‌های خود را بروزرسانی می‌کنند. شکل ۳-۴ نیز مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌های قیمت انرژی الکتریکی و تولید توان خورشیدی مربوط به روز ۲۱ اکتبر ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصاویر مشخص است، قیمت انرژی الکتریکی در روز ۲۱ اکتبر دارای تغییرات ناگهانی می‌باشد که پیش‌بینی دقیق آن را مشکل می‌کند.

جدول ۴-۵: بخشی از اطلاعات مربوط به پارامترهای غیرقطعی در روز ۱۰ آگوست ۲۰۰۹

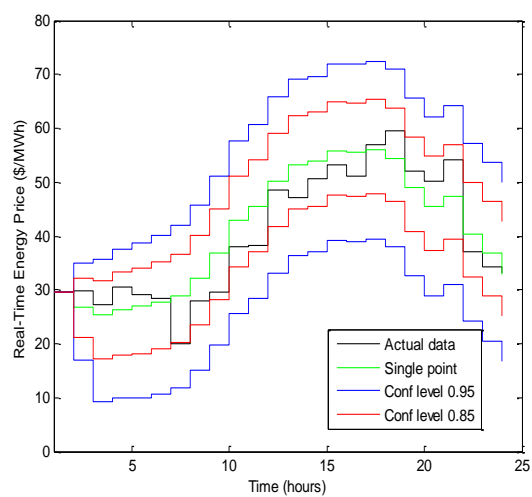
ساعت	کران پایین قیمت انرژی [S/MWh]	امید ریاضی قیمت انرژی [S/MWh]	کران بالای قیمت انرژی [S/MWh]	قیمت واقعی انرژی الکتریکی [S/MWh]	کران پایین توان خورشیدی [pu]	امید ریاضی توان خورشیدی [pu]	کران بالای توان خورشیدی [pu]	توان واقعی خورشیدی [pu]
۱	29.5	29.5	29.5	29.5	0	0	0	0
۲	21.10479	26.80709	32.1	29.88	0	0	0	0
۳	17.15	25.28294	31.7043	27.34	0	0	0	0
۴	17.81162	26.35269	33.25	30.5	0	0	0	0
۵	18.07293	26.92177	34.11636	29.05	0	0	0	0
۶	18.95935	27.79119	35.25191	28.49	0	0	0	0
۷	20.14851	28.94929	36.70636	19.91	5.78E-12	0.005681	0.0095	0
۸	23.4525	32.23358	40.23157	27.99	0.11017	0.135335	0.133389	0.11017
۹	28.24629	36.95023	45.07875	29.49	0.286923	0.34155	0.379346	0.286923
۱۰	34.25821	42.86926	51.19601	37.92	0.348824	0.395092	0.507538	0.348824
۱۱	37.03343	45.55619	54.04006	38.16	0.577712	0.612326	0.670176	0.577712
۱۲	41.74194	50.23445	58.95	48.61	0.577711	0.610801	0.684482	0.577711
۱۳	44.94162	53.33	62.27782	47.11	0.327906	0.360177	0.428302	0.327906
۱۴	45.56438	53.9	62.93741	50.74	0.413564	0.444367	0.526794	0.413564
۱۵	47.58625	55.89	65.00382	53.24	0.192892	0.245349	0.244735	0.192892
۱۶	47.28471	55.58	64.75	51.12	0.191969	0.283172	0.27638	0.191969
۱۷	47.78707	56.01	65.31885	57.02	0.327906	0.359398	0.391201	0.327906
۱۸	46.36074	54.49769	63.81971	59.46	0.088808	0.090427	0.115398	0.088808
۱۹	40.93368	49.01255	58.43349	52.16	0	2.69E-07	0.001349	0
۲۰	37.34732	45.38595	54.85166	50.29	0	0	0	0
۲۱	39.38144	47.39223	56.91	54.09	0	0	0	0
۲۲	32.46879	40.43	49.95834	37.08	0	0	0	0
۲۳	28.85728	36.72919	46.37492	34.23	0	0	0	0
۲۴	25.11	32.95	42.65226	33.03	0	0	0	0

جدول ۴-۶: بخشی از اطلاعات مربوط به پارامترهای غیرقطعی در روز ۲۱ اکتبر ۲۰۰۹

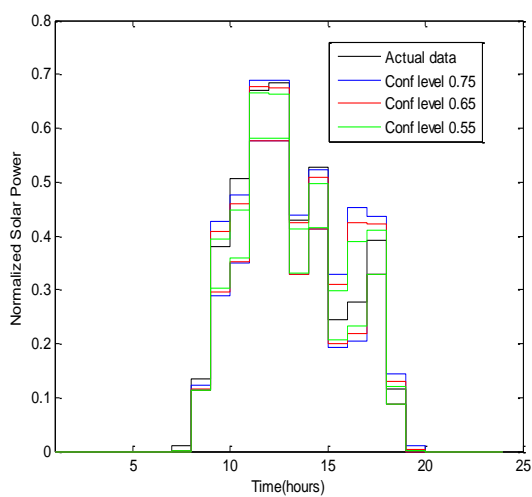
توان واقعی خورشیدی [pu]	کران بالای توان خورشیدی [pu]	امید ریاضی توان خورشیدی [pu]	کران پایین توان خورشیدی [pu]	قیمت واقعی انرژی الکتریکی [S/MWh]	کران بالای قیمت انرژی [S/MWh]	امید ریاضی قیمت انرژی [S/MWh]	کران پایین قیمت انرژی [S/MWh]	ساعت
0	0	0	0	40.86	40.86	40.86	40.86	۱
0	0	0	0	38.92	52.09154	38.32733	32.40527	۲
0	0	0	0	37.39	48.41124	34.16883	27.8622	۳
0	0	0	0	37.43	46.80489	32.34	25.86	۴
0	0	0	0	38.3	49.64596	35.26347	28.67	۵
0	0	0	0	46.22	51.66858	37.25465	30.60079	۶
0	0	0	0	59.97	66.67572	52.51	45.77997	۷
0.00905	0.048829	0	0	73.23	73.0044	59.19	52.37374	۸
0.081229	0.0626	0.062529	0	72.32	72.84419	59.09928	52.16023	۹
0.273991	0.309067	0.232159	0.203078	65.55	71.58897	58.34	51.38968	۱۰
0.358319	0.429907	0.340642	0.298438	57.35	72.91699	59.72	52.68311	۱۱
0.506322	0.571719	0.489412	0.45014	63.56	71.91795	58.8	51.69965	۱۲
0.528975	0.564622	0.485689	0.45014	127.87	69.55149	56.62476	49.4167	۱۳
0.469741	0.555586	0.478405	0.45014	83	69.71712	56.93263	49.67	۱۴
0.284177	0.331012	0.256314	0.238339	57	67.11163	54.63949	47.3	۱۵
0.090911	0.08323	0.0626	0.062493	45.52	61.62686	49.25574	41.85329	۱۶
0.009784	0.067572	0.001736	0	57.73	65.13259	52.89733	45.41662	۱۷
0.000514	0.0585	8.03E-20	0	58.32	70.78758	58.80526	51.24203	۱۸
0	0	0	0	77.22	75.45876	63.7	56.08341	۱۹
0	0	0	0	55.7	69.9922	58.3703	50.72485	۲۰
0	0	0	0	71.95	66.32949	54.79656	47.10658	۲۱
0	0	0	0	45.14	58.40585	46.94116	39.19102	۲۲
0	0	0	0	36.66	48.47752	37.11143	29.33142	۲۳
0	0	0	0	35.9	46.42838	35.16301	27.36006	۲۴



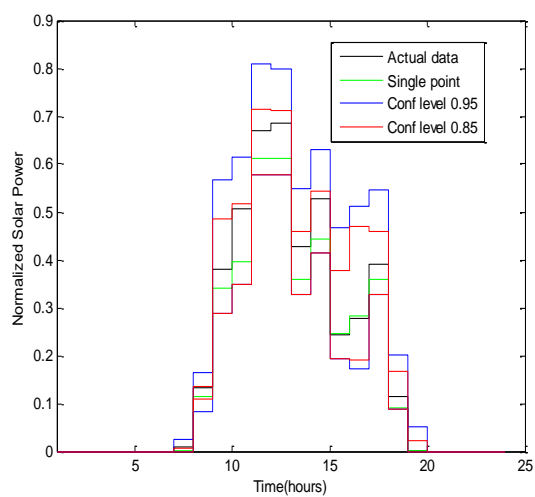
(ب)



(الف)

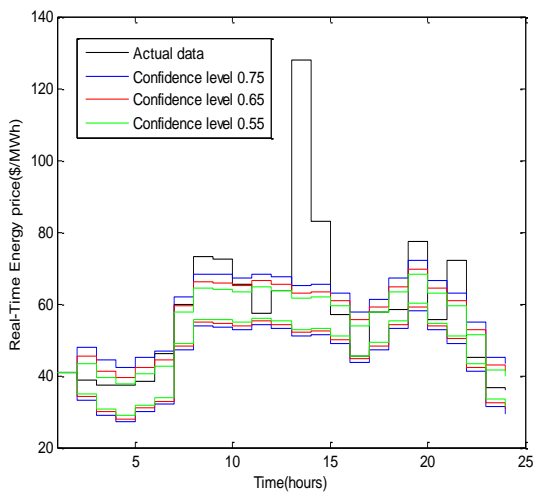


(د)

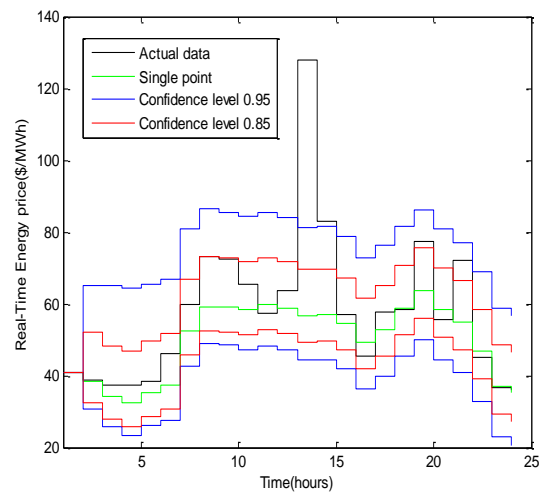


(ج)

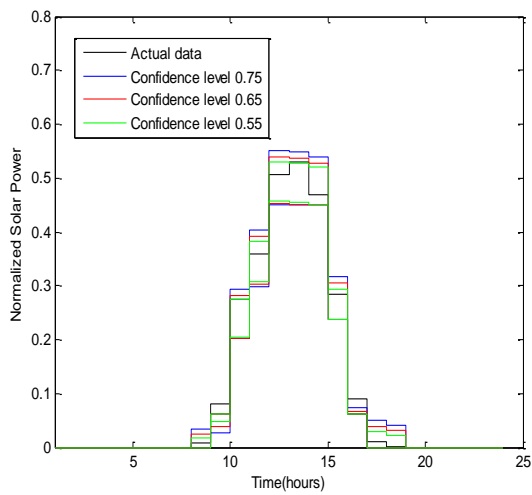
شکل ۴-۲: پیش‌بینی‌های مربوط به روز ۱۰ آگوست ۲۰۰۹ (الف و ب) قیمت انرژی الکتریکی، ج و د) تولید توان خورشیدی



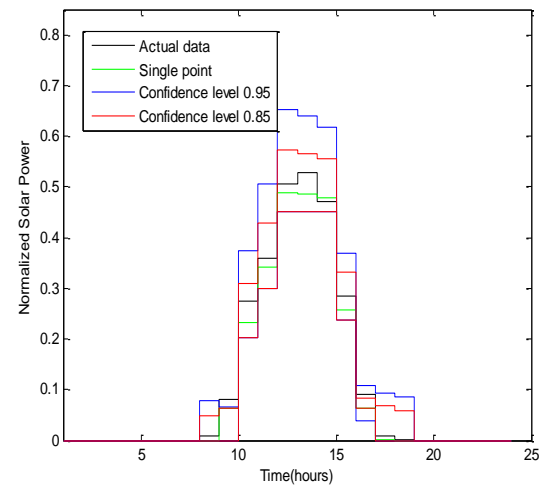
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

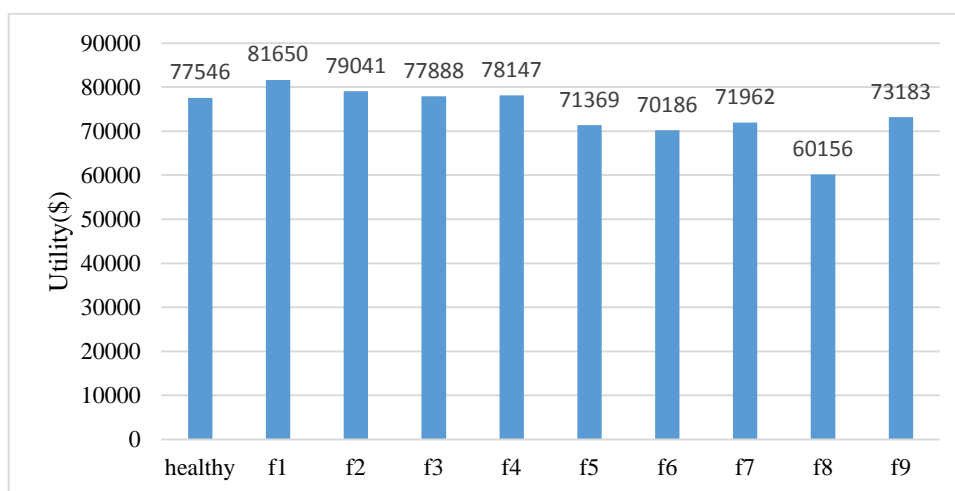
شکل ۳-۴: پیش‌بینی‌های مربوط به روز ۲۱ اکتبر ۲۰۰۹ (الف و ب) قیمت انرژی الکتریکی، ج و د) تولید توان خورشیدی

۳-۴ نتایج شبیه‌سازی

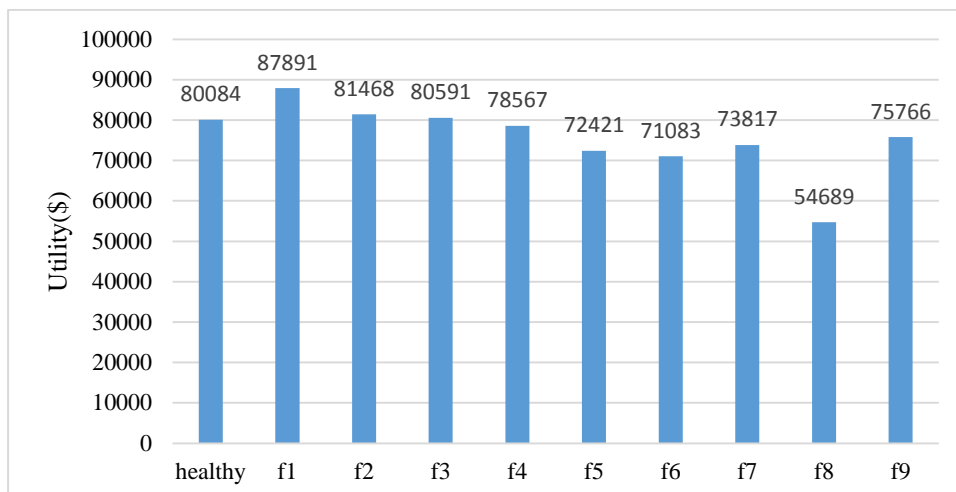
وقوع پیشامدهای گوناگون می‌تواند وضعیت بهره‌برداری و سود نیروگاه مجازی را تحت تأثیر قرار دهد. این پیشامدها می‌توانند شامل خرابی و خروج خطوط انتقال انرژی و منابع تأمین انرژی باشد، در این شبیه‌سازی‌ها، از خرابی و خروج منابع تأمین انرژی صرف‌نظر می‌شود.

قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی دارای ماهیت بسیار متغیر می‌باشد و پیش‌بینی دقیق آن دشوار و پرهزینه می‌باشد. به همین علت، دو روز مختلف در سال که قیمت انرژی دارای رفتار متفاوتی می‌باشد، انتخاب می‌شود. قیمت انرژی در روز ۱۰ آگوست با دقت خوبی پیش‌بینی شده است، اما در روز ۲۱ اکتبر قیمت انرژی دارای تغییرات ناگهانی است که موجب می‌شود پیش‌بینی آن از دقت بالایی برخوردار نباشد. هدف از این کار بررسی عملکرد الگوریتم‌های مدیریت انرژی ارائه‌شده در شرایط مختلف و نزدیک به واقعیت می‌باشد.

به منظور مشاهده میزان و نحوه اثرگذاری پیشامدها بر سود نیروگاه مجازی، اثر وقوع پیشامدهای مختلف در ساعت ۶ دو روز مورد مطالعه در شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. با توجه به ضابطه وقوع $n - 1$ پیشامد، در شبیه‌سازی‌ها، امکان وقوع خرابی تنها برای یکی از خطوط وجود دارد.



شکل ۴-۴: اثر خروج خطوط ریزشکده در ساعت ۶ بر سود نیروگاه مجازی در روز ۱۰ آگوست در مدل قطعی

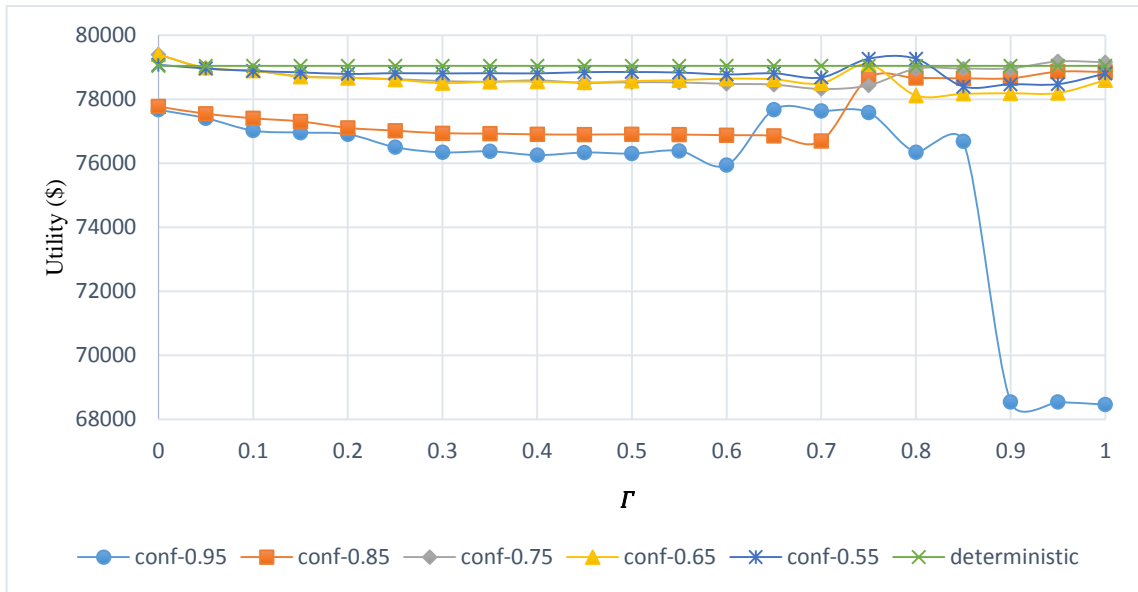


شکل ۴-۵: اثر خروج خطوط ریزشبهه در ساعت ۶ بر سود نیروگاه مجازی در روز ۲۱ اکتبر در مدل قطعی

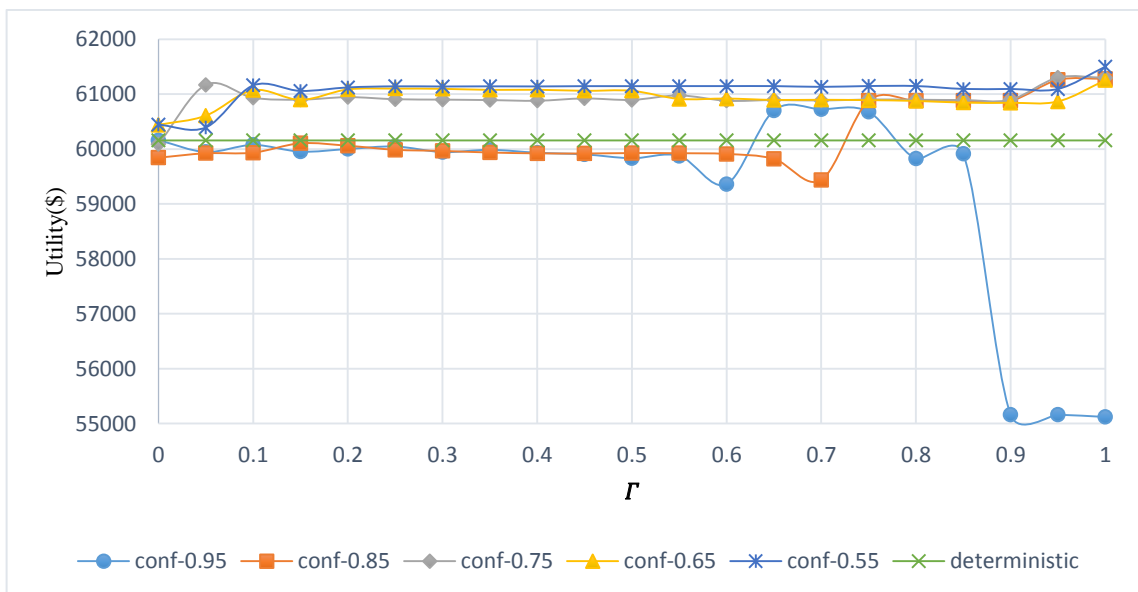
در هر ساعت، دو حالت امکان‌پذیر است، حالت اول این است که هیچ‌گونه خطایی رخ ندهد و وضعیت شبکه سالم باشد و حالت دوم دربرگیرنده وضعیت خرابی هر یک از خطوط می‌باشد و با توجه به اینکه ریزشبهه مورد مطالعه دارای ۹ خط انتقال انرژی می‌باشد، اثر خروج خط‌های ۱ تا ۹ در کنار وضعیت سالم شبکه نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که این خروج هر یک از خطوط اثر متفاوتی بر سود نیروگاه مجازی می‌گذارند، و در حالی که برخی از پیشامدها سود را به شدت کاهش می‌دهد، برخی دیگر منجر به افزایش سود شبکه می‌شود. از این خاصیت که ناشی از محدودیت‌های شبکه و پخش توان می‌باشد در کلیدزنی خطوط و بازآرایی سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود که خارج از بحث این تحقیق می‌باشد. همچنین نتایج مؤید این نکته است که تغییرات ناگهانی قیمت انرژی میزان تأثیر وقوع پیشامد بر نیروگاه مجازی را افزایش می‌دهد.

به منظور بررسی اثر وقوع پیشامد، سطح اطمینان و درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی (Γ^{MG}) بر سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم، خروج خط‌های ۲ و ۸ در ساعت ۶ و وضعیت سالم ریزشبهه انتخاب شده‌اند. درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی (Γ^{MG}) در هر ساعت برنامه‌ریزی مقداری بین $[0, 24 - t]$ می‌باشد، این مقدار در ضرایبی با گام‌های ۰/۰۵ در بازه $[0, 1]$ تغییر داده می‌شود، این ضرایب تعیین می‌کنند که اثر چند درصد از پارامترهای غیرقطعی در

برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند. هرچه این ضریب مقدار بیشتری اختیار شود، برنامه‌ریزی محافظه-کارانه‌تر خواهد بود (در این شکل‌ها $\text{conf}=0.95$ نشان‌دهنده مدل مقاوم با سطح اطمینان 0.95 است).



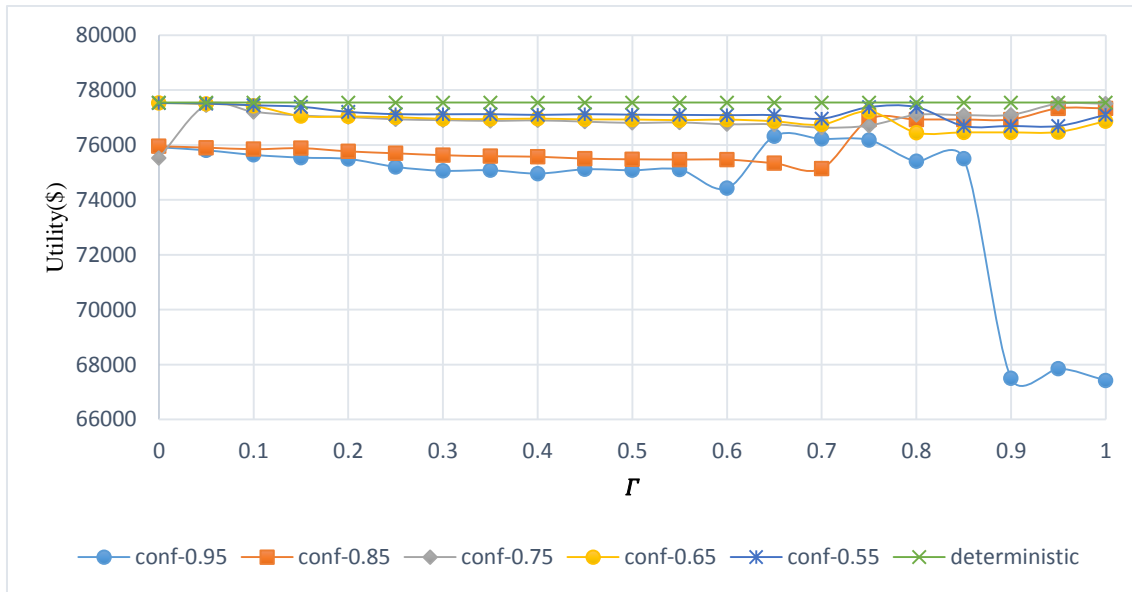
شکل ۴-۶: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازااء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست و مقادیر مختلف Γ^{MG}



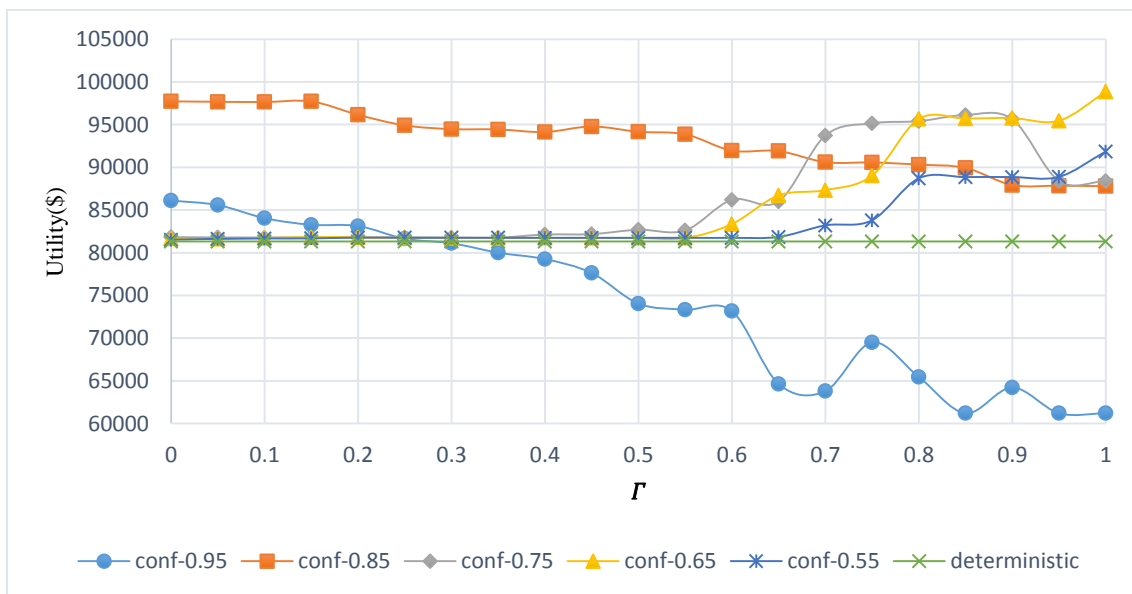
شکل ۴-۷: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازااء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست و مقادیر مختلف Γ^{MG}

همچنین برای مقایسه، سود نیروگاه مجازی در مدل قطعی (استفاده از مقادیر پیش‌بینی نقطه‌ای برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی) نیز در شرایط یکسان محاسبه شده است. نتایج بررسی‌ها در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۱ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها درجه مقاومت نسبت به تغییر

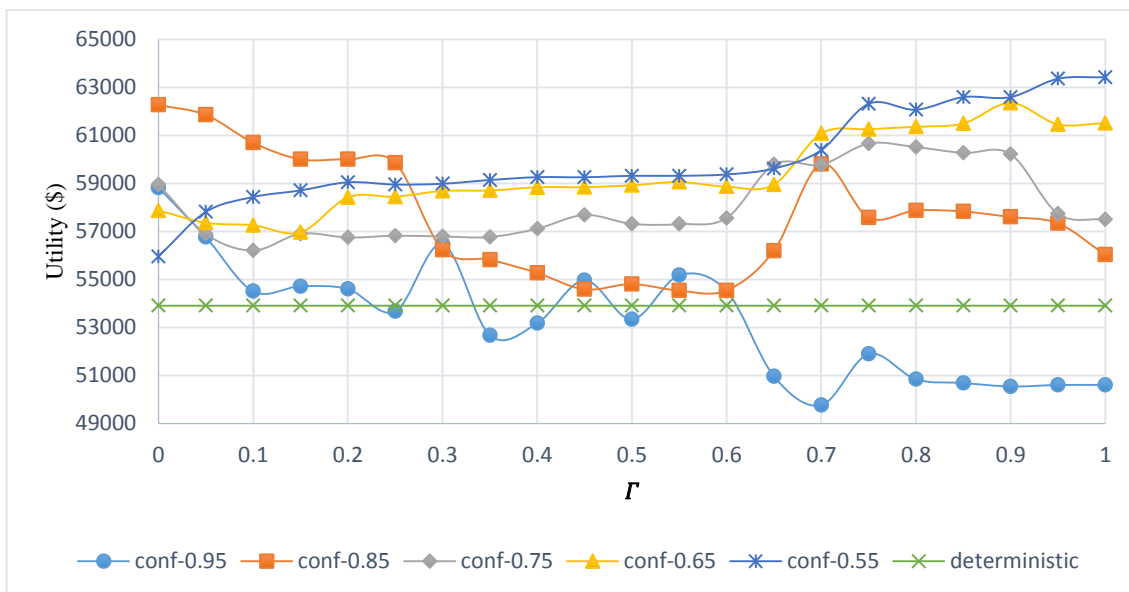
تولید خورشیدی (Γ^{SO}) برابر ۱ در نظر گرفته شده است. تفاوت موجود میان سود نیروگاه مجازی در خطاهای رخ داده در هر یک از دو روز به خوبی اهمیت وقوع پیشامد را نشان می‌دهد، نتایج تغییرات



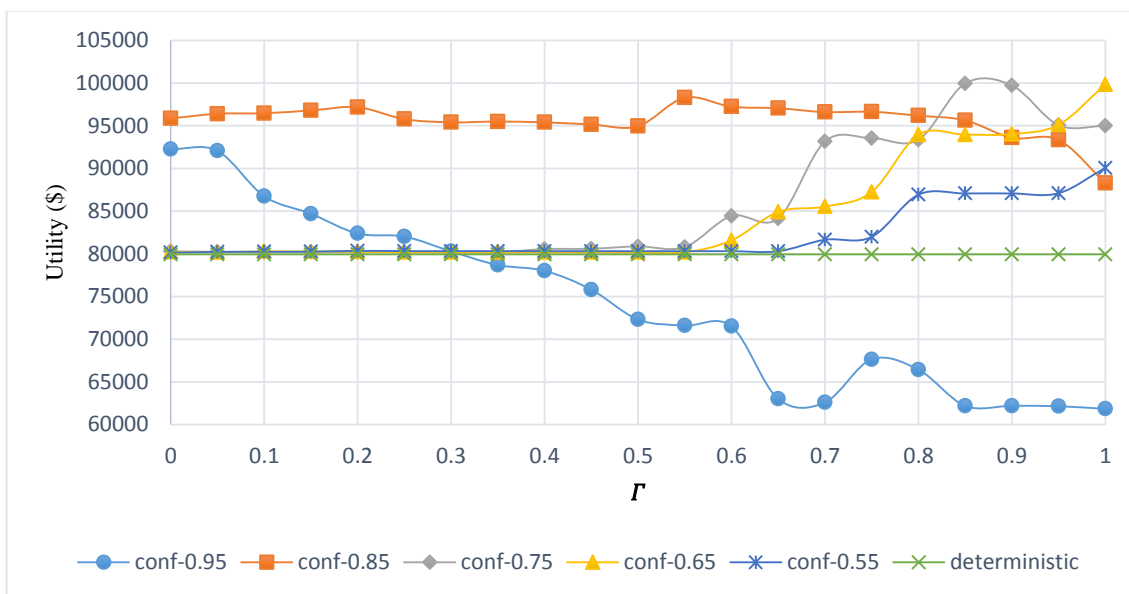
شکل ۴-۸: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء وضعیت سالم ریزش‌بکه روز ۱۰ آگوست و مقادیر مختلف Γ^{MG}



شکل ۴-۹: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر و مقادیر مختلف Γ^{MG}



شکل ۴-۱۰: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازا خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر و مقادیر مختلف Γ^{MG}



شکل ۴-۱۱: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم بازا وضعیت سالم روز ۲۱ اکتبر و مقادیر مختلف Γ^{MG}

۲۰-۳۵٪ را نشان می‌دهند که رقمی بسیار قابل توجه می‌باشد. حساسیت مدل مقاوم به تغییر مقدار درجه مقاومت در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۱ نشان داده شده است که با توجه به تغییرات ناگهانی قیمت انرژی، این حساسیت افزایش می‌یابد. شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸ مربوط به روزی هستند که از پیش-بینی مناسب قیمت انرژی برخوردار می‌باشد. در این وضعیت، با افزایش سطح اطمینان، حساسیت سیستم مدیریت انرژی به درجه مقاومت افزایش می‌یابد. در سطوح اطمینان پایین‌تر در هر سه شکل

میزان تغییر سود کم و تقریباً ثابت می‌باشد که به معنای حساسیت کمتر نسبت به تغییر Γ^{MG} می‌باشد. در سطح اطمینان بسیار بالا (سطح اطمینان ۰/۹۵)، با افزایش پارامتر Γ^{MG} نزدیک به ۱، سود شدیداً کاهش می‌یابد. زیرا این حالت محافظه‌کارترین حالت ممکن برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی می‌باشد.

از سوی دیگر شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۱ حساسیت شدید سود را نسبت به تغییرات Γ^{MG} در وضعیتی که قیمت انرژی دارای تغییرات زیاد و پیش‌بینی نامناسب می‌باشد، نشان می‌دهد. در این وضعیت نیز مشابه روز دیگر، کاهش شدید سود در حالت‌های محافظه‌کارانه (سطوح اطمینان بالاتر) رخ می‌دهد و دامنه نوسان سود نیروگاه مجازی در سطوح اطمینان پایین‌تر کم‌تر می‌باشد. با دقت بر اثر درجه مقاومت در یک سطح اطمینان مشخص بر سود نیروگاه مجازی، درمی‌یابیم با افزایش درصد در نظر گرفتن بدترین حالت‌های قابل رخداد لزوماً سود نیروگاه مجازی کاهش یا افزایش نمی‌یابد و از یک روند مشخص پیروی نمی‌کند. همچنین با دقت بر اثر سطح اطمینان در یک درجه مقاومت مشخص درمی‌یابیم که در این وضعیت نیز لزوماً افزایش یا کاهش سطح اطمینان منجر به افزایش یا کاهش سود نیروگاه مجازی نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهند هیچ الزامی وجود ندارد که یک سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب برای یک پیشامد در یک روز خاص، برای پیشامد در روز دیگر نیز مناسب باشد.

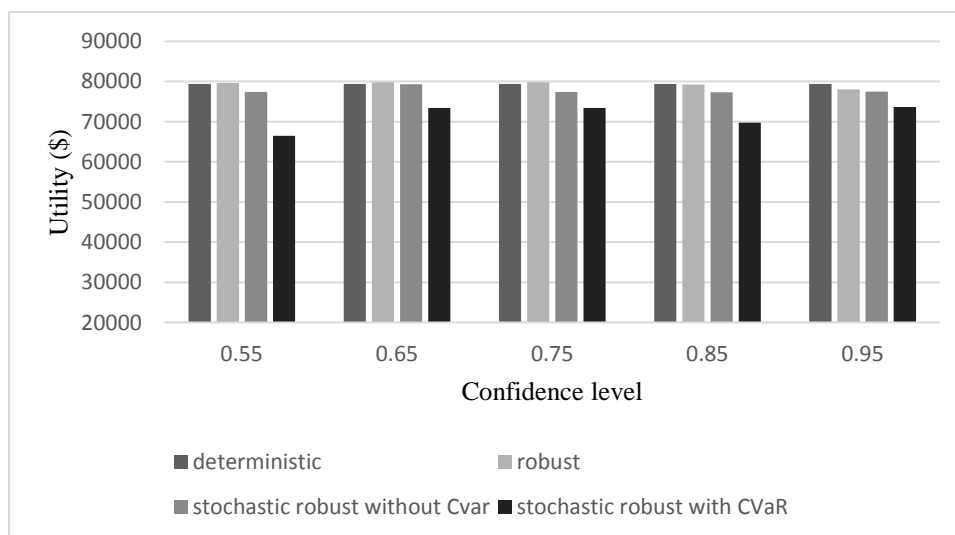
برای مقایسه، نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل قطعی در وضعیت‌های مشابه (وقوع پیشامدهای یکسان) در شکل‌ها نمایش داده شده است که نتایج، عملکرد مناسب مدل مقاوم را تأیید می‌کند. با توجه به شکل‌های مربوط به روز ۱۰ آگوست، نتایج نشان می‌دهند در وضعیتی که قیمت انرژی دارای تغییرات زیاد و ناگهانی نیست، هرچند که مدل مقاوم توانسته است در بعضی حالت‌ها، سود بیشتری به دست آورد، عملکرد دو برنامه تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. زیرا در این حالت مقادیر حاصل از پیش‌بینی نقطه‌ای در برنامه قطعی نزدیک به مقادیر واقعی می‌باشند. اما نتایج شکل‌های مربوط به روز

۲۱ اکتبر نشان می‌دهند در شرایطی که قیمت انرژی الکتریکی تغییرات ناگهانی را تجربه می‌کند، عملکرد مدل مقاوم چشمگیر است به گونه‌ای که در اکثر وضعیت‌ها سود بیش‌تری نسبت به مدل قطعی به دست می‌آورد. نتایج نشان می‌دهند که انتخاب سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب در مدل مقاوم می‌تواند سود نیروگاه مجازی را در وضعیت‌های خروج خط ۲، خروج خط ۸ و سالم شبکه به ترتیب تا میزان ۲۱٪، ۱۷٪ و ۲۴/۸٪ افزایش دهد. به بیان دیگر، تا این میزان ضرر ناشی از وقوع تغییر ناگهانی قیمت و همچنین ضرر وقوع پیشامد در این وضعیت را کاهش دهد. میزان حداکثر افزایش سود مدل مقاوم نسبت به مدل قطعی در وضعیت‌ها و سطوح اطمینان متفاوت در جدول ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۷: خلاصه نتایج مقایسه مدل‌های مقاوم و قطعی

پیشامد	نوع تغییر	سطح اطمینان ۰/۹۵	سطح اطمینان ۰/۸۵	سطح اطمینان ۰/۷۵	سطح اطمینان ۰/۶۵	سطح اطمینان ۰/۵۵
خروج خط ۲ ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست	میزان تغییر	٪۱۳	٪۳	٪۱۴	٪۱۶	٪۱۱
	افزایش سود	-۱۷٪	-۰/۲٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۳٪
خروج خط ۸ ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست	میزان تغییر	٪۱۰	٪۱۸	۲٪	٪۱۳	٪۱۸
	افزایش سود	٪۱	۳/۱٪	۱/۹٪	۱/۸٪	۲/۲٪
وضعیت سالم ریزش‌بکه ۱۰ آگوست	میزان تغییر	۱۳٪	۲/۹٪	۲/۶٪	۱/۴٪	۱/۰۵٪
	افزایش سود	-۱/۵٪	-۰/۲٪	-۰/۰۵٪	-۰/۲٪	-۰/۰۲٪
خروج خط ۲ ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر	میزان تغییر	٪۴۰	۱۱/۳٪	۱۷/۵٪	٪۲۱	۱۲/۵٪
	افزایش سود	۵/۹٪	۲۰٪	۱۸٪	٪۲۱	۱۳٪
خروج خط ۸ ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر	میزان تغییر	۱۸٪	۱۴٪	۸٪	۹٪	۱۳٪
	افزایش سود	٪۹	۱۵٪	۱۲٪	٪۱۵	۱۷٪
وضعیت سالم ریزش‌بکه ۲۱ اکتبر	میزان تغییر	٪۴۹	۱۱٪	۲۵٪	۲۴/۵٪	٪۱۲
	افزایش سود	٪۱۵	۲۳٪	٪۲۴	۲۴/۸٪	۱۲/۶٪

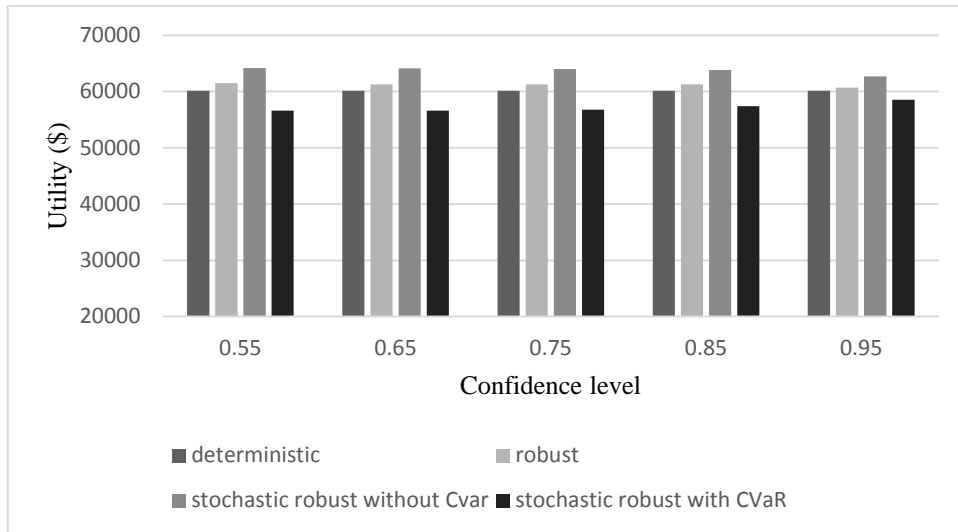
پس از اجرای مدل مقاوم با درجه‌های مقاومت متفاوت نسبت به تغییر انرژی الکتریکی در وضعیت‌های مختلف، مقادیری از Γ^{MG} که منجر به بیش‌ترین میزان سود در این مدل می‌شود، مشخص می‌شوند. با این پیش‌فرض که این مقادیر در مدل مقاوم تصادفی نیز بهترین عملکرد را داشته باشند، در شبیه‌سازی‌های بعدی Γ^{MG} برابر با این مقادیر اختیار می‌شوند. به منظور بررسی عملکرد مدل مقاوم تصادفی، و همچنین اثر شاخص CVaR بر سود نیروگاه مجازی، شبیه‌سازی‌ها با پنج سطح اطمینان متفاوت، در سه وضعیت مختلف ریزش‌بکه و در دو حالت بدون در نظر گرفتن شاخص CVaR ($\beta = 0$) و با شاخص CVaR (با سطح اطمینان بسیار بالا $\beta = 1.5, \zeta = 0.99$) در دو روز ۱۰ آگوست و ۲۱ اکتبر انجام می‌شوند که در شکل‌ها و جداول زیر نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازا خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست

جدول ۴-۸: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازا خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد)

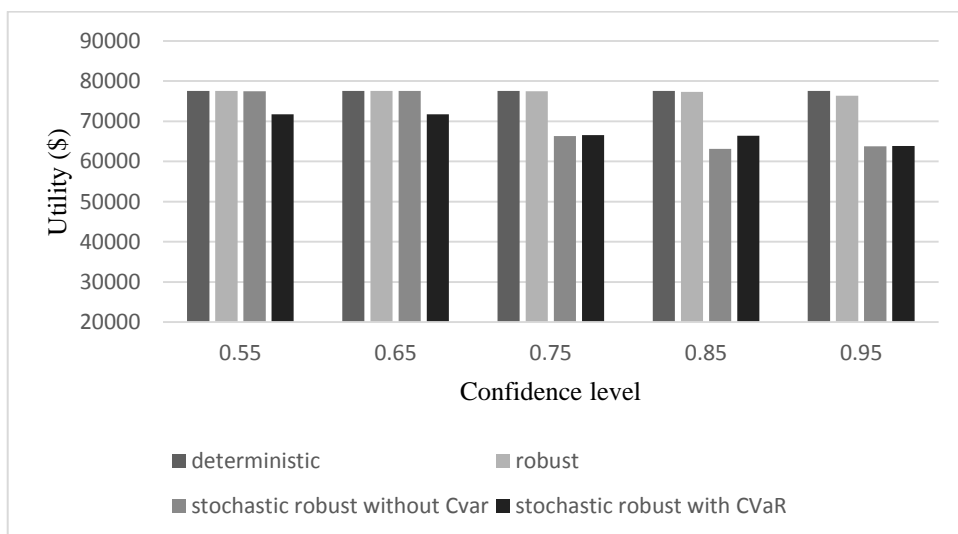
سطح اطمینان	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵
مدل مقاوم	۰/۳	۰/۵	۰/۵	-۰/۲	-۱/۷
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=0$	-۲/۴۹	-۰/۰۸	-۲/۵۳	-۲/۶۷	-۲/۴
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=1.5$	-۱۶/۳۱	-۷/۵۶	-۷/۵۶	-۱۲/۱۹	-۷/۲۵



شکل ۴-۱۳: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازااء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست

جدول ۴-۹: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازااء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد)

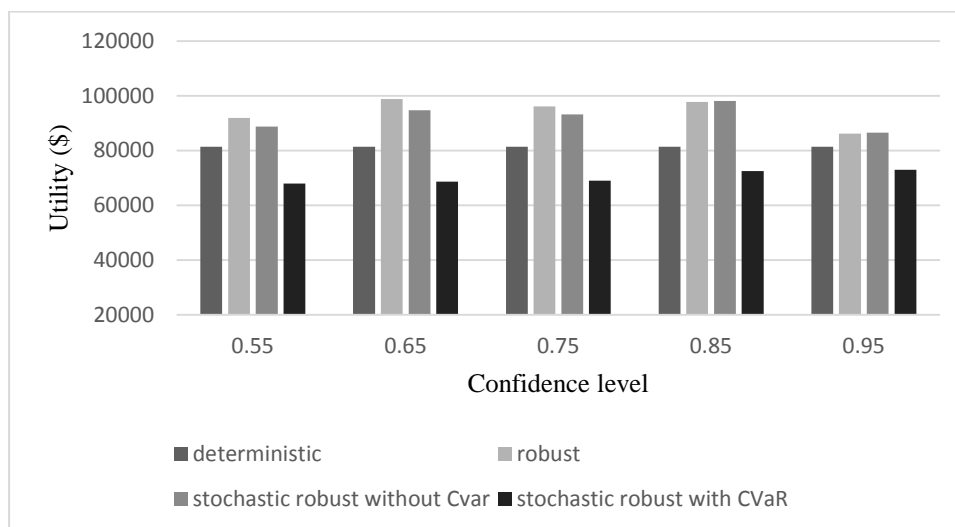
سطح اطمینان	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵
مدل مقاوم	۲/۲	۱/۸	۱/۹	۳/۱	۰/۹۴
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=0$	۶/۶	۶/۵۵	۶/۴	۶/۱	۴/۲
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=1.5$	-۵/۸۷	-۵/۸۵	-۵/۶	-۴/۵	-۲/۶



شکل ۴-۱۴: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازااء وضعیت سالم ریزش‌بکه در روز ۱۰ آگوست

جدول ۴-۱۰: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازا خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد)

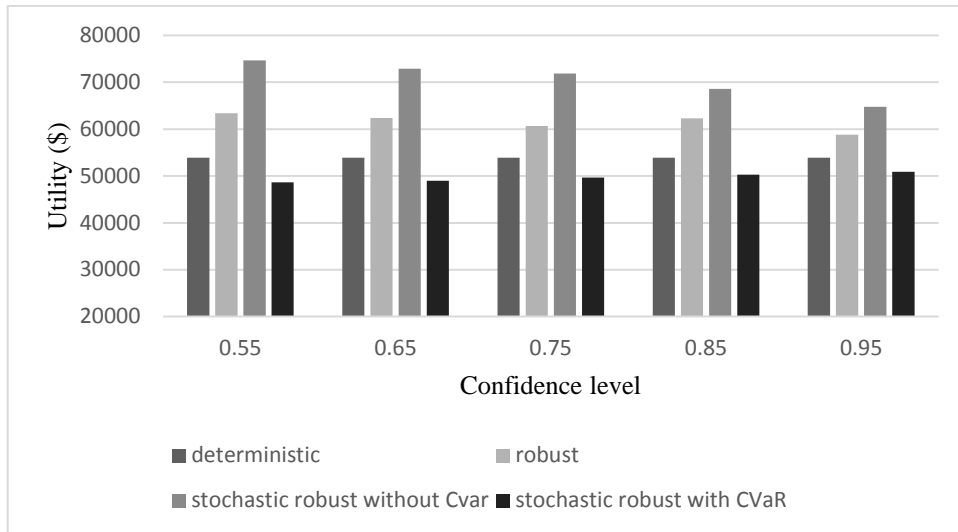
سطح اطمینان	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۵۵
مدل مقاوم	-۱/۵	-۰/۲	-۰/۰۵	-۰/۲	-۰/۰۲
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=0$	-۱۷/۷	-۱۸/۵	-۱۴/۵	-۰/۰۳	-۰/۰۶
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=1.5$	-۱۷/۷	-۱۴/۳	-۱۴/۱	-۷/۵	-۷/۵



شکل ۴-۱۵: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازا خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر

جدول ۴-۱۱: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازا خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد)

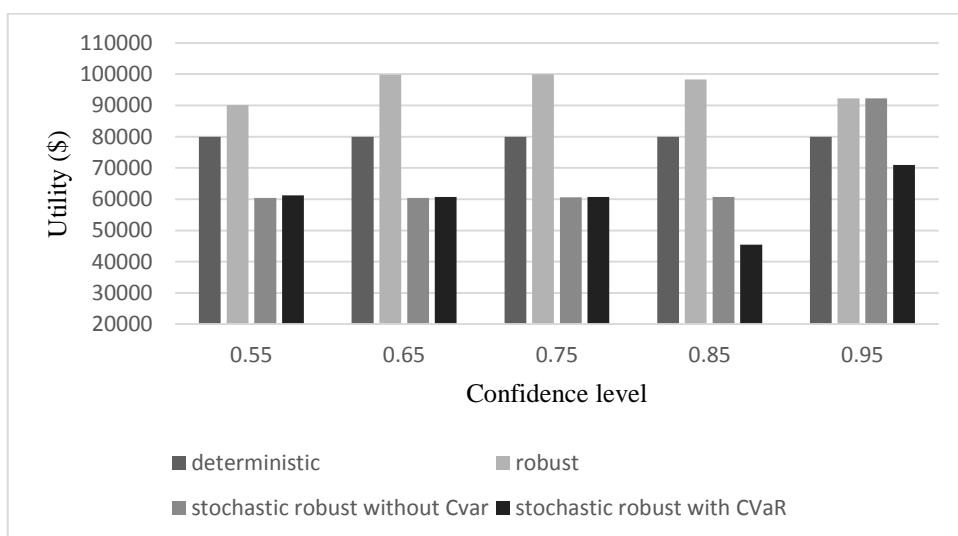
سطح اطمینان	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۵۵
مدل مقاوم	۵/۹	۲۰/۱۷	۱۸/۲۱	۲۱/۵۶	۱۲/۹۵
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=0$	۶/۳۶	۲۰/۶	۱۴/۶	۱۶/۵۲	۹/۰۵
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=1.5$	-۱۰/۲۷	-۱۰/۸۵	-۱۵/۱۹	-۱۵/۵۷	-۱۶/۴۷



شکل ۴-۱۶: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازااء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر

جدول ۴-۱۲: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازااء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد)

سطح اطمینان	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵
مدل مقاوم	۱۷/۶۴	۱۵/۶۶	۱۲/۵۳	۱۵/۵	۹/۱۱
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=0$	۳۸/۵	۳۵/۲۱	۳۳/۳۴	۲۷/۱۹	۲۰/۱۵
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=1.5$	-۹/۷۱	-۹/۱۶	-۷/۹۲	-۶/۷۲	-۵/۵۶



شکل ۴-۱۷: سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی بازااء وضعیت سالم ریزشیکه روز ۲۱ اکتبر

جدول ۴-۱۳: میزان افزایش سود مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی نسبت به مدل قطعی بازا خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست (برحسب درصد)

سطح اطمینان	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۵۵
مدل مقاوم	۱۵/۴۱	۲۲/۹۵	۲۵/۰۲	۲۴/۸۸	۱۲/۶۶
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=0$	۱۵/۴۱	-۲۴/۰۸	-۲۴/۱۵	-۲۴/۴۵	-۲۴/۴۳
مدل مقاوم تصادفی با $\beta=1.5$	-۱۱/۲۵	-۴۳/۱۷	-۲۴/۰۱	-۲۴/۰۷	-۲۳/۳۷

با دقت در شکل‌های ۴-۱۲ تا ۴-۱۷ کاهش شدید سود بر اثر در نظر گرفتن شاخص CVaR مشاهده می‌شود. زیرا با در نظر گرفتن این شاخص، تأثیر سناریوهایی که دارای سود کم می‌باشند بر تابع هدف، به طور محسوسی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که اتخاذ یک سیاست بسیار محافظه‌کارانه و به دور از ریسک‌پذیری می‌تواند موجب کاهش شدید سود شود، اما به‌رحال عملکرد ایمن نیروگاه مجازی تضمین شده است.

همان‌طور که قبلاً هم مشاهده شده بود، به صورت کلی عملکرد مناسب مدل مقاوم در هر دو روز ۱۰ آگوست و ۲۱ اکتبر مورد توجه می‌باشد. مزیت بارز مدل مقاوم تصادفی در هنگام خروج خط ۸ در هر دو حالتی است که قیمت انرژی دارای تغییرات عادی و ناگهانی می‌باشد. در این وضعیت مدل مقاوم تصادفی توانسته است که از سایر مدل‌ها سود بیشتری به دست می‌آورد. همچنین در وضعیت خروج خط ۲ در روز ۲۱ اکتبر نیز سود حاصل از آن از مدل قطعی بیش‌تر و نزدیک به سود مدل مقاوم می‌باشد. اما به جز در یک مورد در تمامی وضعیت‌های سالم شبکه، کمترین میزان سود، در مقایسه با سایر مدل‌ها را به دنبال خواهد داشت. میزان افزایش سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم تصادفی در مقایسه با سایر مدل‌ها در وضعیت‌ها و سطوح اطمینان مختلف در جدول‌های ۴-۸ تا ۴-۱۳ آورده شده است. با توجه به آن به صورت کلی می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که مدل مقاوم تصادفی مناسب‌ترین مدل در هر دو روز، هنگام رخداد خطای مهمی است که موجب کاهش سود

نیروگاه مجازی می‌شود و در این وضعیت نسبت به سایر مدل‌ها سود بیشتری عاید نیروگاه مجازی می‌کند. عملکرد این مدل در هنگام تغییرات ناگهانی قیمت انرژی و خروج خط ۸ به قدری مؤثر و درخشان می‌باشد که بازار سطوح اطمینان متفاوت، میزان سود نیروگاه مجازی نسبت به مدل قطعی ۲۰-۳۸٪ افزایش می‌یابد، یا به عبارت دیگر، به همین میزان از ضرر ناشی وقوع پیشامد و تغییر ناگهانی قیمت انرژی کاسته می‌شود.

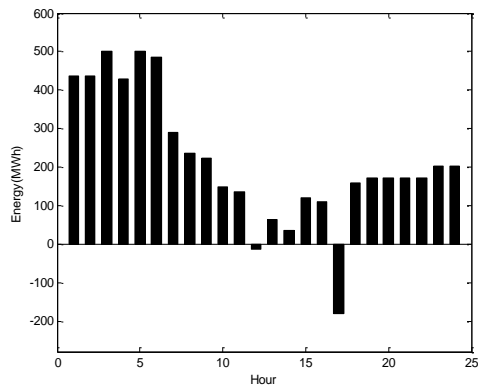
شبیه‌سازی‌ها آشکار می‌سازد که الزاماً یک سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب برای یک پیشامد در یک روز خاص برای پیشامد دیگر نیز مناسب نیست و از طرف دیگر یک تفاوت عمده میان مدل مقاوم تصادفی و سایر مدل‌ها، در زمان و نوع در نظر گرفتن پیشامدها است. مدل‌های مقاوم قطعی تنها به ابزار پایش پیشامد مجهز هستند و پس از وقوع آن برای پیشامد رخ داده اقدامات مقتضی را انجام می‌دهند، اما مدل مقاوم تصادفی علاوه بر اختیار داشتن آن ابزار، در هنگام تصمیم‌گیری امکان وقوع همه پیشامدها را قبل از وقوع آن‌ها در نظر می‌گیرد و تصمیمات را به گونه‌ای اتخاذ می‌کند که در صورت وقوع هر یک از پیشامدها، مشکلی (مانند انحراف از میزان توان تبدیلی توافق شده با شبکه اصلی و ایجاد عدم تعادل در بازار) در هنگام بهره‌برداری از نیروگاه مجازی رخ ندهد. پس در واقع Γ^{MG} باید به گونه‌ای انتخاب شود که برای همه پیشامدهای ممکن مناسب باشد و این نکته در پیش‌فرض انجام‌گرفته رعایت نشده است و این پیش‌فرض همواره صحیح نیست.

در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ انرژی توافق شده برای مبادله با شبکه اصلی در مرحله تصمیم‌گیری در وضعیت وقوع پیشامد خروج خط ۸ در ساعت ۶ در این دو روز نمایش داده شده است. سطح اطمینان ۰/۸۵ برای مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی انتخاب و $\Gamma^{MG} = 0$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود، به صورت کلی در همه مدل‌ها، نیروگاه مجازی در ابتدای روز که قیمت انرژی الکتریکی پایین می‌باشد، به خرید انرژی از شبکه اصلی اقدام می‌کند، سپس در ساعات میانی روز که قیمت انرژی مقدار بالایی می‌باشد و تولید انرژی خورشیدی صورت

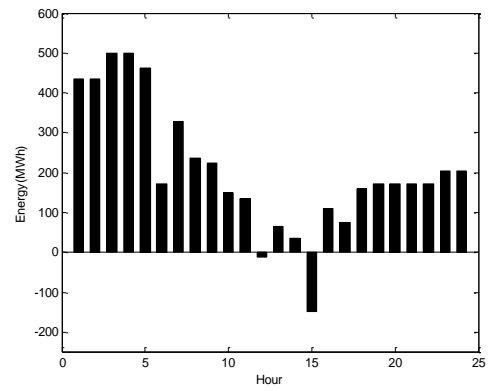
می‌گیرد، نیروگاه مجازی با استفاده از تولید خورشیدی، کاهش میزان مصرف، آزادسازی انرژی ذخیره- شده در واحدهای ذخیره، میزان انرژی خرید شده از شبکه اصلی را کاهش می‌دهد و در بعضی ساعات به آن انرژی می‌فروشد.

در ساعات انتهایی روز، قیمت نسبتاً بالای انرژی موجب می‌شود که نیروگاه مجازی به میزان کمتری نسبت به ساعات ابتدایی، از شبکه اصلی توان خریداری نماید. نکته موردتوجه در این شکل، میزان انرژی توافق شده با شبکه در ساعت وقوع پیشامد می‌باشد. در مدل مقاوم تصادفی با توجه به پیش‌بینی وقوع پیشامد میزان انرژی مبادله‌ای به گونه‌ای توافق می‌شود که در هنگام توزیع توان، انحرافی در قرارداد رخ ندهد، با توجه به وقوع پیشامد، مدل‌های مقاوم و قطعی به ترتیب به میزان ۳ و ۴۴ مگاوات ساعت از انرژی توافق شده انحراف داشته‌اند و بهره‌بردار شبکه اصلی باید با امکاناتی که در اختیار دارد این عدم تعادل ایجادشده را مدیریت نماید. همچنین مدل مقاوم تصادفی این کاهش خرید در ساعت وقوع پیشامد را با افزایش خرید در ساعت بعد از آن جبران می‌کند.

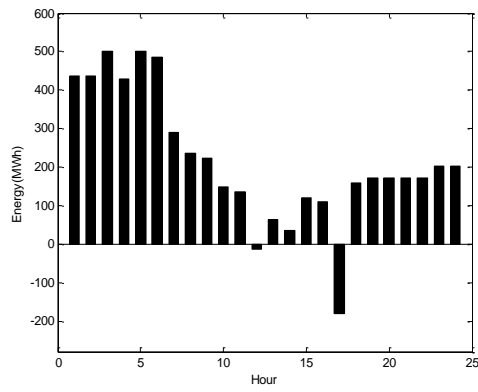
مشابه این روند در روز ۲۱ اکتبر نیز دیده می‌شود، با این تفاوت که مدل قطعی به دلیل عدم پیش‌بینی مناسب تغییر ناگهانی قیمت انرژی در ساعت ۱۲، نتوانسته است در هیچ ساعتی انرژی الکتریکی را به شبکه اصلی بفروشد، در حالی که مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی در ساعت ۱۲، حدود ۸۰ مگاوات ساعت انرژی به شبکه اصلی می‌فروشند. همچنین بار دیگر به میزان ۵ مگاوات ساعت در مدل قطعی انحراف از قرارداد مشاهده می‌شود ولی در سایر مدل‌ها انحرافی رخ نمی‌دهد.



(ب)

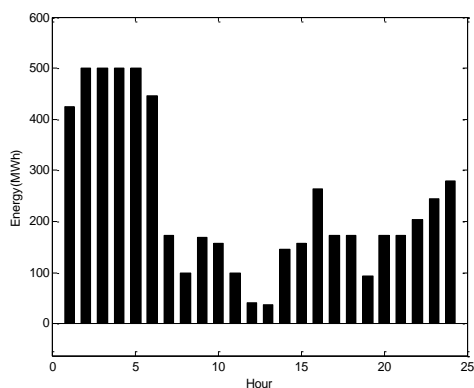


(الف)

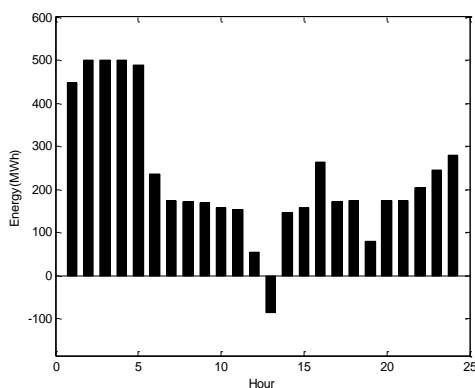


(ج)

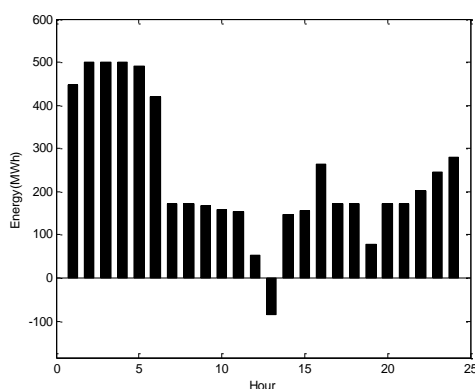
شکل ۴-۱۸: انرژی توافقی شده برای مبادله با شبکه اصلی بازا خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست، الف) مدل مقاوم تصادفی، ب) مدل قطعی، ج) مدل مقاوم



(ب)



(الف)

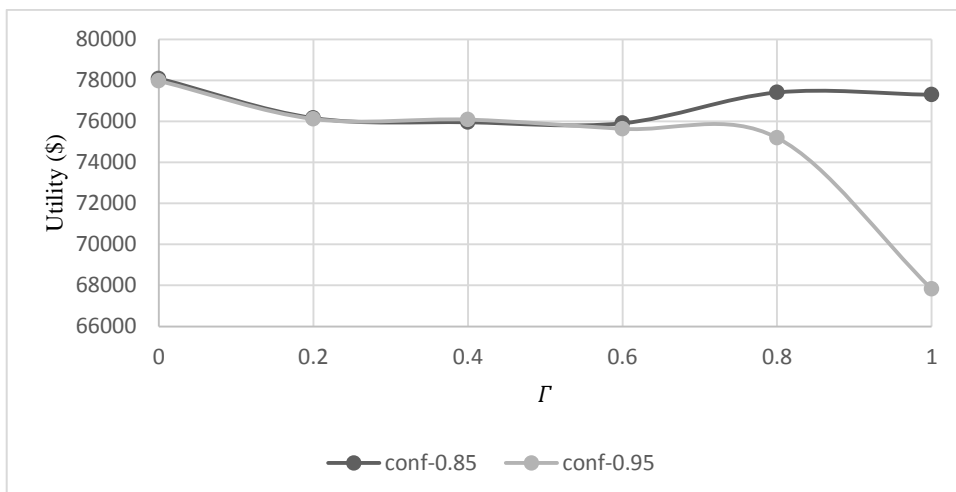


(ج)

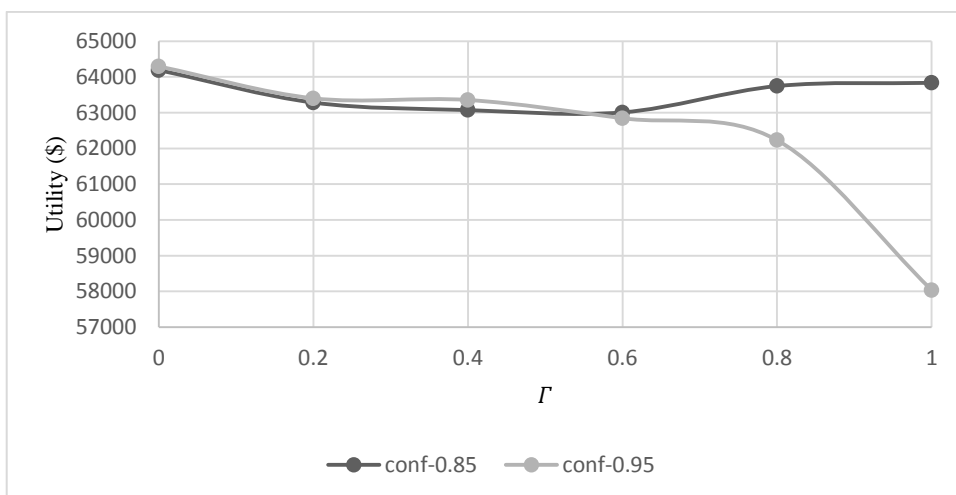
شکل ۴-۱۹: انرژی توافقی شده برای مبادله با شبکه اصلی بازا خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر، الف) مدل مقاوم تصادفی، ب) مدل قطعی، ج) مدل مقاوم

به منظور بررسی اثر درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی (Γ^{MG}) بر مدل مقاوم تصادفی، شبیه‌سازی جدیدی در وضعیت‌های مختلف ریزشبکه در دو روز ۱۰ آگوست و ۲۱ اکتبر با دو سطح اطمینان ۰/۸۵ و ۰/۹۵ انجام می‌شود. همچنین در مدل مقاوم تصادفی از اثر شاخص CVaR صرف نظر می‌شود ($\beta = 0$).

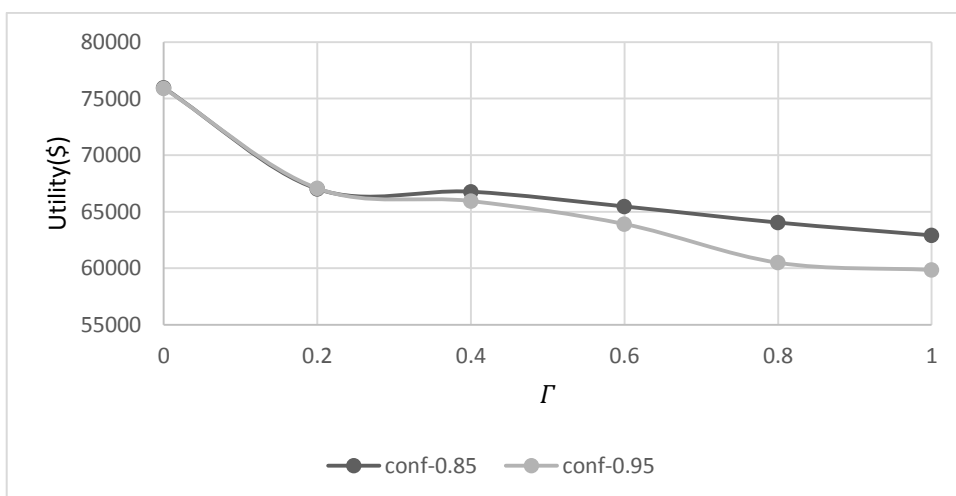
نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۴-۲۰ تا ۴-۲۵، اثرگذاری درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی (Γ^{MG}) بر مدل مقاوم تصادفی را تأیید می‌کنند.



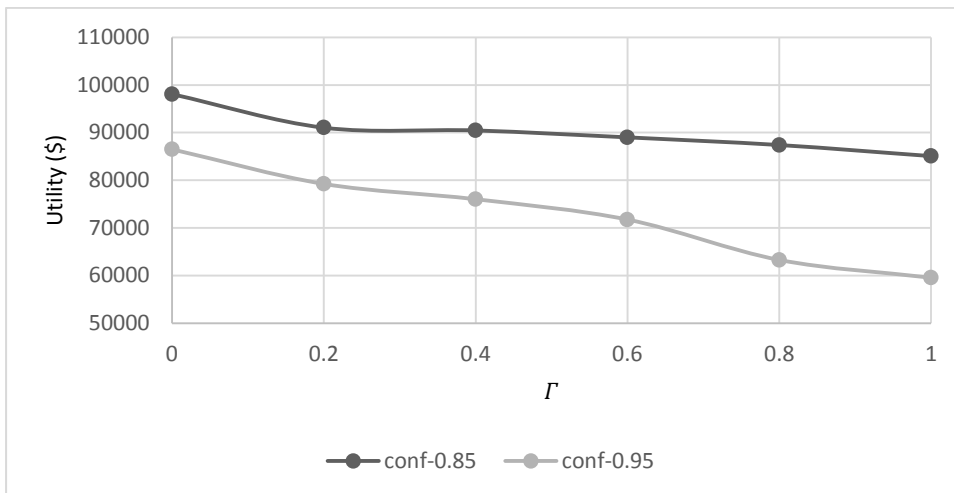
شکل ۴-۲۰: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست



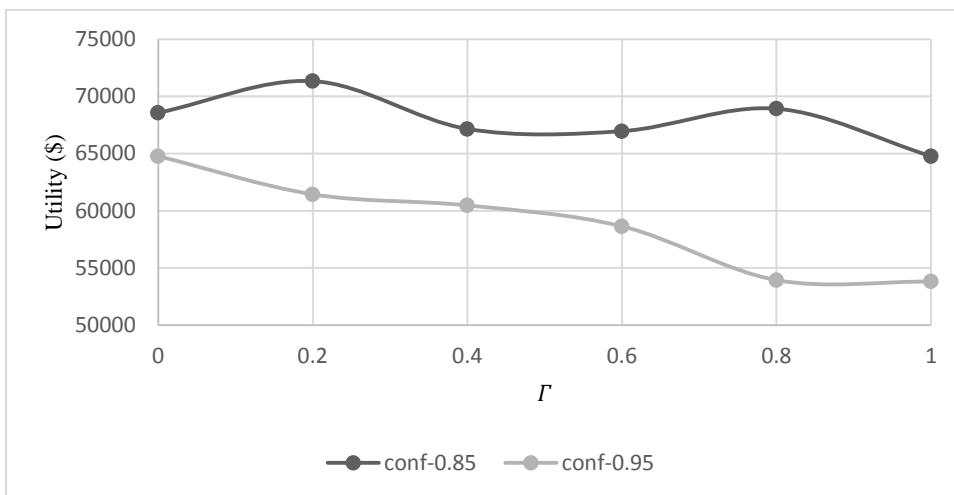
شکل ۴-۲۱: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ آگوست



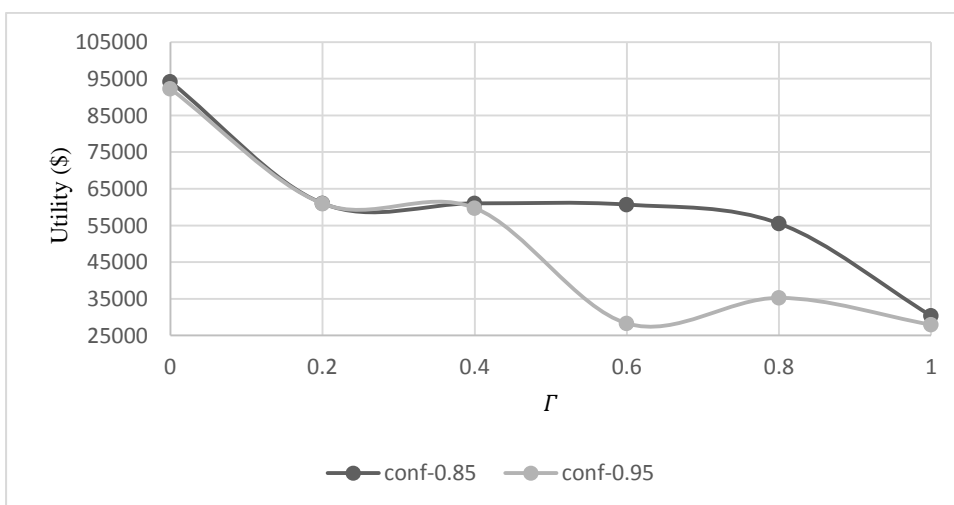
شکل ۴-۲۲: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازاء وضعیت سالم ریزشبه روز ۱۰ آگوست



شکل ۴-۲۳: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازار خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر



شکل ۴-۲۴: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازار خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر



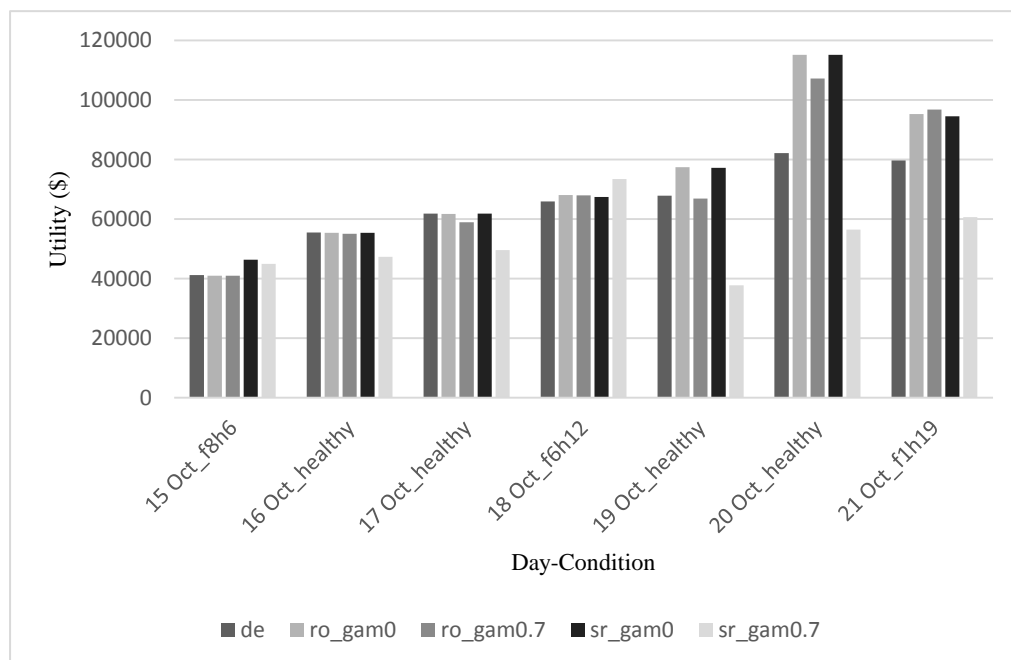
شکل ۴-۲۵: اثر Γ^{MG} بر سود مدل مقاوم تصادفی بازار وضعیت سالم ریزش شبکه روز ۲۱ اکتبر

همچنین نتایج نشان می‌دهند که سود نیروگاه مجازی در سطح اطمینان ۰/۹۵ همواره کمتر از سطح اطمینان ۰/۸۵ می‌باشد و به صورت کلی با افزایش درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی (Γ^{MG})، سود نیروگاه مجازی هم کاهش می‌یابد. اما در سطح اطمینان ۰/۸۵، سود نیروگاه مجازی از یک روند ثابت پیروی نمی‌کند و در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. هر چند که در همه وضعیت‌ها در هر دو روز، نتایج نشان می‌دهند که سود نیروگاه مجازی در شرایطی که انحراف قیمت انرژی الکتریکی از مقدار نامی نادیده گرفته شود ($\Gamma^{MG} = 0$) حداکثر است، اما تحقیقات پیش‌تر در مورد انتخاب بهینه این پارامتر مورد نیاز است که خود به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی جداگانه می‌تواند مطرح شود.

در نهایت به منظور مقایسه مدل‌های ارائه‌شده، یک هفته مشخص از سال انتخاب می‌شود. این هفته از روز ۱۵ اکتبر آغاز و به روز ۲۱ اکتبر ختم می‌شود. در سه روز غیر متوالی از هفته مورد مطالعه، پیشامدهای مختلفی رخ می‌دهد، به منظور حفظ جامعیت شبیه‌سازی، این پیشامدها در ساعات مختلفی از شبانه‌روز (صبح، ظهر و شب) رخ می‌دهند و ممکن است منجر به جزیره شدن ریزشکه مورد نظر شوند. این پیشامدها شامل خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۵ اکتبر، خروج خط ۶ در ساعت ۱۲ روز ۱۸ اکتبر و خروج خط ۱ در ساعت ۱۹ روز ۲۱ اکتبر می‌باشد که از میان آن‌ها خروج خط ۱ موجب جزیره شدن ریزشکه مورد مطالعه می‌گردد. در باقی روزهای هفته وضعیت ریزشکه سالم است و پیشامدی رخ نمی‌دهد. سطح اطمینان در مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی ۰/۸۵ اختیار می‌شوند و درصد درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی در دو مقدار ۰ و ۷۰ درصد تنظیم می‌شوند. همچنین در مدل مقاوم تصادفی از اثر شاخص CVaR صرف نظر می‌شود ($\beta = 0$). نتایج در شکل ۴-۲۶ و جدول ۴-۱۴ نشان داده است.

نتایج نشان می‌دهند که در هر یک از روزها، مدل‌ها برتری نسبی خود را نشان داده‌اند و هیچ‌کدام از مدل‌ها به طور مطلق برتر نبوده است. اما مدل‌های مقاوم و مقاوم تصادفی با $\Gamma^{MG} = 0$ برتری خود را

در اکثر روزهای هفته نشان داده‌اند و تنها در روزهای ۱۶ و ۱۷ اکتبر است که مدل قطعی توانسته است سود بیشتری را عاید نیروگاه مجازی کند. با این وجود، اختلاف سود آن‌ها با مدل قطعی در این دو روز، کمتر از ۰/۲٪ می‌باشد که اختلاف بسیار ناچیزی است. اما دو مدل مقاوم و مقاوم تصادفی، در روزهای دیگر تا میزان ۴۰٪ سود نیروگاه مجازی را افزایش می‌دهند که رقم بسیار چشمگیری است. همچنین در میان این دو مدل نیز، مدل مقاوم تصادفی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. با اینکه اختلاف سود آن با مدل مقاوم، در همه روزهایی که سود کم‌تری به دست می‌آورد، کمتر از ۱٪ می‌باشد اما در هنگام وقوع پیشامد در روز ۱۵ اکتبر، به مقدار ۱۳٪ سود بیشتری به دست می‌آورد که رقم قابل توجهی است. مدل مقاوم تصادفی با $\Gamma^{MG} = 0.7$ در روزهای ۱۵ و ۱۸ عملکرد مناسبی داشته است و اختلاف ۸٪ آن با سایر مدل‌ها در روز ۱۸ اکتبر قابل توجه می‌باشد. همچنین مدل مقاوم با $\Gamma^{MG} = 0.7$ در روزهای ۱۸، ۲۰ و ۲۱ اکتبر عملکردی خوبی داشته است و در روز ۲۱ اکتبر بیش‌ترین میزان سود را عاید نیروگاه مجازی کرده است.



شکل ۴-۲۶: مقایسه سود مدل‌های مدیریت انرژی در یک هفته

جدول ۴-۱۴: میزان افزایش سود مدل‌ها نسبت به مدل قطعی در یک هفته (برحسب درصد)

مدل / روز	۱۵ اکتبر	۱۶ اکتبر	۱۷ اکتبر	۱۸ اکتبر	۱۹ اکتبر	۲۰ اکتبر	۲۱ اکتبر
مدل مقاوم $\Gamma^{MG} = 0$	-۰/۵	-۰/۱۲	-۰/۰۸	۳/۳	۱۴	۴۰	۱۹
مدل مقاوم $\Gamma^{MG} = 0.7$	-۰/۵	-۰/۸	-۵	۳/۱	-۱/۴	۳۰	۲۱
مدل مقاوم تصادفی $\beta = 0$ $\Gamma^{MG} = 0$	۱۲/۵	-۰/۱۴	-۰/۰۴	۲/۳۵	۱۳/۹	۴۰	۱۸/۶
مدل مقاوم تصادفی $\beta = 0$ $\Gamma^{MG} = 0.7$	۹	-۱۴	-۱۹/۷	۱۱/۴۲	-۴۴	-۳۰	-۲۳/۸

۴-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل الگوریتم‌های ارائه‌شده برای مدیریت انرژی بر اساس اطلاعات واقعی تولید انرژی خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی شبیه‌سازی و تحلیل شدند. عملکرد این الگوریتم‌ها که بر اساس مدل‌سازی عدم قطعیت در مدل‌های قطعی، مقاوم و مقاوم تصادفی معرفی شده‌اند، در دو روز از سال با رفتار متفاوت قیمت انرژی الکتریکی، با وقوع پیشامدهای مختلف و در سطوح اطمینان گوناگون بررسی شدند. در نهایت با انتخاب یک هفته از سال عملکرد مدل‌های مدیریت انرژی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج اصلی به‌دست‌آمده از تحلیل شبیه‌سازی‌ها به شرح زیر است:

۱. وقوع پیشامدهای ریزشکته یک موضوع مهم می‌باشد و اثر قابل‌توجهی بر سود نیروگاه مجازی می‌گذارد و با توجه به محدودیت‌های ریزشکته و پخش توان این اثر می‌تواند در جهت کاهش یا افزایش سود باشد.
۲. با بررسی سطوح اطمینان و درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی در

مدل مقاوم، این پارامترها بر سود نیروگاه مجازی اثرگذار بوده است و اتخاذ سیاست-های بسیار محافظه کارانه می تواند منجر به کاهش سود شود. همچنین یک سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب برای یک پیشامد، الزاماً برای پیشامدهای دیگر مناسب نیست.

۳. تغییرات ناگهانی قیمت انرژی بر سود نیروگاه مجازی در همه مدل ها بسیار اثرگذار بوده است و پیش بینی مناسب این تغییرات می تواند اثر زیان آور آن را بر سود نیروگاه مجازی تا حد قابل توجهی کاهش دهد.

۴. با توجه به پیش بینی وقوع پیشامد در مدل مقاوم تصادفی، این مدل در هنگام قرارداد با شبکه اصلی میزان انرژی تبادلی را به گونه ای تعیین می کند که در صورت وقوع پیشامد، انحرافی از میزان قرارداد رخ ندهد. در حالی که در با وقوع انحراف سایر مدل ها بهره بردار شبکه اصلی باید با امکانات در دسترس خود، عدم تعادل ایجاد شده را مدیریت نماید.

۵. الگوریتم های مدیریت انرژی با به کارگیری فناوری شبکه هوشمند، منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو به گونه مناسبی انرژی نیروگاه مجازی را در همه وضعیت-های وقوع یا عدم وقوع پیشامد مدیریت می کنند.

۶. با وجود اینکه مدل های مقاوم تصادفی و مقاوم عملکرد قابل توجهی از خود نشان دادند، اما هر یک از این مدل ها در شرایط مشخصی، عملکرد مناسب تری از خود نشان می-دهند.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مروری بر کارهای انجام شده

در این پایان نامه، مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزش شبکه مطالعه و بررسی گردید.

در فصل دوم به بررسی سابقه موضوع مدیریت انرژی نیروگاه مجازی پرداخته شد. با توجه به گستردگی موضوع مدیریت انرژی و ارتباط آن با مفاهیم و فناوری‌های گوناگون مانند نیروگاه مجازی، منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخگو و شبکه هوشمند، ابتدا فناوری‌های مرتبط با مدیریت انرژی معرفی و دلایل پیدایش آن‌ها تشریح شدند، سپس اهمیت مدیریت انرژی، سابقه آن و کارهای انجام شده در این حوزه مورد بحث قرار گرفت.

در فصل سوم، الگوریتم مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی تشریح و بر اساس روش‌های مدل سازی عدم قطعیت در سه مدل قطعی، مقاوم و مقاوم تصادفی فرمول بندی شد. در مدل قطعی از روش پیش بینی نقطه‌ای به منظور مدل سازی عدم قطعیت متغیرهای پیوسته مانند تولید منابع خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی استفاده شد. در مدل مقاوم عدم قطعیت‌های موجود در این متغیرها با استفاده از روش پیش بینی بازه‌ای مدل سازی شدند. به طور مشابه در مدل مقاوم تصادفی برای مدل سازی عدم قطعیت متغیرهای پیوسته از روش پیش بینی بازه‌ای و متغیرهای گسسته مانند خروج مؤلفه‌های ریزش شبکه از روش تولید سناریو استفاده شد. همچنین برای پیش بینی متغیرهای پیوسته، مدل‌های آریمای و منطق فازی به کار گرفته شدند.

در فصل چهارم، الگوریتم‌های ارائه شده برای مدیریت انرژی بر اساس اطلاعات واقعی تولید انرژی خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان حقیقی شبیه سازی و تحلیل شدند. عملکرد این الگوریتم‌ها که بر اساس مدل سازی عدم قطعیت در مدل‌های قطعی، مقاوم و مقاوم تصادفی معرفی شده‌اند، در دو روز از سال با رفتار متفاوت قیمت انرژی الکتریکی، با وقوع پیشامدهای مختلف و در

سطوح اطمینان گوناگون بررسی شدند. در نهایت با انتخاب یک هفته از سال عملکرد مدل‌های مدیریت انرژی با یکدیگر مقایسه شدند.

۲-۵ نتایج

کارهای انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده در این پایان‌نامه را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر مطرح نمود:

- مفاهیم نیروگاه مجازی، منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخگو، شبکه هوشمند و پیشامدهای ریزشبه در این پایان‌نامه بررسی شدند، که پیش از این انجام نشده بود.
- مدل‌سازی انجام‌شده این قابلیت را دارد که در صورت نیاز، در بازه‌های زمانی متفاوت برنامه-ریزی مورد استفاده قرار گیرد.
- با توجه به سازوکار در نظر گرفته‌شده برای حفظ تعادل ریزشبه، مدل ارائه‌شده مستقل از نوع و ساختار ریزشبه می‌باشد و می‌تواند در ریزشبه‌های شعاعی پیاده‌سازی شود و در صورت بروز پیشامد به صورت جزیره‌ای به کار خود ادامه دهد.
- نوع و تعداد پیشامدهای ریزشبه تغییری در فرمول‌بندی ارائه‌شده ایجاد نمی‌کند و مدل ارائه‌شده یک مدل جامع برای در نظر گرفتن پیشامدهای ریزشبه می‌باشد.
- با استناد به اثر قابل‌توجه پیشامد بر کاهش یا افزایش سود نیروگاه مجازی با توجه به محدودیت‌های ریزشبه و پخش توان، وقوع پیشامدهای ریزشبه یک موضوع مهم می‌باشد و باید در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری نیروگاه مجازی مورد نظر قرار گیرد.
- با توجه اثرگذاری سطوح اطمینان و درجه مقاومت نسبت به تغییر قیمت انرژی الکتریکی در مدل مقاوم بر سود نیروگاه مجازی، انتخاب درست این پارامترها مهم می‌باشد و اتخاذ سیاست‌های بسیار محافظه‌کارانه می‌تواند منجر به کاهش سود شود. همچنین یک سطح

اطمینان و درجه مقاومت مناسب برای یک پیشامد، الزاماً برای پیشامدهای دیگر مناسب نیست.

- تغییرات ناگهانی قیمت انرژی بر سود نیروگاه مجازی در همه مدل‌ها بسیار اثرگذار بوده و پیش‌بینی مناسب این تغییرات می‌تواند اثر زیان‌آور آن بر سود نیروگاه مجازی را تا حد قابل توجهی کاهش دهد.

- با توجه به پیش‌بینی وقوع پیشامد در مدل مقاوم تصادفی، این مدل در هنگام قرارداد با شبکه اصلی میزان انرژی مبادله را به گونه‌ای تعیین می‌کند که در صورت وقوع پیشامد، انحرافی از میزان قرارداد رخ ندهد. در حالی که در با وقوع انحراف سایر مدل‌ها بهره‌بردار شبکه اصلی باید با امکانات در دسترس خود، عدم تعادل ایجادشده را مدیریت نماید.

- انتخاب پارامترهای مربوط به شاخص مدیریت ریسک و بهینه‌سازی مقاوم در مدل مقاوم تصادفی باید با دقت مناسب به گونه‌ای انجام شود که برای همه سناریوهای ممکن مناسب باشد که تعریف یک مسئله بهینه‌سازی برای یافتن مقادیر بهینه این پارامترهای مورد نیاز می‌باشد.

- مدل‌های ارائه‌شده توانایی دارند با استفاده از فناوری شبکه هوشمند، منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو به گونه مناسبی انرژی نیروگاه مجازی را در همه وضعیت‌های وقوع یا عدم وقوع پیشامد مدیریت نمایند.

- هر یک از این مدل‌ها در شرایط مشخصی نسبت به دیگران، عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند، با این وجود مدل‌های مقاوم تصادفی و مقاوم عملکرد قابل توجهی از خود نشان دادند. مالک نیروگاه مجازی می‌تواند با توجه به نیازهای خود یکی از این مدل‌ها را برگزیند. به عنوان مثال مدل مقام تصادفی برای مدیریت انرژی ریزشکته‌های پرخطر که همواره در معرض وقوع پیشامدهای گوناگون می‌باشند، مناسب‌تر می‌باشند.

۳-۵ پیشنهادها

در این زیربخش، به دنبال مسائلی که در این پایان نامه مورد مطالعه قرار گرفت، چند پیشنهاد جهت ادامه مطالعه و تحقیق ارائه می شود:

- با توجه به اهمیت انتخاب پارامترهای مربوط به شاخص مدیریت ریسک و بهینه سازی مقاوم در مدل مقاوم تصادفی، یک مسئله بهینه سازی چندهدفه به منظور یافتن مقادیر بهینه این پارامترها به گونه ای که برای همه سناریوهای ممکن مناسب باشد مورد نیاز می باشد.
- کنترل ولتاژ در هنگام بهره برداری چه در شرایط عادی و در شرایط وقوع پیشامد یکی از عامل های مهم در تصمیم گیری می باشد، با توجه به استفاده از پخش بار بهینه مستقیم و عدم بررسی این عامل، پیشنهاد می شود با استفاده از پخش بار بهینه متناوب، این عامل مدنظر گیرد. همچنین کاربرد ادوات FACTS برای کنترل ولتاژ در ترکیب با مدیریت انرژی می تواند مورد توجه قرار گیرد.
- استفاده از روش های پیش بینی ترکیبی مرسوم و دقیق مانند روش های فازی عصبی، تبدیل موجک و ... می تواند به بهبود پیش بینی ها و عملکرد مدل ها کمک کند. همچنین در این پیش بینی همبستگی میان تولید انرژی خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی لحاظ نشده است، پیشنهاد می شود در کارهای آینده تأثیر این همبستگی ها مشاهده شود.
- در این تحقیق نیروگاه مجازی به عنوان یک پذیرنده قیمت عمل می کند و با توجه به عدم شرکت در بازار برق نقشی در تعیین قیمت ها ندارد، عملکرد الگوریتم های مدیریت انرژی هم زمان با شرکت در بازارهای برق می تواند مورد بررسی قرار بگیرد.
- با توجه به حرکت بازارهای برق در حوزه اروپا و آمریکا به سمت بازارهای زمان حقیقی در بازه های زمانی ۵ الی ۱۵ دقیقه، پیشنهاد می شود عملکرد مدل های ارائه شده در برنامه ریزی

- و بهره‌برداری بسیار کوتاه‌مدت ریزشبکه هوشمند بررسی شود.
- استفاده از فناوری‌های گوناگون مورد استفاده برای منابع تولید پراکنده، مانند مزارع بادی، سیستم‌های زمین‌گرمایی و منابع تولید هم‌زمان توان و حرارت (CHP)³¹ نتایج شبیه‌سازی را به واقعیت نزدیک می‌کند.

³¹ Combined Heat and Power

مراجع

- [1] M. Liserre, T. Sauter, and J. Y. Hung, "Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, pp. 18-37, 2010.
- [2] A. Molderink, V. Bakker, M. G. Bosman, J. L. Hurink, and G. J. Smit, "Management and control of domestic smart grid technology," *Smart grid, IEEE transactions on*, vol. 1, pp. 109-119, 2010.
- [3] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, "Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 1229-1238, 2011.
- [4] V. Vittal, "Consequence and impact of electric utility industry restructuring on transient stability and small-signal stability analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 196-207, 2000.
- [5] S. Ruester, S. Schwenen, C. Batlle, and I. Pérez-Arriaga, "From distribution networks to smart distribution systems: Rethinking the regulation of European electricity DSOs," *Utilities Policy*, vol. 31, pp. 229-237, 2014.
- [6] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," *Renewable power generation, IET*, vol. 1, pp. 10-16, 2007.
- [7] 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," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 949-956, 2011.
- [8] G. Chicco and P. Mancarella, "Distributed multi-generation: a comprehensive view," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 535-551, 2009.
- [9] J. Corera and J. Maire, "Flexible electricity networks to integrate the expected energy evolution," *FENIX project, Bilbao, Spain*, 2009.
- [10] 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.

- [11] H. Pandžić, J. M. Morales, A. J. Conejo, and I. Kuzle, "Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming," *Applied Energy*, vol. 105, pp. 282-292, 2013.
- [12] M. F. Akorede, H. Hizam, and E. Pouresmaeil, "Distributed energy resources and benefits to the environment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2010-2024.
- [13] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Recent developments in microgrids and example cases around the world—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4030-4041, 2011.
- [14] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric power systems research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [15] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy policy*, vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [16] J. Aghaei and M.-I. Alizadeh, "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 64-72, 2013.
- [17] U. DoE, "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. A report to the United States Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005," 2006.
- [18] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, pp. 18-28, 2010.
- [19] D. Von Dollen, "Report to NIST on the smart grid interoperability standards roadmap," *Prepared by the Electric Power Research Institute for NIST (June 2009)*, 2009.
- [20] E. SmartGrids, "SmartGrids Strategic Deployment Document for

Europe's Electricity Networks of the Future," *European Technology Platform SmartGrids*, 2010.

- [21] H. Gharavi and R. Ghafurian, *Smart grid: The electric energy system of the future*: IEEE, 2011.
- [22] A. Chuang and C. E. Commission, *California Utility Vision and Roadmap for the Smart Grid of 2020: Final Project Report*: California Energy Commission, 2011.
- [23] W. Kahlenborn, *DIN EN 16001: Energy management systems in practice: a guide for companies and organisations*: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2010.
- [24] W.-J. Lee and R. Kenarangui, "Energy management for motors, systems, and electrical equipment," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 602-607, 2002.
- [25] P. Antunes, P. Carreira, and M. M. da Silva, "Towards an energy management maturity model," *Energy Policy*, vol. 73, pp. 803-814, 2014.
- [26] W. C. Turner and S. Doty, *Energy management handbook: The Fairmont Press, Inc.*, 2007.
- [27] H.-T. Pao, "Forecasting electricity market pricing using artificial neural networks," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 907-912, 2007.
- [28] V. Vahidinasab, S. Jadid, and A. Kazemi, "Day-ahead price forecasting in restructured power systems using artificial neural networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1332-1342, 2008.
- [29] R. Dominguez, L. Baringo, and A. Conejo, "Optimal offering strategy for a concentrating solar power plant," *Applied Energy*, vol. 98, pp. 316-325, 2012.
- [30] P. Pinson, H. A. Nielsen, J. K. Møller, H. Madsen, and G. N. Kariniotakis, "Non-parametric probabilistic forecasts of wind power: required properties and evaluation," *Wind Energy*, vol. 10, pp. 497-516, 2007.

- [31] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, "Short-term trading for a wind power producer," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 554-564, 2010.
- [32] P. Pinson and R. Girard, "Evaluating the quality of scenarios of short-term wind power generation," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 12-20, 2012.
- [33] L. G. Matteson and K. Anderson, "Energy management and control system for Iowa-Illinois gas and electric company," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 95, pp. 903-908, 1976.
- [34] S. I. Freedman, "Technical alternatives for energy management," *Energy Conversion*, vol. 13, pp. 57-65, 1973.
- [35] H. Kirkham, D. Nightingale, and T. Koerner, "Energy management system design with dispersed storage and generation," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 3432-3441, 1981.
- [36] G. E. MacDonald, A. C. Lordi, and J. J. Kovach, "Electrical energy management in the cement industry," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, pp. 341-347, 1979.
- [37] M. Radtke, "Migrating an energy management system to a networked architecture," in *Power Industry Computer Application Conference, 1995. Conference Proceedings., 1995 IEEE*, 1995, pp. 351-356.
- [38] J. Contreras, A. Losi, M. Russo, and F. F. Wu, "Simulation and evaluation of optimization problem solutions in distributed energy management systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 57-62, 2002.
- [39] C. Clastres, T. H. Pham, F. Wurtz, and S. Bacha, "Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production," *Energy*, vol. 35, pp. 55-64, 2010.
- [40] M. C. Bozchalui, S. A. Hashmi, H. Hassen, C. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Optimal operation of residential energy hubs in smart grids," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1755-1766,

2012.

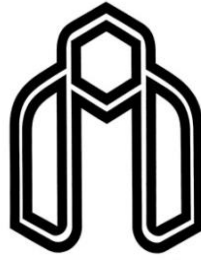
- [41] C. O. Adika and L. Wang, "Autonomous appliance scheduling for household energy management," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 673-682, 2014.
- [42] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, V. W. Wong, and R. Schober, "Tackling the load uncertainty challenges for energy consumption scheduling in smart grid," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 1007-1016, 2013.
- [43] Z. Yu, L. Jia, M. C. Murphy-Hoye, A. Pratt, and L. Tong, "Modeling and stochastic control for home energy management," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 2244-2255, 2013.
- [44] A. J. Conejo, J.M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 236-242, 2010.
- [45] M. Rahimiyan, L. Baringo, and A. J. Conejo, "Energy management of a cluster of interconnected price-responsive demands," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 645-655, 2014.
- [46] M. Lopez, S. de la Torre, S. Martín, and J. Aguado, "Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 689-698, 2015.
- [47] M. Motevasel and A. R. Seifi, "Expert energy management of a micro-grid considering wind energy uncertainty," *Energy Conversion and Management*, vol. 83, pp. 58-72, 2014.
- [48] M. Motevasel, A. R. Seifi, and T. Niknam, "Multi-objective energy management of CHP (combined heat and power)-based micro-grid," *Energy*, vol. 51, pp. 123-136, 2013.
- [49] A. Baziar and A. Kavousi-Fard, "Considering uncertainty in the optimal energy management of renewable micro-grids including storage devices," *Renewable Energy*, vol. 59, pp. 158-166, 2013.
- [50] R. Velik and P. Nicolay, "Grid-price-dependent energy management in microgrids using a modified simulated annealing triple-optimizer," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 384-395, 2014.

- [51] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3881-3895, 2010.
- [52] V. Black, "Cost and Performance Data for Power Generation Technologies," *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*, 2012.
- [53] 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," *Power Systems, IEEE Transactions on*, *In press*, 2016.
- [54] "ISO New England, US. [Online]. Available: <http://www.iso-ne.com>"./.
- [55] P. Pinson, "Estimation of the uncertainty in wind power forecasting," *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2006.
- [56] "Harvard Green Campus Initiative, US. [Online]. Available: <http://www.sunviewer.net/portals/Harvard>"./.
- [57] D. Bertsimas and M. Sim, "Robust discrete optimization and network flows," *Mathematical programming*, vol. 9, pp. 49-71, 2003.
- [58] D. Bertsimas and M. Sim, "The price of robustness," *Operations research*, vol. 52, pp. 35-53, 2004.
- [59] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets* vol. 1: Springer, 2010.
- [60] F. Bouffard, F. D. Galiana, and A. J. Conejo, "Market-clearing with stochastic security-part I: formulation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1818-1826, 2005.

Abstract

Coordinated energy management of distributed energy resources (DERs) and price-responsive demands as a virtual power plant (VPP) has become an attractive issue in electricity industry. Uncertainty in stochastic DERs, energy prices and availability of microgrid components makes the energy management problem of VPP more complex. Equipped with smart grid technology, it is possible to monitor the VPP condition near real-time, and modify energy management decisions to deal with the uncertainties. In this thesis, a stochastic robust optimization is proposed to model the energy management problem of a VPP that contains solar power stations, storage units and price-responsive demands interconnected within a power microgrid. This way, uncertainties in continuous (i.e. energy price and solar generation) and discrete random variables (i.e. availability of microgrid components) are modeled by interval- and scenario-based forecasting approaches, respectively. The performance of the proposed stochastic robust optimization is analyzed through a case study, and compared with the performance of deterministic approach and robust optimization. The results validate solution feasibility and good performance of the proposed stochastic robust optimization particularly in the case that contingency occurs in a day with highly volatile energy prices.

Keywords: Energy management, virtual power plant, smart grid, robust optimization, stochastic programming, contingencies.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering

Smart Energy Management of a Virtual Power Plant with Microgrid Contingencies

Soheil Kaabe PahneKolaei

Supervisor:

Dr. Morteza Rahimiyan

A thesis submitted in partial fulfillment of the

requirements for the degree of

Master of Science in Electrical Engineering

January 2016