مجله علمی مطالعات پژوهشی در مهندسی مکانیک آینده، ۱۴۰۳، دوره ۱، شماره ۱، ص ص ۶۴-۷۱

مجله علمی مطالعات پژوهشی
در مهندسی مکانیک آینده
www.journalhi.com/mec/

به‌کارگیری یک مکانیسم برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای جهت یکپارچه‌سازی تقاضای قابل تعویق و منابع انرژی تجدیدپذیر در مقیاس کلان بازار رزرو چرخان در حضور ذخیره‌سازهای انرژی و تجمیع‌گرهای بار

محسن محمدی [۱]

۱- دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۷ اسفند ۱۴۰۱
پذیرش: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲
ارائه در سایت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۲

کلید واژگان:
برنامه‌ریزی تصادفی
تجمیع‌گر بار
سیستم ذخیره‌ساز انرژی
بازار رزرو چرخان
تقاضای قابل تعویق

چکیده

یک روش ایده‌آل برای کسب مزایای انعطاف‌پذیری تقاضا، استفاده از قیمت‌گذاری زمان واقعی در سطوح خرده‌فروشی می‌باشد. با این حال به واسطه‌ی موقعیت‌های سیاسی و وضعیت موجود صنعت، بعید است که این رویه در آینده به سرعت رخ دهد. یک روش جایگزین برای نیل به این هدف، استفاده از بارهای قابل تعویق و یک انبوه‌ساز برای معرفی این بارها در بازارهای خرده-فروشی می‌باشد. یک روش جایگزین برای به‌کار گرفتن انعطاف‌پذیری بار در بازارهای موجود و پروتکل‌های بهره‌برداری اتصال مستقیم منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی و تجمیع‌گر بار قابل تعویق می باشد. بر اساس نوع کوپلینگ پیشنهادی در این مقاله، تجمیع‌گر بار قابل تعویق می‌توانند با تولیدکننده‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی در مقیاس کلان جفت شوند که در نتیجه این منابع، تولیدشان را به این بارها اختصاص می‌دهند. در این مقاله، یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای ارزیابی تاثیرات ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی با تجمیع‌گر بار قابل تعویق در مقیاس کلان ارایه می‌شود. همچنین برای بررسی مزایای انعطاف‌پذیری تقاضا، یک روش پاسخگویی بار نیز مورد تحلیل واقع می‌شود. علاوه بر این به منظور هماهنگی تجمیع‌گر بار قابل تعویق با منابع تولیدکننده‌ی انرژی، یک الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی پیشنهاد شده است. شایان ذکر است که برای اعتبارسنجی مدل‌ها و الگوریتم پیشنهادی، کنسول هماهنگی الکتریسته‌ی نواحی غرب آمریکا در نظر گرفته شده است.

Using a two-stage stochastic planning mechanism for the integration and use of energy resources as a result of the rotating reserve macro market in the presence of energy storage and load aggregators

Mohsen Mohammadi[1]

1- PhD in Agricultural Economics, Payam Noor University, Tehran, Iran.

Article Information

Original Research Paper
Received 18 March 2023
Accepted 02 October 2023
Available Online 04 October 2023

Keywords:
Random programming
Load collector
Ethergy storage system
Revolving reservation market
A request that can be postponed

Abstract

An ideal way to gain the right to choose is to use real-time pricing at the retail level. However, due to political situations and the current state of the industry, this practice is unlikely to happen quickly in the future. An alternative method to achieve this goal is the use of postponable loads and a mass generator to introduce these loads in retail markets. An alternative method for using load acceptability in existing markets and operating protocols is the direct connection of energizing energy sources and energy storage and load aggregators. Based on the type of coupling proposed in this paper, the load aggregator can be coupled with energy storage energy generators as a result of the macro, which consequently allocates their generation to these sources. In this paper, a two-stage stochastic model is developed to evaluate the effects of integration of renewable energy sources and energy storages with a scalable aggregator. Also, to check the acceptance method, a load response is also analyzed. In addition, in order to coordinate the postponable load aggregator with energy generating sources, a dynamic programming algorithm is proposed. It is worth mentioning that for the validation of the models and the proposed algorithm, the electrical coordination console of the western regions of America has been considered.

۱- مقدمه

در سالیان اخیر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در بهره-برداری از سیستم¬های قدرت رشد روزافزونی داشته است. در بین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی بادی و خورشیدی در مقایسه با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر نقش موثرتری در تولید برق مصرفی ایفا نموده¬اند. از این رو ادغام یکپارچه¬ی این منابع از قبیل منبع بادی و خورشیدی در مقیاس کلان، از لحاظ اقتصادی و تکنیکی در سیستم قدرت امکان¬پذیر است. در کنار مزایای اقتصادی و زیست¬محیطی این منابع، بهره¬وری از این منابع سبب بروز مشکلاتی در سیستم قدرت خواهد شد چرا که منابع انرژی بادی و خورشیدی دارای طبیعتی تصادفی و متغیر هستند و این امکان را ایجاد می¬کنند که مقدار توان زمان¬واقعی باد و خورشیدی با مقدار پیش¬بینی و برنامه-ریزی¬شده آن متفاوت باشد [۴-۱]. به عبارتی دیگر با توجه به عدم قطعیت و نامعینی به وجود آمده در انرژی تولیدی این منابع، تعادل بین تولید و مصرف توان در بهره¬برداری سیستم بر هم می¬خورد. بنابراین در حین عدم قطعیت به وجود آمده، بهره برداران می-کوشند تا مقدار معینی ذخیره¬ی چرخان و غیرچرخان در سیستم در نظر بگیرند تا از این طریق بر عدم قطعیت ایجادشده در انرژی تولیدشده توسط این منابع، فایق بیایند و در نتیجه ایمنی سیستم حفظ شود[۵].

روبرو شدن با چالش¬های ذکر شده که با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره¬ساز انرژی در مقیاس کلان ظاهر می-شوند، میزان انعطاف¬پذیری الکتریسیته¬ی مصرفی را بلافاصله مشخص می¬سازد. بخش قابل توجهی از انرژی که در بخش¬های صنعتی، تجاری و مسکونی مصرف می¬شود، صرف انجام اموری می-شود که که می¬توان آنها را برای مدت زمان زیادی به تعویق انداخت و همچنین کمترین تاثیر را بر رفاه مصرف¬کنندگان دارند. برخی از مصارفی که مصداق این امر می¬باشند شامل پمپ¬های کشارزی، سیستم¬های سرمایشی و گرمایشی و شارژ خودروهای برقی می¬باشد. در واقع، بسیاری از وظایف مصرف انرژی انعطاف¬پذیر را می¬توان به صورت طبیعی به عنوان نیاز به مقداری مشخصی انرژی در یک مدت زمان مشخص تشریح نمود. بنابراین می¬توان گفت که منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره¬ساز انرژی و نیازهای قابل تعویق را می¬توان با یکدیگر کوپل نمود. این مهم به واسطه¬ی این حقیقت است که تولید توان تجدیدپذیر در یک افق زمانی مشخص نسبت به یک لحظه¬ی دلخواه قابلیت پیش¬بینی بیشتری دارد که برآوردن نیازها را آسان¬تر می¬کند[۸-۶].

یک روش ایده¬آل برای کسب مزایای انعطاف¬پذیری تقاضا، استفاده از قیمت¬گذاری زمان¬واقعی در سطوح خرده¬فروشی می¬باشد. با این حال به واسطه¬ی موقعیت¬های سیاسی و وضعیت موجود صنعت، بعید است که این رویه در آینده به سرعت رخ دهد. یک روش جایگزین برای نیل به این هدف، استفاده از بارهای قابل تعویق و یک انبوه¬ساز برای معرفی این¬ بارها در بازارهای خرده-فروشی می¬باشد.

یک انبوه¬ساز می¬تواند نماینده¬ی جمعیتی از بارها برای تهیه¬ی ظرفیت¬ سرویس¬های مربوط به اپراتور سیستم ایفای نقش کند. علاوه بر این، انبوه¬ساز مسئولیت هماهنگی مصرف بارها را بر اساس چندین قیمت یا روش کنترل مستقیم بر عهده¬ دارد. انتظار می¬رود که با افزایش ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره¬ساز انرژی، ملزومات سرویس¬های فرعی افزایش پیدا کند. این رویه برای می¬تواند برای کاربرانی که تمایل به پاسخ به احتیاجات آنی اپراتورهای سیستم قدرت دارند، سودآور باشد. با اینکه رویه¬ی یادشده جذاب و سودآور می¬باشد اما نگرانی¬هایی در ارتباط با تعریف تولیدات بازار وجود دارد که مربوط به انواع خدماتی است که بارها می¬توانند به صورت حقیقی ارایه کنند. یکی از مهم¬ترین این نگرانی¬ها، افزایش نیاز به اصلاح بازارهای الکتریسیته¬ی موجود می-باشد. در نتیجه احتمال اینکه مذاکرات سیاست¬گذاری فرآیند استفاده از انبوه¬سازها را که به منظور مدیریت جمعیت قابل توجهی از بارها به کار گرفته می¬شوند، به تاخیر بیندازد[۱۱-۹].

یک روش جایگزین برای به¬کار گرفتن انعطاف¬پذیری بار در بازارهای موجود و پروتکل¬های بهره¬برداری اتصال مستقیم منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره¬ساز انرژی و تجمیع¬گر بارهای قابل تعویق می باشد. بر اساس نوع کوپلینگ پیشنهادی در این مقاله، بارهای قابل تعویق می¬توانند با تولیدکننده¬های تجدیدپذیر در مقیاس کلان جفت شوند که در نتیجه این منابع، تولیدشان را به این بارها اختصاص می¬دهند.

۲- فرمول‌بندی مساله

عدم قطعیت‌های مورد بحث در این مدل، با استفاده از منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی و تقاضا استخراج می-شوند[۱۳-۱۲]. منابع تقاضا در این مدل شامل مصرف‌کننده‌های انعطاف‌پذیر با الگوی مصرف تصادفی و مصرف‌کننده‌های تجمیع‌گر تعویق‌پذیر که نیازمند مقادیر ثابتی انرژی در طول روز هستند که این‌که الگوهای مصرف آنی خود را با هدف غالب‌سازی شرایط سیستم وفق می‌دهند.

مدل ارایه شده شامل دو هدف عمده می‌باشد.

۱- ماژول پشتیبانی تصمیمات: این ماژول در مرحله اول قرار دارد که بهره‌برداری بازار روز پیش‌رو را شبیه‌سازی می‌کند و برای تعیین ملزومات رزرو روز پیش‌رو در زمانی که منابع تقاضای تعویق‌پذیر در جذب منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی متنوع شرکت می‌کنند، استفاده می‌شود.

۲- ماژول ارزیابی: این ماژول در مرحله‌ی دوم قرار گرفته است که با استفاده مدل روز پیش‌رو و به‌کارگیری الگوریتم تصمیم‌گیری تصادفی به مقایسه‌ی هزینه‌های بهره‌برداری زمان‌واقعی سیستم تحت پیکربندی پاسخگویی بار که در ادامه بحث می‌شود، پرداخته می‌شود.

تحلیل انجام شده در این مقاله متمرکز بر منابع توان بادی است. به واسطه‌ی نسبت غیرخطی سرعت باد به توان حاصل از آن، یک مدل تصادفی از سرعت باد توسعه داده شده و از یک منحنی توان استاتیکی کالیبره شده‌ی مطلوب برای تعیین تولید توان بادی مربوطه استفاده می‌کند.

به منظور تعیین میزان رزرو روز پیش‌رو که با هدف تطبیق ادغام همزمان منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی با تجمیع‌گرهای بارهای تعویق‌پذیر انجام می‌شود، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای فرمول‌بندی شده است که در آن فرض بر آن است که اپراتور سیستم دیسپاچ مربوط به بارهای انعطاف‌پذیر و منابع تولید را بهینه می‌کند[۱۵-۱۴]. عدم قطعیت حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر و نوسانات بار به صورت یک مجموعه‌ی گسسته حاوی سناریو مانند S بیان می‌شود. مساله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی به صورت یک مدل تصمیم‌گیری دو مرحله‌ای فرمول‌بندی می‌گردد که مرحله‌ی اول آن در برنامه‌ریزی تصادفی روز پیش‌رو واحدها را بیان می-کند و گام دوم آن دیسپاچینگ اقتصادی زمان واقعی را در یک بازار ساعت پیش‌رو بیان می‌کند. از این مدل برای تعیین برنامه‌ریزی روز پیش‌رو منابع

رزرو کند با این فرض که اپراتور سیستم می‌تواند دیسپاچ ژنراتورها و تجمیع-گرهای بارهای قابل تعویق را بهینه نماید. استفاده از یک گام زمانی ساعتی با استناد به این حقیقت که مدل برنامه‌ریزی تصادفی روز پیش‌رو برای پاک - سازی بازار انرژی استفاده می‌شود و همچنین تعیین ملزومات رزرو توسط اپراتور سیستم به صورت ساعتی، تعدیل شده‌اند.

برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

تعیین ملزومات رزرو در گام‌های ساعتی برای بررسی تاثیرات عدم قطعیت و خاصیت تغییر پذیری منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی کافی می‌باشد. معادلات مربوط به مدل تطبیق منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با تجمیع‌گرهای بارهای قابل تعویق به صورت زیر بیان می‌شود:

$$min \sum_{g\in G}\sum_{s\in S}\sum_{t\in T}\pi_s\left(K_g u_{gst}+S_g v_{gst}+C_g p_{gst}\right) \quad (۱)$$

$$\sum_{g\in G} p_{gst}=D_{st}+e_{st} \quad s\in S, t\in T \quad (۲)$$

$$\sum_{t\in T} e_{st}=R \quad s\in S \quad (۳)$$

$$0\le e_{st}\le C \quad s\in S, t\in T \quad (۴)$$

$$u_{gst}=w_{gt}, v_{gst}=z_{gt}, g\in G_s, s\in S, t\in T \quad (۵)$$

$$(p,e,u,v,w,z)\in D \quad (۶)$$

مجموعه‌ی ژنراتورهای موجود G به دو بخش ژنراتورهای کند G_s که تصمیمات برنامه‌ریزی تصادفی برای آن‌ها در چارچوب زمان روز پیش‌رو ثابت است و ژنراتورهای سریع که برنامه‌ریزی تصادفیشان در گام دوم تنظیم می-گردد. تصمیمات گام اول شامل w_{gt} و z_{gt} به صورت باینری و تصمیمات راه-اندازی ژنراتورهای کند تعریف می‌شود. تصمیمات گام دوم شامل راه‌اندازی و توان خروجی تمامی ژنراتورهاست که به ترتیب به صورت u_{gst}، v_{gst} و p_{gst} نمایش داده می‌شود. دیسپاچ تجمیع‌گرهای بارهای تعویق‌پذیر نیز یک متغیر تصمیم‌گیری در گام دوم قرار است که به صورت e_{st} نمایش داده می‌شود.

در ارتباط با مدل ارایه شده برای واحدها، نکات زیر مطرح است:

۱- تابع هدف رابط ۱ هزینه‌ی بهره‌برداری را کمینه می‌سازد. هزینه-ی راه‌اندازی، هزینه‌ی بار کمینه و هزینه‌ی ثابت سوخت برای هر ژنراتور مانند g به ترتیب با نمادهای S_g، K_g و C_g نمایش داده می-شود.

۲- مدل ارایه شده برای یک افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته با گام‌های زمانی ساعتی حل می‌گردد. رابطه‌ی مربوط به تعادل توان در رابطه‌ی ۲ ارایه شده است.

۳- تقاضای شبکه D_{st} که برابر با اختلاف توان تقاضای شرکت توزیع و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، منبع عدم قطعیت را بیان می‌کند.

۴- قید ارایه شده در رابطه‌ی ۳ به این دلیل ضروری است که تجمیع‌گرهای بارهای تعویق‌پذیر می‌توانند مقادیر R را برای انرژی در یک چارچوب زمانی داده شده، تولید کند.

۵- در رابطه‌ی ۴ محدودیتی بر روی نرخ مصرف تجمیع‌گرهای بارهای تعویق پذیر اعمال شده است.

۶- قیود غیر پیشگویانه‌ی تصمیم‌گیری گام اول در رابطه‌ی ۵ بیان شده است.

۷- تمامی ژنراتورهای موجود شامل واحدهای کند می‌توانند سطح تولید خود را در گام دوم تنظیم کنند.

۸- مجموعه‌ی D شامل قیود ظرفیت ژنراتورها می‌باشد.

الگوریتم انتخاب سناریو

الگوریتم انتخاب سناریوی استفاده شده در مدل برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده، نشئت گرفته از نمونه‌برداری اهمیت آن می‌باشد که در آن سناریوها بر اساس تاثیری که بر هزینه‌ی مورد انتظار دارند انتخاب می‌شوند. قابل توجه است که انتخاب این سناریوها نمی‌تواند تابع هدف فرمول‌بندی مدل برنامه‌ریزی تصادفی را بایاس نماید. الگوریتم تجزیه‌ای که به‌کار گرفته شده است، مبتنی بر شماتیک آزادسازی لاگرانژ برای تجزیه سناریو می‌باشد که در این مقاله با در نظر گرفتن قیود انتقال، عدم قطعیت بار و عدم قطعیت منابع تولید پراکنده و همچنین احتمال خروج خط انتقال یا ژنراتور توسعه یافته است. مدل مرکزی مساله تطبیق منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با تجمیع‌گرهای بارهای قابل تعویق که در این قسمت ارایه شده است، با فرض توانایی اپراتور سیستم در مانیتورینگ مرکزی و کنترل بارهای منحصر به فرد می‌باشد. قابل توجه است که یک مدل مرکزی الگوی مطلوبی را برای تخمین بیشترین مزایای پاسخگویی تقاضا را فراهم می‌کند.

انعطاف‌پذیری تقاضا

در این قسمت به معرفی شماتیک پاسخگویی بار و چگونگی یکپارچه-سازی آن با مدل پخش بار اقتصادی در بهره‌برداری زمان‌واقعی می‌پردازیم. مدل بهینه‌ی برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی راه‌اندازی w_{gt}^* و z_{gt}^* با راه‌حل بهینه نمودن مدل برنامه‌ریزی تصادفی در فاز روز پیش‌رو به عنوان ورودی مدل پخش بار اقتصادی برای هر تحقق عدم قعطیتی مانند ω استفاده می-شود. در مدل یاد شده، افق برنامه‌ریزی مساله T با گام‌های ساعتی در ۲۴ ساعت شبانه‌روز می‌باشد.

کنترل بار مرکزی

در روش کنترل بار مرکزی فرض بر آن است که بهره‌بردار پخش بار اقتصادی بارهای منعطف و منابع تولید را بهینه می‌کند:

$$(ED_\omega): \quad (۷)$$

$$min \sum_{g\in G}\sum_{t\in T}\left(K_g u_{gt}+S_g v_{gt}+C_g p_{gt}\right)$$

$$\sum_{g\in G} p_{gt}=D_{\omega t}+e_t \quad t\in T \quad (۸)$$

$$\sum_{t\in T} e_{st}=R \quad (۹)$$

$$0\le e_t\le C \quad t\in T \quad (۱۰)$$

$$u_{gt}=w_{gt}^*, v_{gt}=z_{gt}^*, g\in G_s, t\in T \quad (۱۱)$$

$$(p,e,u,v)\in D \quad (۱۲)$$

با توجه به این نکته که مدل مرکزی در عمل واقع‌بینانه به نظر نمی‌رسد، مفید است که یک الگوی مطلوب برای مزایای انعطاف‌پذیری تقاضا فراهم گردد. در این فرمول‌بندی w_{gt}^* بیان‌گر مجموعه‌ی تقاضای شرکت توزیع منهای میزان تولید منابع انرژی تجدیدپذیر است.

مناقصات تقاضا

در این قسمت فرض می‌کنیم که تابع تقاضا، یک تابع خطی است که شامل کسر α است که بیانگر مصرف‌کنندگان انعطاف‌ناپذیر است که با هزینه‌ی خرده‌فروشی ثابتی مانند λ^R روبر می‌شوند و کسر $1-\alpha$ که در واقع بیانگر مصرف‌کنندگان پاسخگو به قیمت هستند که با هزینه‌ی زمان‌واقعی الکتریسیته یعنی λ_t برخورد می‌کنند. تابع تقاضا $Q_t(\ )$ برای هر دوره را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$Q_t(\lambda_t;w)=a_t(w)-\alpha b\lambda^R-(1-\alpha)b\lambda_t \quad (۱۳)$$

در رابطه‌ی ۱۳ $a_t(w)$ میزان رهگیری تابع تقاضا و b شیب تابع تقاضا می‌باشد. توجه شود که فرض نمودیم یک شیب مرسوم برای همه‌ی زمان‌های دوره برقرار است. همچنین فرض نمودیم که میزان رهگیری به صورت تصادفی و متغیر با زمان است که به تحقق تقاضای انعطاف‌پذیر بستگی دارد.

به منظور مدل‌سازی تابع تقاضا با مدل پاسخگویی بار، پارامترهای تابع تقاضا به گونه‌ای کالیبره می‌شوند که بتوانند دو شرط زیر را ارضا نمایند:

- توابع تقاضا با توجه به محدودیت نرخ شارژ C بایستی دارای کارایی تقاضای روزانه‌ای معادل R باشند.
- تابع تقاضا بایستی در برابر تقاضای انعطاف‌ناپذیر مشاهده شده مقاوم باشد.

فرآیند کالیبرازیسیون در گام‌های زیر تشریح شده است:

۱- گام اول: انتخاب کسر تقاضای انعطاف‌ناپذیر α که در آن R بیانگر یک کسر $1-\alpha$ از کل تقاضای روزانه می‌باشد. به طور منحصر به فرد، برای هر مقدار R داده شده، کسر α برای هر نوع روز به صورت $1-\alpha=\frac{R}{(R+\overline{D})}$ تعیین می‌شود که $\overline{D}$ متوسط تقاضای روزانه شرکت توزیع برای هر نوع روز می‌باشد. این مقدار بر اساس داده‌های موجود تخمین زده می‌شود.

۲- گام دوم: مقدار شیب b به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که میزان تولید برای مصرف‌کنندگان پاسخگو به قیمت در مدل پخش بار اقتصادی همراه با ژنراتورهای کند برنامه‌ریزی شده بر اساس حل بهینه‌ی w_{gt}^* و z_{gt}^* در مساله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی، معادل R است. به طور منحصر به فرد، توابع تقاضای تقاضای ثابتی در نقطه‌ی $\left(\lambda^R,\frac{\overline{D}_t}{\alpha}\right)$ ثابت می‌شود و تا زمانی که مدل یاد شده بر اساس پروفیل میانگین تولید توان بادی به مقدار تقاضای کلی $\frac{\overline{D}}{\alpha}$ برسد، شیب تابع تقاضا یعنی b کالیبره می‌گردد. در اینجا $\overline{D}_t$ مربوط به تقاضای ساعتی میانگین شرکت توزیع برای هر نوع روز می‌باشد که بر اساس داده‌های موجود تخمین زده می‌شود. همچنین $\overline{D}=\sum_{t\in T}\overline{D}_t$ می‌باشد.

۳- گام سوم: برای هر تحقق ω در در تقاضای انعطاف‌ناپذیر مانند $\alpha Q_t(\lambda^R;\omega)$، برای اینکه ω در هر تقاضای انعطاف‌ناپذیر مشاهده نشده به صورت ثابت و استوار باقی بماند، بایستی رابطه‌ی $a_t(\omega)=Q_t(\lambda^R;\omega)+b\lambda^R$ تنظیم گردد.

۴- گام چهارم: معکوس تابع تقاضا برای تقاضای تعویق‌پذیر به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که می‌توان آن را برای ارزیابی B_{lt} با هدف تنظیم بارهای پاسخگو به قیمت L و ارزیابی‌های مربوط به آن‌ها در قالب فرمول‌بندی بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی در مدل اقتصادی پخش بار به صورت زیر ارایه نمود:

$$B_t(q_t;\omega)=\left(\frac{1}{b}\right)\left(a_t(\omega)-\frac{q_t}{(1-\alpha)}\right), q_t\le C \quad (۱۴)$$

$$(ED_\omega): \quad (۱۵)$$

$$max \sum_{l\in L}\sum_{t\in T}B_{lt}d_{lt}-\sum_{g\in G}\sum_{t\in T}\left(K_g u_{gt}+S_g v_{gt}+C_g p_{gt}\right)$$

$$\sum_{g\in G}p_{gt}=D_{\omega t}+\sum_{l\in L}d_{lt} \quad t\in T \quad (۱۶)$$

$$0\le\sum_{l\in L}d_{lt}\le C, \quad t\in T \quad (۱۷)$$

$$u_{gt}=w_{gt}^*, v_{gt}=z_{gt}^*, g\in G_s, t\in T \quad (۱۸)$$

$$(p,e,u,v)\in D \quad (۱۹)$$

در این رابطه d_{lt} بیانگر توان بخش l بار در دوره‌ی t می‌باشد. همچنین $D_{\omega t}$ بیانگر میزان تقاضای جریان منهای توان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد.

کوپلینگ

در این قسمت یک ساختار قراردادی برای اتصال منابع تولیدکننده‌ی انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز با تجمیع‌گرهای بارهای قابل تعویض در نظر گرفته شده است. بر اساس این قرارداد، یک انبوه‌ساز برای ارزیابی هر مقدار خرجی از گروه کلانی از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم-های ذخیره‌ساز و ظرفیت بارگذاری آن‌ها، حق‌الزحمه‌ای را دریافت می‌کند. سپس این انبوه‌ساز به منظور تولید تجمیع‌گرهای بارهای قابل تعویض به یک ساختار قراردادی وارد می‌شود. بارها بر اساس مقدار ثابت تقاضای انرژی‌شان در یک پنجره‌ی زمانی شناخته می‌شوند. انبوه‌ساز به طور مستقیم بارها را کنترل کرده و از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی به عنوان منابع انرژی اولیه برای ارضای تقاضای تجمیع‌گر قابل تعویق استفاده می‌کند. در حال کمبود تولید انرژی، انبوه‌ساز بازارهای عمده‌فروشی زمان‌واقعی را برای تولید توان بر اساس قیمت غالب بازیابی می‌کند. انبوه‌ساز تجمیع‌گر بارهای قابل تعویق را در نرخ ρ برای هر واحد ناخودآگاه جبران می‌کند. رویه‌ی کار مشابه برنامه‌ریزی دینامیکی است که در آن برنامه‌ریزی منابع تقاضا و تولید بر اساس نواحی کنترلی صورت می‌پذیرد تا در حالت تولید صفر نیز در مدار باقی بمانند. برای اهداف کاربردی نمی‌توان انبوه‌ساز را به عنوان یک معامله‌گر توان تجسم کرد. علاوه بر این فرض می‌کنیم که انبوه‌ساز پیشنهادی برای مصرف انرژی حاصل از منابع تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی دارد اما هیچ مالکیتی بر روی خروجی آن ندارد.

ساختار کوپلینگ به صورت یک مساله‌ی کنترل بهینه‌ی تصادفی فرمول-بندی می‌شود:

$$\min_{\mu_t(x_t)} E[\sum_{t\in T}\lambda_t(\mu_t(x_t)-w_t)^+\Delta t+\rho r_N] \quad (۲۰)$$

$$r_1=R \quad (۲۱)$$

$$r_{t+1}=r_t-\mu_t(x_t) \quad (۲۲)$$

$$\mu_t(x_t)-w_t\le M_t \quad (۲۳)$$

$$0\le\mu_t(x_t)\le C \quad (۲۴)$$

$$r_t\ge 0 \quad (۲۵)$$

برای تحقق هر عدم قطعیت به صورت ω، حل مساله‌ی کنترل بهینه شامل پروفیل تقاضایی به صورت $\mu_t(x_t)-w_t$ برای تجمیع‌گر بارهای قابل تعویق متصل به منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی است. تقاضای کلی سیستم $D_{\omega t}$ به صورت مجموع پروفیل تقاضای شبکه و تقاضای انعطاف‌ناپذیر است. در نتیجه تقاضای کلی که بهره‌بردار سیستم را در فاز پخش بار اقتصادی ارضا می‌کند، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(ED_\omega): \quad (۲۶)$$

$$\sum_{g\in G}\sum_{t\in T}\left(K_g u_{gt}+S_g v_{gt}+C_g p_{gt}\right)$$

$$\sum_{g\in G}p_{gt}=D_{\omega t} \quad t\in T \quad (۲۷)$$

$$u_{gt}=w_{gt}^*, v_{gt}=z_{gt}^*, g\in G_s, t\in T \quad (۲۸)$$

$$(p,u,v)\in D \quad (۲۹)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله نتایج حاصل برای یک سیستم تحت مطالعه تحت عنوان مدل کاهش¬یافته¬ی شورای هماهنگی برق بخش غرب آمریکا مهیا شده است[۱۷-۱۶]. مدل مورد استفاده شامل ۱۲۴ ژنراتور می¬باشد. بار میانگین سیستم نیز معادل ۲۷۲۹۸ مگاوات است. کمترین مقدار بار و پیک بار سیستم نیز به ترتیب ۱۸۴۱۲ و ۴۵۵۶۲ مگاوات می¬باشد. ظرفیت تولید حرارتی کل سیستم ۲۸۳۸۱/۵ مگاوات است. واحدهای حرارتی با ظرفیت بیش از ۳۰۰ مگاوات در دسته¬ی ژنراتورهای آهسته دسته¬بندی می¬شوند. در مدل در نظر گرفته شده ۸۲ ژنراتور سریع با ظرفیت کلی ۹۱۵۶/۱ مگاوات و ۴۲ ژنراتور آهسته با ظرفیت کلی ۱۹۲۲۵/۴ مگاوات در

نظر گرفته شده است. مقدار بار از دست رفته در مقدار $/MWh 5000 تنظیم شده است. میزان تولید واحدهای موجود در مدل کاهش¬یافته¬ی شورای هماهنگی برق بخش غرب آمریکا معرفی شده و همچنین میزان توان تولیدی ژنراتورهای سریع و آهسته در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: میزان تولید واحدهای موجود در مدل معرفی شده

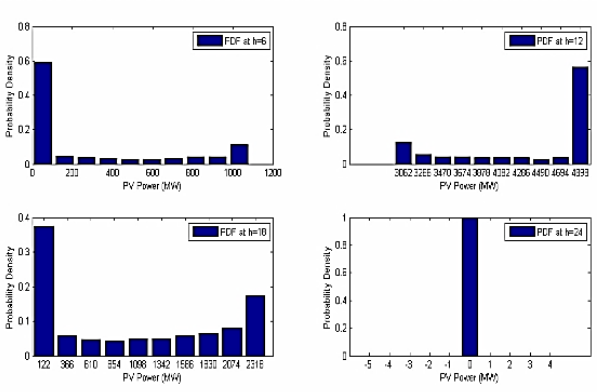
نوع واحد	تعداد واحدها	ظرفیت (MW)
هسته‌ای	۲	۴۴۹۹
گازی	۸۶	۱۸۷۴۵/۶
زغال سنگ	۶	۲۸۵/۹
سوخت فسیلی	۵	۲۵۲
سوخت دوگانه	۲۳	۴۵۹۹
وارداتی	۲۲	۱۲۶۹۱
برق آبی	۶	۱۰۸۴۲
تجمیع‌گر بار	۳	۵۵۸
زمین گرمایی	۲	۱۱۹۳
بادی با نفوذ ۷/۱ درصد	۵	۶۶۸۸
بادی با نفوذ ۱۴ درصد	۱۰	۱۴۱۴۳
ژنراتور سریع	۸۲	۹۱۵۶/۱
ژنراتور آهسته	۴۰	/۴ ۱۹۲۲۵

از آن¬جا که در این مقاله از اطلاعات سال ۲۰۰۴ استفاده شده است، از اطلاعات بار همان سال استفاده شده است که در پایگاه داده¬ی مربوط به اپراتور سیستم مستقل کالیفرنیا موجود است. برای کالیبرازیسیون مدل تابع تقاضا، هزینه¬ی خرده¬فروشی بر اساس داده¬های تهیه¬شده توسط دپارتمان اطلاعات انرژی آمریکا به صورت در نظر گرفته شده است. سه حالت ادغام منابع بادی در جدول ۲ خلاصه شده است.

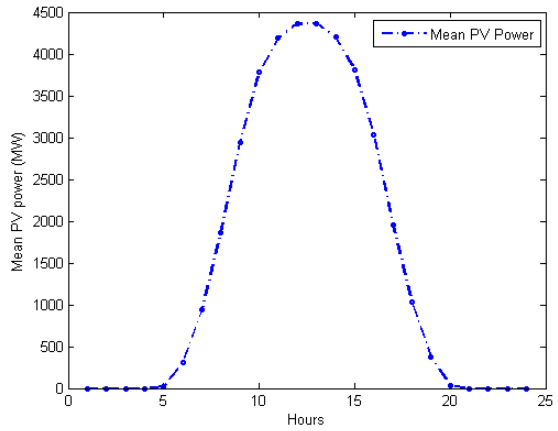
جدول ۲: حالات ادغام منابع بادی برای پاسخگویی بار مورد مطالعه

	بدون باد	باد متوسط	باد شدید
ظرفیت توان بادی (MW)	۰	۶۶۸ ۸	۱۴ ۱۴۳
ظرفیت پاسخگویی بار C (MW)	۰	۵۰ ۰۰	۱۰ ۰۰۰
انرژی بادی روزانه (MWh)	۰	۴۶۴ ۸۵	۹۵ ۴۱۴
انرژی تقاضای بار روزانه R (MWh)	۰	۴۰ ۰۰۰	۸۰ ۰۰۰
تقاضای انعطاف‌پذیری (%)	۰	۶/۱	/۲ ۱۲

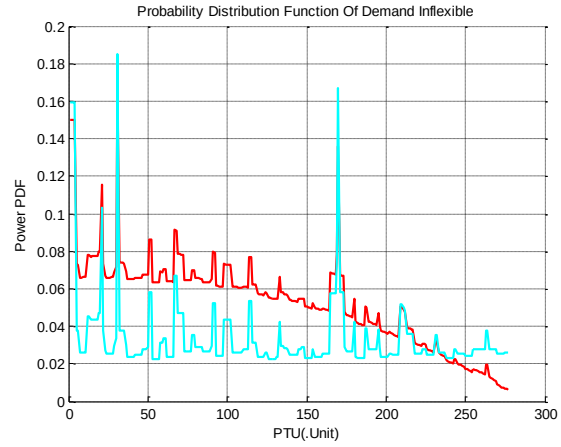
ب



شکل ۱: تابع توزیع احتمال تولید منابع خورشیدی



شکل ۲: تولید انتظاری منابع خورشیدی در شبانه¬روز

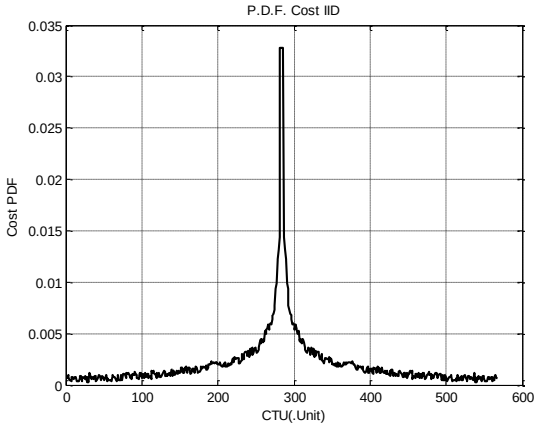


شکل ۳: تابع توزیع احتمال تقاضای انعطاف¬ناپذیر برای تقاضای تعویق¬پذیر

ار ارایه شده در جدول ۱ تحت عنوان بار انعطاف¬پذیر اضافی سیستم در نظر گرفته می¬شود. برای هر سطح از ادغام باد، فرض بر آن است که سطح یکپارچه¬سازی پاسخگویی بار برای ادغام منابع بادی تقریبا تناظری یک به یک بین ظرفیت انرژی و تقاضا دارد. همچنین فرض بر این است که دوره¬ی تقاضای تعویق¬پذیر، ۲۴ ساعت که حد فاصل دو نیمه¬شب است. این مهم ایجاب می¬کند که مساله¬ی کنترل بهینه¬ که در رابطه¬ی ۲۰ ارایه شده است، برای یک افق برنامه¬ریزی ۲۴ ساعته که حد فاصل دو نیمه¬شب است، حل می¬¬گردد. در این مقاله ۶ سطح تولید توان برای مساله¬ی کنترل در نظر گرفته شده است. جریمه¬ی انرژی تامین نشده نیز در نظر گرفته شده است. تعداد سناریو¬های در نظر گرفته شده برای فرمول¬بندی

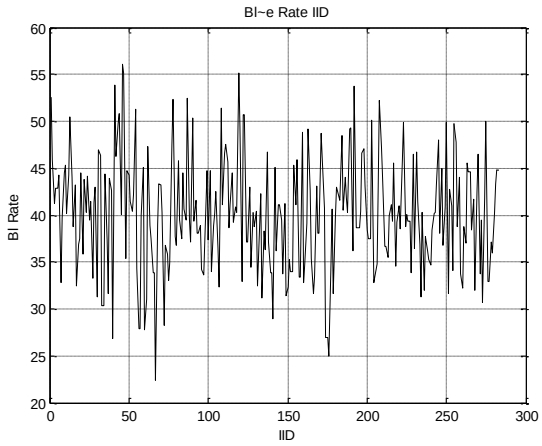
مدل تطبیق منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم¬های ذخیره¬ساز انرژی با تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق نیز ۱۲ سناریو می¬باشد. همچنین داده¬های باد که برای کالیبرازیسیون مدل¬های استاتیکی که مبتنی بر داده¬های آزمایشگاه ملی انرژی¬های تجدیدپذیر است، استفاده می¬شود. با اجرای مدل پیشنهادی برای منابع خورشیدی تابع توزیع احتمال تولید این منابع با ظرفیت ۵۰۰۰ مگاوات در شبانه روز برای هر ساعت محاسبه می¬شود. تابع توزیع احتمال تولید منابع خورشیدی در ساعات محدودی از روز در در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین میانگین تولید انتظاری منابع خورشیدی در شکل ۲، ارائه شده است. بر اساس داده¬های موجود، منحنی مربوط به تابع توزیع احتمال تقاضای انعطاف¬ناپذیر برای تقاضای تعویق¬پذیر در شکل ۳ آورده شده است.

کالیبراسیون تقاضای انعطاف¬ناپذیر حالتی خاص را دنبال می¬کند. بر اساس منحنی نشان داده شده در شکل ۳ بدیهی است که واحدهایی با تولید توان کمتر از ۵۰ مگاوات یا بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ مگاوات تولید دارند، بیشترین میزان تقاضای انعطاف¬ناپذیر را دارند. در تحلیل ارایه شده در این قسمت، یک مدل بادی تک ناحیه مهیا شده است که همچنین به منظور تمرکز بر تاثیر پاسخگویی تقاضا، از قیود انتقال صرف نظر شده است. در شکل ۳ منحنی قرمز رنگ مربوط به داده¬های موجود و منحنی آبی رنگ مربوط به مدل استفاده شده توسط ما می¬باشد که مشاهده می¬کنیم با استفاده از مکانیسم پیشنهادی، مطابقت بالایی با یکدیگر دارند. تابع توزیع احتمال قیمت¬گذاری زمان¬¬ واقعی در شکل ۴ آورده شده است.



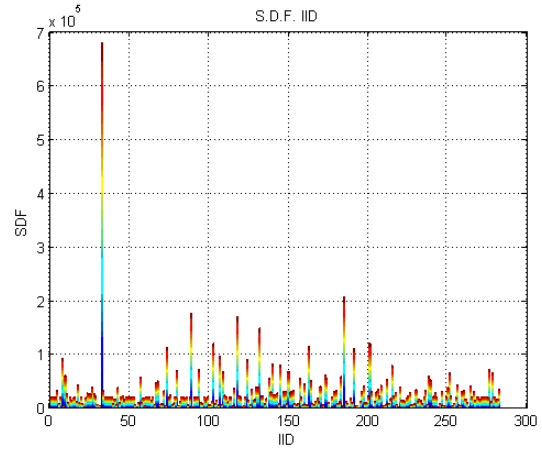
شکل ۴: تابع توزیع احتمال قیمت¬گذاری زمان¬واقعی

تابع توزیع احتمال قیمت¬گذاری زمان¬واقعی با هدف بهره¬وری اقتصادی مشخص شده است، چرا که بر اساس منحنی تابع توزیع احتمال قیمت¬گذاری زمان¬واقعی، واحدهایی که دارای بیشترین هزینه باشند، از لحاظ اقتصادی به صرفه نیستند و بایستی به فکر جایگزینی برای آن¬ها بود. یکی از مهم¬ترین روش¬های جایگزین واحدهایی با بیشترین مقدار هزینه برای تامین تجمیع¬گرهای بارهای تعویق¬پذیر، استفاده از دیگر واحدهای تولیدی می¬باشد که انتخاب آن بر اساس منجنی قیمت¬گذاری زمان¬واقعی انجام می¬شود. بر اساس شکل ۴ بدیهی است که واحدهایی با در حدود ۳۰۰ مگاوات تولید دارند، دارای بیشترین مقدار هزینه می¬باشند و از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی¬باشند، لذا بارهای تعویق¬پذیر از طریق واحدهایی تامین می¬شوند که بهره¬وری اقتصادی بیشتری داشته باشند. با توجه به این¬که منبع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده در این مقاله از نوع بادی می¬باشد، در شکل ۵ تابع توزیع احتمال تولید توان بادی که نشان دهنده¬ی نرخ تغییرات سرعت باد بر حسب توان است، نشان داده شده است.



شکل ۵: تابع توزیع احتمال تولید توان بادی

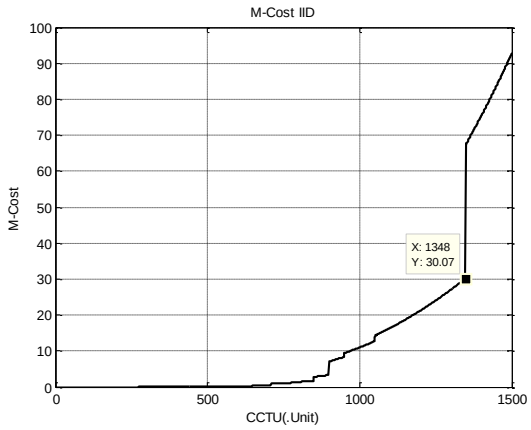
در شکل ۶ چگالی احتمال واحدها نشان داده شده است. بر اساس این نمودار چگالی داده¬ها در میزان تولید انرژی کمتر از ۵۰ مگاوات بالاترین مقدار را دارد. روند محاسبه¬ی مقدار حاشیه¬ای در رابطه¬ی ۲۳ برای حل مساله¬ی کنترل بهینه¬ی تصادفی، در شکل ۷ بیان شده است. این شکل در واقع منحنی مرتبه¬ی شایستگی را برای حل مساله¬ی کنترل¬ بهینه¬ی مدل پیشنهادی نشان می¬دهد. این منحنی مرتبه¬ی شایستگی را می¬توان با استفاده از داده¬های بازار موجود بر روی ظرفیت کلی دیسپاچ شده و قیمت بازار انرژی مربوطه برای هر ساعت از روز ایجاد نمود.



شکل ۶: تابع چگالی احتمال¬ واحدهای تولید

روند محاسبه¬ی مقدار حاشیه¬ای در رابطه¬ی ۲۳ برای حل مساله¬ی کنترل بهینه¬ی تصادفی، در شکل ۷ بیان شده است. این شکل در واقع منحنی مرتبه¬ی شایستگی را برای حل مساله¬ی کنترل¬ بهینه¬ی مدل پیشنهادی نشان می¬دهد. این منحنی مرتبه¬ی شایستگی را می¬توان با استفاده از داده¬های بازار موجود بر روی ظرفیت کلی دیسپاچ شده و قیمت بازار انرژی مربوطه برای هر ساعت از روز ایجاد نمود. در یک مقدار هزینه¬ی ضربه¬ای داده شده مانند ، ظرفیت مربوط به هزینه¬ی ضربه¬ای داده شده با استفاده از مقدار معکوس منحنی مرتبه¬ی شایستگی در این نقطه به دست می¬آید.¬ نقطه¬ی حاصل می¬باشد. این مقدار به طور معمول بیانگر ظرفیتی است که در مقدار هزینه¬ی حاشیه¬ای موجود است. حال برای محاسبه¬ی مقدار حاشیه¬ای نیاز به یک ظرفیت دیگر داریم که بار کل سیستم شامل تقاضای انعطاف¬ناپذیر شبکه به علاوه¬ی تقاضای تعویق¬پذیر است که به صورت نشان داده می¬شود. بنابراین مقدار

حاشیه¬ای به صورت محاسبه می¬شود. با این فرض ک مقدار ظرفیت باشد، مقدار حاشیه¬ای تقریبا معادل ۳۸۴ مگاوات حاصل می¬شود.



شکل ۷: محاسبه¬ی مقدار حاشیه¬ای M_t در رابطه¬ی ۲۳ برای مساله¬ی کنترل بهینه¬ی تصادفی

هدف از حل مساله¬ی برنامه¬ریزی تصادفی به حداقل رساندن هزینه¬های فرآیند تامین انرژی الکتریکی برای یک سیستم قدرت، در یک افق زمانی مشخص می¬باشد. همان¬طور که پیش¬تر گفته شد، در این مقاله، یک الگوی تصمیم¬گیری دو مرحله¬ای در نظر گرفته شده است که بخش اول آن بیانگر تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق و بخش دوم آن بیانگر توزیع اقتصادی است که برای دستیابی به تاثیرات انرژی تجدیدپذیر و سیستم¬های ذخیره¬ساز انرژی لازم می¬باشد که با دقت ساعتی و به صورت نامشخص و متغیر در نظر گرفته می¬شود. مقادیر بهینه¬ی تابع هدف با به¬کارگیری مساله¬ی فرمول¬بندی شده برای تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق و دیسپاچینگ اقتصادی در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول به ترتیب مقدار کمینه¬ی مساله¬ی تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق (معادلات ۱ تا ۶)، مقدار کمینه¬ی دیسپاچینگ اقتصادی (۷ تا ۱۲)، مقدار بیشینه¬ی دیسپاچینگ اقتصادی (۱۵ تا ۱۹) آمده است.

جدول ۳: نتیجه¬ی بهینه¬سازی با استفاده از الگوریتم پویای معرفی شده

نوع متغیر	مقدار متغیر
ADA_{max}	۹۴۵۹۷۵۴/۴۷۳۵
$ED_{\omega-min}$	۱/۲۳۶۹
$ED_{\omega-max}$	۳۳۶۴/۳۵۱۴

۴- نتیجه‌گیری

مساله¬ی برنامه¬ریزی ارایه شده مربوط به تعیین مجموعه¬ی بهینه¬ای از واحدهای تولید با کمترین مقدار توان است که در دهه-های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این مساله¬ در واقع مربوط به کمینه¬ کردن هزینه¬های عملیاتی، هزینه¬های گذرا و هزینه¬های بی باری (حالت انتظار) و همچنین بیشینه کردن سود کمپانی است.

در این مقاله روشی برای حل مساله¬ی پخش بار اقتصادی و تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق با استفاده از الگوریتم¬های پویا می¬باشد. این الگوریتم دارای دو مرحله می¬باشد که مرحله¬ی اول آن مربوط به تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق و بخش دوم آن مربوط به توزیع دیسپاچینگ اقتصادی می¬باشد. علاوه بر این، تاثیر حضور انرژی¬های تجدیدپذیر و سیستم¬های ذخیره¬ساز انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای تعویق¬پذیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیستم غربی ایالات متحده¬ به عنوان سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

در این مقاله پس از استخراج تابع توزیع احتمالی برای کمیت-هایی از قبیل تابع توزیع احتمالی تقاضای انعطاف¬ناپذیر، تابع توزیع احتمالی قیمت¬گذاری زمان¬واقعی، تابع توزیع احتمال تولید توان بادی و تابع چگالی احتمال واحدها، مقدار حاشیه¬ای محاسبه گردید و در پایان نیز مقادیر بهینه¬ی شاخص تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق و دیسپاچینگ اقتصادی گردید که در این راستا، مقادیر شاخص تطبیق منابع تولید کننده¬ی انرژی و تجمیع¬گرهای بارهای قابل تعویق و دیسپاچینگ اقتصادی و همچنین مقدار بیشینه¬ی دیسپاچینگ اقتصادی تعیین گردید.

مراجع

Rodríguez, Rafael, Matías Negrete-Pincetic, Nicolás Figueroa, Álvaro Lorca, and Daniel Olivares. "The value of aggregators in local electricity markets: A game theory based comparative analysis." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 27 (2021): 100498.

Hakimi, Seyed Mehdi, Arezoo Hasankhani, Miadreza Shafie-khah, and João PS Catalão. "Stochastic planning of a multi-microgrid considering integration of renewable energy resources and real-time electricity market." *Applied Energy* 298 (2021): 117215.

Hasankhani, Arezoo, and Seyed Mehdi Hakimi. "Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market." *Energy* 219 (2021): 119668.

Naval, Natalia, and Jose M. Yusta. "Virtual power plant models and electricity markets-A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149 (2021): 111393.

Shang, Yunfeng, Ding Han, Giray Gozgor, Mantu Kumar Mahalik, and Bimal Kishore Sahoo. "The impact of climate policy uncertainty on renewable and non-renewable energy demand in the United States." *Renewable Energy* 197 (2022): 654-667.

López Prol, Javier, and Wolf-Peter Schill. "The economics of variable renewable energy and electricity storage." *Annual Review of Resource Economics* 13 (2021): 443-467.

Bahramara, S. "Robust optimization of the flexibility-constrained energy management problem for a smart home with rooftop photovoltaic and an energy storage." *Journal of Energy Storage* 36 (2021): 102358.

Javanmard, Behzad, Mohammad Tabrizian, Meghdad Ansarian, and Amir Ahmarinejad. "Energy management of multi-microgrids based on game theory approach in the presence of demand response programs, energy storage systems and renewable energy resources." *Journal of Energy Storage* 42 (2021): 102971.

Li, Zening, Su Su, Xiaolong Jin, and Houhe Chen. "Distributed energy management for active distribution network considering aggregated office buildings." *Renewable Energy* 180 (2021): 1073-1087.

Burg, Leonard, Gonca Gürses-Tran, Reinhard Madlener, and Antonello Monti. "Comparative analysis of load forecasting models for varying time horizons and load aggregation levels." *Energies* 14, no. 21 (2021): 7128.

Mohseni, Soheil, Alan C. Brent, Scott Kelly, Will N. Browne, and Daniel Burmester. "Strategic design optimisation of multi-energy-storage-technology micro-grids considering a two-stage game-theoretic market for demand response aggregation." *Applied Energy* 287 (2021): 116563.

Muttaqi, Kashem M., and Danny Sutanto. "Adaptive and predictive energy management strategy for real-time optimal power dispatch from VPPs integrated with renewable energy and energy storage." *IEEE Transactions on Industry Applications* 57, no. 3 (2021): 1958-1972.

Lyu, Cheng, Youwei Jia, and Zhao Xu. "Fully decentralized peer-to-peer energy sharing framework for smart buildings with local battery system and aggregated electric vehicles." *Applied Energy* 299 (2021): 117243.

Alomoush, Muwaffaq I. "Microgrid dynamic combined power–heat economic-emission dispatch with deferrable loads and price-based energy storage elements and power exchange." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 26 (2021): 100479.

Alharbi, Walied, and Abdulaziz Almutairi. "Planning flexibility with non-deferrable loads considering distribution grid limitations." *IEEE Access* 9 (2021): 25140-25147.

[Online]. Available: http://www.eia.gov/electricity/state/california/.

Energy, G. E. *Western wind and solar integration study*. NREL/SR-550-47434. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2010.