

مقابله با عدم قطعیت انرژی بادی به کمک برنامه‌ریزی تصادفی پاسخگویی بار مبتنی بر تجهیزات برنامه‌ریز مصرف انرژی

سیدسعید سیدصادق‌زاده^۱، مجید علمی باگی^۲

۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه فردوسی مشهد. پست الکترونیکی: farid.sadeghzadeh@gmail.com
۲دانشیار گروه برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. پست الکترونیکی: m_oloomi@yahoo.com

۱. مقدمه

یکی از مهمترین مشوق‌ها و مزایای پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند، امکان اعمال برنامه‌های پاسخگویی بار و مدیریت سمت تقاضا جهت مصرف بهینه توان، صرفه جویی در هزینه‌ها و افزایش میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند باد) است. شبکه‌ی هوشمند به‌عنوان یک سیستم فیزیکی-سایبری بزرگ مقیاس متصور می‌شود که می‌تواند با تجمیع تکنیک‌های پیشرفته از رشته‌های گوناگون از قبیل سیستم‌های قدرت، کنترل، مخابرات، پردازش سیگنال و شبکه‌سازی، مواردی همچون راندمان، قابلیت اطمینان، و استحکام^۱ شبکه‌های انرژی و توان را بهبود بخشد.

یکی از مسائلی که شبکه هوشمند بدان می‌پردازد، مدیریت مؤثر بار است. مدیریت بار در شبکه هوشمند می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت برای تولید انرژی و دستیابی به بهره‌برداری بیشتر از تجهیزات موجود شود. همچنین، مدیریت بار باعث کاهش پیک مصرف نیز خواهد شد که در نتیجه نیاز به سرمایه‌گذاری تولید نیز کاهش می‌یابد. از جمله ابزارهایی که می‌توانند کمک مؤثری به مدیریت بار نمایند، تجهیزات برنامه‌ریز مصرف انرژی^۲ (ECS) هستند. این تجهیزات با قرار گرفتن در کنتورهای هوشمند مشترکین، می‌توانند با یکدیگر تعامل کرده و در راستای

چکیده — یکی از مهمترین مشوق‌ها و مزایای پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند، امکان اعمال برنامه‌های پاسخگویی بار و مدیریت سمت تقاضا جهت مصرف بهینه توان، صرفه جویی در هزینه‌ها و افزایش میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند باد) است. در این مقاله، چارچوب پاسخگویی بار جهت مقابله با عدم قطعیت در متغیرهای برنامه‌ریزی، به طور ویژه عدم قطعیت تولید بادی، ارائه می‌شود. به‌طور کلی یک رویکرد مناسب جهت مقابله با عدم قطعیت در متغیرهای یک مسئله بهینه‌سازی، استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی است. در این روش، برنامه‌ریزی بر اساس حداقل کردن امید ریاضی هزینه ریزش شبکه روی سناریوهای ممکن انجام می‌پذیرد. بنابراین نیاز است سناریوهای مختلف بادی ۲۴ ساعت آینده ایجاد شود. بدین منظور از پیش‌بینی‌های احتمالی سرعت باد برای ایجاد سناریو استفاده شده است. جهت کاهش سناریوها به اندازه‌ای قابل قبول، از روش کاهش سناریو نیز استفاده می‌کنیم. روش ارائه‌شده را برای سه روز متفاوت با سه پروفایل تولید بادی مختلف شبیه‌سازی نموده و با برنامه‌ریزی قطعی مقایسه می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از برتری رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به برنامه‌ریزی قطعی است.

واژه‌های کلیدی — انرژی بادی، برنامه‌ریز مصرف انرژی (ECS)، شبکه هوشمند، نظریه بازی‌ها، برنامه‌ریزی تصادفی.

¹ robustness

² Energy Consumption Scheduler

یکی از معروفترین روش‌های یقینی توسط آقای محسنیان راد در [۵] ارائه شده است. در این مقاله ساختاری بر اساس نظریه بازی‌ها ارائه شده است که در آن مصرف‌کنندگان مصرف خود را با توجه به اطلاعات مصرف سایر مصرف‌کنندگان و تابع هزینه تامین توان شبکه تنظیم می‌کنند.

هرچند که هر یک از این کارها مسئله‌ی ریزش‌بکه‌ی هوشمند را از یک منظر مهم مطالعه کرده‌اند، اما نقص اصلی همه‌ی آن‌ها این است که فقط تحلیل قطعی را انجام داده‌اند. در حقیقت غافل ماندن از تأثیر عدم قطعیت می‌تواند بر برنامه‌ریزی کلی عملکرد تأثیرگذار باشد، به طوری که پاسخ بهینه‌ی نهایی شاید در واقع بهترین نقطه‌ی کار نباشد. از این حیث، نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر (به ویژه باد) در بازار توان جدید، روش کار سیستم‌های قدرت را تغییر داده است. این وضعیت، ارزیابی مجدد روش‌های سنتی را در یک محیط تصادفی جدید ضروری می‌سازد. به منظور پرداختن به تأثیر عدم قطعیت، بهره‌گیری از چارچوب‌های تصادفی می‌تواند مفید باشد.

۳. مدیریت مصرف و برنامه‌ریزی بار

۳.۱. روش‌های مدیریت مصرف

روش‌های مختلفی برای مدیریت مصرف وجود دارد. می‌توان این روش‌ها را به طور کلی به سه دسته تقسیم کرد:

- کنترل مستقیم بار^۲ (DLC) [۶]
- قیمت گذاری هوشمند [۷]، و
- در نظر گرفتن تأثیرات متقابل مصرف‌کنندگان [۵].

از بین این روش‌ها، مورد آخر پویاترین و واقع‌بینانه‌ترین روش مدیریت مصرف است. یک برنامه‌ی خوب مدیریت تقاضا می‌بایست به جای تمرکز بر چگونگی رفتار هر یک از مصرف‌کنندگان به طور جداگانه، هدفش این باشد که بار تجمیع شده برخی از ویژگی‌های مطلوب را برآورده کند. به عنوان مثال برای حل مسئله‌ی پخش بار اقتصادی، فقط مجموع بار در هر ساعت اهمیت می‌یابد. همچنین نسبت پیک به تقاضا صرفاً به مجموع تقاضای بار بستگی دارد. بنابراین علاوه بر این که به کارگیری واحدهای تجمیع‌کننده برای شکل-دهی بار^۳ مفید است، طراحی استراتژی‌های اثربخش‌تر برای مدیریت بار خانگی نیز اهمیت دارد. این استراتژی‌ها می‌بایست با فعال کردن تعاملات

² Direct Load Control

³ load shaping

کاهش هزینه مصرف‌کنندگان، مصرف وسایل خانگی از پیش تعریف شده بدین منظور را کنترل نمایند.

با توجه به نفوذ روزافزون تولید بادی در شبکه‌های قدرت، بایستی برای مدیریت مؤثر بار، تمهیدات ویژه‌ای برای مقابله با عدم قطعیت ناشی از این منابع تجدیدپذیر اندیشیده شود. در این مقاله، جهت کاهش اثرات نامناسب عدم قطعیت در میزان تولید بادی از برنامه‌ریزی تصادفی برای برنامه‌ریزی پاسخگویی بار استفاده شده است. در این روش، برنامه‌ریزی بر اساس حداقل کردن امید ریاضی هزینه ریزش‌بکه روی سناریوهای ممکن انجام می‌پذیرد. بنابراین نیاز است سناریوهای مختلف بادی ۲۴ ساعت آینده ایجاد شود. بدین منظور از پیش‌بینی‌های احتمالی سرعت باد برای ایجاد سناریو استفاده شده است. جهت کاهش سناریوها به اندازه‌ای قابل قبول، از روش کاهش سناریو نیز استفاده می‌کنیم. روش ارائه شده را برای یک روز مورد مطالعه شبیه‌سازی نموده و با برنامه‌ریزی قطعی مقایسه می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از برتری رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به برنامه‌ریزی قطعی است.

۲. مرور مقالات

به منظور به حداقل رساندن مجموع بهای پرداختی بابت برق، مصرف‌کنندگان قیمت محور می‌توانند به قیمت‌های برقی که برحسب زمان متغیر هستند واکنش نشان داده و مصارف خود را به بازه‌هایی منتقل کنند که قیمت‌های برق نسبتاً پایین است. کار انجام شده در [۱] یک چارچوب برنامه‌ریزی انرژی را برای آن دسته از وسایل خانگی که در یک خانه به صورت خودکار و بهینه کار می‌کنند ارائه می‌دهد و درعین حال مصالحه‌ی بین حداقل قبض برق و حداکثر انتفاع مصرف‌کننده را در نظر می‌گیرد.

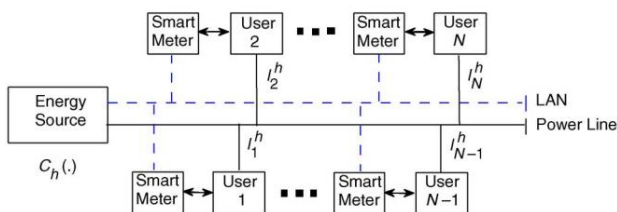
در [۲] خودر و همکارانش در آزمایشگاه یک ریزش‌بکه هوشمند تجدیدپذیر را شبیه‌سازی کردند تا برای مدیریت هوشمند مصرف در هفته‌ی بعد (۶۷۲ بازه زمانی) در یک محیط قطعی^۱، یک روش هوشمند را پیشنهاد کنند. جدید و همکارانش در [۳] به منظور کمینه‌سازی هزینه‌ی کلی یک ریزش‌بکه هوشمند بادی - خورشیدی - آبی، روش جدیدی را بر پایه‌ی برنامه‌ریزی خطی پیشنهاد کردند. داکا و همکارانش در [۴] به منظور ارزیابی مسئله‌ی مشارکت واحدها در یک ریزش‌بکه هوشمند شامل توربین بادی و دستگاه‌های ذخیره، یک روش مشارکت را ارائه کردند.

¹ deterministic

لحاظ کردن خواسته‌های هرکدام از مشترکان، بتواند با تجهیزات مصرف‌کننده توان در تماس باشد و برنامه مصرف توان بهینه آن‌ها را تعیین نماید.

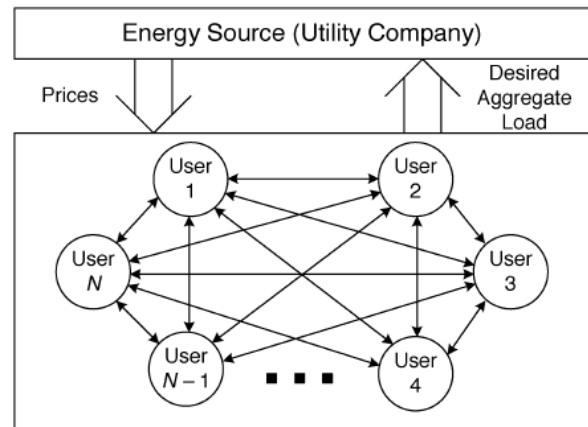
به‌منظور تعیین برنامه مصرف توان بهینه، مشترکان لازم است تابع هدف مطلوب خود را از پیش به ECS معرفی نمایند. ECS متناسب با این تابع هدف برنامه مصرف مناسب را پیدا و اجرا می‌نماید.

شکل ۲ چگونگی پیکربندی شبکه انتقال توان و شبکه انتقال داده را نشان می‌دهد. خاطر نشان می‌شود می‌توان ECSها را در کنتورهای هوشمند^۱ پیاده‌سازی نمود. در این شبکه تعدادی مصرف‌کننده به یک منبع توان متصل هستند. علاوه بر این، مصرف‌کننده‌ها از طریق یک شبکه انتقال محلی^۲ (LAN) به یکدیگر متصل هستند تا بتوانند با یکدیگر تبادل داده نمایند. با استفاده از پروتکل‌های ارتباطی امن مناسب می‌توان تمام اطلاعات مورد نیاز را، مانند میزان مصرف، قیمت و...، از طریق LAN جابه‌جا نمود.



شکل ۲: بلوک دیاگرام یک شبکه هوشمند که شامل یک منبع توان، خط توزیع توان، مصرف‌کنندگان و شبکه محلی اطلاعات (LAN) است [۸].

بین مصرف‌کنندگان از طریق تبادل پیام، طبق شکل ۱، کار کنند [۵]. اگر به مصرف‌کنندگان انگیزه‌ی کافی داده شود، آن‌ها می‌توانند مصرف خود را در جهت کاهش نسبت پیک به میانگین یا کمینه‌سازی هزینه‌ی انرژی هماهنگ کنند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های شبکه‌ی هوشمند، نیازی به دستی بودن تعاملات بین مصرف‌کنندگان نیست و ارتباط بین آن‌ها می‌تواند از طریق یک ارتباط دیجیتال خودکار دوسویه برقرار شود. در این مقاله از چهارچوبی مشابه آنچه در شکل ۱ نشان داده شده، استفاده گردیده است.



شکل ۱: استراتژی مدیریت تقاضا برای شبکه‌ی هوشمند با تعاملات بین کاربران/مصرف‌کنندگان و شرکت خدماتی [۵]

۳.۲. برنامه‌ریز مصرف انرژی (ECS)

به منظور حفظ امنیت شبکه و نیز حریم خصوصی تمام مصرف‌کنندگان، نیاز است برنامه‌ریزی مصرف مشترکان برق توسط سیستم‌های خودکار انجام شود. هرکدام از مصرف‌کنندگان شبکه به دنبال برنامه‌ریزی بهینه مصرف خود با در نظر گرفتن شرایط شبکه هستند. بدین ترتیب لازم است مداوماً با شبکه ارتباط داشته و متناظر با تغییرات شبکه رفتار خود را تنظیم نمایند. از آنجاکه تنظیم نمودن رفتارهای مصرف‌کنندگان فرایندی وقت‌گیر و شاید پیچیده باشد، لازم است تجهیزاتی استفاده گردند که به‌صورت خودکار با شبکه در ارتباط بوده، اطلاعات لازم را دریافت نموده، و با توجه به خواسته‌های هرکدام از مصرف‌کنندگان، برنامه‌ریزی بهینه مصرف مصرف‌کنندگان را مشخص نماید. این‌گونه تجهیزات را ECS می‌نامند. هرکدام از مشترکین شبکه‌های قدرت لازم است یک ECS جداگانه داشته باشد که از یک سو بتواند با شبکه تبادل اطلاعات نموده و از سوی دیگر، با

۴. بیان مسئله و الگوریتم پیشنهادی

۴.۱. شرح مسئله

در این مقاله به دنبال تعریف یک ساختار برای برنامه‌ریزی مصرف توان در ریزشبکه‌های هوشمند آینده هستیم. شبکه مدنظر ما دارای شرایط زیر است:

- دارای یک میکرو توربین متعارف گازی است.
- دارای یک ژنراتور بادی است که میزان تولید آن را می‌توانیم به‌صورت احتمالی پیش‌بینی نماییم. البته جهت پیش‌بینی میزان تولید، ابتدا فرض می‌کنیم پیش‌بینی سرعت باد منطقه موجود است.

¹ Smart meters

² Local Area Network

و هم طبق آن کمترین هزینه را بردارند. البته باید در نظر داشت که تنها بخش محدودی از وسایل برقی قابل کنترل توسط برنامه هستند. به‌عنوان مثال، ماشین ظرف‌شویی برقی، جاروبرقی خودکار، زمان شارژ خودروی برقی و ... را می‌توان با نظر مشترکان، اندکی جابجا نمود، بدون آنکه به رفاه و آرامش مشترکان لطمه‌ای وارد گردد. در شبکه مدنظر ما، مصرف‌کنندگان برنامه مصرف خود در روز آینده را (با حفظ موارد امنیتی و حریم شخصی خود) در اختیار سایر مشترکان قرار می‌دهند. در این تحقیق ما میزان مصرف بادی شبکه برای روز بعد را به‌صورت احتمالی مدل می‌کنیم و مدنظر خواهیم گرفت. درواقع شبکه مدنظر ما مشابه شکل ۲ است.

۴.۲. روش پیشنهادی

در این بخش یک چهارچوب مبتنی بر بهینه‌سازی تصادفی ارائه می‌شود تا با عدم قطعیت‌های تولید بادی در ریزشبهه مقابله گردد. در این روش، یک مسئله تصادفی پیوسته^۱ به چند سناریو گسسته تبدیل می‌شود که هر سناریو احتمال خاص خود را دارد. با بهینه‌سازی امید ریاضی این سناریوها، درواقع معادل قطعی یک مسئله تصادفی را حل می‌کنیم.

در اینجا سعی می‌کنیم آن مسئله بهینه‌سازی را به‌صورت تصادفی تبدیل کنیم. بدین منظور، فرض می‌کنیم تولید بادی دارای عدم قطعیت باشد و سناریوهای تولید بادی برای ۲۴ ساعت آینده را در اختیار داشته باشیم. لازم به ذکر است که در مسئله برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت ما، هر سناریو شامل ۲۴ پیش‌بینی باد متناظر با ۲۴ ساعت افق برنامه‌ریزی است. مسئله بهینه‌سازی قطعی ارائه شده در [۵] را می‌توان به‌صورت زیر به فرم برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور بازنویسی کرد:

$$\min_{x_n \in X_n, \forall n \in N, P_m(h)} \sum_{s=1}^{|scen|} p(scen_s) \sum_{h=1}^H (C(P_{gen}(scen_s, h)) + \lambda_m(h) - P_m(h)) \quad (1)$$

مشروط به:

$$P_{gen}(scen_s, h) = \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h + l_{fixed}(h) - P_m(h) - (P_{wind}(scen_s, h)) \forall h, s \quad (2)$$

^۱مسئله ما نیز پیوسته است چرا که تابع چگالی احتمال تولید بادی به صورت پیوسته است.

مشترکان دارای قابلیت برنامه‌ریزی خودکار توان ECS هستند که می‌توان آن را بر روی کنتورهای هوشمند نصب نمود.

- کنتورهای هوشمند به شبکه قدرت و شبکه ارتباطی انتقال داده متصل هستند.
- کنتورهای هوشمند دارای ECS با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند تا بتوانند اطلاعات مربوط به میزان مصرف یکدیگر را به اشتراک بگذارند تا بدین‌صورت بتوانند برنامه مصرف بهینه‌ای برای تک‌تک مشترکان پیدا نمایند.
- سازوکار قیمت‌گذاری توان این شبکه به‌گونه‌ای تعریف خواهد شد که مشترکان تشویق به همکاری با یکدیگر برای کاهش هزینه کل شبکه گردند چراکه بدین‌صورت هزینه خود آن‌ها نیز کمینه خواهد شد.
- مشترکان شبکه تعدادی وسایل مصرف دارند که زمان به کار افتادن آن‌ها قابل تنظیم توسط ECS ها هستند. به‌عنوان مثال، می‌توان زمان کار وسایلی مانند ظرف‌شویی الکتریکی، یا زمان شارژ خودروی برقی و ... را توسط ECS مشخص نمود.
- مشترکان برنامه مصرف توان خود را در ابتدای روز برای کل دوره ۲۴ ساعته مشخص می‌نمایند.
- ریزشبهه با یک خط انتقال با ظرفیت محدود به شبکه اصلی متصل است و می‌تواند در بازار شرکت کند.
- ریزشبهه باید از پیش میزان خرید یا فروش توان خود را برای روز بعد مشخص کند. هرگونه خرید یا فروش بیش یا کمتر از حد با جریمه خاصی مواجه خواهد شد. بدین ترتیب، ریزشبهه تشویق می‌شود که عدم تعادل‌های خود را ابتدا به کمک میکرو توربین گازی خود جبران کند و سپس در صورت اجبار میزان خرید و فروش خود را در بازار تغییر دهد.

کنتورهای هوشمند با آگاهی از این مکانیسم قیمت‌گذاری و همچنین میزان مصرف سایر مشترکان، با حل یک مسئله بهینه‌سازی، اقدام به تعیین برنامه مصرف مشترک تحت نظر خود می‌نمایند. به‌عبارت‌دیگر قصد داریم به الگوریتمی دست پیدا کنیم که با پیاده‌سازی آن در کنتورهای هوشمند، این کنتورها بتوانند برای یک بازه‌ی زمانی خاص از آینده که ترجیحاً کوتاه‌مدت هم باشد، مثلاً یک روز، یک برنامه‌ریزی را برای وسایل خانگی مختلف انجام دهند که هم کمترین اختلال را در آسایش مصرف‌کنندگان داشته باشد

۲- برنامه‌ریزی تصادفی با پیش‌بینی تابع چگالی احتمال توزیع سرعت باد

در حالت نخست فرض شده است میزان تولید بادی را در اختیار داریم. طبیعتاً این پیش‌بینی با خطا همراه است. اما، در برنامه‌ریزی‌های بار این خطای پیش‌بینی لحاظ نمی‌شود و برنامه‌ریزی بر اساس همین مقادیر پیش‌بینی شده انجام می‌پذیرد. هدف از ارائه این حالت آن است که معایب روش‌های کنونی برنامه‌ریزی شبکه‌های هوشمند که تولید بادی را قطعی فرض نموده‌اند مشخص نماییم.

در حالت دوم فرض نموده‌ایم که چگالی احتمال توزیع سرعت باد را برای هر کدام از ۲۴ ساعت آینده در اختیار داریم. این پیش‌بینی‌ها را ابتدا به صورت گسسته درمی‌آوریم. سپس جهت ایجاد سناریو از روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۱ و جهت کاهش سناریو از روش انتخاب پیشرو سریع^۲ استفاده می‌نماییم. بدین ترتیب به تعداد N سناریو برای تولید بادی خواهیم رسید.

خاطر نشان می‌شود، در هر دو حالت برنامه‌ریزی قطعی با خطا و حالت فعلی (برنامه‌ریزی تصادفی) با عدم قطعیت مواجه هستیم. حالت برنامه‌ریزی قطعی، عدم قطعیت را به هیچ وجه مد نظر نمی‌گیرد و تنها بر مقادیر پیش‌بینی شده (که همراه با خطا است) اتکا می‌کند. اما حالت برنامه‌ریزی تصادفی سعی می‌کند عدم قطعیت را در محاسبات خود مدل نماید.

شبکه‌ی مد نظر ما دارای یک توربین گازی است. تابع هزینه میکروتوربین گازی از نوع درجه ۲ با معادله‌ی زیر است:

$$Cost = 0.02533Q^2 + 25.5472Q + 24.3891 \text{ \$/hr}$$

قید تولید بیشینه میکرو توربین نیز ۱۲ مگاوات می‌باشد. ظرفیت نیروگاه بادی ریزشبهکه مجموعاً ۶۰۰۰ کیلووات تعیین شده است. داده‌های سرعت باد نیز از ایستگاه هواشناسی کلگری در تاریخ ۸ ژوئن ۲۰۱۴ برداشته شده است. این داده‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

در مشخصه تولید توان توربین بادی، سرعت‌های ۴، ۱۲ و ۲۴ متر بر ثانیه به ترتیب سرعت شروع تولید، سرعت تولید توان نامی و سرعت قطع تولید توان هستند. همچنین خاطر نشان می‌شود که در حالت تصادفی، ابتدا به کمک روش مونت کارلو ۱۰۰۰ سناریو بادی ایجاد می‌کنیم. سپس با کمک

$$P_{gen_min} < P_{gen}(scen_s, h) < P_{gen_max} \quad \forall h, s \quad (3)$$

$$P_{line_min} < P_m < P_{line_max} \quad \forall h \quad (4)$$

در این مسئله، h یک ساعت از شبانه‌روز، $H = 24$ ، C تابع هزینه‌ی انرژی میکروتوربین شبکه است. در این مقاله تابع هزینه را درجه دو فرض نموده‌ایم. همچنین λ_m قیمت بازار و P_m میزان خرید از بازار را نشان می‌دهد. البته مقدار منفی برای P_m نشان‌دهنده فروش به بازار می‌باشد.

N مجموعه‌ی مصرف‌کنندگان شبکه و A_n مجموعه وسایل قابل برنامه‌ریزی مصرف‌کننده n است. $x_{n,a}^h$ مصرف انرژی وسیله‌ی خانگی a م تحت اختیار مصرف‌کننده‌ی n م در ساعت h ام است. خاطر نشان می‌شود که لازم است برای هر مصرف‌کننده $n \in N$ و هر وسیله قابل برنامه‌ریزی $a \in A_n$ ، میزان توان روزانه $(E_{n,a})$ مشخص باشد. همچنین مصرف‌کنندگان می‌توانند بازه زمانی دلخواه جهت برنامه‌ریزی وسیله مدنظر خود را (زمان شروع $\alpha_{n,a}$ و زمان پایان $\beta_{n,a}$) به برنامه‌ریز توان (ECS) معرفی نمایند. به این ترتیب، رفاه مصرف‌کنندگان ریزشبهکه تأثیر منفی کمی از برنامه‌ریزی شدن وسایل خود خواهد دید.

میزان توانی که نیاز است میکروتوربین گازی ریزشبهکه تولید کند با P_{gen} نشان داده شده است که برابر با مجموع توان مصرف‌شده شبکه (توان قابل برنامه‌ریزی کل مصرف‌کنندگان $(\sum_{n \in N} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h)$ به علاوه توان مورد نیاز غیرقابل برنامه‌ریزی مصرف‌کنندگان (fixed)) منهای منابع توان تهیه شده برای شبکه (از طریق بازار میزان خرید از بازار (P_m) یا میزان تولید بادی شبکه $(P_{wind}(h))$ است. خاطر نشان می‌شود میزان تولید بادی غیرقابل دیسپچ فرض شده و تماماً در شبکه کار گرفته می‌شوند. همچنین $scen$ مجموع سناریوهای محتمل است. $scen_s$ نشان‌دهنده s امین سناریو و $p(scen_s)$ احتمال وقوع سناریو s ام است. $P_{gen}(scen_s, h)$ نشانگر میزان نیاز به تولید میکرو توربین گازی در سناریو s م و ساعت h ام است که به میزان تولید بادی برای سناریو s ام در ساعت h ، $P_{wind}(scen_s, h)$ وابسته است. رابطه (۱)، در واقع همان مفهوم امید ریاضی را نشان می‌دهد.

۴.۳. مطالعه موردی

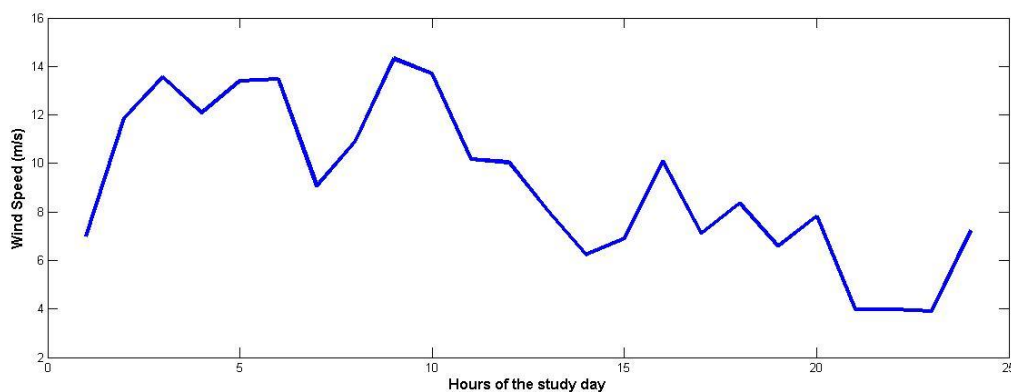
در این بخش به منظور تبیین کارکرد روش پیشنهادی، با مطالعه یک شبکه‌ی فرضی، دو حالت زیر را مقایسه می‌کنیم:

۱- برنامه‌ریزی قطعی با پیش‌بینی اسکالر تولید بادی (با خطا)

¹ Monte Carlo Simulation

² Fast Forward Selection Method

روش کاهش سناریو، تعداد سناریوهای بادی در نظر گرفته شده را به ۱۰ سناریو کاهش می‌دهیم.



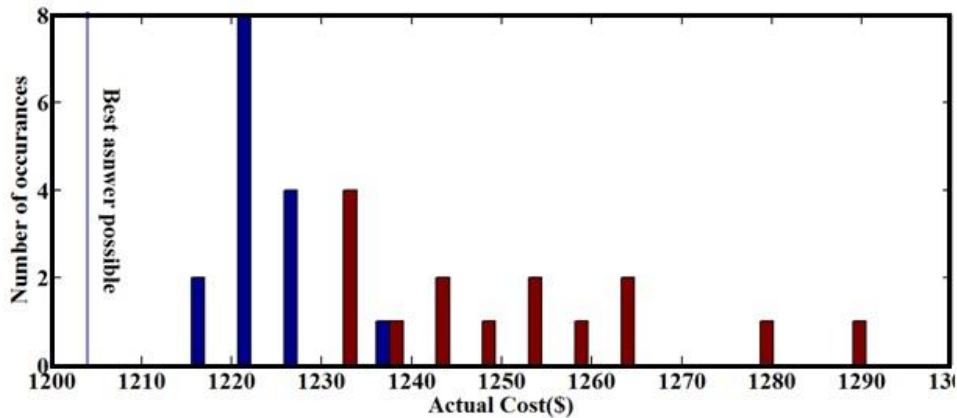
شکل ۳: داده‌های سرعت باد مورد استفاده

اگر در یک ساعات خاص توان اضافی به بازار ارائه شود، بازار این توان اضافی را به ۷۰٪ قیمت بازار خریداری می‌نماید. همچنین، اگر توان اضافی از بازار خریداری شود، بازار ۱۳۰٪ قیمت بازار را از ریزش شبکه اخذ خواهد کرد. در طرف مصرف‌کننده نیز، اسامی و ویژگی‌های تجهیزاتی که قابلیت برنامه‌ریزی دارند در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

همچنین ریزش شبکه باید در ابتدای روز میزان خرید یا فروش خود در هر ساعت شبانه‌روز معین نماید و اگر ریزش شبکه در زمان اجرای بازار توان بیشتر یا کمتر از مقدار خریداری شده از (فروخته شده به) بازار مصرف (تولید) کند با جریمه از سوی بازار مواجه خواهد شد، زیرا باعث عدم تعادل در شبکه اصلی و همچنین پرداخت هزینه‌های رزور بیشتر خواهد شد. مقدار این جریمه ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. یعنی به عنوان مثال

جدول ۱: اسامی و ویژگیهای تجهیزات قابل برنامه‌ریزی

نام تجهیز	ماشین ظرفشویی	ماشین لباسشویی	خشک‌کن لباس	خودروی الکتریکی	تهویه مطبوع صبح	تهویه مطبوع ظهر	تهویه مطبوع شبانه	سایر	سایر	سایر
انرژی روزانه (کیلووات ساعت)	۱/۴۴	۱/۹۴	۲/۵	۹/۹	۱/۲	۳/۶	۲/۴	۴	۱/۶	۱
حداکثر مصرف ساعتی	۱/۴۴	۰/۹۷	۲/۵	۳/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۴	۰/۸	۰/۵
ابتدای بازه برنامه‌ریزی	۱	۱	۱	۱۶	۱	۸	۱۷	۱۵	۱۳	۱۶
انتهای بازه برنامه‌ریزی	۱۳	۲۴	۲۴	۲۴	۷	۱۶	۲۴	۲۱	۲۰	۲۲



شکل ۴: هزینه نهایی واقعی اجرای برنامه‌ریزی‌های انجام شده توسط حالت ۱ (برنامه‌ریزی قطعی) قرمز و حالت ۲ (روش پیشنهادی برنامه‌ریزی تصادفی با پیش‌بینی احتمالی و کاهش سناریو) آبی

نشان داده شده است، استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی، نسبت به حالت برنامه‌ریزی قطعی، هزینه‌های کمتری به مشترکین تحمیل می‌کند. بدین ترتیب، برتری روش پیشنهادی ما بر روش‌های دیگر که عدم قطعیت باد را در نظر نمی‌گیرند قابل تشخیص است.

جدول ۱: مقایسه هزینه تمام شده کل ریزش‌بکه در روش‌های برنامه‌ریزی مختلف

روش برنامه‌ریزی	هزینه تمام شده (دلار)
بدون برنامه‌ریزی بار (با اطلاعات کامل)	۱۳۸۹
برنامه‌ریزی قطعی با پیش‌بینی اسکالر (میانگین ۱۵ بار تکرار)	۱۲۵۱
برنامه‌ریزی تصادفی (میانگین ۱۵ بار تکرار)	۱۲۲۴

عملکرد روش‌های مختلف برنامه‌ریزی مصرف از لحاظ میزان جریمه تحمیلی از سوی بازار در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که روش برنامه‌ریزی تصادفی توانسته است به طرز محسوسی جریمه‌های تحمیلی از سوی بازار را (که به خاطر عدم قطعیت و عدم تعادل تولید و مصرف است) کاهش دهد.

جدول ۲: مقایسه میزان جریمه بازار (بر حسب دلار) در روش‌های برنامه‌ریزی مختلف

روش برنامه‌ریزی	هزینه تمام شده (دلار)
برنامه‌ریزی قطعی با پیش‌بینی دارای خطا (میانگین ۱۵ بار تکرار)	۳۴/۲
برنامه‌ریزی تصادفی (میانگین ۱۵ بار تکرار)	۱۲/۶

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، هر دو حالت ۱ و ۲ دارای حالتی تصادفی هستند. بنابراین، در هر بار اجرای آنها نتایج متفاوتی به دست می‌آید. بنابراین، جهت انجام مقایسه‌ای عادلانه، لازم است هرکدام از این روش‌ها را به تعداد زیاد اجرا و سپس با یکدیگر مقایسه کنیم. بدین جهت، هر دو حالت ۱ (برنامه‌ریزی قطعی بر اساس پیش‌بینی اسکالر) و ۲ (روش پیشنهادی برنامه‌ریزی تصادفی) را ۱۵ بار اجرا نمودیم و نتایج خروجی، یعنی هزینه نهایی واقعی ریزش‌بکه را ذخیره نمودیم.

شکل ۴ هزینه نهایی واقعی دو حالت فوق‌الذکر را برای ۱۵ بار تکرار برای پروفایل سرعت باد ۸ ژوئن نشان می‌دهد. در وهله اول مشاهده می‌شود که در این روز مورد مطالعه، هزینه تمام شده سیستم در حالت اطلاعات کامل (که با خط آبی نشان داده شده) با حالت تصادفی متفاوت است. با توجه به آنکه سایر پارامترهای تأثیرگذار شبکه (قیمت بازار، تعداد وسایل قابل برنامه‌ریزی و ...) ثابت فرض شده‌اند، این تغییر هزینه ریزش‌بکه تنها به واسطه تغییر میزان مصرف و پروفایل باد در ریزش‌بکه است. در جدول ۲، میانگین هزینه ریزش‌بکه در روز مورد مطالعه، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بر اساس میانگین ۱۵ بار تکرار، همان‌طور که انتظار می‌رود، با اعمال پاسخگویی بار (در هرکدام از حالات با اطلاعات کامل، با پیش‌بینی اسکالر و یا برنامه‌ریزی تصادفی) می‌توان هزینه بهره برداری ریزش‌بکه را کاهش داد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، داشتن اطلاعات کامل از وضعیت ریزش‌بکه و میزان تولید بادی (حالت پاسخگویی بار با اطلاعات کامل) باعث می‌شود کمترین هزینه ممکن به شبکه اعمال گردد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۴ نیز

منابع

- [1] A. Leon-garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 120-133, 2010.
- [2] H. M. Khodr, N. El Halabi, and M. Garcia-Gracia, "Intelligent renewable microgrid scheduling controlled by a virtual power producer: A laboratory experience," *Renew. Energy*, vol. 48, pp. 269-275, Dec. 2012.
- [3] R. Chedid and S. Rahman, "Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 12, no. 1, pp. 79-85, 1997.
- [4] A. Dukpa, I. Duggal, B. Venkatesh, and L. Chang, "Optimal participation and risk mitigation of wind generators in an electricity market," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 4, no. 2, p. 165, 2010.
- [5] A.-H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-garcia, "Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 320-331, 2010.
- [6] I. C. N. Ruiz and J. Oyarzabal, "A direct load control model for virtual power plant management," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 959-966, 2009.
- [7] C. Triki and A. Violi, "Dynamic pricing of electricity in retail markets," *J. Oper. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 21-36, 2009.
- [8] H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, and R. Schober, "Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2010.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه یک چارچوب پاسخگویی بار مبتنی بر برنامه‌ریز مصرف انرژی (ECS) ارائه نمودیم که با در نظر گرفتن بازی شکل‌گرفته بین مصرف‌کنندگان، رفتار بهینه پاسخگویی بار را در یک ریزشبه مدل می‌نماید. چارچوب ارائه‌شده، رفتار بهینه مصرف‌کنندگان (برنامه‌ریزی بار) را به همراه رفتار مناسب ریزشبه در تولید، خرید و فروش توان مشخص می‌نماید. در ادامه، یک گام فراتر گذاشته و چارچوب فوق را توسعه داده تا با عدم قطعیت پارامترهای سیستم قدرت سازگارتر گردد. بدین جهت از ابزارهای برنامه‌ریزی تصادفی استفاده نمودیم. ایده کلی استفاده از روش برنامه‌ریزی سناریو محور (یا معادل قطعی یک برنامه‌ریزی تصادفی) می‌باشد. بدین منظور ابتدا فرض نمودیم که با کمک مفهوم پیش‌بینی احتمالی سرعت باد، می‌توانیم چگالی احتمال سرعت باد را برای هر ساعت از افق برنامه‌ریزی خود داشته باشیم. در روش پیشنهادی، با کمک تابع چگالی احتمال، اقدام به ایجاد سناریوهای مختلف برای سرعت باد شده است. با توجه به مراحل افق برنامه‌ریزی (۲۴ ساعت) تعداد سناریوهای حاصله بسیار زیاد خواهد بود. بدین منظور لازم بود از روش‌های کاهش سناریو استفاده نماییم. روش پیشنهادشده برنامه‌ریزی تصادفی برای چند پروفایل مختلف بادی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که روش برنامه‌ریزی تصادفی بر روش برنامه‌ریزی قطعی برتری دارد چراکه منجر به هزینه‌های کمتری می‌گردد.

در این مقاله نشان داده شد که استفاده از پاسخگویی بار توزیع‌شده می‌تواند در عین حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان، به کاهش هزینه‌های ریزشبه منجر گردد. همچنین استفاده از روش پیشنهادی منجر به پیک سایی مصرف در شبکه می‌شود که نهایتاً هزینه‌های سرمایه‌گذاری شبکه را کاهش خواهد داد. همچنین استفاده از چهارچوب پیشنهادی پاسخگویی بار نهایتاً منجر به کاهش پیک مصرف نیز شده است که نهایتاً هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم را می‌تواند کاهش دهد. مهمتر از همه آن که نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور می‌تواند جهت مقابله با عدم قطعیت تولیدات بادی در برنامه‌ریزی‌ها استفاده گردد.