Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 28-38

Vol. 11/ No. 4/ Winter 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

The Potential of Smart Distribution Networks for Demand Response Contribution to Enhance the Performance of Energy Service Providers

Esmaeil Mahboubi Moghaddam[1], Ahmad Nikoobakht[2], Mohsen Zare[3]
1- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran, (Corresponding author) mahboubi@qiet.ac.ir
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Higher Education Center of Eghlid, Eghlid, Iran, a.nikoobakht@eghlid.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran, mzare@jahromu.ac.ir

Abstract:
The concept of demand response (DR) continues to evolve, and its various capabilities are being investigated to enhance the efficiency of nowadays electric power industries. To this end, the barriers that limit DR capabilities should be resolved. This paper provides a new efficient decision model for energy service providers in smart distribution networks to make the maximum use of DR potential as the most cost-effective solution. The correct and proper application of the DR problem provides special capabilities for these entities and can lead to more profit. On the other hand, participating in the upstream market and demand allocation in the downstream network are two main tasks of energy providers. These two tasks affect each other, and simultaneous attention to them is needed for more efficiency. Generally, conservative participation in the upstream market is the main problem of these entities due to the uncertainty of load forecasting, especially considering that the DR problem will aggravate this uncertainty. In these conditions, the interactions between the load curve and price changes should also be considered. To better understand, suppose that an energy provider wants to reduce its energy purchase cost by applying DR. This entity initially forecasts its load consumption and participates in the electricity market. After market clearing, the values of locational marginal price (LMP) are determined for the next 24 hours. Now, applying DR and moving the load consumption to the less expensive hours will reduce the final purchase cost. However, moving the load consumption leads to changes in the LMP values in the substation bus of the distribution network. It is due to the dependencies between the load consumption and the prices. Disregarding these dependencies will limit DR capabilities. Therefore, a new two-step sequential framework is proposed in this paper to enhance the performance of the energy providers in the smart distribution network. The main problem is the optimization of the power purchase cost for the downstream network using DR. The subsidiary problem includes electricity market modeling. The load curve is determined in the main problem, and the amounts of the energy price under different conditions are determined in the subsidiary problem recursively. This framework guides the energy provider to analyze how market clearing affects DR and vice versa. To model load flexibility, a residential distribution network with different types of responsive appliances is utilized, and the model is studied using two case studies. The results demonstrate that applying the proposed framework leads to more reliable and optimal results and has significant benefits for the strategic performance of energy service providers.

Keywords:
Demand response, Energy service provider, Day-ahead market, Smart distribution network, Transmission network.

Submit date: 2021/12/26
Accepted date: 2023/01/28

Corresponding author Name: Esmaeil Mahboubi Moghaddam
Corresponding author address: Iran, Razavi Khorasan Province, Quchan, Quchan University of Technology, Department of Electrical Engineering

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۳۸-۲۸

Vol. 11 / No. 4/ Winter 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

بهبود عملکرد تامین کنندگان سرویس انرژی با استفاده از قابلیت‌های پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع هوشمند

نوع مطالعه: پژوهشی

اسماعیل محبوبی مقدم[۱]، استادیار، احمد نیکوبخت[۲]، استادیار، محسن زارع[۳]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق ـ دانشگاه صنعتی قوچان ـ قوچان ـ ایران
mahboubi@qiet.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق ـ مرکز آموزش عالی اقلید ـ اقلید ـ ایران
a.nikoobakht@eghlid.ac.ir
۳- دانشکده فنی و مهندسی ـ دانشگاه جهرم ـ جهرم ـ ایران
mzare@jahromu.ac.ir

چکیده: برنامه‌های پاسخگویی بار نقشی کلیدی در بهبود عملکرد سیستم‌های برق موجود ایفا می‌کنند. لذا، قابلیت‌های گوناگون و موانع چنین برنامه‌هایی می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقاله، یک مدل تصمیم گیری موثر برای تامین کنندگان سرویس انرژی با هدف چگونگی حضور در بازار روز بعد، و اختصاص توان در شبکه توزیع پایین دست ارائه شده است. به منظور در نظر گرفتن اثرات متقابل پاسخگویی بار و قیمت‌های برق، یک چارچوب تکراری دو مرحله‌ای پیشنهاد گردیده است. در این چارچوب، در یک مرحله، بازار برق شبکه بالادست تسویه گردیده تا مقادیر قیمت‌های حاشیه‌ای محلی تعیین گردد، و سپس مسئله پاسخگویی بار با هدف کاهش هزینه کل تامین انرژی در شبکه توزیع اجرا می‌گردد و این روند ادامه می‌یابد. مدل‌سازی بارهای منعطف با در نظر گرفتن انواع مختلف وسایل خانگی پاسخگو در یک شبکه توزیع انجام می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از چارچوب پیشنهادی منجر به پاسخ‌های بهینه‌تر و نیز قابل اعتمادتری گردیده، و مزایای قابل توجهی برای تامین کنندگان سرویس انرژی فرآهم می‌آورد.

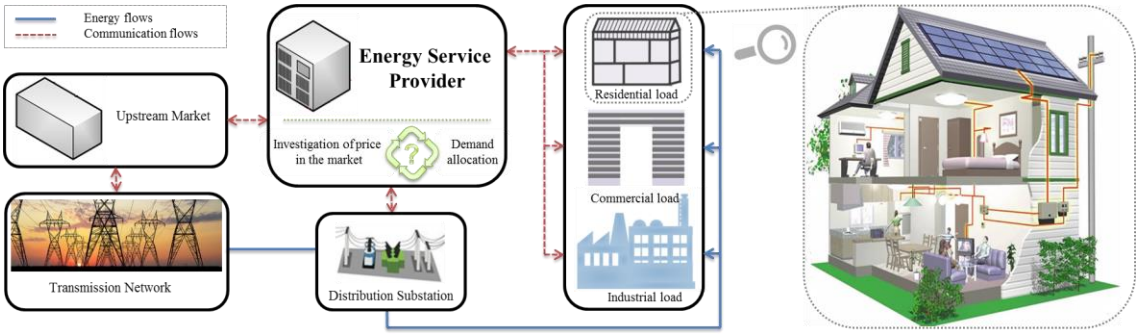
واژه‌های کلیدی: پاسخگویی بار، تامین کنندگان سرویس انرژی، بازار روز بعد، شبکه توزیع هوشمند، شبکه انتقال

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

نام نویسندهٔ مسئول: اسماعیل محبوبی مقدم
نشانی نویسندهٔ مسئول: ایران – قوچان – کیلومتر ۴ جاده قوچان به مشهد – دانشگاه صنعتی قوچان – دانشکدهٔ برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]



شکل (۱): عملکرد دو جانبه نهادهای تامین انرژی در بازار بالادست و شبکه پایین‌دست

۱- مقدمه

۱-۱- انگیزه و رویکرد

پاسخگویی بار[1] (DR)، به عنوان بخشی جدایی نا پذیر از شبکه‌های هوشمند آینده، می‌تواند انعطاف‌پذیری قابل توجهی در تقاضای بار بوجود آورده، و در نتیجه مزایای اقتصادی و فنی گوناگونی برای صنعت برق فراهم آورد. ازجمله قابلیت های استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار شامل، تعویق هزینه‌های سنگین تقویت شبکه (Lui et al., 2010)، کاهش نیاز به استفاده از واحدهای تولیدی گران قیمت با آلودگی بالا (Khodaei et al., 2011)، استفاده به عنوان خدمات جانبی[2] (Aalami et al., 2010)، تسهیل جهش های قیمت در بازار برق (QDR, 2006)، کاهش پتانسیل قدرت بازار[3] (QDR, 2006)، بهبود بهره برداری از انرژی های تجدید پذیر (Montuori et al., 2014; Wang et al., 2015)، و صرفه‌جویی در صورت حساب برق مشتریان (Mohsenian-Rad & Leon-Garcia, 2010) می‌باشد. علاوه بر این، تامین کنندگان سرویس انرژی[4] (ESP) می‌توانند از این برنامه‌ها برای مدیریت نوسانات قیمت برق و کاهش ریسک استفاده نمایند. در این مقاله، از پاسخگویی بار به عنوان ابزاری برای بهبود عملکرد ESP در شبکه توزیع استفاده می‌شود.

کاربرد صحیح و به موقع مسئله پاسخگویی بار، قابلیت ها و توانایی‌های منحصر به فردی را برای این نهادها بوجود آورده و می‌تواند منجر به افزایش بیشتر سود گردد.

از سوی دیگر، حضور در بازارهای بالادست، و تخصیص توان در شبکه پایین دست، وظایف اصلی نهادهای تامین کننده انرژی می‌باشد. این دو مورد، تاثیرات متقابل بسیار زیادی داشته و توجه همزمان به آن‌ها قابلیت‌های عملکرد در هر دو مورد را افزایش خواهد داد. بطور کلی می‌توان گفت مشکل اصلی این نهادها، حضور با احتیاط در بازار بالادست می‌باشد. چنین رویکردی به علت عدم قطعیت در پیش‌بینی بارهای مصرفی می‌باشد. با در نظر گرفتن پاسخگویی بار این مشکل شدیدتر خواهد گردید. در این حالت، تاثیرات متقابل و رفت و برگشتی جابجایی منحنی مصرف و تغییرات قیمت نیز می‌بایست در نظر گرفته شود.

برای تفهیم بهتر، فرض کنید، یک تامین کننده انرژی می‌خواهد از پاسخگویی بار به عنوان ابزاری برای کاهش هزینه استفاده نماید. این نهاد در ابتدا با پیش‌بینی مصرف خود، در بازار برق شرکت می‌نماید. با تسویه بازار قیمت خرید انرژی (مقادیر قیمت های حاشیه‌ای محلی[5] یا LMP) در ۲۴ ساعت آینده مشخص می گردد. حال این نهاد با اجرای پاسخگویی بار و جابجایی بارهای مصرفی به ساعات ارزان‌تر هزینه نهایی خود را کاهش می‌دهد. اما جابجایی بارهای مصرفی خود منجر به تغییر مقادیر LMP در پاسخ تغذیه کننده شبکه توزیع خواهد شد. در واقع بار های مصرفی و قیمت انرژی (LMP) بطور متقابل برروی یکدیگر تاثیر دارند. عدم در نظر گرفتن تاثیرات متقابل ذکر شده، قابلیت‌های پاسخگویی بار را محدود می‌نماید.

بنابراین در این مقاله، برای بهبود عملکرد تامین کنندگان انرژی در شبکه توزیع، یک چارچوب تکراری دو مرحله‌ای ارائه شده است. مسئله اصلی، شامل بهینه سازی هزینه تامین انرژی برای بار های شبکه پایین دست با استفاده از پاسخگویی بار می‌باشد. مسئله فرعی نیز، شامل مدل‌سازی بازار برق است. در مسئله اصلی تخصیص بار انجام گردیده و در مسئله فرعی مقادیر LMP در شرایط مختلف تعیین می‌گردد. این مفهوم در شکل ۱ ترسیم گردیده است. برای مدل سازی پاسخگویی بار از یک شبکه توزیع خانگی با وسایل مصرفی منعطف[6] استفاده شده است.

۱-۲- ادبیات موضوع

مسئله پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع و یا شبکه‌های هوشمند در مقالات بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. در (Reka et al., 2021)، یک استراتژی بهینه برای زمان بندی لوازم خانگی با در نظر گرفتن حریم خصوصی مشترکین و نیز حضور منابع انرژی تجدید پذیر ارائه شده است. در بهینه‌سازی این تحقیق از هوش مصنوعی مبتنی بر یادگیری تقویتی استفاده شده است. برای دستیابی به بهره

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

برداری بهینه بین نهاد های مختلف سیستم، در (Zhang et al., 2021) یک مدل بهینه سازی چند هدفه برای شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن پاسخگویی بار و قیمت گذاری پویا پیشنهاد گردیده است. در این تحقیق با ارزیابی ویژگی های قیمت گذاری مشترک چند نهاد، قیمت انرژی پویا با مشارکت تامین کنندگان و نیز مصرف کنندگان فرمول‌بندی شده است. در نهایت با توجه به اولویت های مورد علاقه‌ی نهادی گوناگون، استراتژی‌ها و مکانیسم‌های مختلفی می‌توان استخراج نمود که منجر به بهبود اقتصادی و قابلیت اطمینان عملکرد سیستم و ارتقای تعامل بین چندین نهاد می‌شود. یک مدل قیمت گذاری انعطاف پذیر برای یک شبکه توزیع فعال در حضور منابع تجدید پذیر، بارهای پاسخگو و سیستم‌های ذخیره کننده انرژی در قالب یک مسئله دو سطحی در (RaeisiNia et al., 2022) پیشنهاد گردیده است. در (Zugno et al., 2013) از رویکرد نظریه بازی برای مدل سازی رابطه بین خرده فروشان و مصرف کنندگان استفاده شده است. در این حالت، روش قیمت گذاری بلادرنگ[7]، با روش‌های تخت[8] و زمان استفاده[9] برای مشتریان مقایسه می شود. بهینه سازی سود مورد انتظار برای خرده فروش و هزینه برق برای مصرف کننده در قالب یک مسئله تک سطحی مدل سازی شده و توسط یک نرم افزار بهینه سازی تجاری حل می شود. با این حال، پیچیدگی محاسباتی چارچوب پیشنهادی قابل توجه بوده و تنها برای سناریویی با سه مصرف کننده مورد مطالعه قرار گرفته است.

عدم قطعیت قیمت به عنوان یک چالش اصلی در مسائل پاسخگویی بار در برخی از مطالعات در نظر گرفته شده است. آقای کانجو و همکارانشان در (Conejo et al., 2010) فرض کرده‌اند که قیمت به دلایل بسیاری نمی‌تواند به عنوان یک متغیر قطعی مدل گردد. بنابراین، در این مقاله یک روش بهینه سازی استوار[10] برای مدیریت عدم قطعیت قیمت برق با مدل قیمت گذاری زمان استفاده ارائه شده است. همچنین در (Chen et al., 2012) عدم قطعیت قیمت برای مدل قیمت گذاری بلادرنگ، با استفاده از روش بهینه سازی تصادفی و نیز رویکرد بهینه سازی استوار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بررسی جامع انواع طرح ها و برنامه‌های پاسخگویی بار در شبکه‌های هوشمند در (Vardakas et al., 2015) و (Aghaei & Alizadeh, 2013) ارائه شده است.

برنامه‌های پاسخگویی بار در زمینه برنامه ریزی تولید و بازار های عمده فروشی نیز مورد مطالعه قرار گرفته و مقالات بسیاری تلاش نموده اند با استفاده از آن استراتژی‌های زمان بندی را برای اپراتورهای سیستم ارائه دهند. آقای شاهیده پور و همکارانش در (Khodaei et al., 2011)، مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی[11] (SCUC) را با در نظر گرفتن پاسخگویی بار ها مطالعه نموده اند. در (Abdollahi et al., 2012) چارچوبی جدید برای برنامه ریزی مشارکت واحدها با استفاده از پاسخگویی بار ارائه شده است، که در آن هر دو مزایای اقتصادی و زیست محیطی پاسخگویی بار بررسی گردیده است. همچنین در (Tabandeh & Hossain, 2021) با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به مشارکت مصرف کنندگان و نیز مزرعه بادی، از پاسخگویی بار برای مدیریت تراکم در شبکه انتقال استفاده شده است.

کارهای پژوهشی انجام شده در ارتباط با مسائل بهینه سازی دو سطحی و یا تکراری نیز بسیار گسترده است. این روش ها در زمینه‌های مختلفی نظیر برنامه‌ریزی توزیع شده سیستم‌های یکپارچه برق-گاز (Lan et al., 2022)، هماهنگی بهره برداری شبکه انتقال و شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده (Sheikhahmadi et al., 2021)، سرمایه گذاری در انرژی باد (Baringo & Conejo, 2013)، ادغام تبادلات پاسخگویی بار در مسئله بازار روز بعد (Wu et al., 2015)، و منافع اقتصادی متضاد میان خرده فروشان و مشترکین آن‌ها (Zugno et al., 2013)، بکار رفته اند. با این حال، در هیچ یک از این مقالات، یک مدل تکراری دو مرحله‌ای برای ESP با در نظر گرفتن بازخورد از سمت بازار وجود ندارد.

۳-۱- نوآوری

همان‌گونه که ذکر شد، خرید توان از بازار بالادست، و تخصیص توان در شبکه پایین دست، تاثیرات متقابل بسیار زیادی داشته و توجه همزمان به آن‌ها قابلیت‌های عملکرد در هر دو مورد را افزایش می‌دهد. همچنین با در نظر گرفتن پاسخگویی بار این تاثیر شدیدتر خواهد شد. با وجود کارهای ارزشمند انجام شده در مراجع، این تاثیر مهم در قالب یک مسئله دو سطحی در نظر گرفته نشده است. بنابراین، مهم‌ترین جنبه‌های نوآوری این مقاله در مقایسه با پژوهش‌های قبلی عبارتند از:

- یک مدل تصمیم‌گیری جدید برای تامین کنندگان سرویس انرژی در شبکه توزیع پیشنهاد گردیده است. در این مدل از یک چارچوب تکراری دو مرحله‌ای استفاده گردیده و از بازار برق بالادست بصورت متوالی فیدبک گرفته می شود. مدل مذکور، اتصال دهنده‌ی برنامه‌های پاسخگویی بار خانگی به بازار های برق بالادست می‌باشد. چنین مدلی، امکان ارزیابی متقابل اجرای پاسخگویی بار در شبکه توزیع، و خرید توان از شبکه بالادست را فراهم آورده و منجر به حصول پاسخ بهینه تری خواهد گردید.
- حداکثر استفاده از قابلیت‌های پاسخگویی بار برای کاهش هزینه خرید تامین توان در شبکه توزیع انجام پذیرفته است.
- تاثیرات پاسخگویی بار بر بازار برق و بالعکس و پتانسیل روش پیشنهادی در شبکه نمونه استاندارد مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

در ادامه، تشریح مدل و روابط ریاضی آن در بخش دو ارائه می‌شود. در بخش سه، نتایج عددی ارائه خواهد شد. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش‌های ۴ آورده می‌شود.

۲- تشریح مدل و روابط ریاضی

۲-۱- فرضیات

برای شفافیت بیشتر، برخی از فرضیات مدل در نظر گرفته شده، در ادامه ذکر شده است.

- منظور از شبکه پایین‌دست، یک شبکه توزیع خانگی است که شامل بارهای پاسخگو می‌باشد.
- این شبکه توزیع توسط ادوات ارتباطی تجهیز گردیده و از آن به عنوان شبکه توزیع هوشمند یاد می‌شود.
- تامین کننده سرویس انرژی (ESP) مسئول اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار در این شبکه خانگی است.
- شبکه توزیع خانگی توسط یک باس تغذیه به یک شبکه انتقال تحت عنوان شبکه بالادست متصل گردیده است.
- قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست برابر مقادیر LMP در باس اتصال دهنده دو شبکه (باس تغذیه) می‌باشد.
- برای محاسبه مقادیر LMP در شبکه بالادست از مدل مشارکت واحدها[۱۲] (UC) برای حل مسئله بازار روز بعد استفاده شده است. این مدل به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی آغشته به اعداد صحیح[۱۳] (MIP) فرمول بندی می‌شود. در حال حاضر در غالب بازارهای برق پیشرفته دنیا این رویکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- نحوه پیاده سازی پاسخگویی بار

بارهای پاسخگو می‌توانند با دریافت یک سیگنال از جانب ESP شیفت پیدا کنند. یک وسیله پاسخگو، وسیله‌ایست که زمان عملکرد و/یا مصرف انرژی آن می‌تواند بدون از بین رفتن آسایش مصرف کننده (مشترک خانگی)، از راه دور برنامه‌ریزی و کنترل گردد (Safdarian, Lehtonen, et al., 2014). معروف‌ترین نمونه‌های این وسایل عبارتند از ماشین ظرف شویی، ماشین لباس شویی، خشک‌کن لباس، سیستم‌های گرمایشی و تهویه، یخچال و فریزر. عملکرد، پروفیل مصرف انرژی و هدف استفاده از آن‌ها میزان قابلیت اجرای پاسخگویی بار توسط این وسایل را تعیین خواهد نمود. انعطاف پذیری این وسایل نیز، موضوع مهم دیگری در ارتباط با قابلیت اجرای پاسخگویی بار توسط آن‌ها می‌باشد. در این مقاله، انعطاف پذیری توسط زمان شیفت قابل قبول[۱۴] (AST) و سطح نفوذ[۱۵] (PL) مصرف کنندگان فعال مدل‌سازی می‌شود. AST حداکثر بازه زمانی می‌باشد که وسیله مورد نظر بدون از بین رفتن آسایش مصرف کننده می‌تواند شیفت پیدا نماید. بدیهیست که مقدار AST برای بارهای غیرپاسخگو برابر صفر است. مقادیر AST می‌تواند با ارزیابی ترجیحات مصرف کنندگان با استفاده از پرسش‌نامه و داده های نظر سنجی محاسبه گردد. چنین اطلاعاتی برای غالب وسایل خانگی در (Stamminger et al., 2008) آورده شده است. سطح نفوذ مصرف کنندگان فعال نیز بیان‌گر اشتیاق متوسط مصرف کنندگان برای مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار است. در واقع، این میزان برابر نرخ تعداد مصرف کنندگان فعال به تعداد کل مصرف کنندگان شبکه می‌باشد. یک مصرف کننده فعال نیز فردی است که مشتاقانه پروفیل بار مصرفی خود را در پاسخ به سیگنال‌های ارسال شده توسط ESP تنظیم می‌نماید (Lui et al., 2010).

با درنظر گرفتن مفاهیم ذکر شده، مسئله بهینه سازی پاسخگویی بار (به عنوان مسئله اصلی) در روابط (۱) تا (۵) ارائه شده است. در این مسئله، با مشخص بودن قیمت‌های خرید انرژی از بازار بالادست (LMP)، شیفت بارهای پاسخگو با هدف کمینه‌سازی هزینه تامین توان اجرا می‌گردد.

$$\min \sum_t \rho_t^{grid} P_t^D \tag{۱}$$

$$P_t^D = P_t^{TS} + \sum_a P_{a,t}^R + P_t^{NR} \quad ,\forall t \tag{۲}$$

$$P_t^{TS} = \sum_a \sum_{t'} P_{a,t',t}^S - \sum_a \sum_{t'} P_{a,t,t'}^S \quad ,\forall t \tag{۳}$$

$$0 \le \sum_{t'} P_{a,t,t'}^S \le P_{a,t}^R PL \quad ,\forall a,t \tag{۴}$$

$$P_{a,t,t'}^S = 0, \quad \forall a, \{(t + AST_a < t' \& t - AST_a + T > t') \| (t - AST_a > t' \& t + AST_a - T < t')\} \tag{۵}$$

رابطه (۱) به عنوان تابع هدف مسئله، هزینه خرید توان در شبکه پایین دست می‌باشد، که از حاصلضرب مجموع بار مصرفی در مقادیر LMP برای ۲۴ ساعت بدست خواهد آمد. مجموع بار مصرفی حاصل جمع بارهای پاسخگو، بارهای غیر پاسخگو و مقادیر شیفت بار است (۲). در رابطه (۳) مجموع بار خالص شیفت یافته تمامی وسایل به ساعت t محاسبه می‌گردد. میزان بار شیفت یافته برای هر یک از وسایل با در نظر گرفتن کل بار وسیله و سطح نفوذ (PL) توسط قید (۴) محدود می‌شود. همچنین در (۵)، شیفت بار هر یک از وسایل در محدوده زمانی خارج از AST آن، برابر صفر قرار داده شده است. با در نظر گرفتن این روابط در هر تکرار، مقدار بار مورد تقاضای شبکه پایین دست در باس تغذیه بدست خواهد آمد.

۲-۳- بازار روز بعد

برای محاسبه مقادیر LMP، مسئله بهینه سازی تسویه بازار بالادست (به عنوان مسئله فرعی) اجرا می‌شود. تابع هدف مسئله، هزینه کل تولید می‌باشد که در رابطه (۶) ارائه شده است. این هزینه شامل هزینه تولید توان ژنراتورها، و نیز هزینه خاموش و روشن شدن آن ها می‌باشد. رابطه (۷) بیان کننده‌ی قانون کیرشهف بوده که منجر به برقراری تعادل توان در هریک از باس‌های شبکه انتقال خواهد شد. در (۸)، n^* معرف باس تغذیه برای شبکه توزیع هوشمند موردنظر بوده، و در نتیجه پروفیل بار آن می‌بایست در هر تکرار از مسئله

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

اصلی بدست آید. رابطه (۹) بیان کننده انتشار توان در هر یک از خطوط انتقال است. در (۱۰)، توان عبوری از خطوط توسط بارگذاری‌های حداکثر و حداقل مربوطه محدود شده است. همچنین توان خروجی واحدهای تولیدی در رابطه (۱۱) محدود شده است. رابطه مابین متغیرهای باینری UC و متغیر های روشن و خاموش شدن واحدها در معادله (۱۲) آورده شده است. قیود مربوط به حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها به ترتیب توسط (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. قیود مربوط به حداکثر شیب افزایشی و کاهشی توان واحدها، در زمان روشن و خاموش شدن و نیز در حالت عملکرد پیوسته آن ها، توسط (۱۵) و (۱۶) مدل سازی شده است. براین اساس، می‌توان متغیر u_{gt} را به صورت باینری و متغیر های v_{gt} و w_{gt} را به عنوان متغیرهای پیوسته[۱۶] تعریف نمود ((۱۷) تا (۱۹)).

$$\min \sum_t \sum_g c_g P_{g,t}^{GEN} + c_g^{SU} v_{g,t} + c_g^{SD} w_{g,t} \quad (۶)$$

$$\sum_{\forall k(n,.)} P_{k,t}^{F} - \sum_{\forall k(.,n)} P_{k,t}^{F} + \sum_{\forall g(n)} P_{g,t}^{GEN} = d_{n,t} \quad ,\forall n,t \quad (۷)$$

$$d_{n^*,t} = P_t^D \quad ,\forall t \quad (۸)$$

$$B_k(\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) - P_{k,t}^F = 0 \quad ,\forall k,t \quad (۹)$$

$$\underline{P_k^F} \le P_{k,t}^F \le \overline{P_k^F} \quad ,\forall k,t \quad (۱۰)$$

$$\underline{P_g^{GEN}} u_{g,t} \le P_{g,t}^{GEN} \le \overline{P_g^{GEN}} u_{g,t} \quad ,\forall g,t \quad (۱۱)$$

$$v_{g,t} - w_{g,t} = u_{g,t} - u_{g,t-1} \quad ,\forall g,t \quad (۱۲)$$

$$\sum_{q=t-UT_g+1}^{t} v_{g,q} \le u_{g,t} \quad ,\forall g,t \in \{UT_g,\ldots,T\} \quad (۱۳)$$

$$\sum_{q=t-DT_g+1}^{t} w_{g,q} \le 1 - u_{g,t} \quad ,\forall g,t \in \{DT_g,\ldots,T\} \quad (۱۴)$$

$$P_{g,t}^{GEN} - P_{g,t-1}^{GEN} \le R_g^{+} u_{g,t-1} + R_g^{SU} v_{g,t} \quad ,\forall g,t \quad (۱۵)$$

$$P_{g,t-1}^{GEN} - P_{g,t}^{GEN} \le R_g^{-} u_{g,t} + R_g^{SD} w_{g,t} \quad ,\forall g,t \quad (۱۶)$$

$$0 \le v_{g,t} \le 1 \quad ,\forall g,t \quad (۱۷)$$

$$0 \le w_{g,t} \le 1 \quad ,\forall g,t \quad (۱۸)$$

$$u_{g,t} \in \{0,1\} \quad ,\forall g,t \quad (۱۹)$$

۴-۲- روش تکراری دو مرحله‌ای

همان‌گونه که ذکر گردید، در این مدل، برنامه پاسخگویی بار به عنوان ابزاری برای کاهش هزینه تامین توان و بهبود عملکرد ESP در شبکه توزیع هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور، ESP با پیش‌بینی متوالی بازار بالادست به اصلاح پروفیل بار خود می‌پردازد. در ادامه تشریح روش تکراری مورد استفاده ارائه شده است.

در ابتدا، پارامترهای ورودی، شامل اطلاعات بازار و شبکه توزیع جمع آوری می‌شود. اطلاعات بازار مربوط به شبکه انتقال، واحدهای تولید توان، و بارهای متصل به سایر باس‌های شبکه انتقال (بجز باس n^*) می‌باشد. اطلاعات شبکه توزیع نیز پروفیل بار مصرف کنندگان و مشخصات بارهای پاسخگو است. سپس، بازار بالادست می‌بایست تسویه گردیده تا مقادیر LMP برای باس تغذیه‌کننده شبکه پایین دست (n^*) تخمین زده شود. حال، با مشخص شدن مقادیر LMP، مسئله اصلی ارائه شده در روابط (۱) تا (۵) پیاده سازی گردیده تا هزینه خرید توان کمینه گردد. بنابراین، هزینه بهینه محاسبه گردیده و پروفیل بار بروزرسانی می شود. در مرحله بعد، بازار می‌بایست مجددا به ازای مقادیر جدید پروفیل بار در باس n^* تسویه گردد. بنابراین، مسئله فرعی (۶) تا (۱۹) حل گردیده و مقادیر جدید LMP محاسبه می‌شود. مقادیر LMP جدید و پروفیل بار بروزرسانی شده برای محاسبه هزینه واقعی خرید توان بصورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$Cost_Real = \sum_t \rho_t^{grid} P_t^D \quad (۲۰)$$

در واقع، اگر بار شیفت یافته از بازار بالادست تقاضا گردد، مقدار درست هزینه خرید توان برابر $Cost_Real$ خواهد بود. این رویه تا زمان برقراری شاخص توقف[۱۷] زیر بصورت تکراری ادامه می‌یابد:

$$\left| \frac{Cost_Real - Cost}{Cost_Real} \right| \le \varepsilon \quad (۲۱)$$

بطوریکه، $Cost$ هزینه بهینه بدست آمده از اجرای مسئله اصلی بوده، و $Cost_Real$ مقدار صحیح و واقعی آن می‌باشد. همچنین، ε یک آستانه ثابت مثبت بوده که در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این رساله برابر ۰/۰۲ است.

همگرایی این روش توسط نتایج شبیه‌سازی تایید می‌شود. علاوه بر این، یک روش تکراری مشابه برای تلفیق دو مسئله بهینه‌سازی در (Wu et al., 2015) مورد استفاده قرار گرفته است. چارچوب دو مرحله‌ای ارائه شده قادر به گنجاندن مدل‌های پیچیده تر بازار و نیز پاسخگویی بار می‌باشد.

۳- نتایج شبیه سازی

مدل تصمیم‌گیری پیشنهادی در ابتدا بر روی یک شبکه ساده ۶ باسه مورد ارزیابی قرار گرفته است تا تحلیل جزئیات مدل به شکل ساده تری انجام پذیرد. سپس به منظور تصدیق نتایج از شبکه استاندارد ۷۳ باسه IEEE (RTS 96) استفاده شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم افزار گمز پیاده سازی گردیده و از حل کننده‌ی CPLEX استفاده شده است (Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS). [Online]. Available: http://www.gams.com). برای این منظور سیستمی با مشخصات Corei7 ، 1.7GHz و 4GB RAM مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۱- شبکه ۶ باسه

شبکه ۶ باسه در شکل ۲ ترسیم گردیده است. اطلاعات واحدهای تولیدی و خطوط انتقال مورد استفاده قرار گرفته در این تحلیل، در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. بار پیک برابر ۳۰۰MW است.

اطلاعات مربوط به مدل سازی بار های منعطف شبکه توزیع هوشمند مطابق (Safdarian, Fotuhi-Firuzabad, et al., 2014) می‌باشد. پنج وسیله خانگی با قابلیت اجرای پاسخگویی بار در نظر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

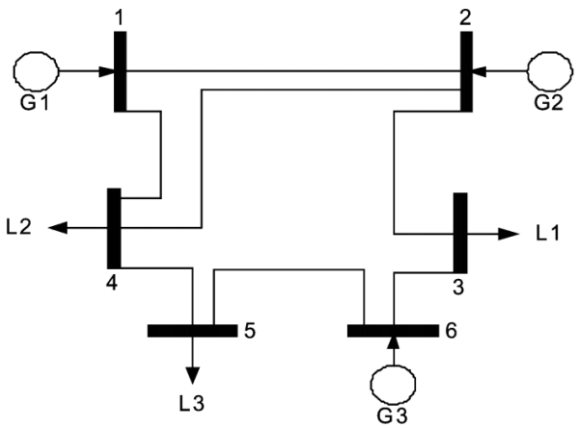
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

گرفته شده است. در جدول ۳ مقادیر AST و نیز سهم درصدی این وسایل در مصرف انرژی کل شبکه آورده شده است. با فرض PL=۰/۴ ، ۲۰ درصد از کل بار قابل شیفت می‌باشد.

برای ترسیم عملکرد و اثرات مدل ارائه شده، سه مورد مطالعاتی زیر در نظر گرفته می‌شود :

- مورد صفر، خرید توان بدون درنظر گرفتن پاسخگویی بار : در این حالت، بازار برق براساس بار پایه، تسویه گردیده، و مقادیر LMP بدست می‌آیند. سپس میزان هزینه خرید توان شبکه توزیع با توجه به منحنی تقاضای بار محاسبه می‌گردد.
- مورد ۱، خرید توان الکتریکی با درنظر گرفتن پاسخگویی بار و بدون در نظر گرفتن مدل پیشنهادی : این مورد مشابه استراتژی بکار رفته در مراجع (RaeisiNia et al., 2022; Reka et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zugno et al., 2013) بوده، و بیان کننده‌ی حالتی است که تامین کننده توان شبکه توزیع با پیش‌بینی تقریبی مقادیر LMP، پاسخگویی بار را اجرا می‌نماید، تا منحنی مطلوب خود را بدست آورده و به بازار پیشنهاد دهد. این مورد معادل اجرای یک تکرار از الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. بنابراین، در ابتدا بازار برق براساس بار پایه تسویه گردیده و مقادیر LMP بدست می‌آیند. سپس، پاسخگویی بار با هدف کاهش هزینه اجرا می‌گردد، تا منحنی بار بدست آید. در ادامه مجددا می‌بایست بازار برق تسویه گردد، تا مقادیر واقعی LMP و هزینه محاسبه گردد.
- مورد ۲، خرید توان با در نظر گرفتن مدل پیشنهادی.

در شکل ۳، مقادیر هزینه مورد نیاز برای خرید توان شبکه پایین دست در سه مورد یاد شده، آورده شده است.



شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه ۶ باسه

جدول (۱): اطلاعات واحدهای تولیدی شبکه ۶ باسه

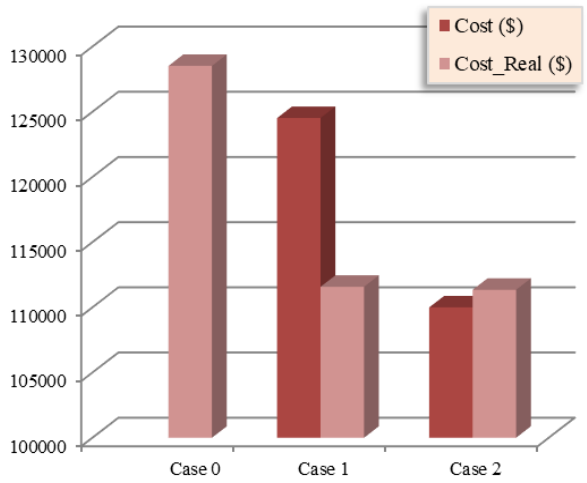
Unit	Bus No	Cg ($/MWh)	P^{max} (MW)	P^{min} (MW)	DT (h)	UT (h)	R^{+} (MW/h)	R^{SU} ($)
G1	1	43.64	220	100	4	4	55	62.35
G2	2	49.84	100	10	3	2	50	124.61
G3	6	62.31	100	10	1	1	20	0

جدول (۲): اطلاعات خطوط انتقال شبکه ۶ باسه

Line No	From	To	X(pu)	Flow Limit (MW)
1	1	2	0.17	200
2	2	3	0.037	100
3	1	4	0.258	100
4	2	4	0.197	100
5	4	5	0.037	100
6	5	6	0.14	100
7	3	6	0.018	100

جدول (۳): اطلاعات وسایل پاسخگو

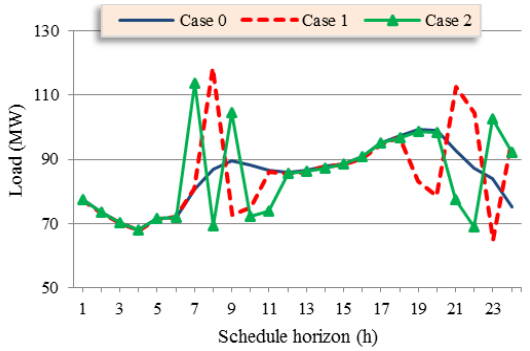
Appliances type	Percent of total load	AST (min)
Dishwasher	1.52	300
Clothes dryer	0.61	60
Clothes washer	2.46	120
Freezer & Refrigerator	8.56	60
Heating & Ventilation	37.78	120



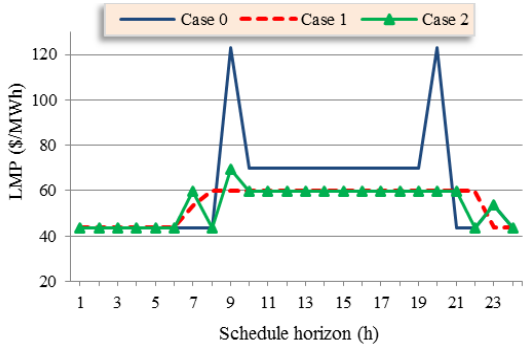
شکل (۳): هزینه خرید توان برای شبکه پایین دست

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]



شکل (۴): نمودار پروفیل بار شبکه پایین دست نسبت به زمان



شکل (۵): نمودار تغییرات LMP نسبت به زمان

منظور از Cost هزینه بهینه بدست آمده از اجرای پاسخگویی بار، و منظور از Cost_Real هزینه واقعی خرید توان (با گرفتن فیدبک از شبکه بالادست) می‌باشد.

همانگونه که مشاهده می‌شود، در مورد صفر، و در صورت عدم اجرای پاسخگویی بار، میزان هزینه ۱۲۸۵۲۴/۱ دلار خواهد بود. در مورد ۱، و با اجرای پاسخگویی بار (تکرار اول الگوریتم) میزان هزینه حدودا ۴۰۰۰ دلار کاهش یافته است (۱۲۴۵۲۷/۹ دلار). اما در صورتیکه مجددا از بازار فیدبک گرفته شده و هزینه واقعی بدست آید، مشاهده می‌گردد که این هزینه ۱۱۱۵۸۱/۸ دلار بوده است، که با میزان بهینه محاسبه شده ۱۲۹۴۶/۱ دلار (بیش از ده در صد) اختلاف دارد. در مورد ۲، الگوریتم پیشنهادی اجرا می‌گردد. پس از ۴ تکرار مقدار هزینه برابر ۱۱۰۰۰۱ دلار بدست می‌آید که با مقدار واقعی آن (۱۱۱۳۴۷/۵ دلار) تنها یک درصد اختلاف دارد. با توجه به مطالب ذکر شده، نکات زیر قابل استنباط است:

- بطور کلی با اجرای پاسخگویی بار، میزان هزینه خرید توان به شکل محسوسی کاهش یافته است. این مطلب نشان می‌دهد که اجرای پاسخگویی بار می‌توانند نقش پررنگی در کاهش هزینه‌های خرید توان داشته و به عنوان یک ابزار در اختیار تامین کننده توان شبکه توزیع قرار بگیرد.
- در مورد ۱، هزینه بدست آمده با مقدار واقعی آن تفاوت محسوسی دارد. زیرا با جابجایی بارها، مقادیر LMP نیز تغییر یافته، و متعاقبا میزان هزینه تغییر می‌کند. همچنین می‌بایست ذکر نمود که اگرچه هزینه واقعی، از هزینه بهینه کم‌تر بدست آمده است، اما بسته به شرایط شبکه بالادست (گراف شبکه، محدودیت‌های خطوط، قیمت‌های پیشنهادی و محدودیت‌های واحدهای تولید، شرایط سایر بارها و ..)، ممکن بود مقدار آن بیشتر باشد. با توجه به اختلاف موجود، این نتایج قابل اعتماد نبوده، و قابلیت‌های مثبت پاسخگویی بار را محدود می‌نماید.
- در مورد ۲، اختلاف هزینه بهینه و هزینه واقعی در تکرار آخر حدودا یک درصد بوده، که می‌تواند قابل اعتماد باشد. همچنین می‌بایست ذکر نمود که هزینه واقعی در تکرار آخر (۱۱۱۳۴۷/۵ دلار) کمترین هزینه در میان هزینه‌های واقعی تکرارهای متوالی الگوریتم پیشنهادی بوده است. در واقع با اجرای چارچوب پیشنهادی، بهینه‌ترین و نیز قابل اعتمادترین حالت ممکن برای اجرای پاسخگویی بار بدست آمده، و حداکثر استفاده از ظرفیت‌های پاسخگویی بار به عمل آمده است.

در ادامه، به منظور درک بهتر مفاهیم یاد شده، در شکل‌های ۴ و ۵، تغییرات پروفیل بار و نیز تغییرات LMP برای این سه مورد ترسیم شده است. با درنظر گرفتن این شکل‌ها نکات زیر قابل بیان است:

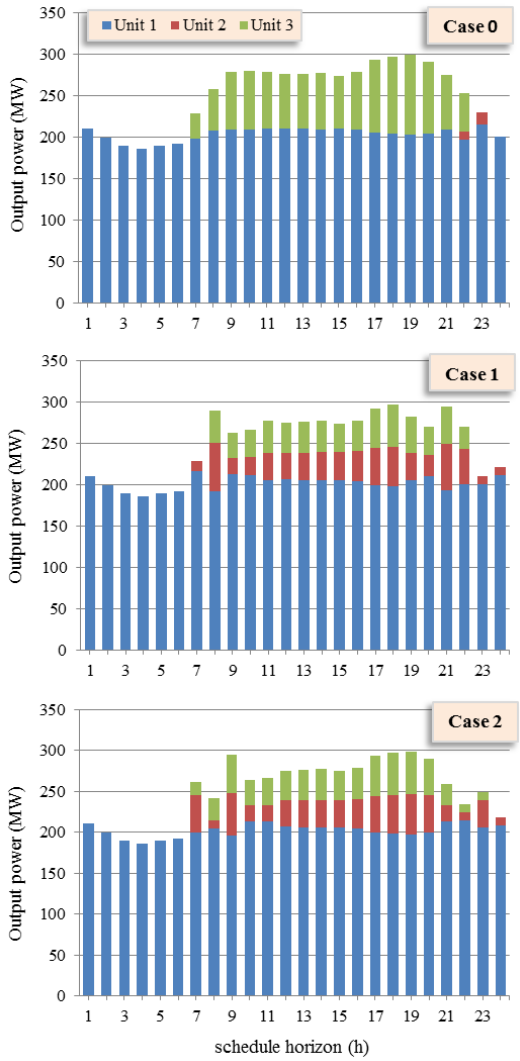
- در مورد صفر، به دلیل افزایش بار در محدوده ساعات ۹ تا ۲۰، خط ۳ (۴-۱) دچار گرفتگی شده و مقدار LMP افزایش یافته است. در ساعات ۹ و ۲۰ قید حداکثر شیب افزایشی توان واحدها برای ژنراتور سوم (که برابر ۲۰ مگاوات است) باعث افزایش ناگهانی و شدید LMP گردیده است. پیک LMP حدودا سه برابر مقدار حداقل آن شده است.
- در مورد ۱، و با اجرای پاسخگویی بار (تکرار اول الگوریتم)، توان مصرفی ساعات ۹ و ۲۰ به ساعات مجاور انتقال یافته تا هزینه خرید توان کاهش یابد. میزان بار در سایر ساعات بدون تغییر مانده است. همین جابجایی بار در ساعات بحرانی، علاوه بر تغییر دیسپچ شبکه بالادست، ورود و خروج واحدهای تولیدی در این ساعات را نیز دستخوش تغییر نموده، و در نتیجه نه تنها جهش LMP در ساعات ۹ و ۲۰ از بین رفته، بلکه مقدار LMP در محدوده ساعات ۹ تا ۲۰ نیز کاهش یافته است.
- در مورد ۲، و با اجرای چارچوب پیشنهادی، توان‌های مصرفی در اطراف ساعات ۹ و ۲۰ باز هم دستخوش تغییر شده، و پروفیل بار به شکل دیگری نمایان شده است. اما نکته‌ای که می‌بایست به آن توجه نمود آنست که توان‌های مصرفی برخلاف مورد ۱، در ساعات ۹ و ۲۰ نسبت به پروفیل ابتدایی کاهش نیافته است. با این حال هزینه بدست آمده نسبت به حالات قبلی کمتر بوده است. این مطلب نشان می‌دهد که با کاهش دادن توان مصرفی در ساعات با بیشترین قیمت LMP، الزاما بهترین پاسخ بدست نخواهد آمد. زیرا جابجایی بار خود منجر به تغییر شرایط دیسپچ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

و همچنین ورود و خروج واحدهای تولیدی شده، و مقادیر LMP و هزینه را دستخوش تغییر خواهد نمود.

برای مشاهده شرایط دیسپچ، توان خروجی سه واحد تولیدی برای هر سه مورد در شکل ۶ آورده شده است. در این شکل، واحد ۱ ارزان ترین واحد تولیدی بوده و به عنوان واحد تامین کننده بار پایه در نظر گرفته می‌شود. دو واحد دیگر در ساعات پیک بار دیسپچ می‌شوند. همانگونه که مشاهده می‌شود با اجرای پاسخگویی بار، نحوه دیسپچ واحدها در مورد های ۱ و ۲ نسبت به مورد صفر تفاوت محسوسی داشته است. در مورد صفر، واحد ۲ سهم بسیار کمی از تامین انرژی داشته و تنها در ساعات ۲۲ و ۲۳ وارد مدار شده است. اما در موردهای ۱و ۲ این واحد از ساعت ۷ به بعد وارد مدار شده است. با مقایسه موردهای ۱ و ۲ نیز می‌توان دریافت که تولید توان واحدها در اطراف ساعات ۹ و ۲۰ بگونه‌ای تغییر یافته تا بهترین پاسخ ممکن بدست آید.



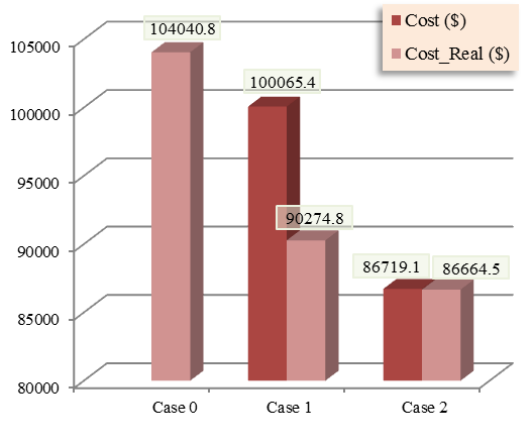
شکل (۶): توان‌های خروجی واحدهای تولیدی در سه مورد مطالعاتی

۲-۳- شبکه ۷۳ باسه

شبکه ۷۳ باسه IEEE (RTS 96) توسط کمیته‌ای از متخصصین سیستم‌های قدرت طراحی گردیده و در بسیاری از پژوهش ها برای مطالعات موردی استفاده شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولیدی، خطوط انتقال، و پروفیل بار در مرجع (Wong et al., 1999) آورده شده است. مشابه تحلیل بخش قبلی، اطلاعات مربوط به مدل‌سازی بارهای منعطف شبکه توزیع هوشمند مطابق مرجع (Safdarian, Fotuhi-Firuzabad, et al., 2014) می‌باشد. اما مقدار PL برابر ۰/۲۶ در نظر گرفته شده و در نتیجه ۱۳ درصد از کل بار قابل شیفت خواهد بود. در اینجا نیز سه مورد مطالعاتی ذکر شده در بخش قبل ارزیابی می‌گردد.

هزینه مورد نیاز برای خرید توان شبکه پایین دست برای سه مورد یاد شده، در شکل ۷ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج این مطالعه نیز نشان می‌دهد که با اجرای پاسخگویی بار مقدار هزینه از ۱۰۴۰۴۰/۸ دلار در مورد صفر، به ۱۰۰۶۵/۴ دلار در مورد ۱، کاهش یافته است. اما در مورد ۱ ، مقدار هزینه بدست آمده قابل اعتماد نبوده و با مقدار هزینه واقعی (۹۰۲۷۴/۸ دلار) حدودا ۱۰ درصد اختلاف دارد. با اجرای روش پیشنهادی در مورد ۲، مقدار هزینه‌ی بهینه و مقدار واقعی آن تقریبا یکسان بدست آمده است (۸۶۷۱۹/۱ دلار و ۸۶۶۶۴/۵ دلار)، اختلاف مابین هزینه‌ها در این مورد به ۰/۰۶ درصد کاهش یافته است. از طرف دیگر، در مورد ۲ نسبت به مورد ۱، مقدار هزینه ۱۳۳۴۶/۳ دلار و مقدار هزینه واقعی ۳۶۱۰/۳ دلار کاهش یافته است. این اختلاف نیز محسوس بوده و نشان دهنده قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی در استفاده بیشتر از ظرفیت‌های پاسخگویی بار می‌باشد.

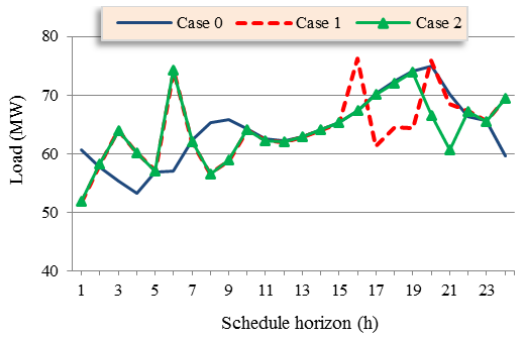
تغییرات پروفیل بار و تغییرات LMP برای سه مورد یاده شده در شکل‌های ۸ و ۹، ترسیم شده است. با درنظر گرفتن این شکل‌ها نکات زیر قابل بیان است:



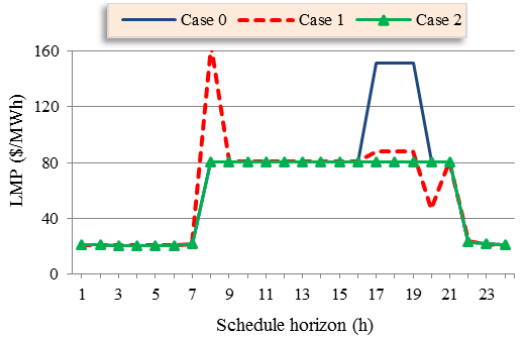
شکل (۷): هزینه خرید توان برای شبکه پایین دست

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]



شکل (۸): نمودار پروفیل بار شبکه پایین دست نسبت به زمان



شکل (۹): نمودار تغییرات LMP نسبت به زمان

- در مورد صفر، با افزایش بار مصرفی مقدار LMP از ساعت ۷ به بعد نسبت به ساعات کم باری، حدودا چهار برابر شده است و در محدوده ساعات ۱۷ تا ۱۹ حدودا ۷/۵ برابر شده است. می‌بایست توجه نمود که بیشترین بار در ساعت ۲۰ اتفاق افتاده است، اما LMP در این ساعت نسبت به ساعات ۱۷ تا ۱۹ کاهش یافته است، زیرا پروفیل بار مصرفی سایر باس های شبکه بالادست (انتقال) با پروفیل مصرف شبکه توزیع مورد بررسی که می اختلاف دارد.
- در مورد ۱، با اجرای پاسخگویی بار، مقدار بار مصرفی در محدوده ساعات ۱۷ تا ۱۹ کاهش و به ساعات مجاور انتقال یافته است. همچنین بار مصرفی ساعات انتهایی روز نیز جابجا شده و به ساعات ابتدایی روز انتقال یافته است.
- در مورد ۲ برخلاف مورد ۱، مقدار بار مصرفی در محدوده ساعات ۱۷ تا ۱۹ کاهش نیافته است، اما با این حال هزینه بدست آمده نسبت به مورد ۱ کمتر بوده است. بنابراین باز هم می‌بایست ذکر نمود که با کاهش دادن توان مصرفی در ساعات با بیشترین قیمت LMP، الزاما بهینه‌ترین پاسخ بدست نخواهد آمد. تغییرات بارهای مصرفی در ساعات انتهایی روز، دیسپچ واحدهای تولیدی را (حتی در ساعات ابتدایی روز) دستخوش تغییر خواهد نمود. در نتیجه در مورد ۲، با در نظر گرفتن شرایط شبکه بالادست، پروفیل بار به شکلی تغییر یافته است که بهترین مقادیر برای LMP، و در نهایت کمترین هزینه ممکن حاصل گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد تکراری دو مرحله‌ای برای اجرای بهینه‌ی پاسخگویی بار توسط یک تامین کننده سرویس انرژی در یک شبکه توزیع با بارهای خانگی تشریح گردیده است. مسئله اصلی، بهینه سازی هزینه تامین توان با استفاده از اجرای پاسخگویی بار، و مسئله فرعی بهینه سازی تسویه بازار برق است. روش پیشنهادی امکان پیشبینی تغییرات قیمت توان با تغییرات پروفیل بار را مهیا نموده، و منجر به پاسخ‌های بهینه‌تری خواهد شد. این چارچوب می‌توانند مدل‌های پیچیده‌تری را در خود جای دهد. کارهای آتی می‌توانند شامل مواردی نظیر در نظرگرفتن عدم قطعیت قیمت و بار، در نظر گرفتن تلفات توان و قیود امنیتی در مدل سازی بازار، و ارزیابی رفتار استراتژیک شرکت کنندگان بازار (به غیر از ESP) باشد.

علائم

مجموعه‌ها و اندیس‌ها:

t,t'	زمان (ساعت)
a	وسایل خانگی پاسخگو
k	عناصر انتقال‌دهنده توان (خط یا ترانسفورماتور)
$k(n,.)/k(.,n)$	عناصر انتقال دهنده توان از/ به باس n
g	واحدهای تولیدی (ژنراتورها)
$g(n)$	مجموعه‌ی واحدهای تولیدی متصل به باس n
m,n	باس‌های شبکه انتقال

پارامترها:

ρ_t^{grid}	قیمت برق در باس تغذیه (LMP در باس n^*) در ساعت t
$P_{a,t}^R$	مقدار بار وسیله‌ی پاسخگو a در ساعت t
P_t^{NR}	مقدار بار غیرپاسخگو در ساعت t
PL	سطح نفوذ مصرف کنندگان فعال
AST_a	حداکثر زمان شیفت مجاز وسیله پاسخگو a
T	تعداد ساعات بازه‌ی زمانی مورد مطالعه
B_k	سوسپتانس عنصر انتقال دهنده توان k
c_g	هزینه تولید توان توسط واحد g
c_g^{SD}/c_g^{SU}	هزینه روشن / خاموش شدن واحد g
$d_{n,t}$	مقدار بار مصرفی در باس n در ساعت t
DT_g/UT_g	حداقل زمان روشن / خاموش ماندن واحد g
R_g^-/R_g^+	حداکثر شیب افزایش / کاهش توان واحد g
R_g^{SD}/R_g^{SU}	حداکثر شیب تغییرات توان در روشن / خاموش شدن واحد g

متغیرها:

P_t^D	مقدار کل بار شبکه پایین دست در ساعت t
P_t^{TS}	مقدار کل بار خالص شیفت یافته به ساعت t

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

مقدار بار شیفت یافته وسیله a از ساعت t به ساعت t'	$P^{S}_{a,t,t'}$
توان تولیدی واحد g در ساعت t	$P^{GEN}_{g,t}$
توان عبوری از عنصر انتقال دهنده k در ساعت t	$P^{F}_{k,t}$
متغیر باینری UC واحد g در ساعت t	$u_{g,t}$
متغیر باینری روشن / خاموش شدن واحد g در ساعت t	$w_{g,t} / v_{g,t}$
زاویه ولتاژ باس n شبکه انتقال در ساعت t	$\theta_{n,t}$

مراجع

. (Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS). [Online]. Available: http://www.gams.com).

Aalami, H., Moghaddam, M. P., & Yousefi, G. (2010). Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs. *Applied energy*, *87*(1), 243-250.

Abdollahi, A., Moghaddam, M. P., Rashidinejad, M., & Sheikh-El-Eslami, M. K. (2012). Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, *3*(1), 12-25.

Aghaei, J., & Alizadeh, M.-I. (2013). Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *18*, 64-72.

Baringo, L., & Conejo, A. J. (2013). Risk-constrained multi-stage wind power investment. *Power Systems, IEEE Transactions on*, *28*(1), 401-411.

Chen, Z., Wu, L., & Fu, Y. (2012). Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, *3*(4), 1822-1831.

Conejo, A. J., Morales, J. M., & Baringo, L. (2010). Real-time demand response model. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, *1*(3), 236-242.

Khodaei, A., Shahidehpour, M., & Bahramirad, S. (2011). SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, *2*(3), 564-571.

Lan, P., Wu, G., Shen, X., Lv, L., Liu, J., Zhao, H., Jawad, S., & Liu, J. (2022). Distributed optimal scheduling for coupled transmission-distribution integrated electricity-gas system. *Electric Power Systems Research*, *206*, 107759.

Lui, T. J., Stirling, W., & Marcy, H. O. (2010). Get smart. *Power and Energy Magazine*, *8*(3), 66 - 78.

Mohsenian-Rad, A.-H., & Leon-Garcia, A. (2010). Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, *1*(2), 120-133.

Montuori, L., Alcázar-Ortega, M., Álvarez-Bel, C., & Domijan, A. (2014). Integration of renewable energy in microgrids coordinated with demand response resources: Economic evaluation of a biomass gasification plant by Homer Simulator. *Applied energy*, *132*, 15-22.

QDR, Q. (2006). Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them.

RaeisiNia, M. R., Javadi, S., Jokar, M. R., & Nejati, S. A. (2022). Flexibility pricing in the active distribution network including renewable and flexibility sources as a bi-level optimization model. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *52*, 101947.

Reka, S. S., Venugopal, P., Alhelou, H. H., Siano, P., & Golshan, M. E. H. (2021). Real time demand response modeling for residential consumers in smart grid considering renewable energy with deep learning approach. *IEEE access*, *9*, 56551-56562.

Safdarian, A., Fotuhi-Firuzabad, M., & Lehtonen, M. (2014). Benefits of demand response on operation of distribution networks: A case study. *Systems Journal, IEEE*(99), 1 - 9.

Safdarian, A., Lehtonen, M., Fotuhi-Firuzabad, M., & Billinton, R. (2014). Customer interruption cost in smart grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, *2*(29), 994-995.

Sheikhahmadi, P., Bahramara, S., Mazza, A., Chicco, G., & Catalão, J. P. (2021). Bi-level optimization model for the coordination between transmission and distribution systems interacting with local energy markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *124*, 106392.

Stamminger, R., Broil, G., Pakula, C., Jungbecker, H., Braun, M., Rüdenauer, I., & Wendker, C. (2008). Synergy potential of smart appliances. *Report of the Smart-A project*.

Tabandeh, A., & Hossain, M. J. (2021). Hybrid Scenario-IGDT-Based Congestion Management Considering Uncertain Demand Response Firms and Wind Farms. *IEEE Systems Journal*, *16*(2), 3108-3119.

Vardakas, J. S., Zorba, N., & Verikoukis, C. V. (2015). A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, *17*(1), 152-178.

Wang, X., Palazoglu, A., & El-Farra, N. H. (2015). Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems. *Applied energy*, *143*, 324-335.

Wong, P., Albrecht, P., Allan, R., Billinton, R., Chen, Q., Fong, C., Haddad, S., Li, W., Mukerji, R., & Patton, D. (1999). The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. *Power Systems, IEEE Transactions on*, *14*(3), 1010-1020.

Wu, H., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A. (2015). Demand Response Exchange in the Stochastic Day-Ahead Scheduling With Variable Renewable Generation. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, *6*(2), 516-525.

Zhang, D., Zhu, H., Zhang, H., Goh, H. H., Liu, H., & Wu, T. (2021). Multi-objective optimization for smart integrated energy system considering demand responses and dynamic prices. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *13*(2), 1100-1112.

Zugno, M., Morales, J. M., Pinson, P., & Madsen, H. (2013). A bilevel model for electricity retailers' participation in a demand response market environment. *Energy Economics*, *36*, 182-197.

[1] Demand response
[2] Ancillary services
[3] Market power
[4] Energy service providers
[5] Locational marginal prices
[6] Flexible appliances
[7] Real-time pricing
[8] Flat pricing
[9] Time-Of-Use pricing
[10] Robust optimization
[11] Security-constrained unit commitment

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]

[12] Unit Commitment
[13] Mixed integer programming
[14] Acceptable shift time
[15] Penetration level
[16] Continuous variables
[17] Stopping criterion

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.3.1]