

Probabilistic–Possibilistic modeling of V2G parking lot with the approach of improving flexibility in the Security-Constrained Unit Commitment.

Ramin Sharikabadi, Amir Abdollahi*, Masoud Rashidinejad, Mehdi Shafiee

Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran ^{1,2,3}

Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran ⁴

E-mails: ramin.sharikabadi@gmail.com; a.abdollahi@uk.ac.ir; mrashidi@uk.ac.ir; m-shafiee@tvu.ac.ir

Short Abstract

One of the advantages of electric vehicles is their mass storage capability, which can help to change the hourly generation portfolio and reduce the operating costs of the SCUC scheduling problem. On the other hand, the uncertainty in the power system can lead to an imbalance in production and consumption, and as a result, unpredictable blackouts. Therefore, studies of the flexibility of the power system have gained special importance. In this paper, the effect of the presence of Vehicle-to-grid (V2G) on the flexibility index and operating cost of the power system has been investigated as it's considered a quick response source. The uncertainty of electric vehicles (EVs) has been modeled using the Z-number method. In fact, this method describes the number of v2g capable charging stations in each parking lot as a probabilistic–possibilistic variable. Improving the flexibility is reasonable when the operating cost is at the lowest possible level. For this reason, in order to reach the expected level of flexibility, the SCUC problem has been solved, considering security and flexibility, and the numerical analysis shows the improvement of the level of flexibility with the minimum cost of operation. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed method, the IEEE 24-bus test system has been used.

Keywords

Security-constrained unit commitment, flexibility, vehicle-to-grid, uncertainty, z-number.

1- Short Introduction

The SCUC problem is a key optimization function in power system management, which minimizes the total operating cost while satisfying security constraints in a short-term horizon [4]. Also, the presence of electric vehicles in the SCUC problem reduces the dependence of the power system on expensive units in peak load [7]. But one of the critical things that must be considered when optimally connecting electric vehicles to the power grid is the high uncertainty of EVs, which inevitably affect the behavior of the power system [17]. On the other hand, the uncertainty of electric vehicles and power generation sources, overshadows the flexibility of the power system [23]. Therefore, electric vehicles are used as a source of flexibility enhancement.

2- Proposed Work and Methodology

In this paper, security-constrained unit commitment in the presence of probabilistic–possibilistic modeling of V2G parking lots with the approach of improving flexibility (FBSCUC^{V2G}) is proposed. The main goal of FBSCUC^{V2G} problem is to provide network load with minimum operating cost and maximize network security. On the other hand, to evaluate the effect of electric vehicles on the level of flexibility of the power system, the introduced flexibility indices are added to the constraints of the SCUC problem. In fact, the problem of FBSCUC^{V2G} is solved with the aim of maximizing the security and flexibility of the power system. In this structure, the uncertainty of electric vehicles is modeled by the Z-Number method. Using this method, the number of v2g capable charging stations in each parking lot is calculated. The reason for this choice is that the construction of V2G enabled parking lot and predicting its behavior in the studied system requires having its historical data available. Due to the lack of such data and the various pattern of using electric vehicles in each country, these data are considered as incomplete data in Iran. Therefore, to effectively use these information, the Z-number method has been utilized.

3- Conclusion

The simulation results of the FBSCUC^{V2G} problem show that the controlled presence of electric vehicles in the power system, leads to improved flexibility with the most reasonable operating cost. On the other hand, it is observed that the untargeted presence of electric vehicles in the power system reduces the flexibility indicators. The effectiveness of the proposed problem has been examined in three cases. In the first case, the SCUC problem is solved without considering electric vehicles and flexibility indices are calculated. In the second case, the SCUC problem has been solved in the presence of electric vehicles and the effect of their uncertainty on the the power system flexibility has been evaluated. Finally, in the third case, the SCUC problem is constrained to flexibility indices. In this case, in addition to reducing the operation cost, electric vehicle have led to an increase in the power system flexibility.

4- References

- [1] M. Govardhan and R. Roy, "Economic analysis of unit commitment with distributed energy resources," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 71, pp. 1–14, 2015.
- [2] A. Nasri, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. Hadi Amini, "Probabilistic-possibilistic model for a parking lot in the smart distribution network expansion planning," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 13, pp. 3363–3374, 2018.
- [3] S. Poorvaezi Roukerd, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Probabilistic-possibilistic flexibility-based unit commitment with uncertain negawatt demand response resources considering Z-number method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, no. May, pp. 71–89, 2019.

مدل سازی امکانی - احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی با رویکرد بهبود انعطاف پذیری در برنامه ریزی مشارکت امنیت مقید واحدهای نیروگاهی

رامین شریک آبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

امیر عبدالمهی

استاد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

مسعود رشیدی نژاد

استاد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

مهدی شفیعی

دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

از جمله مزایای خودروهای برقی، قابلیت ذخیره سازی انبوه آن‌ها می‌باشد که می‌تواند به تغییر سبب تولید ساعتی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مسئله برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید واحدهای نیروگاهی (SCUC) کمک کند. از طرفی عدم قطعیت موجود در سیستم قدرت، می‌تواند منجر به رخداد عدم تعادل در تولید و مصرف و در نتیجه آن بروز خاموشی‌های غیرقابل پیش‌بینی گردد. بنابراین مطالعات انعطاف‌پذیری سیستم قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است. در این مقاله، تاثیر حضور خودروهای برقی (V2G) به عنوان منبع پاسخگوی سریع، بر شاخص انعطاف‌پذیری و هزینه بهره‌برداری سیستم قدرت بررسی شده است. عدم قطعیت خودروهای برقی با استفاده از روش Z-number مدل گردیده است. در واقع این روش تعداد خودروهای موجود در پارکینگ را به عنوان یک متغیر امکانی و احتمالاتی توصیف می‌کند. بهبود انعطاف‌پذیری زمانی معقول است که هزینه بهره‌برداری در حداقل سطح ممکن قرار گیرد. به همین جهت برای رسیدن به سطح انعطاف‌پذیری مورد انتظار، مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای نیروگاهی بطور همزمان با در نظر گرفتن قیود امنیت و انعطاف‌پذیری حل شده است. تحلیل‌های عددی حاکی از بهبود سطح انعطاف‌پذیری با حداقل هزینه بهره‌برداری می‌باشد. به منظور نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی از سیستم تست ۲۴ باس IEEE استفاده شده است.

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید واحدهای نیروگاهی، انعطاف‌پذیری، خودروی برقی، عدم قطعیت، مدل Z-number

نام نویسنده مسئول: امیر عبدالمهی

ایمیل نویسنده مسئول: a.abdollahi@uk.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۶

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

۵- مقدمه

فسیلی در بخش حمل و نقل و صنعت برق، تحت عنوان عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، نگرانی بزرگی را در سرتاسر جهان به وجود آورده است [۳]. در همین راستا، خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه (PEV) به عنوان یک راه حل امیدوارکننده در کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و آلودگی زیست محیطی بخش حمل و نقل، پیشنهاد شده است [۴]. از طرفی، PEV های تجمیع شده^۲، می‌توانند در قالب یک نیروگاه مجازی، انرژی ذخیره شده خود را با شبکه قدرت مبادله نمایند [۵]. علاوه بر این، خودروهای متصل به شبکه (V2G) با دشارژ شدن در ساعات اوج مصرف منجر به کاهش وابستگی سیستم قدرت به واحدهای گران قیمت، در پیک بار می‌شوند [۶]. در [۷] یک ساختار SCUC تصادفی با ناوگان خودروهای برقی تجمیع شده با هدف به حداقل رساندن هزینه

مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای نیروگاهی (UC) با محدودیت‌های زیادی همچون محدودیت تعادل توان، محدودیت تولید، ذخیره چرخان و غیره، مواجه است [۱]. با این وجود مسئله فوق، تضمین نمی‌کند که توان عبوری از خطوط انتقال با موفقیت به مصرف‌کننده برسد. به همین جهت، مسئله برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید واحدهای نیروگاهی^۱ (SCUC) معرفی می‌گردد. مسئله SCUC یک عملکرد بهینه‌سازی کلیدی در مدیریت سیستم‌های قدرت است، که هزینه کل بهره‌برداری را به حداقل می‌رساند و در عین حال محدودیت‌های امنیتی را در یک افق کوتاه مدت برآورده می‌سازد [۲]. در سال‌های اخیر، گرمایش جهانی ناشی از استفاده بی‌رویه از سوخت‌های

^۲ Aggregated

^۱ Security Constrained Unit Commitment

و انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را بررسی نموده‌اند. عدم قطعیت خودروهای برقی در این مرجع با استفاده از زنجیره مارکوف مدل شده است. در [۲۵]، با استفاده از ناوگان خودروهای برقی متحرک در کنار استراتژی بازیابی مجدد شبکه، عدم قطعیت منابع انرژی باد را کاهش و انعطاف‌پذیری شبکه قدرت را بهبود بخشیده است. در [۲۶]، زمان‌بندی چندهدفه باتری خودروهای برقی موجود در پارکینگ، برای بهبود انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه شده است. بررسی دقیق مراجع اخیر نشان می‌دهد که حضور خودروهای برقی در مسئله SCUC و تأثیر آن بر انعطاف‌پذیری سیستم قدرت بطور همزمان دیده نشده است. از این‌رو، نوآوری‌های مقاله حاضر را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

- ۱) مدل‌سازی امکانی-احتمالاتی خودروهای برقی در مسئله SCUC.
- ۲) بهره‌برداری انعطاف‌پذیر-محور از سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی، با هدف افزایش انعطاف‌پذیری و امنیت سیستم قدرت بصورت توأمان و کاهش هزینه بهره‌برداری.

۶- بیان مسئله

در این مقاله، برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید واحدهای نیروگاهی در حضور مدل‌سازی امکانی-احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی با رویکرد بهبود انعطاف‌پذیری (FBSCUC^{V2G})^۵ پیشنهاد شده است. خودروهای متصل به شبکه با مشارکت در برنامه‌ریزی سیستم قدرت، وابستگی فرآیند تولید به واحدهای حرارتی کوچک و پرهزینه را کاهش می‌دهند و متعاقباً تأثیر فوق‌العاده‌ای بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری دارند [۲۷]. گذشته از آن، با توجه به سرعت بالای اتصال این منابع به شبکه قدرت، می‌توان از آن‌ها به عنوان یک منبع ارتقاء انعطاف‌پذیری استفاده نمود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت از آنجایی ضرورت پیدا کرد که، منابع دارای عدم قطعیت بیش از پیش در سیستم قدرت نفوذ پیدا کرده است. از این‌رو، به منظور ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت بایستی یک شاخص مناسب و تعریف جامع برای آن معرفی گردد. بنابراین در این مقاله از تعریف و شاخص انعطاف‌پذیری معرفی شده در مرجع [۱۸]، استفاده شده است.

آنچه که مرجع فوق تحت عنوان تعریف انعطاف‌پذیری به کار برده است " توانایی سیستم قدرت در روبه‌رو شدن با عدم قطعیت‌های موجود در مسئله، در سطحی قابل قبول، در زمانی مناسب و با هزینه‌ای منطقی " می‌باشد. شاخص معرفی‌شده در مرجع [۱۸] به این دلیل انتخاب شده است، که حداکثر ظرفیت آزاد واحدهای تولیدی و سرعت رسیدن به این ظرفیت را در نظر گرفته است، لذا اتصال خودروهای برقی به سیستم قدرت موجب آزادسازی ظرفیت واحدهای نیروگاهی شده و در پی آن، بهبود انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را به دنبال دارد. یکی از مواردی که بایستی در ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت مورد توجه قرار گیرد، عدم قطعیت منابع موجود در مسئله می‌باشد. علاوه بر عدم قطعیت منابع تولیدکننده و مصرف‌کننده توان، عدم قطعیت منابعی که به منظور بهبود انعطاف‌پذیری شبکه قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز بایستی در مطالعات لحاظ گردد. از این‌رو در این مقاله، برای مدل‌سازی عدم قطعیت خودروهای برقی از روش Z-number مطابق مرجع [۱۶] استفاده شده است. دلیل این انتخاب این است که، احداث پارکینگ خودروهای برقی و پیش‌بینی رفتار آن در شبکه مورد مطالعه مستلزم دراختیار داشتن داده‌های تاریخی آن است، لیکن به علت کمبود این داده‌ها در بعضی کشورها و متفاوت بودن الگوی استفاده از خودروهای برقی در هر کشور، این داده‌ها به عنوان داده‌های ناقص، تلقی می‌شوند. بنابراین برای استفاده موثر از این داده‌ها از روش Z-number استفاده گردیده است [۱۶].

بهره‌برداری پیشنهاد شده است. در [۸]، با تعیین بهینه محدوده پارکینگ خودروهای برقی در هر ساعت از زمان بهره‌برداری و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ آن‌ها، بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت را ارزیابی نموده است. در [۹] برای حل مسئله SCUC مقاوم چند هدفه که شامل خودرو متصل به شبکه و مزارع بادی می‌باشد، از تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتارهای شارژ و دشارژ خودروهای متصل به شبکه می‌توانند مشخصات بار را در صورت اتصال تعداد قابل توجهی از این خودروها، به شدت تغییر دهند. در [۱۰] یک مدل برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای نیروگاهی برای یک سیستم V2G، با در نظر گرفتن سطوح مختلف نفوذ خودروهای برقی، پیشنهاد شده است. این مرجع از الگوهای رانندگی تاریخی و ظرفیت‌های مختلف باتری برای شبیه‌سازی تقاضای خودروی برقی، استفاده کرده است.

همان‌طور که مطالعات اخیر نشان می‌دهد، به کارگیری فناوری خودرو به شبکه در سیستم قدرت مزایای زیادی را به همراه دارد. اما یکی از موارد حیاتی که باید در هنگام اتصال بهینه خودروهای برقی به شبکه قدرت مورد توجه قرار گیرد، عدم قطعیت بالای این خودروها است که بطور اجتناب‌ناپذیری بر رفتار سیستم قدرت تأثیر می‌گذارد [۱۱]. در [۱۲]، یک روش تصادفی اصلاح‌شده برای مدل‌سازی رفتار نامشخص خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ معرفی شده است. مرجع [۱۳] برای مقابله با عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و خودروهای برقی، یک رویکرد مبتنی بر سناریو را پیشنهاد کرده است. در سال‌های اخیر، چندین روش برای مدل‌سازی عدم قطعیت متغیرهای احتمالاتی پیشنهاد شده است، که می‌توان روش‌های امکانی، احتمالی و امکانی-احتمالاتی^۶ را نام برد [۱۴]. از این‌رو، مدل Z-number در دسته روش‌های امکانی-احتمالاتی قرار می‌گیرد. در [۱۵]، عدم قطعیت برنامه‌های پاسخگویی تقاضا با روش Z-number مدل‌سازی گردیده است. مرجع [۱۶]، توان خروجی پارکینگ خودروهای برقی را به عنوان یک متغیر امکانی-احتمالاتی، توسط روش Z-number محاسبه نموده است.

از سوی دیگر، خودروی برقی به عنوان یک منبع اتکناپذیر، با توجه به عدم قطعیت و تغییرپذیری بالایی که دارد، انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را تحت الشعاع قرار می‌دهد [۱۷]. اگرچه منابع اتکناپذیر در دسته منابع پاک قرار می‌گیرند و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهند، اما پیش‌بینی و کنترل توان خروجی آن‌ها برای بهره‌بردار سیستم قدرت یک چالش سخت و حیاتی می‌باشد [۱۸]. از این‌رو منابع ارتقاء انعطاف‌پذیری در مطالعات مختلف به چهار دسته سمت تولید توان، سمت شبکه قدرت، سمت تقاضای توان و سمت ذخیره انرژی تقسیم می‌شوند [۱۹]. از جمله منابع سمت تقاضا که به عنوان ذخیره‌ساز شناخته می‌شوند، خودروهای برقی می‌باشند که به عنوان یک منبع سریع پاسخ و با شیب بالا می‌توانند شبکه‌های محلی را به وسیله شارژ و دشارژ خود منتفع نمایند [۲۰]. مرجع [۲۱] با ارائه یک روش شارژ هوشمند خودروهای برقی، انعطاف‌پذیری را در سمت تقاضا مدیریت کرده است. تجمع خودروهای الکتریکی پتانسیل قابل توجهی را در قالب خدمات جانبی برای سیستم‌های قدرت فراهم می‌کند؛ به‌طوری که مرجع [۲۲] به جهت ارائه انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، روشی را برای یافتن برنامه کاهش بار پارکینگ خودروهای برقی با حداقل تأثیر منفی بر کیفیت خدمات شارژ ارائه نموده است. در [۲۳] جنبه‌های فنی و کلیدی برای ادغام خودروهای الکتریکی در شبکه قدرت به عنوان ارائه‌دهنده انعطاف‌پذیری بررسی شده است. محققان در [۲۴] خودروهای برقی را در بازار رمپ^۴ مشارکت داده‌اند و تأثیر آن بر قابلیت اطمینان

^۵ Flexibility based SCUC in the presence of V2Gs

^۳ Probabilistic-possibilistic

^۴ ramp market

بعد از تعریف مجموعه Z-number مربوط به تعداد خودرو، با تأثیر مجموعه‌های احتمالاتی در مجموعه‌های فازی مربوط به تعداد خودروها، مجموعه Z-number به فازی تبدیل می‌گردد. بر همین اساس، ابتدا مجموعه‌های احتمالاتی طبق رابطه (۴) فازی‌زدایی می‌گردد [۱۸].

$$\lambda = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (pr \times \mu_{R^t}(pr)) dpr}{\int_{-\infty}^{+\infty} (\mu_{R^t}(pr)) dpr} \quad (4)$$

λ در رابطه (۴) ضرایب وزنی نامیده می‌شود، که در تابع عضویت Z-number تعداد خودروها، مطابق (۵) ضرب می‌شود. در این حالت مجموعه تعداد خودروها از حالت Z-number به حالت فازی تبدیل می‌گردد [۲۹].

$$\mu_{\tilde{N}_{it}^{V2G}}(pr) = (\lambda \times (\mu_{\tilde{A}_{it}^{V2G}}(pr))) \quad (5)$$

مجموعه فازی تعیین‌شده دارای توابع عضویت نامنظم است. بنابراین، توابع عضویت نامنظم طبق (۶) منظم می‌گردد.

$$\mu_{\tilde{N}_{it}^{V2G}}(N_{V2G}) = \mu_{\tilde{N}_{it}^{V2G}}\left(\frac{N_{V2G}}{\sqrt{\lambda}}\right) \quad (6)$$

پس از آن، برای کاهش محاسبات، آن دسته از مجموعه‌های Z-number که مؤلفه اولشان یکسان است به دلیل همپوشانی زیادی که در اثر تبدیل به یک مجموعه فازی دارند، به یک مجموعه مطابق رابطه (۷) تبدیل می‌گردد.

$$NT_{j,t}^{V2G} = \bigcup_i \tilde{N}_{i,t}^{V2G}, \quad \forall j = \begin{cases} 1 & \text{if } \{i = 1, 2, 3\} \\ 2 & \text{if } \{i = 4, 5, 6\} \\ 3 & \text{if } \{i = 7, 8, 9\} \end{cases} \quad (7)$$

به‌منظور اعمال تأثیر اطلاعات تاریخی ناقص موجود در مسئله، پارامترهای تابع توزیع نرمال مربوط به اطلاعات تاریخی تعیین می‌گردد. سپس تأثیر آن‌ها بصورت فازی-احتمالاتی در نظر گرفته خواهد شد [۱۶]. پس از تعیین تابع توزیع نرمال توسط داده‌های تاریخی موجود در سایت (NHTS) ^۶، احتمال مجموعه‌های فازی مربوط به تعداد خودروها بر اساس رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$prob^{V2G}(\tilde{A}) = \int_a^d \tilde{A} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

فازی‌زدایی و محاسبه تعداد خودروهای هر پارکینگ

در این بخش از روش فازی‌زدایی، به جهت اینکه مقدار عددی متناظر با مجموعه فازی NT^{V2G} با تابع عضویت $\mu_{NT^{V2G}}$ تعیین گردد، استفاده شده است. در نتیجه، توسط روش مرکز ثقل مطابق رابطه (۹) محاسبه شده است [۱۶].

$$NT_j^{V2G} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (pr \times \mu_{NT_j^{V2G}}(pr)) dpr}{\int_{-\infty}^{+\infty} (\mu_{NT_j^{V2G}}(pr)) dpr} \quad (9)$$

در رابطه فوق NT_j^{V2G} مقدار عددی متناظر با مجموعه فازی $\tilde{NT}_i^{V2G}$ می‌باشد. پس از فازی‌زدایی هر مجموعه فازی مربوط به تعداد خودروهای هر پارکینگ، با توجه به روابط (۸) و (۹)، تعداد خودروهای موجود در پارکینگ مطابق رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$N_{\text{parking}}^V = \sum_{j=1}^{N_{NT}} [\text{prob}_j^{V2G} NT_j^{V2G}] - \sum_{h=1}^{N_{NTC}} [\text{prob}_h^{V2G} NTC_h^{V2G}] \quad (10)$$

۷- ساختار مدل پیشنهادی FBSCUC^{V2G}

ساختار و چارچوب کلی مدل پیشنهادی FBSCUC^{V2G} در شکل ۱ نشان داده شده است. در قسمت اول ساختار پیشنهادی، مدل‌سازی امکانی-احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی با استفاده از روش Z-number توصیف شده است. پس از آن در قسمت دوم، شاخص انعطاف‌پذیری سیستم قدرت معرفی گردیده است. در این بخش، ابتدا به‌منظور تعیین نقطه کار سیستم، توان خروجی واحدهای تولیدی با حل مسئله بهره‌برداری در حالت پایه، محاسبه می‌گردد. سپس مقدار شاخص‌های انعطاف‌پذیری موردنظر، بر اساس رویداد غیرمنتظره به وقوع پیوسته، محاسبه می‌شود. در نهایت قسمت آخر، ساختار مدل‌سازی مسئله FBSCUC^{V2G} را توصیف نموده است. در ادامه، توضیحات هر بخش به تفصیل شرح داده شده است.

۷-۱ مدل‌سازی امکانی-احتمالاتی خودروهای برقی با استفاده از روش Z-number

روش Z-number نمونه کامل‌تری نسبت به روش فازی است [۲۸]. در روش Z-number برای هر متغیر دو مجموعه فازی تعریف می‌گردد. یک مجموعه نشان‌دهنده مقدار متغیر و مجموعه دیگر احتمال آن متغیر را توصیف می‌کند. در نهایت مجموعه $Z=(A,B)$ تعریف می‌گردد که A مجموعه فازی مربوط به مقدار و B مجموعه مربوط به احتمال آن مقدار است. در ادامه به کاربرد این روش در مدل‌سازی عدم قطعیت خودروی برقی پرداخته شده است.

تعریف مجموعه Z-number برای خودروی برقی

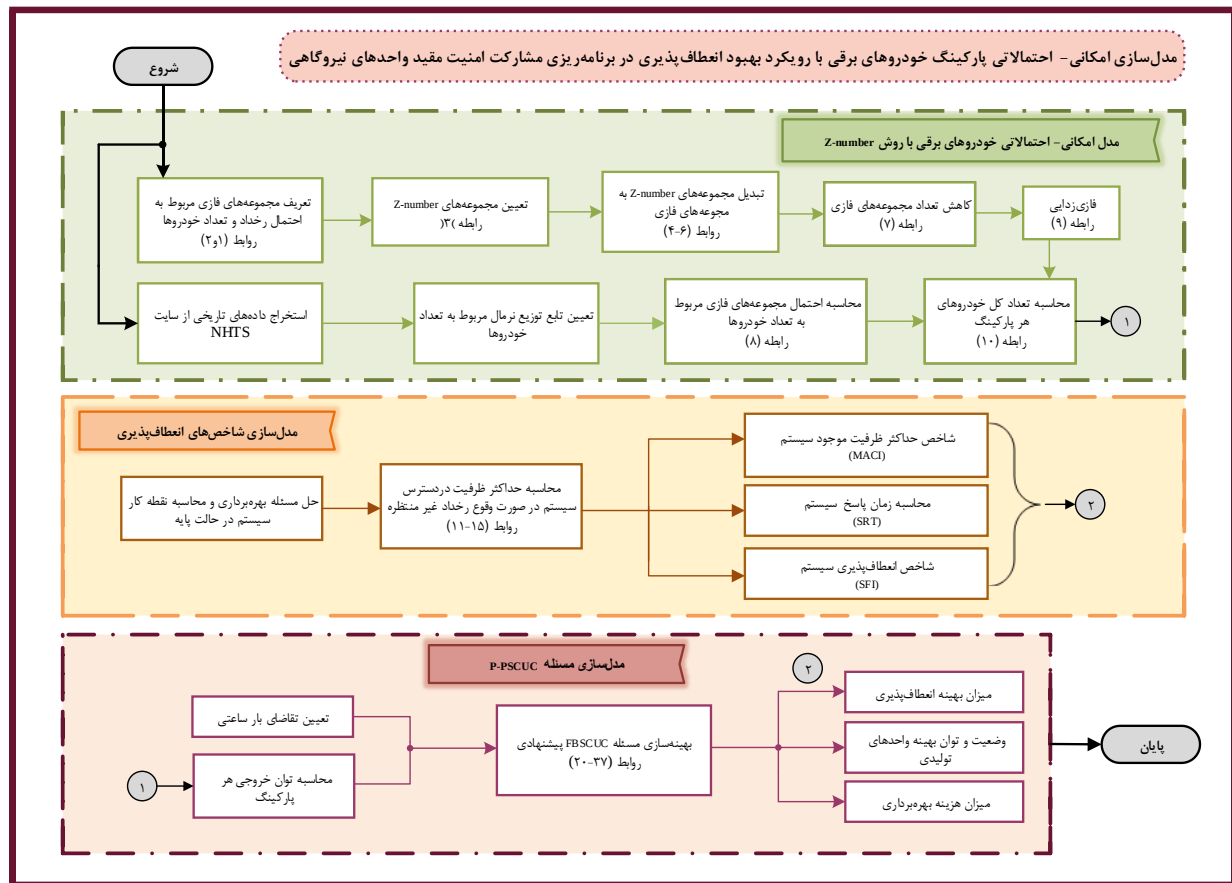
به‌منظور مدل‌سازی خودروی برقی توسط روش Z-number، ابتدا بایستی مجموعه‌های فازی مربوط به احتمالات رخداد و تعداد خودروهای موجود در پارکینگ با توجه به تعریفی که نسبت به هر مجموعه وجود دارد تعریف گردد [۱۴]. در همین راستا، برای تعداد خودروهای برقی سه مجموعه تحت عنوان کم، متوسط و زیاد تعریف می‌شود. رابطه (۱) محدوده این سه مجموعه را نشان می‌دهد و همچنین مجموعه فازی مربوط به احتمال رخداد به سه حالت غیرمطمئن، نسبتاً مطمئن و کاملاً مطمئن مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$A_{V2G}^{\gamma} = \begin{cases} \tilde{A}_1 = \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, & \forall \{\gamma = \text{low}, N_{V2G}^{\text{Min}} \leq \Gamma_1 < \Gamma_2 < \Gamma_3\} \\ \tilde{A}_2 = \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, & \forall \{\gamma = \text{medium}, \Gamma_2 < \Gamma_3 < \Gamma_4 < \Gamma_5\} \\ \tilde{A}_3 = \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, & \forall \{\gamma = \text{high}, \Gamma_4 < \Gamma_5 < \Gamma_6 \leq N_{V2G}^{\text{Max}}\} \end{cases} \quad (1)$$

$$R_{V2G}^{\beta} = \begin{cases} \tilde{R}_1 = \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, & \forall \{\gamma = \text{not sure}, 0 < \zeta_1 < \zeta_2 < \zeta_3\} \\ \tilde{R}_2 = \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, & \forall \{\gamma = \text{almost certainly}, \zeta_2 < \zeta_3 < \zeta_4 < \zeta_5\} \\ \tilde{R}_3 = \zeta_4, \zeta_5, \zeta_6, & \forall \{\gamma = \text{quite sure}, \zeta_4 < \zeta_5 < \zeta_6 < 1\} \end{cases} \quad (2)$$

پس از تعیین مجموعه‌های فازی مربوط به تعداد خودروهای موجود در پارکینگ و احتمال رخداد آن‌ها، مجموعه Z-number مطابق الگوی پیشنهادی در [۱۶] مشخص می‌گردد. در واقع به ازای هر مجموعه مربوط به تعداد خودرو و احتمال وقوع آن یک مجموعه Z-number مطابق رابطه (۳) تعریف می‌گردد.

$$\tilde{N}_{it}^{V2G,Z} = (\tilde{A}_{it}^{\gamma}, \tilde{R}_{it}^{\beta}) \quad (3)$$



شکل ۱- ساختار مدل پیشنهادی FBSCUC^{V2G}

۲-۷- معرفی شاخص انعطاف پذیری

به منظور ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، ابتدا می‌بایست نقطه کار سیستم مشخص گردد. به همین سبب، مسئله SCUC در حالت پایه حل می‌شود و سپس توان خروجی واحدهای تولیدی تحت عنوان نقطه کار تنظیمی بدست می‌آید. در واقع انعطاف‌پذیری سیستم با بررسی توانایی آن در خارج شدن از حالت تعادل و رسیدن به حداکثر توان خود با در نظر گرفتن شتاب و سرعت پاسخ رسیدن به این توان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۱۸]. از این‌رو، حداکثر انحراف ممکن از عملکرد عادی در صورت وقوع رویداد غیرمنتظره برای سیستم بایستی محاسبه گردد. فرمول محاسبه حداکثر ظرفیت موجود سیستم و محدودیت‌های آن در روابط (۱۱) - (۱۲) ارائه شده است:

$$\text{Max}_{(ut, p_{i,t}^a)} \left\{ \left| \text{TAC}(ut) \right| = \left| \sum_{i=1}^g \sum_{t=ut}^T C_{(i,t,ut)}^a \right| \right\} \quad \forall ut \quad (11)$$

$$C_{(i,t,ut)}^a = p_{(i,t+1,ut)}^a - p_{(i,t)}^* \quad \forall ut, i, t \quad (12)$$

$$C_{(i,t)}^a \leq RU_{(i)} \quad \forall i, t \quad (13)$$

$$p_{(i,t+1)}^a \leq p_{(i)}^{\max} \quad \forall i, t \quad (14)$$

$$p_{(i,t+1)}^a \leq \text{SU}_{(i)} \quad \text{if } y_{(i,t+1)}=1 \quad \forall i,t \quad (15)$$

$$OT_{(i,t+1)} \geq DT_{(i)} \quad \text{if } z_{(i,t+1)}=1 \quad \forall i,t \quad (16)$$

رابطه (۱۱) مسئله بهینه‌سازی، برای به حداکثر رساندن ظرفیت موجود است. روابط (۱۳) تا (۱۶) به ترتیب، نرخ شیب، محدودیت حداکثر تولید توان، محدودیت توان راه‌اندازی و حداقل زمان خاموش بودن می‌باشد. در مرحله بعد ظرفیت منابع مورد نظر در تأمین توان مورد نیاز سیستم مشخص می‌شود. بنابراین حداکثر ظرفیت موجود سیستم در صورت وقوع یک رویداد احتمالی به صورت (۱۷) محاسبه می‌گردد.

$$SMACI = \frac{1}{Tg} \sum_{ut=1}^{T-1} \frac{1}{T-ut} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^g \frac{C_{(i,t,ut)}^a}{p_{(i,t)}^*} \quad (17)$$

شاخص SMACI معرفی شده برای ارزیابی سطح انعطاف پذیری سیستم و زمان پاسخگویی واحدهای تولید کافی نیست و باید زمان رسیدن به حداکثر ظرفیت موجود را در نظر گرفت [۱۸]. بنابراین، شاخص SRT به صورت زیر محاسبه می شود:

$$SRT = \frac{1}{Tg} \sum_{ut=1}^{T-1} \sum_{i=1}^g t_{C_{(i,ut)}^*}^{-t(i,j,ut)} \quad (1\lambda)$$

در نهایت، شاخص نهایی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت مطابق (۱۹) تعریف می‌گردد. این شاخص نشان می‌دهد که، سیستمی انعطاف‌پذیرتر است که حداکثر ظرفیت ممکن را در زمان کمتری فراهم کند [۱۸].

$$SFI = \frac{1}{Tg} \sum_{ut=1}^{T-1} \frac{1}{T-ut} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^g \frac{C_{(i,t,ut)}^a}{P_{(i,t)}^* \times \left(t_{C_{(i,ut)}^*}^{-t_{(i,j,ut)}} \right)} \quad (19)$$

۷-۳- مدل سازی مسئله FBSCUC^{V2G}

هدف اصلی مسئله FBSCUC^{V2G}، تأمین بار شبکه با حداقل هزینه بهره‌برداری و حداکثر نمودن امنیت شبکه می‌باشد. از طرفی، به منظور ارزیابی تأثیر خودروهای برقی بر سطح انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، شاخص‌های انعطاف‌پذیری معرفی شده در بخش قبل به قیود مسئله SCUC اضافه می‌گردد. در واقع مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای نیروگاهی، با هدف حداکثرسازی امنیت و انعطاف‌پذیری شبکه به صورت توأمان حل می‌گردد. تابع هدف مدل پیشنهادی FBSCUC^{V2G} در رابطه (۲۰) ارائه گردیده است:

$$\text{Min Cf} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^g [FC(i,t) + Cst(i,t) + Csd(i,t)] + \sum_{v=1}^{Nv} [p_{(v,t)}^{dic} \rho_t^{dic} - p_{(v,t)}^{ch} \rho_t^{ch}] \right] \quad (20)$$

بر اساس رابطه (۲۰)، تابع هدف مسئله مورد مطالعه متشکل از هزینه بهره‌برداری واحدهای نیروگاهی و هزینه بهره‌برداری از پارکینگ خودروهای برقی می‌باشد. هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی از سه بخش شامل هزینه سوخت، هزینه راه‌اندازی و هزینه خاموش کردن می‌باشد، که در ادامه رابطه هر کدام شرح داده شده است. هزینه بهره‌برداری از پارکینگ خودروهای برقی نیز شامل هزینه شارژ و دشارژ خودروها می‌باشد. گفتنی است که در زمان شارژ خودروهای برقی به این دلیل که بهره‌بردار سیستم از مالکین خودرو هزینه دریافت می‌کند، این هزینه سود بهره‌بردار تلقی می‌گردد و لذا از هزینه کل کاسته می‌شود [۳۰].

هزینه بهره‌برداری واحدهای نیروگاهی سوخت فسیلی

تابع هزینه بهره‌برداری واحدها، بصورت یک تابع درجه دوم بیان می‌گردد. که در آن ضرایب مثبت هزینه سوخت می‌باشند [۱۰].

$$FC(i,t) = a_i (p(i,t))^2 + b_i (p(i,t)) + c_i \quad (21)$$

هزینه راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی

هزینه راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی از دو بازه زمانی تشکیل شده است. بدین صورت که در بازه زمانی نخست که مربوط به ساعات اولیه بهره‌برداری می‌باشد، وضعیت اولیه ژنراتورها به عنوان یک پارامتر ثابت (Ins_i) در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو حالت اولیه با حالت فعلی مقایسه می‌گردد و اگر ژنراتورها از حالت خاموش به روشن تغییر وضعیت داده باشند، مشمول هزینه راه‌اندازی می‌باشند. بازه زمانی دوم، به ساعتهای غیر از ساعت اولیه اشاره دارد [۳۰].

$$\begin{aligned} Cst(i,t) &= \rho_g^{st} (u(i,t) - Ins(i)) & \forall t = t1 \\ Cst(i,t) &= \rho_g^{st} (u(i,t) - u(i,t-1)) & \forall t > t1 \end{aligned} \quad (22)$$

هزینه خاموش کردن واحدهای نیروگاهی

هزینه خاموش کردن واحدها مشابه با هزینه راه‌اندازی تعریف می‌گردد [۳۰].

$$\begin{aligned} Csd(i,t) &= \rho_g^{sd} (Ins(i) - u(i,t)) & \forall t = t1 \\ Csd(i,t) &= \rho_g^{sd} (u(i,t-1) - u(i,t)) & \forall t > t1 \end{aligned} \quad (23)$$

هزینه بهره‌برداری پارکینگ خودروهای برقی

هزینه شارژ / دشارژ خودروهای برقی مطابق رابطه (۲۴) محاسبه می‌گردد [۳۱].

معمولاً قیمت لحظه‌ای^۷ یک روز آینده در بازار تنظیم مقررات برق^۸ اعلام می‌شود و بهره‌بردار پارکینگ خودروهای برقی می‌تواند برنامه شارژ/دشارژ خودروها را برای دستیابی به حداکثر سود تعیین کند [۳۲].

$$C_{V2G(v)} = \sum_{v=1}^{Nv} [p_{(v,t)}^{dic} \rho_t^{dic} - p_{(v,t)}^{ch} \rho_t^{ch}] \quad (24)$$

۷-۴- قیود مسئله FBSCUC^{V2G}

محدودیت تعادل توان

مطابق با رابطه (۲۵) به منظور پایداری و تعادل شبکه بایستی مجموع توان تولیدی در هر باس با مجموع توان مصرف شده در آن باس برابر باشد [۳۲].

$$\sum_{i=1}^g p(i,t) + \sum_{v=1}^{Nv} (p_{(v,t)}^{dic} - p_{(v,t)}^{ch}) = f(n,t) + load(n,t) \quad (25)$$

محدودیت ظرفیت خطوط انتقال

در هر بازه زمانی، انتقال توان تولیدی واحدها از طریق خطوط انتقال به دلیل حد ظرفیتی خطوط با محدودیت روبه‌رو می‌باشد و نباید از یک محدوده خاص تجاوز کند [۳۳]. رابطه (۲۶) بیان‌کننده توان عبوری و رابطه (۲۷) محدوده این توان را نشان می‌دهد.

$$f(n,t) = \beta_{nn'} (\theta_{n,t} - \theta_{n',t}) \quad \forall t, n \quad (26)$$

$$-I_{nn'}^{max} \leq \beta_{nn'} (\theta_{n,t} - \theta_{n',t}) \leq I_{nn'}^{max} \quad \forall t, n \quad (27)$$

- محدودیت حداقل زمان روشن/خاموش بودن واحدهای نیروگاهی
- رابطه (۲۸) حداقل زمان روشن بودن و رابطه (۲۹) حداقل زمان خاموش بودن واحدهای نیروگاهی را نشان می‌دهد [۳۲].

$$\begin{aligned} \min \left\{ T, (UT_i - U_i^0) u(i,t)=0 \right\} \\ \sum_{t=1}^{k+UT_i-1} 1 - u(i,t) = 0 \quad \forall t, i \\ \sum_{t=k}^{k+UT_i-1} u(i,t) \geq UT_i y(i,k) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \forall k = \min \left\{ T, (UT_i - U_i^0) u(i,t)=0 \right\} + 1 \dots T - UT_i + 1 \\ \sum_{t=k}^T u(i,t) - y(i,t) \geq 0 \\ \forall k = T - UT_i + 2 \dots T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min \left\{ T, (DT_i - S_i^0) [1 - u(i,t)=0] \right\} \\ \sum_{t=1}^{k+DT_i-1} u(i,t) = 0 \quad \forall t, i \\ \sum_{t=k}^{k+DT_i-1} 1 - u(i,t) \geq DT_i z(i,k) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \forall k = \min \left\{ T, (DT_i - S_i^0) [1 - u(i,t)=0] \right\} + 1 \dots T - DT_i + 1 \\ \sum_{t=k}^T 1 - u(i,t) - z(i,t) \geq 0 \\ \forall k = T - DT_i + 2 \dots T \end{aligned}$$

^۸ deregulated electricity market^۷ spot price

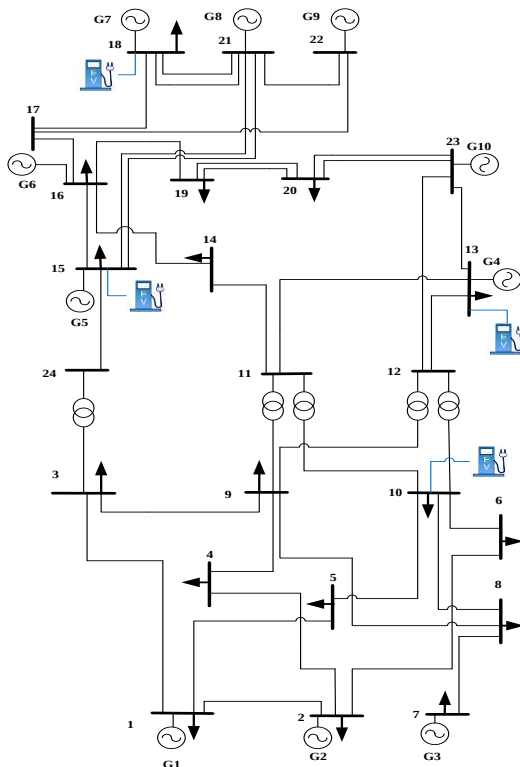
بنابراین سطح انعطاف‌پذیری سیستم مطابق رابطه (۴۰) محدود می‌شود. برای رسیدن به بالاترین سطح انعطاف‌پذیری با تکیه بر منابع انعطاف‌پذیر موجود در مسئله، انعطاف‌پذیری حالت پایه سیستم در مقدار ثابتی مانند α_r ضرب می‌شود [۲۵]. در واقع این پارامتر، درصد انعطاف‌پذیری موردانتظار بهره‌بردار سیستم قدرت را نشان می‌دهد.

$$SFI \geq (1 + \alpha_r) \cdot SFI_b \quad (40)$$

۸- مطالعات عددی

به‌منظور حل مسئله FBSCUC^{V2G} از حل‌کننده CPLEX نرم‌افزار GAMS، در مدل MILP استفاده شده است. در این مدل به جهت دستیابی به جواب بهینه، تابع هزینه واحدها که مدلی غیر خطی دارد با مدل تکه‌ای-خطی تقریب زده شده است. عدم قطعیت خودروهای برقی با روش Z-number در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است.

سیستم مورد مطالعه برای مطالعات بهره‌برداری و تحلیل نتایج در این مقاله، شبکه ۲۴ باس IEEE اصلاح شده می‌باشد. این شبکه با اضافه کردن ۴ عدد پارکینگ خودروی برقی بر روی باس‌های ۱۰، ۱۳، ۱۵، ۱۸ مطابق شکل ۲، اصلاح شده است. دلیل انتخاب باس‌های فوق برای جابجایی پارکینگ خودروهای برقی، قرار داشتن بیشترین بار روزانه بر روی این باس‌ها می‌باشد [۷]. تعداد خودروهای هر پارکینگ با استفاده از روش Z-number در هر ساعت بدست آمده است. همچنین، حداکثر تعداد خودروهای موجود در هر پارکینگ به ترتیب ۱۷۵۰۰، ۲۴۰۰۰، ۲۸۵۰۰ و ۳۰۰۰۰، در نظر گرفته شده است. ظرفیت باتری خودروهای برقی برابر با ۱۰ کیلووات ساعت فرض شده است، و بازده شارژ و دشارژ آن‌ها برابر با ۹۰ درصد می‌باشد. همچنین مدت زمان مورد نیاز برای شارژ کامل خودروهای برقی برابر با ۵ ساعت در نظر گرفته شده است. زمان ورود و خروج خودروهای هر پارکینگ مطابق جدول ۱ می‌باشد [۷].



شکل ۲- دیاگرام تک خطی شبکه ۲۴ باس IEEE اصلاح شده

محدودیت خروجی واحدهای نیروگاهی

توان خروجی هر واحد نیروگاهی در هر بازه زمانی بایستی در محدوده مجاز قابل تولیدش قرار داشته باشد. بنابراین محدودیت موردنظر در رابطه (۳۰) نشان داده شده است.

$$u_{(i,t)} p_i^{\min} \leq p_{(i,t)} \leq u_{(i,t)} p_i^{\max} \quad \forall t, i \quad (31)$$

محدودیت نرخ شیب

نرخ شیب افزایشی/کاهشی واحدها همانند هزینه راه‌اندازی شامل دو بازه زمانی می‌باشد، با این تفاوت که در بازه زمانی نخست وضعیت تولید ژنراتورها (Inp^g) به عنوان یک پارامتر ثابت ورودی در نظر گرفته می‌شود [۳۰].

$$p_{(i,t)} - Inp(i) \leq RU(i) \quad \forall t = t1 \quad (32)$$

$$p_{(i,t)} - p_{(i,t-1)} \leq RU(i) \quad \forall t > t1$$

$$Inp(i) - p_{(i,t)} \leq RD(i) \quad \forall t = t1 \quad (33)$$

$$p_{(i,t-1)} - p_{(i,t)} \leq RD(i) \quad \forall t > t1$$

محدودیت شارژ/دشارژ پارکینگ خودروهای برقی

پس از تعیین تعداد خودروهای هر پارکینگ توسط روش Z-number، توان شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی بصورت (۳۴) محدود می‌شود [۳۱].

$$0 \leq p_{(v,t)}^{ch} \leq \frac{C^{bat}}{k \eta^{ch}} u_{(v,t)}^{ch} N_{parking}^v \quad \forall v, t \in [T_v^d \dots T_v^a] \quad (34)$$

$$0 \leq p_{(v,t)}^{dis} \leq \frac{C^{bat}}{k} \eta^{dis} u_{(v,t)}^{dis} N_{parking}^v \quad \forall v, t \in [T_v^d \dots T_v^a]$$

حالت شارژ خودروهای هر پارکینگ

حالت شارژ هر پارکینگ خودروی برقی در هر ساعت بر اساس روابط زیر محاسبه می‌گردد. رابطه (۳۵) محدوده وضعیت شارژ پارکینگ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. این رابطه بیان می‌کند که، وضعیت شارژ پارکینگ در زمان ورود خودروها بایستی برابر با مقدار SOC ورود باشد و همچنین وضعیت شارژ پارکینگ در زمان خروج خودروها از پارکینگ بایستی بزرگتر یا مساوی مقدار SOC خروج باشد.

$$SOC(v,t) = SOC(v,t-1) + \frac{1}{N_{parking}^v C^{bat}} \left(\eta^{ch} p_{(v,t)}^{ch} - \frac{p_{(v,t)}^{dis}}{\eta^{dis}} \right) \quad (35)$$

$$0 \leq SOC(v,t) \leq 1 \quad \forall v, t \in [T_v^d \dots T_v^a]$$

$$SOC(v,t) \geq soc_v \quad \forall v, t = T_v^d \quad (36)$$

$$SOC(v,t) = soc_v \quad \forall v, t = T_v^a$$

محدودیت شارژ / دشارژ همزمان پارکینگ

در هر بازه زمانی خودروهای هر پارکینگ یا درحال شارژ هستند و یا در حال دشارژ شدن، که این مورد توسط معادله (۳۸) بیان می‌شود.

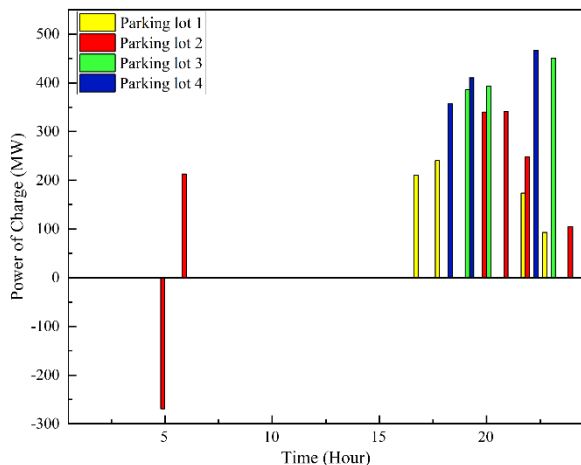
$$u_{(v,t)}^{ch} + u_{(v,t)}^{dis} \leq 1 \quad \forall v, t \quad (37)$$

$$u_{(v,t)}^{ch}, u_{(v,t)}^{dis} \in \{0,1\}$$

محدودیت انعطاف‌پذیری

در این مقاله به‌منظور بررسی سطح انعطاف‌پذیری، مسئله SCUC به شاخص انعطاف‌پذیری مقید می‌گردد.

که در شکل ۳ مشخص است، در این بازه زمانی هیچ خودرویی درون پارکینگ نمی‌باشد.



شکل ۳- شارژ/دشارژ پارکینگ خودروهای برقی در سناریو دوم

سناریوی سوم: به منظور دستیابی به سطوح بالای انعطاف‌پذیری سیستم قدرت و استفاده بهینه از پتانسیل خودروهای برقی در جهت پیشبرد این هدف، مسئله FBSCUC^{V2G} به شاخص انعطاف‌پذیری مقید گردیده است. در واقع بهره‌بردار سیستم ضریب α_r را متناسب با سیستم به طوری تعیین می‌نماید که سطح انعطاف‌پذیری سیستم نسبت به حالت پایه افزایش گردد. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج بدست آمده از سناریو سوم

SFI (pu/h ²)	SRT (h)	MACI (pu/h)	OC (\$)	
۰/۰۹۴	۴/۱۵۴	۰/۴۹۶	۴۲۷۵۳۹	نتایج سناریوی سوم
۹/۳	-۳/۲۶	۲۲/۷۶	-۱/۹۵	درصد تغییرات نسبت به سناریوی اول
۵۶/۶	۱۲/۹	۲۸/۵	۰/۵۲	درصد تغییرات نسبت به سناریوی دوم

از نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که در این سناریو خودروهای برقی نه تنها هزینه بهره‌برداری را نسبت به حالت پایه کاهش داده‌اند بلکه در کنار آن انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را با هزینه‌ای معقول افزایش داده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هزینه بهره‌برداری نسبت به سناریوی دوم افزایش ۰/۵۲ درصدی داشته است که این افزایش هزینه به دلیل تغییر ماهیت مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. قابل ذکر است که خودروهای برقی به‌طور غیرمستقیم بر روی انعطاف‌پذیری سیستم تأثیر می‌گذارند، در واقع خودروهای برقی با آزادسازی ظرفیت موجود، انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را بهبود می‌دهند.

شکل ۴ نتایج شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی و تغییرات منحنی بار حاصل از سناریوی سوم را نشان می‌دهد. در این سناریو شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی در بعضی ساعات نسبت به سناریوی قبل تغییرات محسوسی داشته است، که این تغییرات به جهت آزادسازی ظرفیت بیشتر واحدهای نیروگاهی می‌باشد تا سیستم قدرت به سطح انعطاف‌پذیری مطلوب

جدول ۱- زمان ورود/خروج و SOC متناظر هر پارکینگ خودروهای

پارکینگ	ساعت ورود	ساعت خروج	SOC ورود	SOC خروج
۱	۱۷	۷	۰/۲	۱
۲	۲۰	۸	۰/۲	۱
۳	۱۹	۶	۰/۲	۱
۴	۱۸	۷	۰/۲	۱

به‌منظور تحلیل نتایج و بررسی اثربخش بودن مسئله FBSCUC^{V2G} در بازه زمانی ۲۴ ساعته مدل‌سازی شده و سناریوهای مختلفی به شرح زیر بررسی شده است:

سناریوی اول: در این سناریو، مسئله FBSCUC^{V2G} بدون در نظر گرفتن حضور خودروهای برقی حل شده است و انعطاف‌پذیری سیستم قدرت مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌طوری که انعطاف‌پذیری سیستم قدرت در حالت عملکرد عادی، ۰/۰۸۶ می‌باشد و هزینه بهره‌برداری از سیستم قدرت، ۴۳۶۰۳۱ دلار می‌باشد.

جدول ۲- نتایج بدست آمده از سناریو اول

SFI (pu/h ²)	SRT (h)	MACI (pu/h)	OC (\$)
۰/۰۸۶	۳/۶۸	۰/۴۰۴	۴۳۶۰۳۱

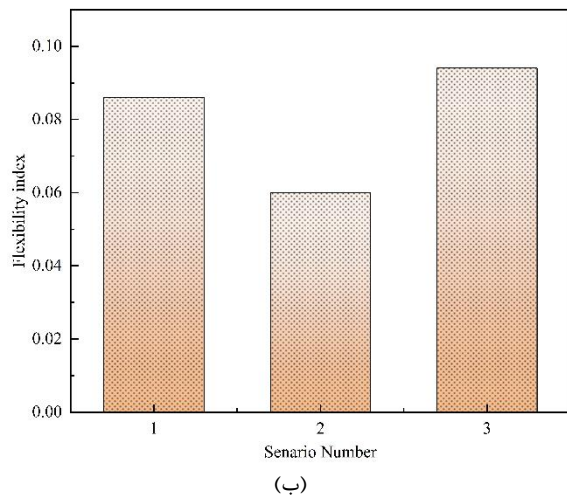
سناریوی دوم: در این سناریو با اضافه شدن خودروهای برقی به مسئله FBSCUC^{V2G} تأثیر آن بر شاخص‌های انعطاف‌پذیری و هزینه بهره‌برداری دیده شده است. همچنین مطابق جدول ۳ نتایج این سناریو با سناریوی اول که حالت پایه می‌باشد، مقایسه شده است.

همان‌طور که نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد، خودروهای برقی به دلیل عدم قطعیت و تغییرپذیری بالایی که دارند انعطاف‌پذیری سیستم را در کنار بهبود هزینه بهره‌برداری، کاهش می‌دهند و این در حالی است که، نیاز به انعطاف‌پذیری در حضور منابع دارای عدم قطعیت بیشتر از حالت پایه می‌باشد. بنابراین، خودروهای برقی برای اینکه بتوانند تأثیر مثبتی بر پارامترها و عملکرد سیستم قدرت داشته باشند، بایستی با برنامه‌ریزی کارآمد و بهینه وارد سیستم قدرت شوند.

جدول ۳- نتایج بدست آمده از سناریو دوم

SFI (pu/h ²)	SRT (h)	MACI (pu/h)	OC (\$)	
۰/۰۶	۴/۲۹۳	۰/۳۸۶	۴۲۵۳۲۷	نتایج سناریوی دوم
-۳۰/۲	۱۶/۶	-۴/۴۵	-۲/۴۵	درصد تغییرات نسبت به سناریوی اول

شکل ۳ منحنی شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی در سناریوی دوم را نشان می‌دهد. مقادیر منفی نشان‌دهنده شارژ پارکینگ و مقادیر مثبت دشارژ پارکینگ خودروهای برقی را توصیف می‌کند. پارکینگ خودروهای برقی در بازه ۷ تا ۱۷ هیچ توانی با شبکه مبادله نکرده‌اند، زیرا مطابق با جدول ۱ و همان‌گونه



شکل ۵- مقایسه نتایج سناریوهای انجام شده: الف) هزینه بهره‌برداری و ب) شاخص انعطاف‌پذیری سیستم قدرت

قسمت (ب) این شکل تغییرات منحنی بار روزانه را در حضور خودروهای برقی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، در ساعت ۱۹ پارکینگ‌های شماره ۳ و ۴ با مشارکت در تولید توان، سهم قابل توجهی در کاهش پیک بار روزانه داشته‌اند. بنابراین، حضور هدفمند خودروهای برقی در شبکه قدرت علاوه بر اینکه انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را بهبود داده است، پیک بار را نیز کاهش داده است.

با مقایسه و تحلیل سه سناریوی نمایش داده شده در شکل ۵، نتیجه می‌شود که اگر خودروهای برقی بطور هدف‌دار و با رویکردی بهینه به شبکه متصل شوند علاوه بر اینکه هزینه بهره‌برداری شبکه را کاهش می‌دهند، انعطاف‌پذیری سیستم را نیز تا حد مورد انتظاری بهبود می‌بخشند.

۸-۱- آنالیز حساسیت و بررسی نتایج مسئله

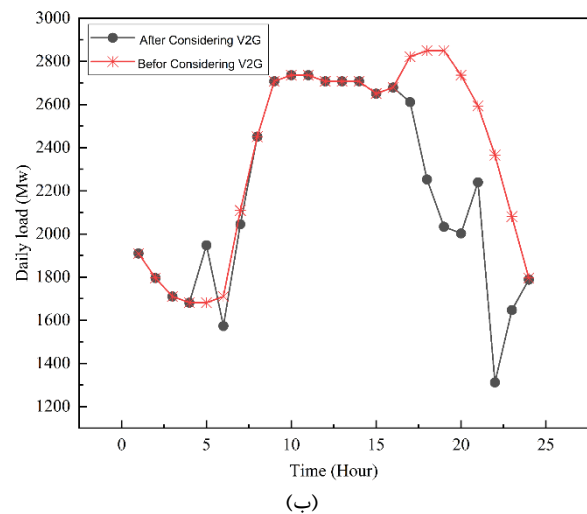
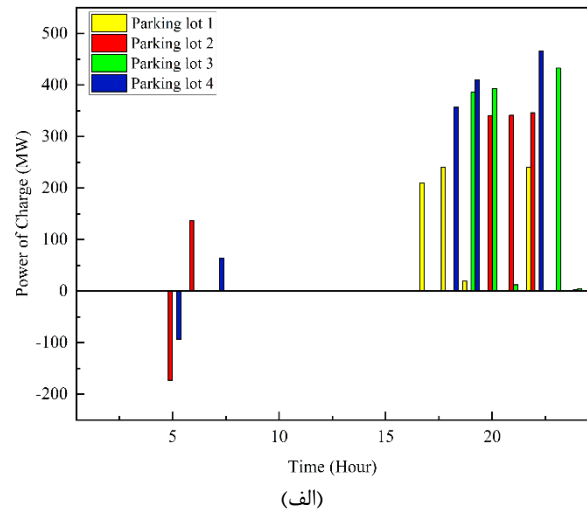
مطالعه اول: آنالیز حساسیت به ظرفیت پارکینگ‌ها

همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، تأثیر پارکینگ خودروهای برقی بر انعطاف‌پذیری سیستم قدرت بصورت غیرمستقیم می‌باشد. به‌طوری که، خودروهای برقی در هنگام نیاز سیستم قدرت به انعطاف‌پذیری بالا، با دشارژ شدن به آزادسازی ظرفیت در دسترس سیستم قدرت کمک می‌کنند. بنابراین همان‌گونه که در روابط (۱۱) تا (۱۹) مشهود است، در دسترس بودن ظرفیت آزاد بیشتر، منجر به افزایش شاخص SFI می‌گردد. از این‌رو، به‌منظور اثبات این موضوع، حداکثر تعداد خودروهای موجود در هر پارکینگ به ترتیب ۴۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است، که در ادامه تأثیر آن بر روی نتایج مسئله نشان داده شده است.

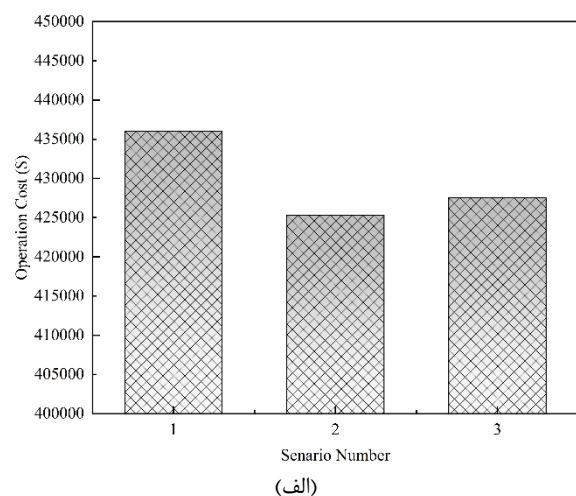
جدول ۵- نتایج آنالیز حساسیت به ظرفیت پارکینگ‌ها

SFI (pu/h ²)	SRT (h)	MACI (pu/h)	OC (\$)
۰/۰۹۴	۴/۰۸۲	۰/۴۱۸	۴۳۵۵۴۷

دست یابد.



شکل ۴- نتایج حاصل از سناریو سوم: الف) شارژ/دشارژ پارکینگ خودروهای برقی و ب) تغییرات منحنی بار روزانه

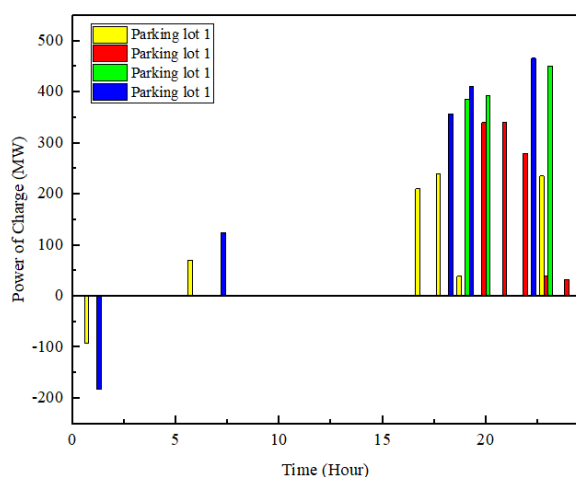


برقی حل شده و شاخص‌های انعطاف‌پذیری سیستم ارزیابی شده است. سپس مسئله در حضور خودروهای برقی حل شده است و تأثیر عدم قطعیت آن‌ها بر انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، نشان داده شده است. در آخر مسئله FBSCUC^{V2G} بصورت انعطاف‌پذیر محور حل شده است و اثربخشی آن در حضور تغییر الگوی مصرف نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج بدست آمده از مطالعه دوم

SFI (pu/h ²)	SRT (h)	MACI (pu/h)	OC (\$)	
۰/۱۵۲	۴/۱۵۴	۰/۴۹۶	۵۱۸۶۰۷	SCUC
۰/۱۳۱	۵/۶۹۴	۰/۵۹۳	۵۰۸۴۳۹	SCUC-V2G
۰/۱۶۴	۷/۲۳۸	۰/۶۴۲	۵۱۷۵۰۷	FBSCUC ^{V2G}

همان‌طور که نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد، در این حالت نیز، عدم قطعیت خودروهای برقی در کنار کاهش قابل توجه هزینه بهره‌برداری، منجر به کاهش شاخص انعطاف‌پذیری سیستم قدرت شده است. در مرحله بعد با حل مسئله بصورت انعطاف‌پذیر محور، شاخص انعطاف‌پذیری نسبت به دوحالت قبل افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است و همچنین این مقدار انعطاف‌پذیری با صرف هزینه‌ای مطلوب بدست آمده است. از طرفی به دلیل تغییر الگوی مصرف، مقدار انعطاف‌پذیری سیستم در این حالت نسبت به سناریو سوم افزایش یافته است. از این‌رو، به‌منظور تأمین تقاضای بار کل شبکه، واحدهای حرارتی بیشتر و گران‌تری به مدار آمده است، که همین موضوع افزایش هزینه بهره‌برداری را در پی داشته است. از سوی دیگر به مدار آمدن واحدهای سریع پاسخ، ظرفیت آزاد بیشتری را در اختیار سیستم قرار می‌دهد؛ که این نیز، باعث افزایش شاخص انعطاف‌پذیری سیستم قدرت می‌گردد. شکل ۸، شارژ و دشارژ پارکینگ‌ها در این حالت را نشان می‌دهد.

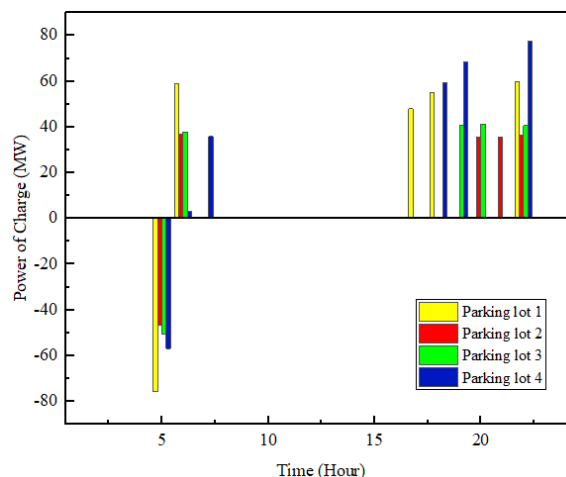


شکل ۸- شارژ/دشارژ پارکینگ خودروهای برقی در مطالعه دوم

مطالعه سوم: آنالیز حساسیت به تغییرات قیمت برق

به‌منظور تحلیل و بررسی حساسیت روش ارائه‌شده به تغییرات قیمت برق، منحنی قیمت لحظه‌ای مطابق با شکل ۹، برای هزینه شارژ و دشارژ خودروهای برقی در نظر گرفته شده است [۳۴]. آنالیز حساسیت انجام‌شده به این صورت است که، ابتدا مسئله FBSCUC^{V2G} با در نظر گرفتن منحنی قیمت لحظه‌ای حل شده است. سپس با اعمال ضرایب تغییرات در منحنی قیمت لحظه‌ای، رفتار

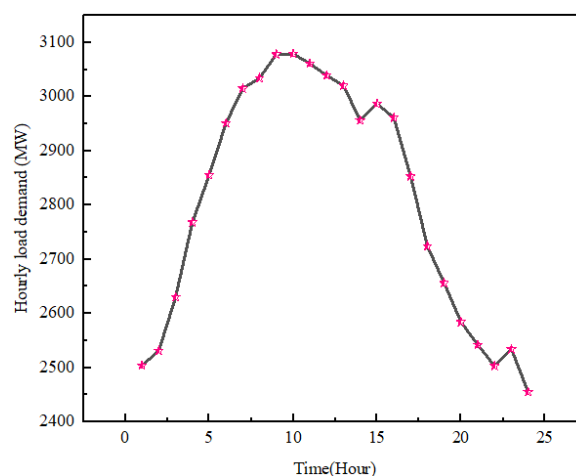
با توجه به نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود که علی‌رغم کاهش ظرفیت پارکینگ خودروهای برقی، انعطاف‌پذیری سیستم قدرت همانند سناریو سوم بخش قبل در مقدار ۰/۰۹۴ ثابت مانده است و این موضوع به این دلیل است که مسئله پیشنهادی به شاخص انعطاف‌پذیری مقید گردیده است و بهره‌بردار سیستم قدرت با تنظیم ضریب α_i در رابطه (۳۷)، آستانه انعطاف‌پذیری سیستم را تعیین می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، با کاهش تعداد خودروهای موجود در پارکینگ، ظرفیت شارژ و دشارژ آن نیز کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به علت کاهش ظرفیت پارکینگ‌ها، حداکثر ظرفیت در دسترس سیستم به مقدار ۰/۴۱۸ کاهش پیدا کرده است. هزینه بهره‌برداری در این حالت ۴۳۵۵۴۷ دلار به‌دست آمده است.



شکل ۶- شارژ/دشارژ پارکینگ خودروهای برقی در مطالعه اول

مطالعه دوم: آنالیز حساسیت به تغییرات الگوی مصرف

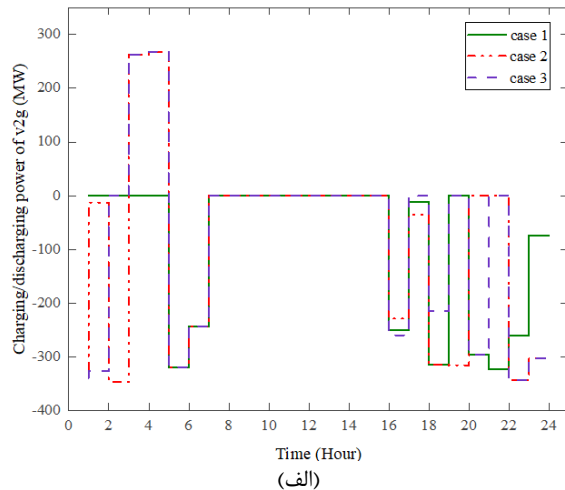
عامل دیگری که می‌تواند میزان انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را تحت تأثیر قرار دهد، تغییرات الگوی مصرف می‌باشد. در واقع تغییر در میزان بار شبکه، بر روی میزان توان تولیدی واحدهای حرارتی و ظرفیت شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی تأثیرگذار می‌باشد. از این‌رو به منظور بررسی اثر تغییرات بار شبکه بر روی شاخص‌های انعطاف‌پذیری، مسئله FBSCUC^{V2G} با در نظر گرفتن منحنی بار ساعتی مرجع [۱۸] مطابق با شکل ۷، حل شده است و نتایج آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۷- منحنی بار ساعتی در مطالعه دوم

در ابتدا مسئله SCUC در حالت پایه و بدون در نظر گرفتن خودروهای

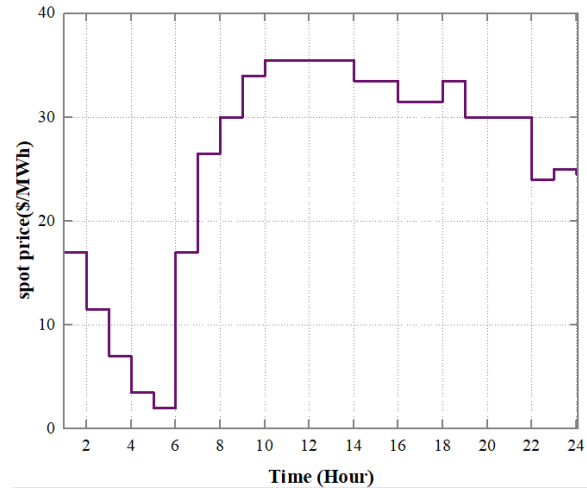
در شکل ۱۰، رفتار پارکینگ خودروهای برقی نسبت به تغییرات قیمت برق نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، هر چهار پارکینگ خودروهای برقی بین ساعت ۳ تا ۵ دشارژ شده‌اند، زیرا در این بازه زمانی قیمت لحظه‌ای انرژی در کمترین مقدار ممکن می‌باشد. در شرایطی دیگر، پارکینگ‌های شماره ۱ و ۲ با افزایش ۲۰ درصدی قیمت انرژی در ساعت ۲، شارژ شده‌اند. این درحالی است که در همین ساعت، در حالت‌های ۱ و ۳ هیچ تبادل توانی با شبکه رخ نداده است. به‌طور مشابه، پارکینگ شماره ۳ در ساعت ۳ با افزایش قیمت لحظه‌ای انرژی، توان شارژ دریافتی خود را از ۲۳۵ مگاوات به ۵۶۰ مگاوات افزایش داده است. از سوی دیگر، با کاهش ۲۰ درصدی قیمت انرژی، این‌بار همانند یک منبع تولید توان عمل کرده است و به شبکه توان الکتریکی تزریق نمود است.



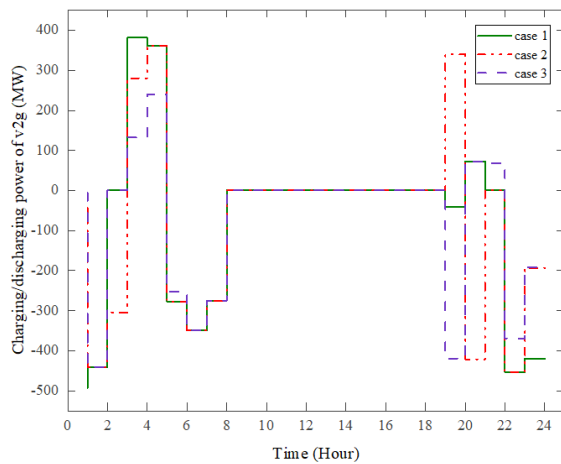
شکل ۹- قیمت لحظه‌ای انرژی

پارکینگ خودروهای برقی و تأثیر آن بر شاخص‌های انعطاف‌پذیری بررسی شده است.

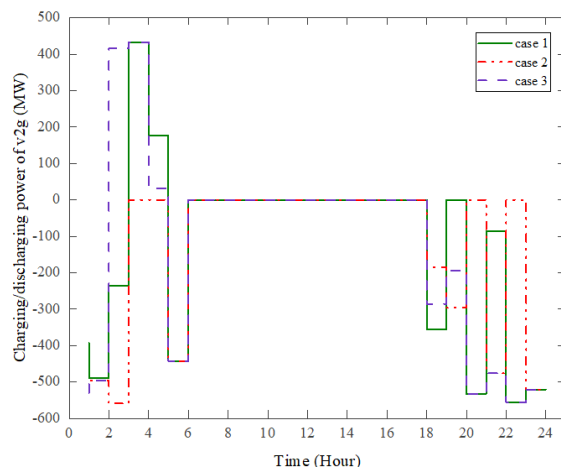
- ✓ حالت ۱: بدون تغییرات قیمت.
- ✓ حالت ۲: افزایش ۲۰ درصدی قیمت لحظه‌ای در هر ساعت.
- ✓ حالت ۳: کاهش ۲۰ درصدی قیمت لحظه‌ای در هر ساعت.



(الف)



(ب)



(ج)

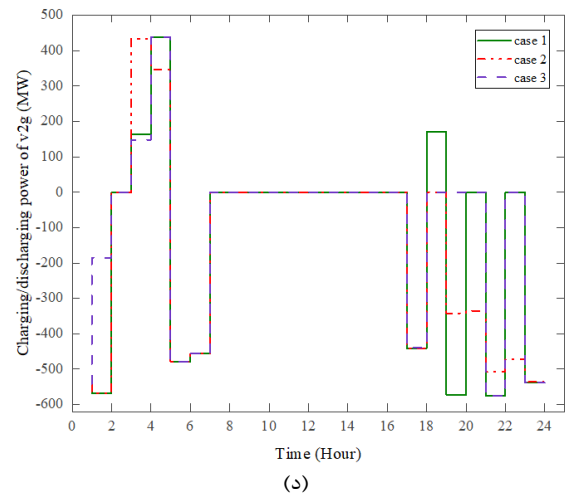
همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن قیمت لحظه‌ای بازار برق، هزینه بهره‌برداری نسبت به مطالعات قبلی کاهش قابل توجهی داشته است. علاوه بر این، مقدار انعطاف‌پذیری سیستم به شکل مطلوبی افزایش داشته است. می‌توان گفت که به دلیل بالا بودن قیمت انرژی در بعضی از ساعات، خودروهای برقی بجای دشارژ شدن و تزریق توان به شبکه، شارژ شده‌اند و از شبکه توان الکتریکی دریافت کرده‌اند. از این‌رو، بهره‌بردار شبکه با تحویل توان به پارکینگ خودروهای برقی، هزینه دریافت نموده است که این مبلغ از کل هزینه بهره‌برداری کاسته شده است. از طرفی با شارژ شدن خودروهای برقی، تقاضای بار افزایش پیدا کرده است، بنابراین واحدهای بیشتری به‌منظور پاسخ‌گویی به تقاضای ایجادشده، به مدار آمده است. به مدار آمدن واحدهای سریع پاسخ بیشتر، موجب افزایش ظرفیت آزاد سیستم و در پی آن افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت شده است.

در حالت ۲، با افزایش ۲۰ درصدی قیمت لحظه‌ای انرژی، هزینه بهره‌برداری و شاخص‌های انعطاف‌پذیری نسبت به حالت ۱، بهبود یافته است. اما در حالت ۳، با کاهش ۲۰ درصدی قیمت لحظه‌ای، هزینه بهره‌برداری افزایش و انعطاف‌پذیری سیستم قدرت کاهش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که، افزایش قیمت انرژی در هر ساعت، به سود بهره‌بردار سیستم قدرت تمام شده است. به‌طوری که با کمترین هزینه بهره‌برداری، به بیشترین میزان انعطاف‌پذیری دست یافته است. و بالعکس، کاهش قیمت لحظه‌ای انرژی به ضرر بهره‌بردار سیستم تمام شده است.

جدول ۷- نتایج بدست آمده از مطالعه سوم

SFI (pu/h ²)	SRT (h)	MACI (pu/h)	OC (\$)	
۰/۱۵۳	۶/۸۰۲	۰/۵۲۷	۲۶۱۳۸۶	حالت ۱
۰/۱۵۹	۷/۰۷۶	۰/۵۶۸	۲۰۶۲۰۰	حالت ۲
۰/۱۴۸	۶/۶۱۲	۰/۵۱۶	۳۱۴۹۱۵	حالت ۳

t	اندیس زمان؛
T	بازه زمانی کلی؛ (h)
ut	زمان نیاز به حداکثر ظرفیت؛ (h)
v	اندیس پارکینگ خودروهای برقی؛
پارامترها	
a_i, b_i, c_i	ضرایب وزنی تابع هزینه تولید؛
C^{bat}	ظرفیت باتری خودروهای برقی؛ (KW)
Ins_i	حالت اولیه واحدهای نیروگاهی؛
I_{nn}^{max}	حداکثر ظرفیت خطوط انتقال؛ (MW)
k	مدت زمان موردنیاز برای شارژ کامل باتری هر خودرو؛
$P_i^{min/max}$	محدوده حداکثر و حداقل ظرفیت تولید؛ (MW)
RDR_i	شیب کاهش توان واحد حرارتی i ام؛ (MW/h)
RUR_i	شیب افزایش توان واحد حرارتی i ام؛ (MW/h)
SU_i	شیب افزایشی در هنگام روشن شدن واحدهای تولیدی؛
SFI_b	شاخص انعطاف‌پذیری حالت پایه سیستم؛ (pu/h ²)
$s\overline{oc}_v$	حالت شارژ مطلوب پارکینگ v ام در زمان خروج خودروها
$s\overline{oc}_v$	حالت شارژ خودروهای پارکینگ v ام در زمان ورود به پارکینگ؛
T_v^a	ساعت ورود خودروهای پارکینگ v ام؛ (h)
T_v^d	ساعت خروج خودروها از پارکینگ v ام؛ (h)
UT_i, DT_i	حداکثر زمان روشن و خاموش بودن واحد حرارتی i ام (h)
$\tilde{A}_{j,t}^{\gamma}$	ترم فازی γ برای تعداد خودرو مجموعه Z-Number؛
$\tilde{R}_{j,t}^{\theta}$	ترم فازی θ برای احتمال مجموعه Z-Number؛
$\tilde{N}_{j,t}^{V2G,Z}$	مجموعه Z-Number مربوط به تعداد خودروها؛
$\tilde{NT}_j^{V2G}$	اجتماع $\tilde{N}_{i,t}^{V2G}$ های دارای مؤلفه احتمالاتی یکسان؛
$\tilde{N}_{i,t}^{V2G}$	حالت فازی منظم از $\tilde{N}_{j,t}^{V2G,Z}$ ؛
$\tilde{N}_{i,t}^{V2G}$	حالت فازی نامنظم از $\tilde{N}_{j,t}^{V2G,Z}$ ؛
$\tilde{A}_{i,t}^{V2G}$	مؤلفه اول مجموعه $\tilde{N}_{j,t}^{V2G,Z}$ ؛
pr	متغیر احتمال؛
λ	ضریب وزنی؛
μ	تابع عضویت؛
ρ_g^{st}	هزینه ثابت راهاندازی واحدهای نیروگاهی؛ (\$)
ρ_g^{st}	هزینه ثابت خاموش کردن واحدهای نیروگاهی؛ (\$)
ρ_t^{ch}	هزینه ساعتی شارژ خودروی برقی؛ (\$)
ρ_t^{dch}	هزینه ساعتی دشارژ خودروی برقی؛ (\$)
η^{ch}	بازده شارژ خودروهای برقی؛
η^{dch}	بازده دشارژ خودروهای برقی؛



شکل ۱۰- شارژ/دشارژ پارکینگ خودروهای برقی: الف) پارکینگ ۱، ب) پارکینگ ۲، ج) پارکینگ ۳ و د) پارکینگ ۴

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی مشارکت امنیید مقید واحدهای نیروگاهی در حضور مدل‌سازی امکانی- احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی با رویکرد بهبود انعطاف‌پذیری، تحت عنوان $FBSCUC^{V2G}$ ارائه گردیده است. خودروهای برقی به عنوان یکی از منابع منعطف سمت تقاضا، پتانسیل قابل توجهی را در جهت بهبود انعطاف‌پذیری ارائه می‌دهند. لذا در این مقاله، خودروهای برقی به عنوان منبع تقویت‌کننده انعطاف‌پذیری در نظر گرفته شده‌اند. عدم قطعیت خودروهای برقی توسط روش Z-number مدل گردیده است. از طرفی ماهیت تغییرپذیر و نایقین خودروهای برقی می‌تواند ارزش انعطاف‌پذیری را کاهش دهد، بنابراین با اضافه نمودن شاخص‌های انعطاف‌پذیری معرفی شده به محدودیت‌های مسئله، عدم قطعیت‌های موجود در مسئله پوشش داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله $FBSCUC^{V2G}$ در یک شبکه ۲۴ باس IEEE اصلاح شده، نشان می‌دهد که حضور کنترل شده خودروهای برقی در شبکه قدرت، بهبود انعطاف‌پذیری با معقول‌ترین هزینه بهره‌برداری را به دنبال دارد. از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که حضور غیرهدفمند خودروهای برقی در سیستم قدرت، انعطاف‌پذیری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، آنالیز حساسیت روش پیشنهادی به ظرفیت پارکینگ‌ها، تغییرات الگوی مصرف و تغییرات قیمت لحظه‌ای انرژی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، اثربخشی روش پیشنهادی را نشان داده است.

مطالعات عدم قطعیت در ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از این‌رو، مطالعه سایر عدم قطعیت‌های موجود در سیستم قدرت و بررسی تأثیر خودروهای برقی در پوشش این عدم قطعیت‌ها، به عنوان کارهای آتی پیشنهاد شده است.

فهرست علائم

اندیس‌ها

g	تعداد کل واحدهای حرارتی؛
i	اندیس واحدهای حرارتی؛
n	اندیس باس‌های شبکه؛
N_{PT}	تعداد مجموعه‌های اجتماع شده؛
N_{PTC}	تعداد مجموعه‌های اشتراک شده؛

- [5] M. Rahmani, S. Hossein Hosseini, and M. Abedi, "Optimal integration of Demand Response Programs and electric vehicles into the SCUC," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 26, p. 100414, 2021.
- [6] C. Fernandes, P. Frías, and J. M. Latorre, "Impact of vehicle-to-grid on power system operation costs: The Spanish case study," *Appl. Energy*, vol. 96, pp. 194–202, 2012.
- [7] M. E. Khodayar, L. Wu, and M. Shahidehpour, "Hourly coordination of electric vehicle operation and volatile wind power generation in SCUC," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1271–1279, 2012.
- [۸] مهدی تورانی، محمدرضا آقاابراهیمی، حمیدرضا نجفی، «برنامه‌ریزی محدوده پارکینگ خودروهای برقی و شارژ و دشارژ آنها به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان در شبکه هوشمند»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۴۲۲–۴۱۳، تابستان ۱۳۹۶.
- [9] A. Ahmadi, A. Esmaeel Nezhad, P. Siano, B. Hredzak, and S. Saha, "Information-Gap Decision Theory for Robust Security-Constrained Unit Commitment of Joint Renewable Energy and Gridable Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, no. 5, pp. 3064–3075, 2020.
- [10] O. Egbue, C. Uko, A. Aldubaisi, and E. Santi, "A unit commitment model for optimal vehicle-to-grid operation in a power system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 141, no. February, p. 108094, 2022.
- [11] M. Casini, A. Vicino, and G. G. Zanvetto, "A receding horizon approach to peak power minimization for EV charging stations in the presence of uncertainty," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. PA, p. 106567, 2021.
- [12] S. F. Hajeforosh, H. Bakhtiari, and M. Bollen, "Risk assessment criteria for utilizing dynamic line rating in presence of electric vehicles uncertainty," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 212, no. July, p. 108643, 2022.
- [13] N. Eghbali, S. Mehdi, A. Hasankhani, and G. Derakhshan, "A scenario-based stochastic model for day-ahead energy management of a multi-carrier microgrid considering uncertainty of electric vehicles," *J. Energy Storage*, vol. 52, no. PB, p. 104843, 2022.
- [14] A. Soroudi and T. Amraee, "Decision making under uncertainty in energy systems: State of the art," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 376–384, 2013.
- [15] M. Mohammadnejad, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Possibilistic-probabilistic self-scheduling of PEVAggregator for participation in spinning reserve market considering uncertain DRPs," *Energy*, vol. 196, p. 117108, 2020.
- [16] A. Nasri, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. Hadi Amini, "Probabilistic-possibilistic model for a parking lot in the smart distribution network expansion planning," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 13, pp. 3363–3374, 2018.
- [17] L. Mokgonyana, K. Smith, and S. Galloway, "Reconfigurable Low Voltage Direct Current Charging Networks for Plug-in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018.
- [18] S. Poorvaezi Roukerd, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Probabilistic-possibilistic flexibility-based unit commitment with uncertain negawatt demand response resources considering Z-number method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, no. May, pp. 71–89, 2019.
- [19] Z. Guo, Y. Zheng, and G. Li, "Power system flexibility quantitative evaluation based on improved universal generating function method: A case study of Zhangjiakou," *Energy*, vol. 205, p. 117963, 2020.
- [20] M. I. Alizadeh, M. Parsa Moghaddam, N. Amjadi, P. Siano, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Flexibility in future power systems with high renewable penetration: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1186–1193, 2016.
- [21] M. Cañigual and J. Meléndez, "Flexibility management of electric vehicles based on user profiles: The Arnhem case study," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 133, no. May, 2021.
- [22] K. Rauma, A. Funke, T. Simolin, P. Järventausta, and C. Rehtanz, "Electric Vehicles as a Flexibility Provider: Optimal Charging Schedules to Improve the Quality of Charging Service," *Electricity*, vol. 2, no. 3, pp. 225–243, 2021.

درصد بحرانی SFI_b مورد استفاده در آستانه انعطاف‌پذیری سیستم؛

β_{nn} سوسپتانس خطوط انتقال؛

متغیرها

$C_{(i,t)}^a$ ظرفیت در دسترس برای هر واحد در زمان مشخص؛

$Cst_{(i,t)}$ هزینه راه‌اندازی واحد حرارتی i ام در زمان t (\$)؛

$Csh_{(i,t)}$ هزینه خاموش کردن واحد حرارتی i ام در زمان t (\$)؛

$FC_{(i,t)}$ هزینه بهره‌برداری واحد حرارتی i ام (\$)؛

$f_{(n,t)}$ توان عبوری از خطوط انتقال (MW)؛

$OT_{(i,t)}$ مدت زمان خاموش بودن واحد حرارتی i ام (h)؛

$p_{(i,t)}^a$ توان در دسترس تولیدی برای هر واحد (MW)؛

$p_{(i,t)}^*$ نقطه کار اولیه واحدهای تولیدی (MW)؛

$p_{(v,t)}^{ch}$ توان شارژ پارکینگ خودروی برقی (MW)؛

$p_{(v,t)}^{dch}$ توان دشارژ پارکینگ خودروی برقی (MW)؛

$SOC_{(v,t)}$ حالت شارژ پارکینگ v ام در زمان t ؛

$SMACI$ شاخص حداکثر ظرفیت در دسترس سیستم (pu)؛

SFI شاخص انعطاف‌پذیری سیستم (pu/h)؛

SRT زمان پاسخ سیستم به حداکثر ظرفیت (h)؛

TAC حداکثر ظرفیت آزاد سیستم (MW)؛

$t_{c(i,ut)}$ زمان رسیدن به حداکثر ظرفیت در دسترس (h)؛

$t_{(i,j,ut)}$ زمان وقوع رویداد غیرمنتظره؛

$u_{(i,t)}$ وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها؛

$y_{(i,t)}$ وضعیت روشن شدن واحد؛

$z_{(i,t)}$ وضعیت خاموش شدن واحد؛

$u_{(v,t)}^{ch}$ متغیر باینری نمایانگر حالت شارژ پارکینگ خودروی برقی؛

$u_{(v,t)}^{dch}$ متغیر باینری نمایانگر حالت دشارژ پارکینگ خودروی برقی؛

$\theta_{(n,t)}$ زاویه ولتاژ باس‌ها؛

مراجع

- [1] K. Sundar, H. Nagarajan, L. Roald, S. Misra, R. Bent, and D. Bienstock, "Chance-constrained unit commitment with N-1 security and wind uncertainty," *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 1062–1074, 2019.
- [2] C. Zhang and L. Yang, "Distributed AC security-constrained unit commitment for multi-area interconnected power systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 211, no. April, p. 108197, 2022.
- [۳] جمشید آقایی، سیداحسان باقری، سجاد شفیعی، طاهر نیکنام، سیدمحسن باقری، «بررسی پاسخگویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۱۱–۲۰، بهار ۱۳۹۶.
- [4] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, "Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 300–310, 2015.

[۳۰] ایمان گروهی ساردو، محمدجواد شهریاری، «برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر»، هوش محاسباتی در مهندسی برق، دوره ۱۱، شماره ۱، صفحه ۱۳۰-۱۱۱، بهار ۱۳۹۹.

[31] J. Soares, H. Morais, T. Sousa, Z. Vale, and P. Faria, "Day-ahead resource scheduling including demand response for electric vehicles," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 596–605, 2013.

[32] M. Govardhan and R. Roy, "Economic analysis of unit commitment with distributed energy resources," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 71, pp. 1–14, 2015.

[۳۳] مهدی منظری توکلی، امیر عبداللہی، مسعود رشیدی‌نژاد، «برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید امکانی-احتمالاتی واحدهای نیروگاهی با استفاده از مدل Z_number »، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۲۳۶-۱۲۲۳، پاییز ۱۳۹۶.

[34] S. Maghsudlu and S. Mohammadi, "Optimal scheduled unit commitment considering suitable power of electric vehicle and photovoltaic uncertainty," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, 2018.

[23] F. Gonzalez Venegas, M. Petit, and Y. Perez, "Electric Vehicles as Flexibility Providers for Distribution Systems. A Techno-Economic review.," *25th Int. Conf. Electr. Distrib. (CIRED 2019)*, no. June, pp. 3–6, 2019.

[24] B. Zhang and M. Kezunovic, "Impact on Power System Flexibility by Electric Vehicle Participation in Ramp Market," *IEEE Trans. Smart Grid*, no. 3, pp. 1285–1294, 2016.

[25] A. Nikoobakht, J. Aghaei, T. Niknam, H. Farahmand, and M. Korpås, "Electric vehicle mobility and optimal grid reconfiguration as flexibility tools in wind integrated power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 110, no. 7491, pp. 83–94, 2019.

[26] A. Pirouzi, J. Aghaei, S. Pirouzi, V. Vahidinasab, and A. R. Jordehi, "Exploring potential storage-based flexibility gains of electric vehicles in smart distribution grids," *J. Energy Storage*, vol. 52, no. PC, p. 105056, 2022.

[27] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, "Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid -A cost-emission optimization," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 3, pp. 898–911, 2010.

[28] L. A. Zadeh, "A Note on Z-numbers," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 181, no. 14, pp. 2923–2932, 2011.

[29] B. Kang, D. Wei, Y. Li, and Y. Deng, "A method of converting Z-number to classical fuzzy number," *J. Inf. Comput. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 703–709, 2012.