Tabriz Journal of Electrical Engineering (TJEE), vol. 52, no. 2, Summer 2022 Serial no. 100
DOI: 10.22034/tjee.2022.15430

Optimal Scheduling of Active Distribution Network in the Presence of Soft Open Points and Microgrids Considering Energy Transactions and Reactive Power Exchanges

Pezhman Khalouie, Payam Alemi*, Mojtaba Beiraghi

Department of Electrical Engineering / Faculty of Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran.
E-mails: Pezhman.Khalouie@iaurmia.ac.ir; P.Alemi@iaurmia.ac.ir; Beiraghi@iaurmia.edu
* means corresponding author

Short Abstract
In this paper, an optimal scheduling method for an Active Distribution Network (ADN) in the presence of Soft Open Points (SOPs) is presented. In the proposed method, all types of energy transactions, as well as the reactive power exchange between the ADN and the Upstream Network (UN) and the microgrids, are modeled. Scheduling is formulated in a 24-hour time horizon in which all costs and revenues of the ADN in energy transactions, such as the cost of purchasing power from the UN and the revenue from selling power to it along with the power loss cost, and the DG's fuel cost are modeled. In this method, the exact equations of AC load flow, operational constraints of SOPs and DGs, and energy transaction constraints such as power factor limitation, are modeled in a mixed-integer second-order conic programming model. Therefore, it is expected that the obtained results are the optimal global response that meets the scheduling constraints. To evaluate this claim, the operational scheduling of the modified 33-bus IEEE distribution system connected to two microgrids in different scenarios in the presence of high penetration of renewable sources has been investigated. The simulation results show the efficiency of the proposed framework.

Keywords
Active distribution network, microgrid, energy transaction, soft open points, distributed generation.

1- Short Introduction (4-5 lines)

In modern Active Distribution Networks (ADNs) the normally open points are replaced with Soft Open Points (SOPs) to increase network controllability in the presence of Distributed Generators (DGs). The SOPs can continuously control the active and reactive power flow in the ADN. In this paper, a comprehensive method for optimal scheduling of an SOP-based ADN is proposed to increase the ADN profit. Energy transactions between the ADN and other agents, namely Upstream Network (UN) and Microgrids (MGs), are considered and all technical operational constraints, such as AC load flow equations, and SOPs and DGs technical limitations are modeled.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discussion)

This paper presents a comprehensive method for determining ADN operational scheduling in the presence of SOPs by considering energy transactions with Microgrids (MGs), and the Upstream Network (UN). The efficiency of the proposed method has been evaluated by performing simulations on an ADN connected to two microgrids in two scenarios with and without SOPs. Based on the simulation results, using the proposed model, the benefit of the ADN in the presence of SOPs is more than 31.8% more than in the case that SOPs are not present in the network. The simulation results showed that with optimal control of SOPs, the loss cost can be reduced by more than 35.3%. Maintaining the voltage amplitude of the buses within the allowed limits is another feature of the proposed method. Based on the simulation results, using the proposed method, the voltage range of the busbars can be kept within the allowable range. A comparison of simulation results showed that by using the ability to inject reactive power by electronic converters of SOPs, the minimum voltage range of the ADN buses can be increased from 0.9 pu to 0.94 pu.

3- Conclusion (4-5 lines)

This paper presents a comprehensive method for scheduling an SOP-based ADN considering energy transactions with MGs and the UN. The efficiency of the proposed method has been evaluated by performing simulations on an ADN connected to two microgrids in two scenarios 1) with and 2) without SOPs. Based on the simulation results, using the proposed model, the profit of this ADN in the presence of SOPs has increased by more than 31.8% compared to the first scenario.

4- References (2-3 references)

[1] M. Doostizadeh, M. R. Shakarami, and H. Bastami, "Decentralized energy trading framework for active distribution networks with multiple microgrids under uncertainty," Scientia Iranica, vol. 26, pp. 3606-3621, 2019.
[2] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "A decentralized cooperative framework for multi-area active distribution network in presence of inter-area soft open points," Applied Energy, vol. 300, p. 117416, 2021.

برنامه‌ریزی بهینه شبکه توزیع فعال در حضور نقاط باز انعطاف‌پذیر و ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن تبادلات انرژی و توان راکتیو

پژمان خالویی
دانشجوی دکتری، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه، ارومیه، ایران

پیام عالمی
استاد، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه، ارومیه، ایران

مجتبی بیرقی
استاد، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده
در این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی بهینه برای شبکه توزیع فعال در حضور نقاط باز انعطاف‌پذیر (SOPها) ارائه شده است. در روش پیشنهادی، انواع تبادلات انرژی و همچنین دادوستد توان راکتیو میان شبکه توزیع فعال با شبکه‌ی بالادست و ریزشبکه‌های متصل به آن مدل‌سازی شده‌اند. برنامه‌ریزی در یک افق زمانی ۲۴ ساعته فرمول‌بندی شده و در آن تمامی هزینه‌ها و درآمدهای شبکه توزیع فعال در تبادلات انرژی، مانند هزینه خرید توان از شبکه‌ی بالادست و درآمد حاصل از فروش توان به آن همراه با هزینه تلفات و هزینه سوخت منابع تولید پراکنده مدل شده‌اند. در این روش، معادلات دقیق پخش بار AC، قیود عملکردی SOPها و منابع تولیدات پراکنده، محدودیت‌های تبادل انرژی مانند محدویت ضریب توان، در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مخروطی درجه دوم مدل‌سازی شده‌اند؛ بنابراین انتظار می‌رود که پاسخ به دست آمده از این مدل همان پاسخ بهینه سراسری باشد که محدودیت‌های برنامه‌ریزی را رعایت نماید. برای ارزیابی این ادعا، برنامه‌ریزی عملکردی سیستم توزیع اصلاح شده‌ی ۳۳ شینه IEEE که به دو ریزشبکه متصل شده در سناریوهای مختلف و در حضور نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی کارایی چارچوب پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی
شبکه توزیع فعال، ریزشبکه، تبادل انرژی، نقاط باز انعطاف‌پذیر، تولیدات پراکنده.

نام نویسنده مسئول: دکتر پیام عالمی
ایمیل نویسنده مسئول: P.Alemi@iaurmia.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰
تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

۱- مقدمه

به دنبال مقررات زدایی در صنعت برق، امروزه در بسیاری از کشورهای جهان، شبکه‌های برق از حالت دولتی خارج و خصوصی شده‌اند [۱]. بخش تولید، انتقال و توزیع مالکیت مستقل از هم پیداکرده‌اند و هر بخش باهدف بیشینه‌سازی سود خود در بازار رقابتی برق شرکت می‌کند [۲]. همچنین، با ظهور ریزشبکه‌ها (MGs[۱]) و منابع تولیدات پراکنده در سطح توزیع، مفهومی با نام شبکه‌های توزیع فعال (ADN[۲]) ایجاد گردیده است [۳، ۴]. یک ADN به شبکه برق بالادست (UN[۳]) متصل است و علاوه بر مشترکین توزیع [۵]، پذیرای MGها و منابع انرژی توزیع‌شده مختلف مانند منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر [۶] و منابع تولید پراکنده قابل‌کنترل (CDGs[۴]) می‌باشد. همچنین، ADNها دارای شبکه ارتباطی مدرن و تجهیزات الکترونیکی پیشرفته مانند نقاط باز انعطاف‌پذیر (SOPs[۵]) هستند. SOPها با کنترل پیوسته توان اکتیو و راکتیو عبوری از فیدرهای توزیع می‌توانند زمینه انجام تبادلات انرژی میان ADN و سایر نهادها [۷]، یعنی UN، DGها و MGها را فراهم نمایند [۸].

MGها که یکی از نهادهای مستقل متصل به ADN هستند [۹]، با تکیه بر منابع انرژی محلی خود، در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای قابل بهره‌برداری هستند. بااین‌حال، در شرایط عملکردی عادی به ADN متصل می‌شوند تا با انجام تبادلات بهینه انرژی سود خود را بیشینه کنند [۱۰]. در این تبادلات، میزان فروش و یا خرید توان اکتیو و راکتیو توسط MG و بر اساس قیمت توافق شده با ADN تعیین می‌شود. به‌صورت مشابه، ADN نیز بر اساس قیمت خریدوفروش اعلام‌شده از سوی UN میزان دادوستد توان با آن را تعیین می‌کند [۱۱].

قیمت برق از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تبادلات انرژی میان نهادهای مختلف است. در تبادلات توان میان ADN و UN، این قیمت توسط UN و بر اساس قیمت برق در بازار انرژی مشخص و به شبکه توزیع ابلاغ می‌گردد [۸، ۹]. روش‌های مختلفی برای تعیین قیمت برق در تبادلات میان ADN با MGها و یا مشترکین وجود دارد. به‌عنوان نمونه، در [۱۲] یک روش دقیق برای تعیین قیمت برق فروخته‌شده به مشترکین در MGهای DC و شبکه‌های توزیع بر اساس قیمت گره‌ای پیشنهاد شده است. در این روش، هزینه‌ی انرژی هر مصرف‌کننده بر اساس هزینه انرژی مصرفی و هزینه‌ی تلفات انرژی متناظر با آن محاسبه‌شده است. بااین‌حال، در بسیاری از مطالعات مانند [۴، ۸، ۱۳]، هنگام تعیین برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه توزیع در یک افق پیشرو، قیمت خرید و یا فروش برق در تبادلات میان ADN با ریزشبکه‌ها، مشترکین و همچنین UN به‌صورت یک پارامتر از پیش تعیین‌شده و یا پیش‌بینی‌شده در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، بهره‌بردار ADN با توجه به این قیمت برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه را تعیین می‌کند.

برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی MGها و ADN، در یک افق زمانی مشخص مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. در [۱۰]، یک مدل برنامه‌ریزی مقاوم برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی MGها در حالت متصل به شبکه ارائه شده است. در این مقاله، قیمت خریدوفروش برق از بازار انرژی در هر بازه زمانی یکسان در نظر گرفته‌شده است. در [۱۴] و [۱۵] مدل‌هایی برای تعیین برنامه‌ریزی MGها در حالت متصل به شبکه ارائه شده است؛ که در آن هزینه خریدوفروش برق از هم تفکیک‌شده‌اند. بااین‌حال، در مدل‌های ارائه شده، محدودیت تبادلات توان راکتیو در مبادلات انرژی مدل‌سازی نشده است.

در [۱۶] یک استراتژی دوسطحی برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی بهینه MG در بازار تبادلات انرژی ارائه شده است. در این مدل ساختار فیزیکی شبکه داخلی MG مدل‌سازی نشده است. مدل‌سازی فیزیک شبکه توزیع بر اساس معادلات پخش بار AC جهت تعیین برنامه‌ریزی بهینه عملکردی شبکه توزیع فعال در حضور SOPها از اهمیت بالایی برخوردار است. وجود SOP در سطح شبکه‌های توزیع فعال مدرن درعین‌حال که انعطاف‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهند نیازمند یک مدل برنامه‌ریزی جامع عملکردی هستند.

در [۱۷] یک روش برنامه‌ریزی غیرمتمرکز همکارانه برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی روز پیشرو ADN در حضور MGها با در نظر گرفتن معادلات پخش بار AC ارائه شده است. بااین‌حال، در این روش، هزینه‌ی تبادلات توان میان MGها و ADN مدل‌سازی نشده است. در این مقاله، برنامه‌ریزی به‌صورت همکارانه و باهدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های بهره‌برداری کل شبکه، یعنی مجموع هزینه‌های بهره‌برداری تمامی MGها و شبکه توزیع فعال به‌گونه‌ای غیرمتمرکز انجام شده است.

در [۱۸] یک چارچوب دوسطحی برای تعیین برنامه‌ریزی ADN در حضور خرده‌فروشان و MGها ارائه شده است. در سطح بالا مدل خرده‌فروشان باهدف بیشینه‌سازی سود آن‌ها و در سطح پایین نیز مدل MGها باهدف کاهش هزینه‌ی بهره‌برداری آن‌ها فرمول‌بندی شده است. برای حل این مدل دوسطحی یک مدل دو هدفه توسعه داده‌شده و از الگوریتم MOPSO برای یافتن جمعیت پارتو استفاده شده است. بااین‌حال، استقلال تصمیم‌گیری MGها و خرده‌فروشان در تعیین برنامه‌ریزی شخصی خود در نظر گرفته نشده است. همچنین، در این مقاله، معادلات پخش بار شبکه توزیع، محدودیت ولتاژ باس‌ها و سایر قیود متناظر با ساختار شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است.

به‌منظور مدیریت ADN با در نظر گرفتن تبادلات توان اکتیو و خدمات جانبی با MGها، یک مدل برنامه‌ریزی چند نهادی در [۱۹] ارائه شده است. این مدل استقلال عملکردی ADN و MGها و حفظ اطلاعات خصوصی آن‌ها را هنگام تعیین برنامه‌ریزی تضمین می‌کند. بااین‌حال، تبادلات توان ADN با UN و معادلات پخش بار ADN در نظر گرفته نشده است.

در [۲۰] یک سیستم مدیریت انرژی نوآورانه برای شبکه‌های فشار ضعیف با تولید پراکنده بر اساس مشارکت فعال مشتریان ارائه شده است. این سیستم می‌تواند پخش بار شبکه توزیع را به‌گونه‌ای تنظیم کند که از بارگذاری بیش‌ازحد ترانسفورماتور جلوگیری شود و دامنه‌ی ولتاژ گره‌های را در محدوده موردنیاز نگه دارد. بااین‌حال، MGها و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری ADN در این روش مدل‌سازی نشده‌اند.

در [۲۱] و [۲۲] نیز یک روش بهینه‌سازی سه لایه برای تعیین برنامه‌ریزی روز پیشرو ADN پیشنهاد شده است. در این چارچوب، ADN ازنظر ساختاری به سه لایه: مشترکین، MGو شبکه توزیع تقسیم‌شده و برنامه‌ریزی لایه‌ها با هم هماهنگ شده است. بااین‌حال، تبادلات خریدوفروش انرژی میان ADN و UN مدل نشده است.

یک روش متمرکز برای تعیین برنامه‌ریزی بهینه شبکه توزیع در روز آینده با در نظر گرفتن نهادهای مختلف مانند MGها، DGها و ذخیره‌سازهای الکتریکی در [۲۳] ارائه شده است. برنامه‌ریزی باهدف به حداقل رساندن هزینه عملیاتی در افق روز آینده فرموله شده است. بااین‌حال، مدل برنامه‌ریزی ارائه شده در این مقاله غیر محدب است و پاسخ به‌دست‌آمده از آن ممکن است پاسخ بهینه سراسری نباشد. همچنین، استقلال عملکردی MGها و DGها در این مقاله در نظر گرفته نشده و فرض شده که بهره‌برداری همگی نهادها در اختیار شبکه توزیع می‌باشد. از سوی دیگر از معادلات خطی شده پخش بار AC برای محاسبه پخش بار شبکه توزیع استفاده شده که دقت نتایج را کاهش می‌دهد.

[۱] Microgrids (MGs)

[۲] Active Distribution Network (ADN)

[۳] Upstream Network (UN)

[۴] Controllable Distributed Generators (CDGs)

[۵] Soft Open Points (SOPs)

در [۲۴] یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه با اهداف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انحراف ولتاژ باس‌ها از مقدار مرجع برای تعیین برنامه‌ریزی ADN ارائه شده است. در این مدل، تبادلات بین MGها و ADN مدل‌سازی نشده و محدودیت ضریب توان در خرید انرژی از UN در نظر گرفته نشده است.

در [۱۳] یک مدل محدب بر اساس بهینه‌سازی مقاوم برای تعیین برنامه‌ریزی روز پیشرو شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری زمان حقیقی ارائه شده است. در این مدل، عدم قطعیت بار و تولید تجدیدپذیر به‌صورت ریسک گریز و بر اساس تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی مدل‌سازی گردیده است. بااین‌حال، تبادلات انرژی میان ADN و ریزشبکه‌ها در این مدل لحاظ نشده است.

در [۴] برنامه‌ریزی بهینه‌ی ADN برای شرکت در بازار انرژی و خدمات جانبی در قالب یک مدل غیرخطی مدل‌سازی شده است. در این مدل، با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی، برنامه‌ریزی شرکت در بازار برق محاسبه‌شده است. بااین‌حال، زمان حل و میزان بهینگی پاسخ به‌دست‌آمده از این مدل غیر محدب بررسی نشده است. یک مدیریت انرژی توزیع‌شده انعطاف‌پذیر به‌منظور هماهنگ نمودن بهره‌برداری از چند ریزشبکه‌ی مستقل متصل‌به‌هم در [۲۵] پیشنهاد شده است. در این مقاله برنامه‌ریزی مبادلات انرژی میان ریزشبکه‌ها در قالب یک مدل غیرخطی دوسطحی تعیین شده است. در [۲۶]، یک روش هماهنگ برای تنظیم برخط ولتاژ شبکه‌های هوشمند با تعیین بهینه میزان تولید توان راکتیو CDGها و همچنین تعیین موقعیت تپ ترانسفورماتورهای تپ‌چنجر دار به‌صورت سلسله مراتبی و با اولویت کنترل توان راکتیو CDGها ارائه شده است. بااین‌حال، مبادلات مالی میان ریزشبکه‌ها مدل‌سازی نشده است.

تبادلات انرژی صورت گرفته میان ADN و سایر نهادها [۷]، یعنی UN، CDGها و MGها هم ازنظر فنی و هم ازنظر اقتصادی بر عملکرد ADN تأثیرگذار هستند. در هنگام تعیین برنامه‌ریزی علاوه بر جنبه‌ی اقتصادی، قیود بهره‌برداری، از قبیل قیود پخش بار AC، محدودیت ولتاژ شین‌ها و محدودیت توان عبوری از شاخه‌های شبکه باید در نظر گرفته شوند. در این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی بهینه با در نظر گرفتن تبادلات انرژی میان نهادهای مختلف ارائه شده است. در این روش، MGها، UN و ADN هرکدام یک نهاد مستقل در نظر گرفته شده‌اند که برنامه‌ریزی خود را بر اساس منافع خود تعیین می‌کنند. SOPهای قرار گرفته در ADN با هدف کاهش هزینه‌های ADN در برنامه‌ریزی روز پیشرو مدل شده‌اند. در این روش، اطلاعات خصوصی مانند اطلاعات بار و یا اطلاعات CDGهای محلی هر نهاد افشا نمی‌شود و تنها قیمت و توان اکتیو و راکتیو دادوستد شده به اشتراک گذاشته می‌شود. مشخصات روش پیشنهادی در جدول ۱ به‌صورت خلاصه با سایر روش‌ها مقایسه شده است.

مهم‌ترین نوآوری‌ها این مقاله به شرح زیر است:

- ✓ ارائه یک مدل جامع برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی ADN در حضور SOPها و منابع انرژی توزیع‌شده با در نظر گرفتن تبادلات انرژی میان ADN با UN، MGها و مشترکین
- ✓ مدل‌سازی تبادلات توان راکتیو در تبادلات انرژی با در نظر گرفتن محدودیت دامنه‌ی ولتاژ شین‌های ADN
- ✓ مدل‌سازی مجزای قیمت خریدوفروش انرژی میان ADN و هرکدام از نهادهای دیگر، یعنی MGها و UN
- ✓ در نظر گرفتن محدودیت ضریب توان در مبادلات توان میان شبکه توزیع و نهادهای دیگر
- ✓ حفظ حریم خصوصی و استقلال عملکردی نهادهای مختلف هنگام تعیین برنامه‌ریزی عملکردی
- ✓ در نظر گرفتن قیود پخش بار AC هنگام مدل‌سازی تبادلات انرژی
- ✓ مدل‌سازی دقیق SOP و در نظر گرفتن تلفات آن هنگام برنامه‌ریزی

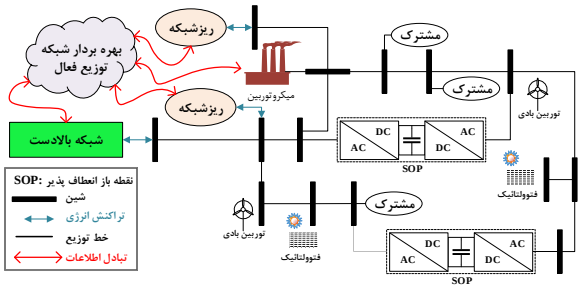
جدول ۱- مقایسه روش پیشنهادی با برخی از مقالات ارائه شده درزمینهٔ برنامه‌ریزی ADN.

مرجع	روش ارائه شده	مدل‌سازی SOP	تبادلات توان راکتیو	دادوستد مالی میان نهادها	مدل‌سازی ساختار شبکه	نوع پاسخ بهینه
[۱۴]	مدیریت انرژی ریزشبکه‌های متصل‌به‌هم	خیر	خیر	بله	خیر	بهینه سراسری
[۱۷]	برنامه‌ریزی غیرمتمرکز ADN در حضور MGها	خیر	بله	خیر	بله	بهینه سراسری
[۱۸]	برنامه‌ریزی چندهدفه دوسطحی ADN	خیر	خیر	بله	خیر	بهینه محلی
[۱۹]	تعامل بلادرنگ ADN با MGهای مجازی	خیر	خیر	بله	خیر	بهینه محلی
[۲۱]	برنامه‌ریزی سه سطحی ADN در حضور نهادهای مختلف	خیر	خیر	بله	بله	بهینه محلی
[۲۳]	مدیریت انرژی ADN در حضور منابع انرژی	خیر	خیر	بله	خیر	بهینه سراسری
[۲۵]	برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از چند MG متصل‌به‌هم	خیر	بله	بله	بله	بهینه سراسری
[۲۶]	کنترل ولتاژ شبکه هوشمند به روش سلسله مراتبی	خیر	بله	خیر	خیر	بهینه محلی
[۸]	برنامه‌ریزی غیرمتمرکز ADN در حضور SOPها	بله	بله	خیر	بله	بهینه سراسری
این مقاله	برنامه‌ریزی ADN با در نظر گرفتن تبادلات دو طرفه انرژی و توان راکتیو	بله	بله	بله	بله	بهینه سراسری

در بخش دوم ساختار کلی ADN تشریح شده است. تبادلات انرژی میان ADN و سایر نهادها به همراه مدل‌سازی اجزای موجود در ADN از قبیل SOPها و CDGها در بخش سوم آمده است. بخش چهارم به مطالعه موردی یک ADN و شبیه‌سازی روش پیشنهادی در آن اختصاص داده شده است. درنهایت مقاله در بخش پنجم نتیجه‌گیری شده است.

۲- ساختار کلی ADN

یک ADN که دارای SOP و منابع تولیدات پراکنده محلی می‌باشد در شکل ۱ نشان داده شده است. این ADN علاوه بر مشترکین محلی به نهادهای دیگر، یعنی UN و MGها متصل شده است و می‌تواند بخشی از انرژی خود را از آن‌ها خریداری کند و یا مازاد تولید منابع خود را به آن‌ها بفروشد. MGها، مشترکین توزیع و UN هرکدام یک نهاد مستقل هستند که بر اساس یک چارچوب مشخص با ADN مبادلات توان انجام می‌دهند.



شکل ۱- ساختار یک شبکه توزیع فعال دارای SOP در حضور نهادهای مختلف

بهره‌بردار ADN به دنبال بیشینه کردن سود خود در این تبادلات انرژی است. در مدل پیشنهادی، چگونگی تعیین و مدیریت بهینه‌ی این تبادلات در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی کارآمد بیان‌شده که در ادامه جزئیات آن تشریح می‌گردد.

۳- چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی

یک ADN به نهادهای مختلف، یعنی UN، MGها و مشترکین متصل است. ازآنجایی‌که این نهادها مستقل هستند، به‌منظور حفظ استقلال عملکردی نهادها تبادلات توان راکتیو و انرژی الکتریکی میان دو نهاد باید با توافق هر دوی آن‌ها و در قالب یک قرارداد مشخص صورت پذیرد. به‌عنوان نمونه، در تبادلات انرژی میان UN و ADN، UN قیمت خریدوفروش برق را بر اساس سود خود و با توجه به شرایط بازار برق تعیین می‌کند و ADN نیز بر اساس قیمت اعلام‌شده میزان تبادل توان با UN را با هدف کاهش هزینه‌های خالص بهره‌برداری خود تعیین می‌کند؛ بنابراین این‌گونه نیست که یک نهاد هم قیمت و هم میزان تبادلات توان را تعیین کند و نهاد دیگر مجبور به پذیرش آن باشد. از طرف دیگر، در چارچوب پیشنهادی، حریم خصوصی نهادها حفظ می‌شود و به‌جز داده‌های مربوط به تبادلات انرژی، یعنی توان اکتیو و راکتیو مبادله شده و قیمت آن، هیچ‌گونه اطلاعات دیگری میان نهادها به اشتراک گذاشته نمی‌شود. در ادامه، چگونگی فرمول‌بندی انواع تبادلات انرژی صورت گرفته میان ADN و سایر نهادها فرمول‌بندی شده است.

۳-۱- فروش برق به مشترکین توزیع

مشترکین توزیع، برق را بر اساس یک پروفایل قیمتی مشخص از ADN خریداری می‌کنند. درآمد ADN از فروش برق به مشترکین در (۱) بیان شده است.

$$R_c = \tau \times \sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\left(\lambda_{t,b}^{PC} \times P_{t,b}^{C} + \lambda_{t,b}^{QC} \times Q_{t,b}^{C}\right) \quad (۱)$$

$$0 \le P_{t,b}^{C}, Q_{t,b}^{C}\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۲)$$

که R_c درآمد ADN از فروش برق به مشترکین در افق برنامه‌ریزی، t اندیس بازه زمانی، τ طول بازه زمانی و T نیز مجموعه‌ی تمامی بازه‌های موجود در افق برنامه‌ریزی می‌باشند. b اندیس شین و B مجموعه‌ی تمامی شین‌های موجود در ADN است. $P_{t,b}^{C}$ و $Q_{t,b}^{C}$ به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو خریداری‌شده از ADN توسط مشترکین واقع در باس bام و در بازه‌ی زمانی tام می‌باشند که بر اساس قید (۲) باید نامنفی باشند. $\lambda_{t,b}^{PC}$ و $\lambda_{t,b}^{QC}$ به ترتیب قیمت انرژی اکتیو و راکتیو برای مشترکین قرار گرفته در باس bام و در بازه‌ی زمانی tام هست. لازم به ذکر است که $\lambda_{t,b}^{PC}$ و $\lambda_{t,b}^{QC}$ پارامترهای از پیش تعیین شده‌اند که بر اساس مدل قیمت‌گذاری زمان استفاده TOU[6] [۲۷] قبل از انعقاد قرارداد با مشترکین توسط ADN تعیین شده‌اند و فرض بر این است که ADN حق تغییر آن‌ها را در طول مدت قرارداد ندارد.

۳-۲- تبادل توان با MGها

در روش پیشنهادی، تبادلات توان میان ADN و MGها در قالب قراردادهای خریدوفروش انرژی به ترتیب در روابط (۳) الی (۴) مدل‌سازی شده‌اند.

$$R_M = \tau \times \sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\left(\lambda_{t,b}^{A2M} \times P_{t,b}^{A2M}\right) \quad (۳)$$

$$C_M = \tau \times \sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\left(\lambda_{t,b}^{M2A} \times P_{t,b}^{M2A}\right) \quad (۴)$$

$$0 \le P_{t,b}^{A2M}, P_{t,b}^{M2A}\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۵)$$

که R_M مجموع درآمد حاصل از فروش برق به MGها و C_M نیز مجموع هزینه‌ی خرید برق از آن‌ها در افق برنامه‌ریزی T می‌باشد که به ترتیب در روابط (۳) و (۴) فرمول‌بندی شده‌اند. $P_{t,b}^{A2M}$ میزان توان فروخته‌شده به MGهای متصل به باس bام ADN و $P_{t,b}^{M2A}$ نیز میزان توان خریداری‌شده از آن‌ها در بازه‌ی زمانی tام هست. $\lambda_{t,b}^{A2M}/\lambda_{t,b}^{M2A}$ قیمت خرید/فروش برق از/به MGهای متصل به باس bام ADN در بازه‌ی زمانی tام می‌باشد.

MGها به‌عنوان نهادهای مستقل از ADN با توجه به پروفایل قیمت‌های $\lambda_{t,b}^{A2M}$ و $\lambda_{t,b}^{M2A}$ مقادیر $P_{t,b}^{A2M}$ و $P_{t,b}^{M2A}$ را محاسبه و به ADN اطلاع می‌دهند. بنابراین، از دید A؛ $P_{t,b}^{A2M}$ و $P_{t,b}^{M2A}$ پارامترهایی هستند که توسط MGها محاسبه‌شده‌اند.

۳-۳- تبادل انرژی با UN

تبادلات انرژی میان ADN و شبکه‌ی بالادست، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد ADN هم ازنظر فنی و هم ازنظر اقتصادی دارد. در روش پیشنهادی، خرید توان از UN و فروش توان به آن با در نظر گرفتن محدودیت ضریب توان مدل‌سازی شده است. هزینه‌ی خرید برق از UN در (۶) و درآمد حاصل از فروش برق به آن در (۷) مدل‌سازی شده‌اند.

$$C_{UN} = \tau \times \sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\left(\lambda_{t}^{U2A} \times P_{t,b}^{U2A}\right) \quad (۶)$$

$$R_{UN} = \tau \times \sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\left(\lambda_{t}^{A2U} \times P_{t,b}^{A2U}\right) \quad (۷)$$

$$0 \le P_{t,b}^{U2A} \le S_{t,b}^{U2A} \times ST_{max}^{UN}\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۸)$$

$$0 \le P_{t,b}^{A2U} \le S_{t,b}^{A2U} \times ST_{max}^{UN}\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۹)$$

$$S_{t,b}^{A2U} + S_{t,b}^{U2A} \le 1\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۱۰)$$

$$0 \le Q_{t,b}^{U2A} \le tan(\cos^{-1}(PF_{min}^{U2A})) \times P_{t,b}^{U2A}\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۱۱)$$

$$0 \le Q_{t,b}^{A2U} \le tan(cos^{-1}(PF_{min}^{A2U})) \times P_{t,b}^{A2U}\ \forall t \in T, \forall b \in B \quad (۱۲)$$

که λ_{t}^{U2A} قیمت خرید برق از UN و λ_{t}^{A2U} نیز قیمت فروش برق به UN در بازه‌ی زمانی tام می‌باشد. $P_{t,b}^{U2A}$ و $P_{t,b}^{A2U}$ به ترتیب توان واردشده از UN و توان صادرشده به UN در بازه‌ی زمانی tام از طریق باس bام ADN می‌باشند. محدوده‌ی تبادل توان با UN در روابط (۸) و (۹) مدل شده‌اند که ST_{max}^{UN} ظرفیت نامی شاخه‌ی ارتباطی میان UN و ADN است. در این روابط، متغیّرهای $S_{t,b}^{A2U}$ و $S_{t,b}^{U2A}$ دو متغیّر باینری هستند که جهت تبادل توان میان ADN و UN را در بازه‌ی زمانی tام کنترل می‌کنند. اگر $S_{t,b}^{A2U}$ برابر یک باشد بدان معناست که در بازه‌ی زمانی tام ADN به UN توان صادر می‌کند. همچنین، اگر $S_{t,b}^{U2A}$ برابر یک

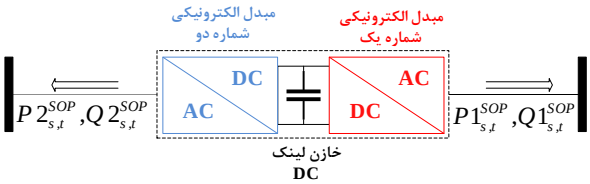
[6] Time-of-use pricing model

باشد ADN واردکننده توان از UN خواهد بود. بر اساس رابطه (۱۰) هر دو متغیّر $S_{t,b}^{A2U}$ و $S_{t,b}^{U2A}$ نمی‌توانند به‌طور همزمان یک شوند.

محدودیت تبادلات توان راکتیو میان ADN و UN در روابط (۱۱) و (۱۲) مدل شده که PF_{min}^{A2U} و PF_{min}^{U2A} به ترتیب حداقل ضریب توان مجاز در تبادلات خریدوفروش انرژی میان ADN و UN را نشان می‌دهد. بنابراین، قی؛ (۱۱) و (۱۲) تبادلات توان راکتیو در شبکه را محدود می‌کنند.

۳-۴- مدل SOP

در این مقاله، قابلیت SOP در کنترل توان اکتیو و راکتیو عبوری از فیدرهای توزیع به‌طور کامل مدل‌سازی شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، هر SOP از دو مبدل الکترونیکی که از طریق یک لینک DC به‌صورت پشت‌به‌پشت هم متصل شده‌اند تشکیل شده است.



شکل ۲- ساختار SOP [۲۸]

در این شکل، $P1_{s,t}^{SOP}$ و $P2_{s,t}^{SOP}$ به ترتیب توان‌های اکتیو تزریق‌شده از سمت مبدل‌های الکترونیکی شماره ۱ و ۲ SOP به سمت شین‌های متصل شده به آن در بازه زمانی tام هستند. همچنین، $Q1_{s,t}^{SOP}$ و $Q2_{s,t}^{SOP}$ نیز توان‌های راکتیو تزریق‌شده از سمت ترمینال‌های SOP به سمت شین‌های متصل شده به آن هستند.

SOP با کنترل پیوسته $P1_{s,t}^{SOP}$، $P2_{s,t}^{SOP}$، $Q1_{s,t}^{SOP}$ و $Q2_{s,t}^{SOP}$ انعطاف‌پذیری شبکه توزیع را افزایش می‌دهد [۸]. بااین‌حال، هنگام تعیین برنامه‌ریزی عملکردی SOPها باید تلفات توان اکتیو در مبدل‌های الکترونیکی SOP و همچنین محدودیت‌های عملکردی آن در نظر گرفته شود. این قیود، در روابط زیر بیان‌شده‌اند [۲۹].

$$\left\|\left[P1_{s,t}^{SOP} \quad Q1_{s,t}^{SOP}\right]\right\|_2 \le S1_{s,max}^{SOP}, \forall s \in S, \forall t \in T \tag{۱۳}$$

$$\left\|\left[P2_{s,t}^{SOP} \quad Q2_{s,t}^{SOP}\right]\right\|_2 \le S2_{s,max}^{SOP}, \forall s \in S, \forall t \in T \tag{۱۴}$$

$$Pl1_{s,t}^{SOP} = Pm1_{s,t}^{SOP} \times Z1_{s}^{SOP}, \forall s \in S, \forall t \in T \tag{۱۵}$$

$$Pl2_{s,t}^{SOP} = Pm2_{s,t}^{SOP} \times Z2_{s}^{SOP}, \forall s \in S, \forall t \in T \tag{۱۶}$$

$$Pl1_{s,t}^{SOP} + Pl2_{s,t}^{SOP} + Pm1_{s,t}^{SOP} + Pm2_{s,t}^{SOP} = 0, \forall s \in S, \forall t \in T \tag{۱۷}$$

که S مجموعه‌ی SOPهای موجود در شبکه و s اندیس نشان‌دهنده SOP ام است. t اندیس بازه‌ی زمانی و T مجموعه‌ی بازه‌های زمانی موجود در افق برنامه‌ریزی می‌باشد. $S1_{s,max}^{SOP}$ و $S2_{s,max}^{SOP}$ به ترتیب توان نامی مبدل‌های الکترونیکی شماره یک و دو SOP ام هستند. $Pl1_{s,t}^{SOP}$ و $Pl2_{s,t}^{SOP}$ به ترتیب تلفات توان و $Pm1_{s,t}^{SOP}$ و $Pm2_{s,t}^{SOP}$ نیز اندازه توان اکتیو تزریق‌شده توسط مبدل‌های شماره یک و دو SOP ام می‌باشند. همچنین، ضرایب $Z1_{s}^{SOP}$ و $Z2_{s}^{SOP}$ به ترتیب پارامترهای مربوط به مبدل‌های شماره یک و دو SOP هستند که نسبت تلفات به توان عبوری از مبدل را بیان می‌کنند [۸].

روابطِ (۱۳) و (۱۴) به ترتیب ظرفیت نامی مبدل‌های الکترونیکی شماره یک و دو SOP ام را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است، نماد $\|A\|_2$ بیانگر عملگر ریاضی نُرم دو ماتریس A می‌باشد. تلفات توان اکتیو هرکدام از مبدل‌های شماره یک و دو SOP به ترتیب در روابط (۱۵) و (۱۶) بر اساس بازده آن مبدل تعریف شده است. قید تعادل توان اکتیو SOP در رابطه (۱۷) بیان‌شده است [۸]. بر اساس این قید، مجموع توان‌های تزریق‌شده به‌علاوه تلفات توان در مبدل‌های شماره یک و دو SOP در تمامی بازه‌های زمانی افق برنامه‌ریزی T باید برابر صفر باشد. این بدان معناست که SOP تولیدکننده، ذخیره‌کننده و یا مصرف‌کننده توان اکتیو نمی‌باشد.

۳-۵- مدل‌سازی CDGها

CDGها ازجمله DGهای قابل‌کنترلی هستند که در سطح ADN قرار می‌گیرند. هزینه تولید CDGها در (۱۸) بیان‌شده است [۳].

$$C_{CDG} = \tau \times \sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\left(a_b^{CDG} \times {P_{t,b}^{CDG}}^2 + b_b^{CDG} \times P_{t,b}^{CDG} + c_b^{CDG}\right) \tag{۱۸}$$

که a_b^{CDG}، b_b^{CDG} و c_b^{CDG} ضرایب تابع هزینه‌ی سوخت CDG واقع در باس bام و C_{CDG} نیز هزینه سوخت CDGهای موجود در ADN در افق برنامه‌ریزی است.

$$0 \le P_{t,b}^{CDG} \le P_{max,b}^{CDG}, \forall b \in B, \forall t \in T \tag{۱۹}$$

$$0 \le Q_{t,b}^{CDG} \le P_{t,b}^{CDG} \times tan\left(\cos^{-1}\left(PF_{min,b}^{CDG}\right)\right), \forall b \in B, \forall t \in T \tag{۲۰}$$

که $P_{t,b}^{CDG}$ و $Q_{t,b}^{CDG}$ به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدشده توسط CDG واقع در باس bام در بازه‌ی زمانی tام هست. $PF_{min,b}^{CDG}$ نیز حداقل ضریب توان عملیاتی CDG واقع در باس bام می‌باشد.

۳-۶- قیود پخش بار AC

معادلات تعادل لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو در باس‌های ADN در حضور SOPها، CDGها، توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک به ترتیب در روابط (۲۱) و (۲۲) مدل شده‌اند.

$$\begin{aligned} P_{t,b}^{WT} + P_{t,b}^{PV} + P_{t,b}^{CDG} + P_{t,b}^{M2A} + P_{t,b}^{U2A} + \sum_{s\in S1_b} P1_{s,t}^{SOP} \\ + \sum_{s\in S2_b} P2_{s,t}^{SOP} \\ + \sum_{j\in PA_b}\left(P_{jb,t}^{br} - r_{jb} \times {i_{jb}}^2\right) \\ = P_{t,b}^{C} + P_{t,b}^{A2M} + P_{t,b}^{A2U} \\ + \sum_{j\in CI_b} P_{bj,t}^{br}, \forall b \in B, \forall t \in T \end{aligned} \tag{۲۱}$$

$$\begin{aligned} Q_{t,b}^{CDG} + Q_{t,b}^{M2A} + Q_{t,b}^{U2A} + \sum_{s\in S1_b} Q1_{s,t}^{SOP} + \sum_{s\in S2_b} Q2_{s,t}^{SOP} \\ + \sum_{j\in PA_b}\left(Q_{jb,t}^{br} - x_{jb} \times {i_{jb}}^2\right) \\ = Q_{t,b}^{C} + Q_{t,b}^{A2M} + Q_{t,b}^{A2U} \\ + \sum_{j\in CI_b} Q_{bj,t}^{br}, \forall b \in B, \forall t \in T \end{aligned} \tag{۲۲}$$

که $P_{t,b}^{WT}$ و $P_{t,b}^{PV}$ به ترتیب توان‌های اکتیو تزریق‌شده توسط WTها و PVهای متصل به باس bام در بازه‌ی زمانی tام هستند. $\sum_{s\in S1_b} P1_{s,t}^{SOP}$ و $\sum_{s\in S2_b} P2_{s,t}^{SOP}$ به ترتیب مجموع توان‌های تزریق‌شده از سوی مبدل‌های شماره یک و دو

SOPهای متصل به شین bام در بازه‌ی زمانی tام هستند. $S1_b$ و $S2_b$ نیز مجموعه‌ی SOPهایی هستند که به ترتیب مبدل شماره یک و دو آن‌ها به شین bام متصل شده است. PA_b و CI_b به ترتیب مجموعه‌ی شین‌های بالادست و پایین‌دست شین bام می‌باشند. $P_{jb,t}^{br}$ توان اکتیو و $Q_{jb,t}^{br}$ توان راکتیو تزریق‌شده از شین jام به شاخه‌ی jbام را نشان می‌دهند. r_{jb} مقاومت، x_{jb} ادمیتانس و i_{jb} نیز دامنه‌ی جریان عبوری از این شاخه در بازه‌ی زمانی tام را بیان می‌کنند. بنابراین عبارت $P_{jb,t}^{br} - r_{jb} \times {i_{jb}}^2$ و $Q_{jb,t}^{br} - x_{jb} \times {i_{jb}}^2$ به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو خالص تزریق‌شده به شین bام از طریق شاخه‌ی jbام را در بازه‌ی زمانی tام نشان می‌دهند.

معادله پخش بار شاخه jbام که میان دو شین j و b قرار گرفته در روابط (۲۳) و (۲۴) بیان‌شده است [۳۰].

$$v_{b,t} = v_{j,t} - 2 \times \left(r_{jb} \times P_{jb,t}^{br} + x_{jb} \times Q_{jb,t}^{br}\right) + {i_{jb}}^2 \times \left({r_{jb}}^2 + {x_{jb}}^2\right), \forall jb \in Br, \forall t \in T \quad (۲۳)$$

$${v_{j,t}}^2 \times {i_{jb}}^2 = \left({P_{jb,t}^{br}}^2 + {Q_{jb,t}^{br}}^2\right), \forall jb \in Br, \forall t \in T \quad (۲۴)$$

که $v_{b,t}$ دامنه ولتاژ شین bام در گام زمانی tام و Br نیز مجموعه‌ی تمام شاخه‌های موجود در ADN هست. رابطه (۲۴)، ارتباط میان ولتاژ، جریان و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه‌ی jbام را با ولتاژ ابتدای شاخه، یعنی ولتاژ باس jام بیان می‌کند.

در معادلات پخش بار از دو متغیّر کمکی $V_{j,t}$ و I_{jb} استفاده می‌شود که به ترتیب معادل ${v_{j,t}}^2$ و ${i_{jb}}^2$ هستند ($V_{j,t} = {v_{j,t}}^2$ و $I_{jb} = {i_{jb}}^2$). با استفاده از متغیّرهای کمکی تعریف شده، قید تساوی (۲۴)، به‌صورت رابطه (۲۵) و در قالب مخروطی درجه دوم بیان می‌شود.

$$\left\|\left[2P_{jb,t}^{br} \quad 2Q_{jb,t}^{br} \quad I_{jb} - V_{j,t}\right]\right\|_2 \le I_{jb} - V_{j,t}, \forall jb \in Br, \forall t \in T \quad (۲۵)$$

۳-۷- هزینه تلفات

در هنگام تعیین برنامه‌ریزی ADN تلفات انرژی نیز باید در نظر گرفته شود.

$$C_L = C_L^{SOP} + C_L^{Br} \quad (۲۶)$$

$$C_L^{SOP} = \tau \times \sum_{t \in T} \left(\lambda_t^L \times \sum_{s \in S} \left(Pl1_{s,t}^{SOP} + Pl2_{s,t}^{SOP}\right)\right) \quad (۲۷)$$

$$C_L^{Br} = \tau \times \sum_{t \in T} \left(\lambda_t^L \times \sum_{jb \in Br} r_{jb} \times I_{jb}\right) \quad (۲۸)$$

که λ_t^L قیمت تلفات در بازه tام است که مطابق رابطه (۲۹) برابر با بزرگ‌ترین قیمت انرژی در آن بازه در نظر گرفته می‌شود.

$$\lambda_t^L = \left[\lambda_{t,b}^{PC} \quad \lambda_t^{U2A} \quad \lambda_t^{A2U} \quad \lambda_t^{M2A} \quad \lambda_t^{A2M}\right] \quad (۲۹)$$

لازم به ذکر است عملگر ریاضی $[A]$ بزرگ‌ترین درایه بردار A را برمی‌گرداند.

۳-۸- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

در مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی با هدف بیشینه کردن سود ADN انجام شده است که در آن (۳۰)، یک مدل برنامه‌ریزی جامع برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی MG iام ارائه شده است.

$$Pr = R_{UN} + R_M + R_C - \left(C_{UN} + C_M + C_{CDG} + C_L\right) \quad (۳۰)$$

که Pr سود خالص ADN در افق برنامه‌ریزی است. مدل برنامه‌ریزی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط درجه دوم مخروطی (MISOCP[۷]) در (۳۱) بیان‌شده است.

$$\max Pr$$
$$\text{st:} \quad (۳۱)$$

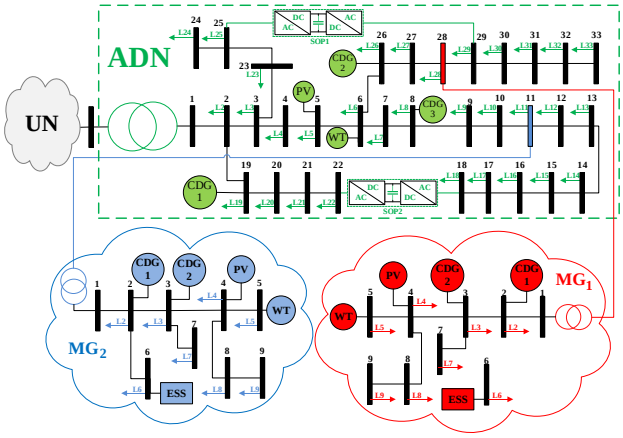
روابط (۱) تا (۲۳) و (۲۵) تا (۳۰)

۴- مطالعات شبیه‌سازی

سیستم توزیع اصلاح‌شده‌ی ۳۳ شینه‌ی IEEE که به دو MG با نام‌های MG_1 و MG_2 متصل شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، مشترکین متصل به ADN با حرف L نشان داده شده‌اند.

اطلاعات شاخه‌ها، مشترکین، CDGها، ESSها، پروفایل تولید منابع تجدیدپذیر و همچنین پروفایل بار شبکه در [۷] آمده است. به‌منظور افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر در این ADN، ظرفیت PV نصب‌شده در شین شماره ۵ از ۳۷۱/۵ کیلووات به ۲۰۰۰ کیلووات افزایش داده شده است. همچنین، جهت بهبود عملکرد شبکه، دو SOP با نام‌های SOP1 و SOP2 در شبکه نصب‌شده است که مشخصات و مکان قرارگیری آن‌ها از [۸] اقتباس شده است. اطلاعات SOPهای شماره یک و دو در جدول ۲ داده شده است.

افق برنامه‌ریزی به‌صورت ۲۴ بازه زمانی یک‌ساعته در نظر گرفته شده است. حداقل و حداکثر دامنه‌ی مجاز ولتاژ شین‌ها به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت و حداقل ضریب توان در تبادلات انرژی میان MGها با ADN و همچنین ADN با UN برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است ($PF_{min}^* = 0.8$).



شکل ۳- شبکه‌ی توزیع فعال موردمطالعه (اطلاعات این شبکه از مراجع [۷] و [۸] اقتباس شده است)

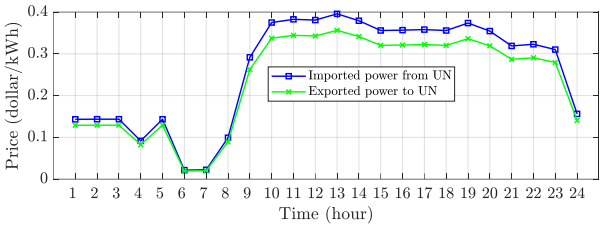
جدول ۲- اطلاعات SOPها [۸].

s	(kVA) $S1_{s,max}^{SOP}$	(kVA) $S2_{s,max}^{SOP}$	$Z1_s^{SOP}$	$Z2_s^{SOP}$
۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲
۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲

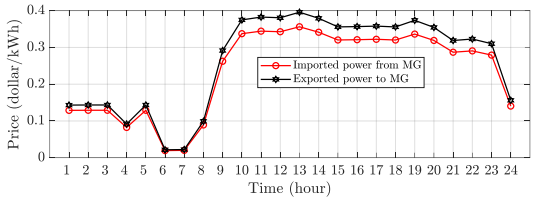
قیمت برق در تبادلات انرژی میان ADN با UN در قسمت (الف) و در تبادلات میان ADN و MGها در قسمت (ب) در شکل ۴ نشان داده شده است. هرکدام از MGها بر اساس قیمت پیشنهاد شده در شکل ۴ (ب) برنامه‌ریزی خود را برای افق ۲۴ ساعته پیش‌رو به‌صورت مستقل انجام می‌دهند و میزان تبادلات انرژی خود را به ADN اطلاع می‌دهند.

[۷] Mixed Integer Second Order Cone Programing (MISCP)

تمامی شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از جعبه‌ابزار YALMIP [۳۱] مدل‌سازی شده‌اند. مدل پیشنهادی از نوع برنامه‌ریزی MISOCP است که روش‌های مختلف حل آن در [۳۲] بررسی‌شده‌اند. بااین‌حال، در این مقاله، برای یافتن پاسخ بهینه‌ی سراسری این مسئله از حل‌کننده‌ی قدرتمند CPLEX 12.9 استفاده شده است.



(الف)

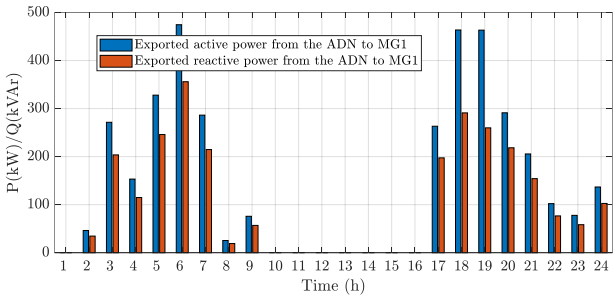


(ب)

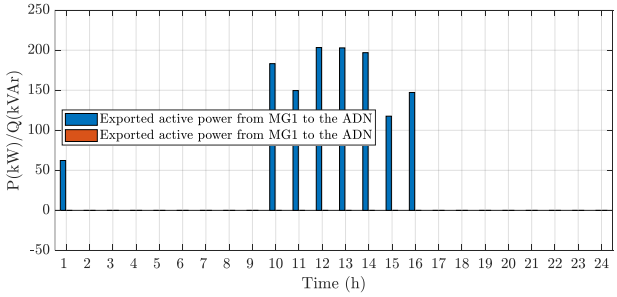
شکل ۴- قیمت انرژی در تبادلات میان ADN و (الف) UN، (ب) MGها

۴-۱- نتایج برنامه‌ریزی MGها

ازآنجایی‌که MGها نهادهای مستقلی هستند، هر MG برنامه‌ریزی تبادلات انرژی با ADN را با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری خود انجام می‌دهد. در شکل ۵ قسمت (الف) برنامه‌ریزی خرید انرژی از ADN و در قسمت (ب) برنامه‌ریزی فروش انرژی به ADN نشان داده شده است. این برنامه‌ریزی توسط MG_1 محاسبه‌شده است. ازآنجایی‌که دو MG شماره یک و دو کاملاً مشابه هستند، در این بخش تنها نتایج برنامه‌ریزی MG_1 ارائه شده است.



(الف)



(ب)

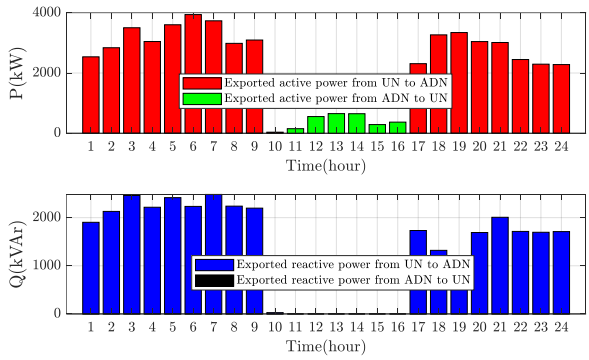
شکل ۵- برنامه‌ریزی: (الف) خرید انرژی از ADN و (ب) فروش انرژی به ADN

۴-۲- برنامه‌ریزی ADN

ADN با توجه به تبادلات انرژی محاسبه‌شده توسط MG_1 و MG_2، قیمت برق (شکل ۴)، پیش‌بینی بار مشترکین و تولید منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی عملکردی خود را بر اساس مدل پیشنهاد شده در (۳۱) تعیین می‌کند. همان‌گونه که نمایان است، در روش پیشنهادی تنها اطلاعات مربوط به تبادلات انرژی و تبادلات توان راکتیو، شامل قیمت برق و میزان توان اکتیو و راکتیو تبادل شده میان نهادهای مختلف، به اشتراک گذاشته می‌شود و نیازی به تبادل اطلاعات خصوصی از قبیل اطلاعات بار و یا مشخصات CDGها نیست. این ویژگی باعث حفظ حریم خصوصی MGها و ADN در هنگام تعیین برنامه‌ریزی می‌شود. همچنین، هرکدام از نهادها بر اساس مدل خود و بدون دخالت نهاد دیگر برنامه‌ریزی خود را انجام می‌دهند که نشان می‌دهد روش پیشنهادی استقلال عملکردی ADN و ریزشبکه‌ها را حفظ می‌کند. جهت نشان دادن قابلیت SOPها در بهبود عملکرد ADN، در ادامه برنامه‌ریزی ADN در دو سناریوی با و بدون در نظر گرفتن SOPها شبیه‌سازی شده است.

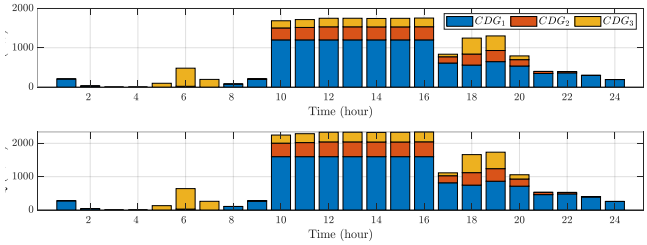
سناریوی ۱: برنامه‌ریزی ADN بدون حضور SOPها

در سناریوی اول، فرض بر این است که SOPها در مدار نیستند. تراکنش‌های انرژی و توان راکتیو میان ADN و UN در این سناریو در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- تراکنش‌های انرژی و توان راکتیو میان ADN و UN در سناریو اول

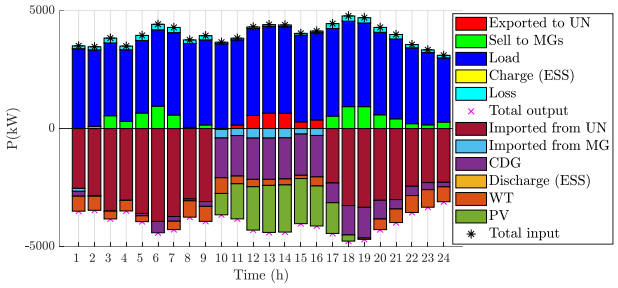
این شکل نشان می‌دهد که ADN در تمامی ساعات افق برنامه‌ریزی به‌جز ساعات ۱۱ الی ۱۶ واردکننده انرژی از UN است. همچنین، ADN ترجیح می‌دهد در تمامی ساعات برنامه‌ریزی واردکننده توان راکتیو از UN باشد. برنامه‌ریزی تولید CDGها در شکل ۷ نشان می‌دهد که CDG شماره ۱ بیشترین تولید را در میان سه CDG موجود در ADN دارد. این تولید بیشتر به دلیل هزینه تولید کمتر این CDG است. بررسی این شکل، رعایت قیود CDGها، یعنی محدوده‌ی تولید و قید حداقل ضریب توان در روابط (۱۹) و (۲۰) را نشان می‌دهد.



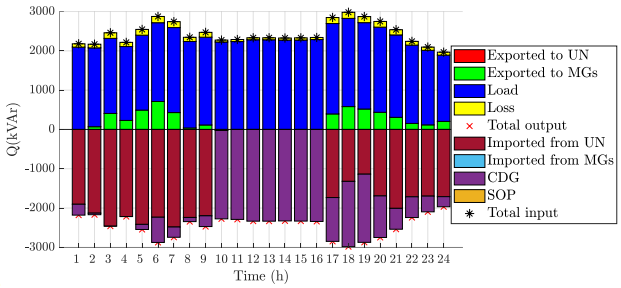
شکل ۷- برنامه‌ریزی تولید CDGها در سناریو اول

میزان توان اکتیو تولیدشده در ADN و یا واردشده به آن، در کنار میزان توان اکتیو مصرف‌شده در ADN و یا صادرشده از آن، در شکل ۸ نشان داده شده

است. بر اساس این شکل، قید تعادل توان اکتیو در (۲۱) در هر ساعت از افق برنامه‌ریزی رعایت شده است. همچنین، برنامه‌ریزی توان راکتیو ADN در شکل ۹ ترسیم‌شده که تحقق قید تعادل توان راکتیو ارائه شده در رابطه (۲۲) را در هر ساعت از ۲۴ بازه زمانی برنامه‌ریزی نشان می‌دهد.

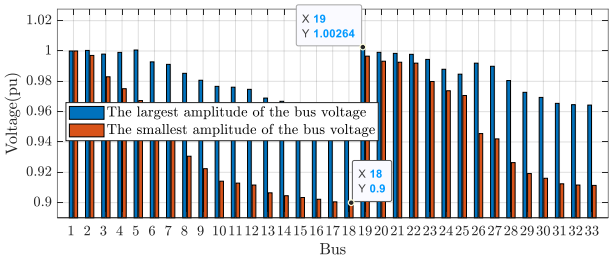


شکل ۸- برنامه‌ریزی توان اکتیو ADN در سناریوی اول



شکل ۹- برنامه‌ریزی توان راکتیو ADN در سناریوی اول

حداقل و حداکثر اندازه ولتاژ هرکدام از شین‌های ADN در افق ۲۴ ساعته برنامه‌ریزی در شکل ۱۰ ترسیم‌شده است. این شکل نشان می‌دهد ولتاژ تمامی شین‌ها در محدوده‌ی مجاز ۰/۹ تا ۱/۱ پریونیت قرار دارد که کارایی روش پیشنهادی در حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز را نشان می‌دهد.

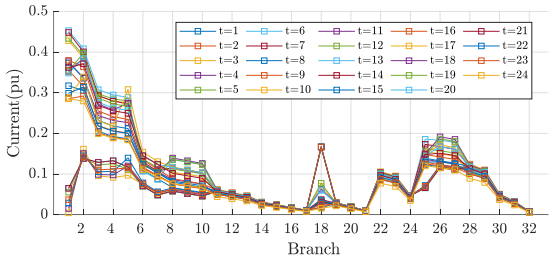


شکل ۱۰- حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ هرکدام از شین‌های ADN در سناریو اول

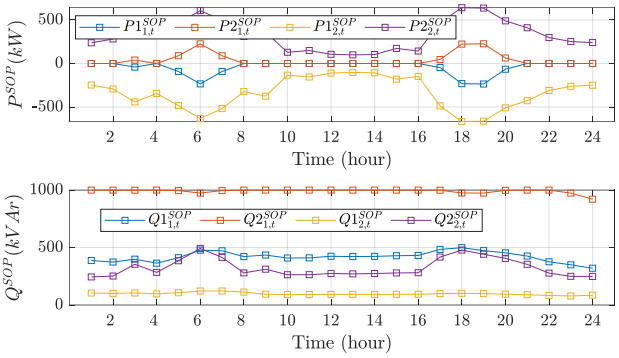
همچنین، بررسی دامنه جریان عبوری از شاخه‌های ADN در افق ۲۴ ساعته برنامه‌ریزی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد هیچ‌کدام از شاخه‌های ADN دچار اضافه جریان نشده‌اند. تحلیل اقتصادی عملکرد ADN در ادامه و در بخش مقایسه نتایج تشریح خواهد شد.

برنامه‌ریزی ADN با SOPها

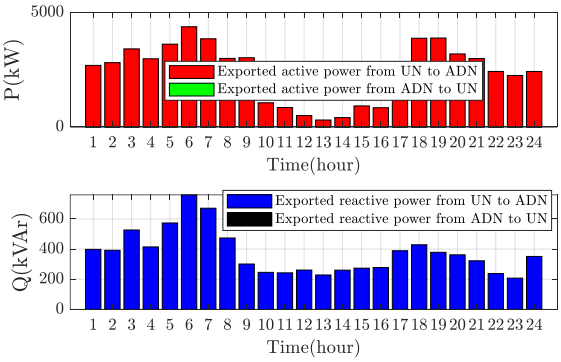
در سناریو دوم، برنامه‌ریزی ADN در حضور SOPها انجام شده است. برنامه‌ریزی عملکردی SOPها، شامل تعیین میزان توان‌های اکتیو و راکتیو تزریق‌شده توسط مبدل‌های الکترونیکی شماره یک و دو SOPها، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برنامه‌ریزی تزریق توان اکتیو نشان داده شده در این شکل بیانگر تحقق قید تعادل توان اکتیو در مبدل‌های الکترونیکی SOPها است که در رابطه (۱۷) بیان‌شده است. بر اساس این شکل، میزان تزریق توان راکتیو تمامی مبدل‌های الکترونیکی SOPها، یک عدد مثبت است که نشان‌دهنده مشارکت آن‌ها در تأمین محلی توان راکتیو موردنیاز ADN است. تبادلات انرژی با UN در سناریوی دوم در شکل ۱۳ رسم شده است.



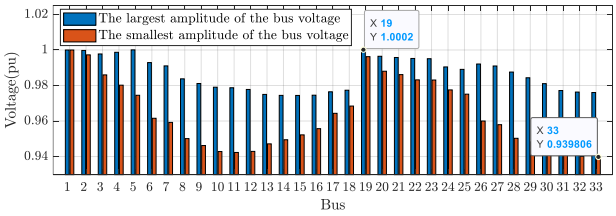
شکل ۱۱- دامنه جریان عبوری از شاخه‌های ADN در سناریو اول



شکل ۱۲- برنامه‌ریزی عملکردی SOPها



شکل ۱۳- تراکنش‌های انرژی و توان راکتیو میان ADN و UN در سناریو دوم



شکل ۱۴- حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ هرکدام از شین‌های ADN در سناریو دوم

همان‌گونه که در این شکل نمایان است، ADN در تمامی ساعات واردکننده توان اکتیو و راکتیو از UN است. مقایسه این شکل با شکل ۶ نشان می‌دهد که ADN در حضور SOPها تمایل بیشتری برای ورود انرژی از UN دارد. حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ باس‌ها در سناریوی دوم در شکل ۱۴ ترسیم شده است. بر اساس این شکل، محدوده‌ی نوسان ولتاژ شین‌ها در ADN در محدوده مجاز ۰/۹۴ تا ۱ پریونیت قرار دارد که نسبت به شکل ۱۰ از نوسان کمتری برخوردار است. این مقایسه بهبود پروفایل ولتاژ ADN در حالت وجود SOPها را تأیید

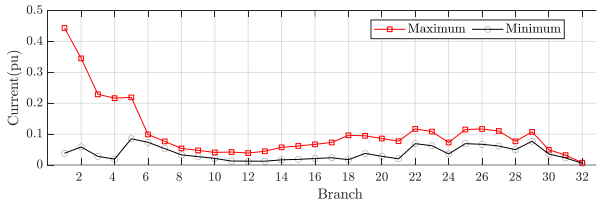
می‌کند. حداقل و حداکثر دامنه‌ی جریان عبوری از هرکدام از ۳۲ شاخه‌ی موجود در ADN در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بررسی دامنه جریان عبوری از هرکدام از ۳۲ شاخه‌ی موجود در این ADN نشان می‌دهد که جریان عبوری از هیچ‌کدام از شاخه‌ها از حداکثر ظرفیت آن شاخه تجاوز نکرده است. میزان سهم SOPها در ایجاد تلفات ساعتی کل ADN در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

بر اساس این شکل، میزان تلفات شبکه در ساعات ۶، ۱۸ و ۱۹ به اوج خود می‌رسد که کمتر از ۱۹ درصد از آن مربوط به مبدل‌های الکترونیکی SOPها می‌باشد. لازم به ذکر است که در سناریوی دوم، تبادلات انرژی در سطح ADN در ساعات ۶، ۱۸ و ۱۹ به اوج خود می‌رسد.

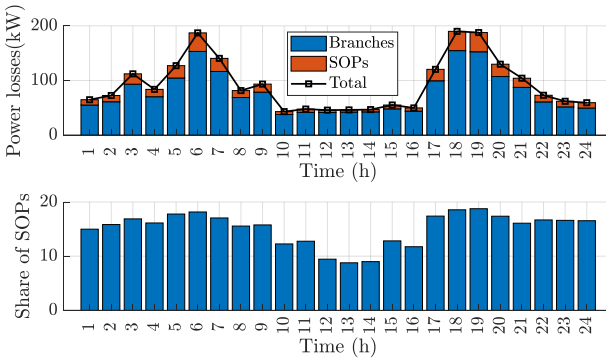
برنامه‌ریزی تولید CDGها در شکل ۱۷ نیز تحقق قیود عملیاتی آن‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۱۷ با شکل ۷ نشان می‌دهد که میزان تولید CDGها در سناریوی دوم کاهش چشمگیری یافته و در سناریوی دوم، CDG شماره ۳ که هزینه تولید نسبتاً بالاتری دارد، به‌طورکلی خاموش شده است.

تحقق قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو در ADN در حضور SOPها به ترتیب در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ نشان داده شده است.

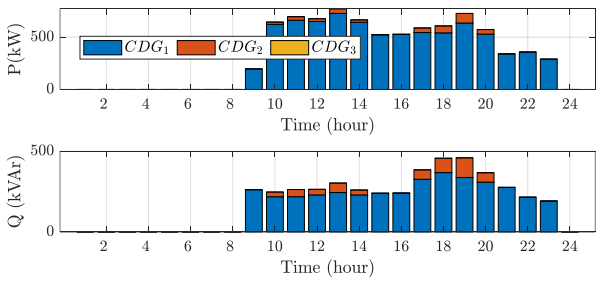
برنامه‌ریزی تولید توان راکتیو توسط SOPها در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که ADN در سناریوی دوم بیشتر توان راکتیو بارهای خود را توسط SOPها تأمین می‌کند. مقایسه این شکل با شکل ۹ نشان می‌دهد که میزان ورود توان راکتیو از UN در سناریوی دوم کاهش چشمگیری داشته است. کاهش مبادلات توان راکتیو با UN کاهش جریان عبوری از شاخه‌های ابتدایی ADN را به دنبال خواهد داشت.



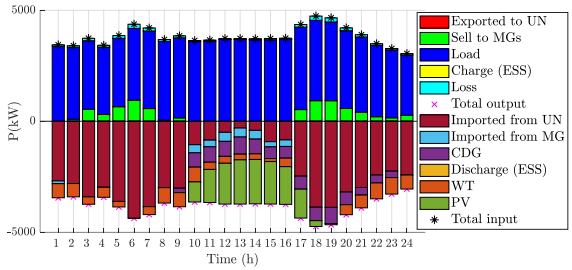
شکل ۱۵- حداقل و حداکثر دامنه جریان عبوری از شاخه‌های ADN در سناریو دوم



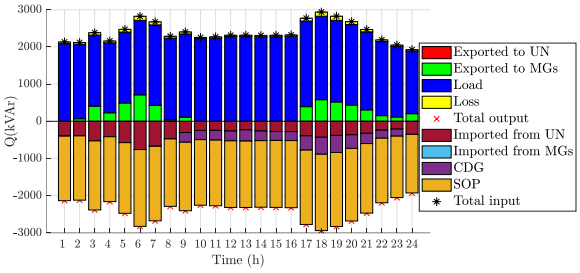
شکل ۱۶- سهم SOPها و شاخه‌ها در تلفات ADN در سناریو دوم



شکل ۱۷- برنامه‌ریزی تولید CDGها در سناریو دوم



شکل ۱۸- برنامه‌ریزی توان اکتیو ADN در سناریوی دوم



شکل ۱۹- برنامه‌ریزی توان راکتیو ADN در سناریوی دوم

مقایسه نتایج

در جدول ۳ نتایج به‌دست‌آمده از دو سناریوی با و بدون SOP از دید اقتصادی با هم مقایسه شده‌اند. در هر دو سناریو، میزان فروش انرژی به مشترکین و همچنین تبادلات انرژی میان ADN و ریزشبکه‌ها یکسان هستند؛ زیرا برنامه‌ریزی تبادلات انرژی میان ADN و ریزشبکه‌ها و همچنین میزان فروش انرژی به مشترکین به ترتیب توسط خود ریزشبکه‌ها و مشترکین تعیین می‌شود و تابع در مدار بودن SOPها نیست.

بر اساس نتایج جدول ۳، ADN در سناریوی دوم (در حضور SOPها) میزان خرید انرژی از UN (C_{UN}) را حدود ۲۲ درصد افزایش داده و از ۱۱۱۱۵ دلار در سناریوی اول به ۱۳۵۳۶ دلار رسانده است. همچنین، در این سناریو، ADN صدور انرژی به UN را متوقف کرده که به دنبال آن درآمد ۱۰۰۷ دلاری حاصل از فروش انرژی به UN (R_{UN}) را از دست داده است. بااین‌حال، به دنبال افزایش ورود انرژی از UN در سناریوی دوم، هزینه‌ی تولید CDGها بیش از ۶۷ درصد کاهش‌یافته و از ۸۲۶۰ دلار به ۲۷۶۰ دلار رسیده است. بناب؛ ین، افزایش ورود انرژی از UN و به دنبال آن کاهش تولید CDGهای محلی باعث افزایش ۲۱۲۶ دلاری سود ADN در حضور SOPها شده است. همچنین، حضور SOPها باعث شده که هزینه تلفات انرژی در ADN بیش از ۳۵ درصد کاهش‌یافته و از ۱۰۰۴ دلار به ۶۴۹ دلار برسد. در حالت کلی، سود ADN در حضور SOPها برابر ۱۰۲۸۰ دلار می‌رسد که حدود ۳۲ درصد از حالت بدون SOP بیشتر است.

جدول ۳- مقایسه هزینه‌ها و درآمد ADN در دو سناریو با و بدون SOP (نتایج برحسب دلار)

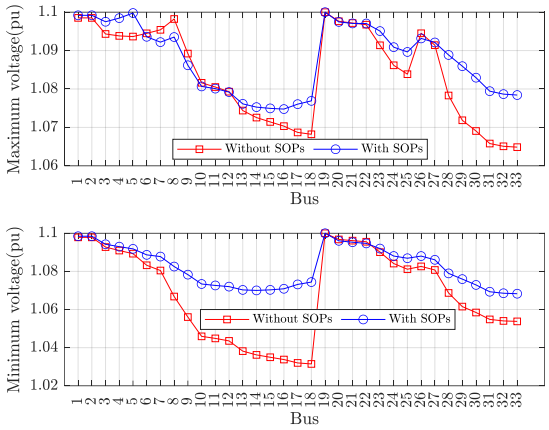
سناریو	C_{UN}	R_{UN}	C_M	R_M	R_C	C_{CDG}	C_L	Pr
اول: بدون SOP	۱۱۱۱۵	۱۰۰۷	۸۳۱	۱۶۵۵	۲۶۳۴۸	۸۲۶۰	۱۰۰۴	۷۷۹۹
دوم: با SOP	۱۳۵۳۶	۰	۸۳۱	۱۶۵۵	۲۶۳۴۸	۲۷۰۶	۶۴۹	۱۰۲۸۰

۴-۳- برنامه‌ریزی ADN در حالت جزیره‌ای

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در حالت جزیره‌ای، در این بخش فرض شده که اتصال میان ADN با UN قطع می‌باشد. در جدول ۴ نتایج برنامه‌ریزی ADN در وضعیت جزیره‌ای در دو حالت با و بدون وجود SOPها با هم مقایسه شده است.

جدول ۴- مقایسه هزینه‌ها و درآمد ADN در حالت قطع UN (نتایج برحسب دلار)

وجود SOP	C_{UN}	R_{UN}	C_M	R_M	R_C	C_{CDG}	C_L	Pr
بدون SOP	۰	۰	۸۳۱	۱۶۵۵	۲۶۳۴۸	۳۸۹۰۵	۲۰۹۴	-۱۳۸۲۷
با SOP	۰	۰	۸۳۱	۱۶۵۵	۲۶۳۴۸	۳۵۹۹۳	۳۰۹	-۹۱۳۰



شکل ۲۰- برنامه‌ریزی تولید CDGها در سناریو دوم

همان‌گونه که در این جدول نشان داده شده، مجموع سود خالص ADN در حالت‌های با و بدون SOP در وضعیت جزیره‌ای (قطع UN) به ترتیب برابر ۹۱۳۰- و ۱۳۸۲۷- دلار می‌باشد. بر اساس این نتایج، وجود SOPها باعث شده که زیان ADN در حالت قطع UN به‌اندازه ۳۳/۹۷٪ درصد (معادل ۴۶۹۷ دلار) کاهش پیدا کند. جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در تعیین بهینه‌ی برنامه‌ریزی روز پیشرو ADN همراه با رعایت قیود فنی، حداقل و حداکثر دامنه‌ی ولتاژ شین‌ها در وضعیت جزیره‌ای در دو حالت با و بدون وجود SOPها در شکل ۲۰ ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل نمایان است، حداقل و حداکثر دامنه‌ی ولتاژ تمامی ۳۳ شین ADN در تمام افق برنامه‌ریزی در محدوده‌ی مجاز از پیش تعیین شده، یعنی بین ۰/۹ الی ۱/۱ پریونیت قرار گرفته‌اند. این نتایج، کارایی روش پیشنهادی در برنامه‌ریزی ADN در حالت جزیره‌ای را تأیید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جامع برای تعیین برنامه‌ریزی عملکردی ADN در حضور SOPها با در نظر گرفتن تبادلات انرژی با MGها و UN ارائه شده است. کارایی روش پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی‌هایی بر روی یک ADN متصل به دو ریزشبکه در دو سناریوی با و بدون حضور SOPها در شبکه ارزیابی شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، با تعیین برنامه‌ریزی بهینه ADN با مدل پیشنهادی، سود ADN بیش از ۳۱/۸ درصد نسبت به حالتی که SOPها در شبکه حضور ندارند، افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با کنترل بهینه SOPها می‌توان هزینه تلفات ADN را بیش از ۳۵/۳ درصد کاهش داد. حفظ پروفایل ولتاژ ADN با در نظر گرفتن تبادلات انرژی میان ADN و MGها و همچنین میان ADN و UN از قابلیت‌های دیگر روش پیشنهادی است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، روش برنامه‌ریزی پیشنهادی می‌تواند دامنه ولتاژ شین‌ها را در محدوده مجاز حفظ کند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با استفاده از قابلیت تزریق توان راکتیو توسط مبدل‌های الکترونیکی SOPها می‌توان حداقل دامنه ولتاژ شین‌های ADN را از ۰/۹ پریونیت به ۰/۹۴ پریونیت افزایش داد. در این مقاله، عدم قطعیت‌های مربوط به میزان تولید منابع تجدیدپذیر و همچنین قیمت برق و میزان بار مصرفی مشترکین ADN در نظر گرفته نشده است. مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها به‌عنوان ادامه‌ی کار این مقاله پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1] A. P. Hota and S. Mishra, "A branch oriented active power loss allocation method for radial distribution networks with distributed generators," *Scientia Iranica*, pp. -, 2020.

[2] F. Separi, A. Sheikholeslami, and T. Barforoshi, "Risk-Based Optimal Decision-Making by the Retailer in A Mixed Local and Wholesale Market Environment Considering Demand Response Solution," *Scientia Iranica*, pp. -, 2021.

[3] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "A non-hierarchical ATC framework for parallel scheduling of active distribution network with multiple autonomous microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 133, p. 107293, 2021/12/01/ 2021.

[۴] حسین نظام آبادی و مهرداد ستایش نظر، "بهره برداری بهینه شبکه توزیع فعال در بازار انرژی، رزروچرخان و توان راکتیو با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴- شماره پیاپی ۷۸، اسفند ۱۳۹۵، صفحه ۳۴۳-۳۳۱.

[5] Y. Gilasi, S. H. Hosseini, and H. Ranjbar, "Resiliency-oriented optimal siting and sizing of distributed energy resources in distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 208, p. 107875, 2022/07/01/ 2022.

[6] S. Souri, H. M. Shourkaei, S. Soleymani, and B. Mozafari, "Flexible reactive power management using PV inverter overrating capabilities and fixed capacitor," *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 107927, 2022/08/01/ 2022.

[7] M. Doostizadeh, M. R. Shakarami, and H. Bastami, "Decentralized energy trading framework for active distribution networks with multiple microgrids under uncertainty," *Scientia Iranica*, vol. 26, pp. 3606-3621, 2019.

[8] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "A decentralized cooperative framework for multi-area active distribution network in presence of inter-area soft open points," *Applied Energy*, vol. 300, p. 117416, 2021/10/15/ 2021.

[9] H. Bastami, M. R. Shakarami, and M. Doostizadeh, "Optimal scheduling of a reconfigurable active distribution network with multiple autonomous microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 201, p. 107499, 2021/12/01/ 2021.

[10] H. Ranjbar and A. Safdarian, "A Robust Model for Daily Operation of Grid-connected Microgrids During Normal Conditions," *Scientia Iranica*, vol. 28, pp. 3480-3491, 2021.

[11] A. Mehrbakhsh, S. Javadi, M. H. Aliabadi, and H. Radmanesh, "A robust optimization framework for scheduling of active distribution networks considering DER units and demand response program," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, p. 100708, 2022/03/31/ 2022.

[12] R. Asad and A. Kazemi, "A Novel Practical Fair Nodal Price for DC Microgrids and Distribution Systems," *Scientia Iranica*, vol. 21, pp. 2232-2242, 2014.

[۱۳] رضا ابولی، مریم رمضانی و حمید فلقی، "مدلی ترکیبی از بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت روز پیشرو شبکه‌های توزیع فعال"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۹، شماره ۳-شماره پیاپی ۸۹، آذر ۱۳۹۸، صفحه ۹۶۴-۹۴۹.

[14] M. R. Sandgani and S. Sirouspour, "Energy Management in a Network of Grid-Connected Microgrids/Nanogrids Using Compromise Programming," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 2180-2191, 2018.

[15] A. Jahani, K. Zare, L. M. Khanli, and H. Karimipour, "Optimized Power Trading of Reconfigurable Microgrids in Distribution Energy Market," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 48218-48235, 2021.

[16] H. Nezamabadi and V. Vahidinasab, "Micro-grids bidding Strategy in a Transactive energy market," *Scientia Iranica*, vol. 26, pp. 3622-3634, 2019.

[17] M. Doostizadeh, M. R. Shakarami, and H. Bastami, "Decentralized energy trading framework for active distribution networks with multiple microgrids under uncertainty(Invited Paper)," *Scientia Iranica*, vol. 26, pp. 3606-3621, 2019.

[18] H. Fateh, S. Bahramara, and A. Safari, "Modeling operation problem of active distribution networks with retailers and microgrids: A multi-objective bi-level approach," *Applied Soft Computing*, vol. 94, p. 106484, 2020/09/01/ 2020.

[19] Z. Zhu, K. Wing Chan, S. Bu, B. Zhou, and S. Xia, "Real-Time interaction of active distribution network and virtual microgrids: Market paradigm and data-driven stakeholder behavior analysis," *Applied Energy*, vol. 297, p. 117107, 2021/09/01/ 2021.

[20] I. Wasiak, M. Szypowski, P. Kelm, R. Mieński, A. Wędzik, R. Pawełek, *et al.*, "Innovative energy management system for low-voltage networks with distributed generation based on prosumers' active participation," *Applied Energy*, vol. 312, p. 118705, 2022/04/15/ 2022.

[21] Y. Zhou and J. Zhang, "Three-layer day-ahead scheduling for active distribution network by considering multiple stakeholders," *Energy*, vol. 207, p. 118263, 2020/09/15/ 2020.

[22] J. Zhang, Y. Zhou, Z. Li, and J. Cai, "Three-level day-ahead optimal scheduling framework considering multi-stakeholders in active distribution networks: Up-to-down approach," *Energy*, vol. 219, p. 119655, 2021/03/15/ 2021.

[23] B. V. S. Vardhan, M. Khedkar, and I. Srivastava, "Effective energy management and cost effective day ahead scheduling for distribution system with dynamic market participants," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, p. 100706, 2022/03/23/ 2022.

[24] H. Kiani, K. Hesami, A. Azarhooshang, S. Pirouzi, and S. Safaee, "Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, p. 100476, 2021/06/01/ 2021.

[۲۵] سید احسان احمدی و نوید رضایی، "برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌های متصل‌به‌هم با استفاده از سیستم مدیریت انرژی توزیع‌شده"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۵۰، شماره ۴-شماره پیاپی ۹۴، اسفند ۱۳۹۹، صفحه ۱۴۷۴-۱۴۶۳.

[۲۶] حسین سبحانی، سعید حسنوند و میثم دوستی‌زاده، "کنترل ولتاژ شبکه هوشمند به روش سلسله‌مراتبی و توزیع‌شده برخط"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۵۰، شماره ۴-شماره پیاپی ۹۴، اسفند ۱۳۹۹، صفحه ۱۶۲۵-۱۶۱۳.

[27] K. Zhou, S. Wei, and S. Yang, "Time-of-use pricing model based on power supply chain for user-side microgrid," *Applied Energy*, vol. 248, pp. 35-43, 2019/08/15/ 2019.

[28] P. Li, H. Ji, C. Wang, J. Zhao, G. Song, F. Ding, *et al.*, "Coordinated Control Method of Voltage and Reactive Power for Active Distribution Networks Based on Soft Open Point," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, pp. 1430-1442, 2017.

[29] I. M. Diaaeldin, S. H. E. Abdel Aleem, A. El-Rafei, A. Y. Abdelaziz, and A. F. Zobaa, "Enhancement of Hosting Capacity with Soft Open Points and Distribution System Reconfiguration: Multi-Objective Bilevel Stochastic Optimization," *Energies*, vol. 13, 2020.

[30] M. Farivar and S. H. Low, "Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part I," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 2554-2564, 2013.

[31] J. Lofberg, "YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB," in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*, 2004, pp. 284-289.

[32] H. Y. Benson and Ü. Sağlam, "Mixed-integer second-order cone programming: A survey," in *Theory Driven by Influential Applications*, ed: INFORMS, 2013, pp. 13-36.