برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده با در نظر گرفتن سیاست‌های حمایتی سیاست‌گذار

علیرضا شیخی فینی، محسن پارسامقدم و محمدکاظم شیخ‌الاسلامی

چکیده: این مقاله چارچوبی را بر مبنای برنامه‌ریزی دینامیکی و تئوری بازی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید منابع انرژی گسترده از دیدگاه سرمایه‌گذار ارائه می‌دهد. در چارچوب ارائه‌شده، جنبه‌ها و ویژگی‌های مختلف برنامه‌ریزی این منابع از جمله عدم قطعیت، ریسک و سایر خصوصیات آنها مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه منابع بادی، گازی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به عنوان منابع انرژی گسترده در نظر گرفته شده‌اند. عدم قطعیت‌های منابع بادی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار سبب می‌شود تا سرمایه‌گذاران این منابع دچار ریسک گردند و برای چیره‌شدن بر این مشکلات مدل اصلاح‌شده‌ای ارائه شده تا اثرات مداخلات سیاست‌گذار را بر توسعه منابع بادی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارزیابی نماید. این کار با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی دینامیکی انجام پذیرفته و در هر مرحله از این برنامه‌ریزی، تعادل نش با استفاده از مدل کارنو محاسبه شده است. مدل ارائه‌شده عدم قطعیت ذاتی در تولید منابع بادی، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و عدم قطعیت در قیمت برق و سوخت را پوشش داده و می‌تواند حالت بهینه سرمایه‌گذاری در این منابع را ارائه نماید. برای نشان‌دادن مؤثربودن روش پیشنهادی، این روش بر روی یک شبکه نمونه اجرا شده است.

کلید واژه: **برنامه‌ریزی دینامیکی، تئوری بازی، سیاست‌های حمایتی، منابع انرژی گسترده.**

۱- مقدمه

ویژگی‌های خاص منابع انرژی گسترده مانند امکان ساخت در مقیاس‌های کوچک، راحتی جانمایی با توجه به اندازه کوچک، زمان ساخت و هزینه سرمایه‌گذاری کم، حذف هزینه توسعه خطوط انتقال و بازدهی مطلوب، از مهم‌ترین دلایل گرایش به استفاده از منابع انرژی گسترده است. علاوه بر این با توجه به اثرات زیست‌محیطی این منابع در کاهش گازهای گلخانه‌ای و برآورده‌کردن سیاست‌های مربوط به امنیت منابع انرژی در سطح ملی مانند تنوع‌بخشیدن به بخش تولید انرژی الکتریکی، این منابع را برای سیاست‌گذاران نیز جذاب کرده است.

یکی از مباحث مهمی که در بحث توسعه منابع انرژی گستره باید به آن پرداخته شود، عدم قطعیت‌های بازار برق می‌باشد. در محیط پرریسک و رقابتی بازار، مداخله سیاست‌گذار و حمایت از این منابع ضروری به نظر می‌رسد و می‌تواند به توسعه منابعی نظیر منابع تجدیدپذیر، منابع پاسخ‌گویی بار، منابع تولید هم‌زمان برق و گرما و نظایر آن کمک نماید به گونه‌ای که آنها را با منابع سنتی تولید برق قابل رقابت کند.

برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده عبارتست از یافتن نقطه بهینه نوع فناوری، ظرفیت، محل و زمان نصب آنها. مطالعات انجام‌شده در این زمینه در محیط سنتی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول تحقیقاتی هستند که صرفاً با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی، منابع انرژی گسترده را به گونه‌ای توسعه داده‌اند که مجموع ظرفیت نصب‌شده، پاسخ‌گوی بار پیش‌بینی باشد و عمده‌ترین قید در نظر گرفته شده عبارتست از حفظ قابلیت اطمینان سیستم در یک سطح قابل قبول و در نظر گرفتن قیود فنی شبکه و منابع انرژی [۱] تا [۷]. دسته دوم شامل تحقیقاتی هستند که با انجام یک بهینه‌سازی چندهدفه، علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌های توسعه تولید، تلفات و یا تأمین توان از شبکه بالادست، اهداف دیگری مانند حداکثرنمودن قابلیت اطمینان سیستم [۸] تا [۱۰] و یا اهداف زیست‌محیطی [۱۱] را دنبال می‌نمایند.

در محیط تجدید ساختار یافته، هدف سرمایه‌گذاران، حداکثرسازی سود در بازه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری است. تحلیل برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی در محیط بازار نیازمند مدل‌سازی مسأله بهینه‌سازی به صورت غیر همکارانه است زیرا مسأله توسعه منابع تولید در محیط تجدید ساختار یافته دارای چندین تصمیم‌گیرنده است که ممکن است از منافع متضادی برخوردار باشند. یکی از بهترین ابزارها برای مدل‌سازی این شرایط تئوری بازی است. در محیط تجدید ساختاریافته، سیاست‌گذار سیاست‌های حمایتی را تنظیم می‌نماید و سرمایه‌گذاران برای دستیابی به سود، به سرمایه‌گذاری در توسعه منابع انرژی گسترده مبادرت می‌ورزند. مرجع [۱۲] از روش ابتکاری و از راه تحلیل اقتصادی برای یافتن اندازه بهینه و محل منابع تولید پراکنده از دید سرمایه‌گذار استفاده نموده و [۱۳] تا [۱۶] توسعه منابع تولید پراکنده را در حضور عدم قطعیت‌ها انجام داده‌اند. در این مطالعات برای ترغیب سرمایه‌گذاران برای سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر حمایت‌هایی نیز در نظر گرفته شده لیکن منابع پاسخ‌گویی بار که یک منبع از سمت مصرف و با ویژگی‌های متفاوت نسبت به سایر منابع انرژی پراکنده است، باید در مطالعات مربوط به توسعه منابع انرژی گسترده در نظر گرفته شود.

نوآوری اصلی این مقاله ارائه یک چارچوب ابتکاری بر اساس ترکیب روش برنامه‌ریزی دینامیک و تئوری بازی برای مطالعه اثرات سیاست‌های حمایتی سیاست‌گذار روی رفتار دینامیک سرمایه‌گذاران است. برنامه‌ریزی دینامیکی برای حل مسأله بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری ارائه گردیده و از تئوری بازی برای مدل‌سازی تعامل راهبردی بین بازیگران بازار استفاده شده و نقطه تعادل نش در هر مرحله از برنامه‌ریزی دینامیکی محاسبه می‌شود. نوآوری دیگر این مقاله بررسی تأثیر مداخلات سیاست‌گذار روی دینامیک رفتار سرمایه‌گذاران در برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده می‌باشد. در این مقاله تأثیر سیاست‌های حمایتی بر روی نحوه توسعه منابع و تأثیر متقابلی که این حمایت‌ها بر نرخ نفوذ و توسعه منابع دیگر

این مقاله در تاریخ ۱۵ آبان ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۲۲ خرداد ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

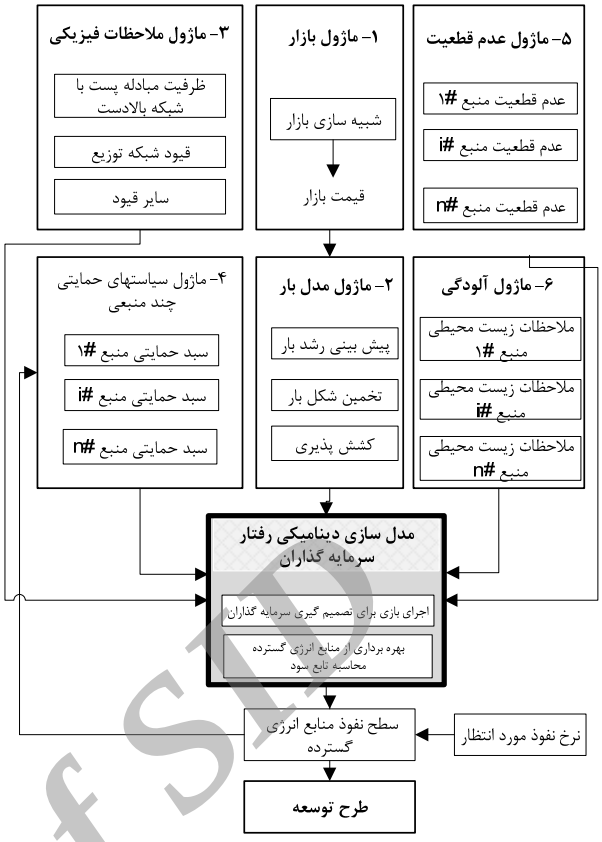
علیرضا شیخی فینی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: arshf2@ieee.org).

محسن پارسامقدم (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: parsa@modares.ac.ir).

محمدکاظم شیخ‌الاسلامی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: aleslam@modares.ac.ir).

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱: چارچوب ماژولار برای مسأله توسعه منابع انرژی گسترده.

می‌گذارند بررسی شده است. چارچوب ارائه‌شده این امکان را فراهم می‌آورد که برای هر نوع منبع با هر مشخصه و هر نوع سیاست حمایتی تجزیه و تحلیل صورت پذیرد.

در بخش ۲ چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده ارائه شده و در بخش ۳ منابع انرژی گسترده و خصوصیات آنها توضیح داده شده است. تأثیر سیاست‌های حمایتی بر مسأله توسعه منابع انرژی گسترده در بخش ۴ آمده و بخش ۵ به مطالعات عددی و تحلیل نتایج اختصاص یافته و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- چارچوب برنامه‌ریزی منابع انرژی گسترده از دیدگاه سرمایه‌گذار

در این بخش چارچوبی برای مسأله برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری منابع انرژی گسترده از دیدگاه سرمایه‌گذار ارائه شده که این چارچوب ماژولار در شکل ۱ نشان داده شده و شامل ۶ بلوک می‌باشد. ایده طراحی ماژولار بر مبنای تنوع در ماهیت منابع انرژی گسترده شکل گرفته و بنابراین چارچوب برنامه‌ریزی بسیار انعطاف‌پذیر بوده و با الگوریتم پیشنهادی، هر نوع منبع با هر ویژگی قابل ورود به مسأله برنامه‌ریزی خواهد بود.

بلوک‌های ۱ تا ۶ ورودی‌های مسأله بهینه‌سازی است. قیمت بازار به عنوان خروجی شبیه‌سازی بازار، ورودی ماژول "مدل‌سازی بار" و برنامه بهینه‌سازی است و برای این که سرمایه‌گذاران بتوانند برای سرمایه‌گذاری تصمیم درستی اتخاذ نمایند، باید سیگنال قیمت درستی را دریافت نمایند. بلوک ۲ نشان‌دهنده مدل‌سازی بار و بلوک سوم بیانگر تمام قیودی است که در شبکه و بازار وجود دارد و بلوک ۴ شامل ماژول سیاست‌های حمایتی چندمنبعی سیاست‌گذار[1] می‌باشد. از آنجا که برخی منابع از نظر اقتصادی ممکن است قابل رقابت با سایر منابع نباشند، بنابراین برای ترغیب به سرمایه‌گذاری بر روی این منابع بایستی مشوق‌هایی به این سرمایه‌گذاران داده شود. عدم قطعیت‌های موجود در مسأله از جمله عدم قطعیت‌های تولید منابع در بلوک ۵ آورده شده است. در بلوک ۶ ماژول آلودگی برای در نظر گرفتن جریمه (یا اعمال هر سیاست دیگری) به واحدهای آلاینده قرار داده شده است. از آنجا که هدف هر سرمایه‌گذار بیشینه‌کردن سود خود است، درآمد هر سرمایه‌گذار در طول دوره بهره‌برداری باید محاسبه گردد که خود نیازمند محاسبه قیمت برق در هر مرحله از برنامه‌ریزی دینامیکی است. برای محاسبه قیمت برق، تحلیل نقطه تعادل صورت می‌گیرد و در آن از تئوری بازی برای مدل‌سازی رفتار استراتژیک بازیگران استفاده خواهد شد. در صورتی که نرخ نفوذ منبعی به میزان معینی که از پیش تعریف شده نرسد، بازخورد اصلاحی برای تغییر سیاست حمایتی تا آنجا ادامه داده می‌شود که هدف دستیابی شود. خروجی این چارچوب عبارتست از میزان توسعه هر یک از منابع انرژی گسترده و میزان تشویقی اعطاشده به هر یک از سرمایه‌گذاران (در اینجا واحدهای بادی) و میزان جریمه و پاداش برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار.

۳- مشخصات منابع انرژی گسترده

۳-۱ سبد منابع

همان گونه که عنوان شد، منابع انرژی گسترده‌ای که سیاست‌گذاران در پی توسعه آنها هستند عبارتست از منابع تولید پراکنده سوخت فسیلی و تجدیدپذیر، منابع ذخیره‌ساز انرژی و برنامه‌های مدیریت سمت مصرف. هر یک از این منابع دارای ویژگی منحصر به فردی می‌باشد، به عبارتی هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری، قابلیت اطمینان، طول عمر مفید و سطح پیشرفت تکنولوژیکی هر منبع ممکن است بسیار متفاوت از منابع دیگر باشد. سؤال این است که بهترین ترکیب برای توسعه این منابع متنوع و متفاوت در کنار یکدیگر چگونه خواهد بود. در این مقاله منابع بادی، واحدهای تولید پراکنده گازی و پاسخ‌گویی بار به عنوان سبد منابع انرژی گسترده در نظر گرفته شده است.

۳-۲ عدم قطعیت منابع انرژی گسترده

علاوه بر عدم قطعیت‌هایی که در یک محیط تجدید ساختار یافته وجود دارد، هنگامی که منابع انرژی گسترده در یک شبکه حضور داشته باشند، عدم قطعیت‌های مربوط به تولید این منابع نیز زیاد خواهد بود. از آنجا که منبع ورودی اکثر منابع انرژی تجدیدپذیر احتمالاتی هستند، تولید این واحدها نیز احتمالاتی بوده و بسته به دقت پیش‌بینی ورودی این منابع، خروجی تولید آنها نیز ممکن است از عدم قطعیت بالایی برخوردار باشند. از جمله مشکلاتی که ممکن است به خاطر این عدم قطعیت‌ها پیش بیاید، عدم ایجاد تعادل بین تولید و بار خواهد بود. به دلیل ماهیت تصادفی باد، تولید واحدهای بادی نیز به صورت تصادفی مدل می‌گردد.

برای مدل‌سازی تولید منابع بادی در این مسأله هر سال به چهار فصل تقسیم شده و به داده‌های موجود تابع توزیع ویبال با میانگین μ و انحراف معیار σ برازش شده است. تابع توزیع احتمال به S_N سناریو با طول $۶\sigma/S_N$ تقسیم شده که احتمال هر حالت (Prob_i) را می‌توان به صورت (۱) نوشت

$$\mathrm{Prob}_i = \int_{WS_i}^{WS_{i+1}} f_v(V)\mathrm{d}V \ , \ i = ۱,\ldots,S_N \qquad (۱)$$

1. Multi-Resource Regulatory Support Schemes

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱: سیاست‌های جهانی حمایت از منابع انرژی گسترده.

نوع منبع	سیاست حمایتی							
	FIT[1]	سهم مشخص[2]	وام[3]	مالیات[4]	تأمین مالی اوراق قرضه[5]	پاداش عدم تولید کربن[6]	پاداش بر مبنای قیمت برق[7]
بادی	❋	❋	❋	❋	❋	❋	❋
پاسخ‌گویی بار							❋

که $f_v(V)$ تابع چگالی احتمال و WS_i سرعت باد در سناریوی iام است. توان خروجی منبع بادی بر حسب سرعت باد متغیر بوده و در (۲) نشان داده شده است

$$PW_i = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \le WS_i \le V_r \text{ or } WS_i \ge V_{co} \\ P_r(A + B \cdot WS_i + C \cdot WS_i^2) & , \quad V_c \le WS_i \le V_r \\ P_r & , \quad V_r \le WS_i \le V_{co} \end{cases} \quad (۲)$$

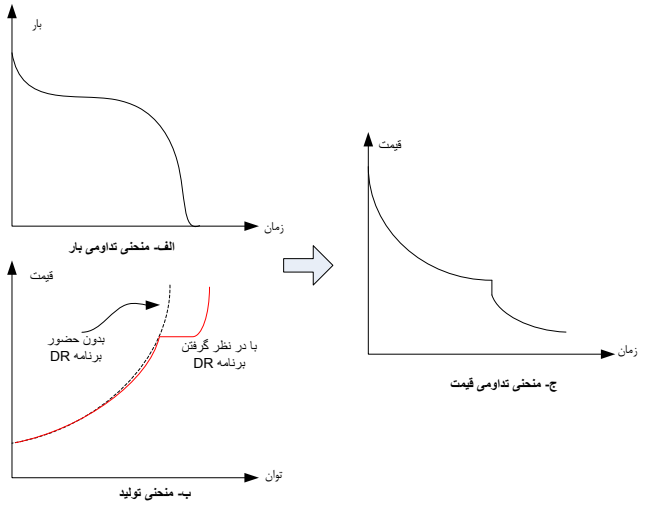
که مقادیر A، B و C ثابت هستند و بر اساس روابط Karki در [۱۷] محاسبه می‌شوند. V_r سرعت نامی و V_c و V_{co} به ترتیب عبارتند از حداقل و حداکثر سرعت بادی بر حسب متر بر ثانیه که منبع بادی قادر به تولید توان خروجی است. P_r عبارتست از توان نامی منبع بادی و PW_i توان تولیدی منبع بادی در سناریوی iام بر حسب مگاوات است.

برای مدل‌سازی عدم قطعیت منابع پاسخ‌گویی بار، مشترکین به دسته‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند و رفتار هر دسته از مصرف‌کنندگان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای هر دسته از مشترکین پارامترهای مهم از قبیل تعدادی که در برنامه شرکت کرده‌اند یا تعدادی که ثبت نام کرده و یا انصراف داده‌اند در نظر گرفته می‌شود. پتانسیل شرکت در بازار مشترکین برای هر دسته‌بندی به صورت احتمالاتی پیش‌بینی می‌شود $(N_{b,ns,h})$ و میزان شرکت مشترکین در قراردادهای برنامه پاسخ‌گویی بار از داده‌های تاریخی به دست می‌آید. عدم قطعیت نسبتاً بالا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان ظرفیت داشته باشد و میزان شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار ممکن است به علت ثبت نام یا انصراف‌های متعدد هر سال تغییر نماید. از روی داده‌های سال‌های گذشته که در یک بازار ثبت شده ضریبی به دست آورده می‌شود تا در تابع سود ضرب گردد. تعداد واقعی شرکت‌کنندگان در برنامه از (۳) به دست می‌آید [۱۸]

$$\tilde{N}_{b,ns,h} = N_{b,ns,h} \cdot Pf_{b,ns,h} \cdot (1 - drop_{b,ns,h}) \quad (۳)$$

که در آن $Pf_{b,ns,h}$ ضریب شرکت مشترکین در برنامه و $drop_{b,ns,h}$ میزان انصراف از برنامه در هر کلاس از مشترکین به ازای فصل و سطح بار مشخص است. لازم به ذکر است که (۳) یک رابطه ساده برای مدل‌سازی عدم قطعیت است و روابط دقیق‌تر در مطالعات آینده استخراج خواهد شد.

1 Feed in Tariff
2 Quato
3 Loan
4 Tax Credit
5 Bond Financing
6 No Carbon Reward
7 MCP Based Incentive



شکل ۲: شکل‌گیری قیمت در بازار با در نظر گرفتن منابع پاسخ‌گویی بار.

۳-۳ سیاست‌های حمایت از منابع انرژی گسترده

همان گونه که ذکر شد، مشخصات و ویژگی‌های منابع انرژی گسترده از جمله هزینه سرمایه‌گذاری، منبع ورودی، آلایندگی و عدم قطعیت این منابع متفاوت از یکدیگر است، از این رو حمایت از آنها نیز باید متفاوت باشد و از طرفی توسعه این منابع به شدت وابسته به مکانیزم‌های تشویقی است. به منظور افزایش نرخ نفوذ منابع انرژی گسترده، مکانیزم‌های حمایتی متنوعی در بازارهای مختلف ایجاد شده که به طور خلاصه در جدول ۱ آمده است [۱۱]. در این مقاله سیاست حمایتی لازم برای توسعه منابع به دست خواهد آمد، لیکن حمایت از هر منبع روی نرخ نفوذ منابع دیگر تأثیر خواهد گذاشت. مدل‌سازی تأثیرات متقابل سیاست‌های حمایتی بر روی نرخ نفوذ منابع دیگر و همچنین میزان حمایت هر منبع به کمک ترکیب پیشنهادی قابل بررسی خواهد بود.

۴-۳ مدل‌سازی شکل‌گیری قیمت برق

در این مقاله فرض می‌شود بازار برق کاملاً رقابتی است، به عبارت دیگر صاحبان منابع انرژی گسترده، قیمت‌پذیرند و تحت این شرایط، قیمت برق در هر لحظه از زمان برابر هزینه حاشیه‌ای گران‌ترین منبع خواهد بود. با مرتب‌سازی صعودی این هزینه‌های حاشیه‌ای، منحنی تولید بر اساس مجموع ظرفیت تولید در هر لحظه به دست می‌آید و از تلاقی منحنی تداومی بار با منحنی تولید، منحنی تداومی قیمت به دست خواهد آمد [۱۹]. در یک دوره مشخص، منحنی تداومی قیمت بیانگر تعداد ساعاتی است که در آن یک قیمت بازار مشخص بزرگ‌تر یا مساوی قیمت در منحنی تولید باشد. شکل ۲ یک منحنی تداومی قیمت نمونه را نشان می‌دهد که این قیمت به عنوان سیگنال بازار برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری به کار می‌رود.

۴- مدل‌سازی تأثیر سیاست‌های حمایتی بر مسأله توسعه منابع انرژی گسترده

به دلیل طبیعت پویای مسأله سرمایه‌گذاری از روش برنامه‌ریزی پویا در این مقاله استفاده شده و همچنین در این مدل، ویژگی‌های چندمرحله‌ای تصمیم‌گیری و عدم قطعیت تولید منابع در نظر گرفته شده است. روابط ریاضی حاکم بر مسأله در این بخش ارائه گردیده و همچنین تأثیر سیاست‌های سیاست‌گذار در روابط مذکور نیز بیان شده است. در محیط تجدید ساختار یافته لازم است مسأله توسعه تولید منابع انرژی گسترده به

Archive of SID
www.SID.ir

صورت یک مسأله بیشینه‌سازی سود غیر همکارانه مدل شود. به این علت که در این محیط، تصمیم‌گیران متعددی وجود دارند که با یکدیگر در حال رقابت هستند و با محیط سنتی که فقط یک تصمیم‌گیر دارد کاملاً متفاوت است. بنابراین تصمیمی که به وسیله یک سرمایه‌گذار گرفته می‌شود نه تنها بر سود خودش تأثیر دارد بلکه بر سود سایر بازیگران نیز اثر می‌گذارد. از این رو این مسأله برنامه‌ریزی را باید به صورت بازی غیر همکارانه مدل کرد. در این تحقیق از روش شناخته‌شده نش- کارنو برای مدل‌سازی رفتار بازار استفاده شده است. در این مدل، رقابت فقط روی مقدار انجام می‌شود، محصول قابل ذخیره‌سازی نیست، هیچ منبعی در هنگام اجرای بازی به مسأله اضافه نمی‌شود و تصمیم‌گیری رقبا هم‌زمان انجام می‌شود. با شروع بازی، هر بازیگر سطح تولید خود را به منظور بیشینه‌کردن سود خود انتخاب می‌نماید و فرض می‌کند که تولید سایر بازیگران تغییر نمی‌کند. در این مدل، مسأله بیشینه‌سازی سود باید برای تمام بازیگران هم‌زمان اجرا گردد.

۴-۱ بهینه‌سازی مسأله سرمایه‌گذاری

مسأله سرمایه‌گذاری در (۴) تا (۶) معرفی شده است. تابع هدف با (۴) نشان داده شده که نشان‌دهنده سود سرمایه‌گذار در طول دوره مطالعه می‌باشد. همان گونه که آمده است، این سود تابعی از میزان توان تولیدی تکنولوژی j ام (P_j) و میزان بار در لحظه t $(d(t))$ است. معادله (۵) بردار ظرفیت را برای هر دوره زمانی t برای هر منبع نشان می‌دهد و رابطه (۶) تغییرات سالانه بار را بیان می‌کند

$$\max \sum_{t=0}^{T}[(1+r)^{-t}\cdot \text{Profit}_j(t,P_j(t),d(t))] \quad (۴)$$

$$P_j(t+1)=P_j(t)+U_j(t+1) \quad (۵)$$

$$d(t+1)=d(t)+\Delta d(t) \quad (۶)$$

که در آن r نرخ بهره، U_j میزان ظرفیت پیشنهادی برای نصب در بازه زمانی t و $\Delta d(t)$ میزان تغییرات بار در بازه زمانی t است. برای حل (۴) تا (۶) از روش برنامه‌ریزی دینامیکی پیشرو استفاده شده است. سود انتظاری هر سرمایه‌گذار در هر برهه زمانی از (۷) محاسبه می‌گردد

$$\text{Profit}_j(t)=R_j(t)-C_j(t)=R_j(t)-\sum_{m=1}^{4}C_{mj}(t) \quad (۷)$$

که در آن R_j درآمد j امین تکنولوژی حاصل از فروش برق و درآمد ناشی از دریافت حمایت و C_j هزینه‌های j امین منبع شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، هزینه آلودگی و هزینه مرتبط با تلفات می‌باشد که در ادامه معرفی خواهند شد.

۴-۲ سود ناشی از بازار برق

مسأله بهینه‌سازی کوتاه‌مدت برای هر سرمایه‌گذار در هر مرحله از برنامه‌ریزی دینامیکی با (۸) تا (۴۰) نشان داده شده و (۹) تا (۱۱) درآمد سرمایه‌گذاران را که از بازار برق کسب می‌نمایند، نشان می‌دهد. در (۸) تا (۱۰) درآمد سرمایه‌گذاران منابع در بازار برق و درآمد ناشی از حمایت انجام‌شده آمده است و (۲۳) تا (۲۷) هزینه‌های سرمایه‌گذاری را اعم از هزینه‌های ثابت و متغیر نشان می‌دهد

$$NPV(R_j)=R_j\sum_{t=1}^{T_j}\left(\frac{1+InfR}{1+IntR}\right)^t \quad (۸)$$
$$j\in Tech\ (Gas\ Engine\ or\ Wind)$$

ارزش فعلی درآمد فروش برق و درآمد حاصل از حمایت واحدهای تولیدی عبارتست از (۹) و (۱۰)

$$R_G=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{nlb}\sum_{ns=1}^{s}\sum_{h=1}^{N_h}T_{t,ns,h}\cdot P_{G,i,t,ns,h}\cdot \pi_{t,ns,h} \quad (۹)$$

که در آن $\pi_{t,ns,h}$ قیمت برق در زمان t، فصل n_s و سطح بار h است و $FIT_{W,t}$ تابع حمایت از منابع بادی است.

در این مقاله شرکت توزیع به عنوان سرمایه‌گذار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته شده و درآمد آن از (۱۱) محاسبه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین مزایای به کارگیری منابع انرژی گسترده، به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها می‌باشد و درآمد ناشی از این تعویق با عبارت ΔPV در (۱۱) نشان داده شده است. درآمد دیگر از جریمه مشترکینی به دست می‌آید که در برنامه پاسخ‌گویی بار ثبت نام کرده بودند ولی به آن پاسخ نداده‌اند. هزینه شرکت توزیع در این مسأله عبارتست از تشویقی‌هایی که به مشترکین برای شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار داده می‌شود و با این توصیف، تابع سود شرکت توزیع عبارتست از (۱۱) تا (۱۶)

$$INC(ns,h)=Inc\cdot\pi_{t,ns,h}\cdot(d_{\cdot}(t,ns,h)-d(t,ns,h)) \quad (۱۳)$$

$$PEN(ns,h)=Pen\cdot\pi_{t,ns,h}\cdot(Pcont(t,ns,h)-d(t,ns,h)) \quad (۱۴)$$

$$d(t,ns,h)=P_{W,t,ns,h}+P_{G,t,ns,h} \quad (۱۵)$$

$$\Delta PV=\sum_{l=1}^{M}(PV_l-PV_{l_{New}})=\sum_{l=1}^{M}\left(\frac{Asset_l}{(1+IntR)^{n_l}}-\frac{Asset_l}{(1+IntR)^{n_{lNew}}}\right) \quad (۱۶)$$

که در آن d و $d_{\cdot}$ بار واقعی و بار اولیه سیستم، Inc ضریب پاداش برای شرکت‌کردن مشترکین در برنامه پاسخ‌گویی بار و Pen ضریب جریمه مشترکینی است که در برنامه پاسخ‌گویی بار ثبت نام کرده بودند ولی به آن پاسخ نداده‌اند (در موعد مقرر بار خود را قطع نکرده‌اند).

$$B_W=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{nlb}\sum_{ns=1}^{s}\sum_{h=1}^{N_h}T_{t,ns,h}\cdot\text{Prob}_{i,t,ns,h}\cdot P_{W,i,t,ns,h}\cdot(\pi_{t,ns,h}+FIT_{W,t}) \quad (۱۰)$$

$$R_{Dis}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{nlb}\sum_{ns=1}^{S}\sum_{h=1}^{N_h}T_{t,ns,h}\cdot(-Inc\cdot\pi_{t,ns,h}\cdot(d_{\cdot}(t,ns,h)-d(t,ns,h))+Pen\cdot\pi_{t,ns,h}\cdot(d(t,ns,h)-Pcont(t,ns,h)))\cdot\tilde{N}_{b,ns,h}-\sum_{t=1}^{T}\sum_{ns=1}^{S}\sum_{h=1}^{N_h}T_{t,ns,h}\cdot Ptrade_{t,ns,h}-DRInv+\Delta PV \quad (۱۱)$$

$$d(t,ns,h)=d_{\cdot}(t,ns,h)+\varepsilon\left[\frac{d_{\cdot}(t,ns,h)}{\pi_{\cdot t,ns,h}}(\pi_{t,ns,h}-\pi_{\cdot t,ns,h})+INC(ns,h)+PEN(ns,h)\right] \quad (۱۲)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$Pcont$ میزان توان قراردادی مشترکین برای کاهش در طی برنامه پاسخ‌گویی بار است و مقدار n_l را می‌توان از سطح بار فعلی و نرخ رشد بار و همان گونه که در (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده به دست آورد

$$C_l = D_l \cdot (1+r)^{n_l} \quad (17)$$

$$n_l = \frac{\log C_l - \log D_l}{\log(1+r)} \quad (18)$$

در (۱۸) اجزای (دارایی) شبکه l (مانند مدارها) ظرفیتی برابر C_l دارد و توانی به میزان D_l را تحمل می‌کند. مدت زمان لازم برای تقویت اجزای شبکه عبارتست از تعداد سال‌های لازم که به ازای یک نرخ رشد مشخص بار، ظرفیت شبکه از D_l به C_l ارتقا یابد که در (۱۹) نشان داده شده است [۲۰]. دوره زمانی جدید برای تقویت یکی از اجزای شبکه در حالتی که منابع انرژی گسترده در شبکه توزیع نصب شده باشند با n_{lnew} نشان داده شده و (۲۰) آن را بیان می‌کند

$$PV_l = \frac{Asset_l}{(1+IntR)^{n_l}} \quad (19)$$

$$n_{lNew} = \frac{\log C_l - \log D_{lNew}}{\log(1+r)} \quad (20)$$

هزینه‌های اصلی برنامه پاسخ‌گویی بار عبارتست از هزینه‌های ایجاد زیرساخت و فناوری‌ها و سخت‌افزارهای پیش‌نیاز این برنامه‌ها که با عبارت $DRInv$ در (۱۱) بیان شده است

$$NPV(DRInv) = DRInv \sum_{t=1}^{T_{DR}} \left(\frac{1+InfR}{1+IntR}\right)^t \quad (21)$$

$$NPV(R_{Dis}) = R_{Dis} \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{1+InfR}{1+IntR}\right)^t \quad (22)$$

هزینه هر یک از واحدهای تولید پراکنده عبارتست از هزینه سرمایه‌گذاری به اضافه هزینه بهره‌برداری، هزینه زیست‌محیطی و هزینه جریمه تلفات در خطوط مرتبط با هر تولیدکننده که در (۲۳) تا (۲۸) آمده است

$$C_j = \sum_{m=1}^{4} C_{mj} \quad (23)$$

$$C_{1j} = \sum_{i=1}^{nlb} IC_j \cdot P_{j,i} \quad (24)$$

$$C_{2j} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{nlb} \sum_{ns=1}^{S} \sum_{h=1}^{N_h} T_{t,ns,h} \cdot C_{MWh,j} \cdot P_{j,i,t,ns,h} \quad (25)$$

$$C_{3j} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{nlb} \sum_{ns=1}^{S} \sum_{h=1}^{N_h} T_{t,ns,h} \cdot P_{j,i,t,ns,h} \sum_{k=1}^{3} \omega_k \cdot ER_k \quad (26)$$

$$C_{4j} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{ns=1}^{S} \sum_{h=1}^{N_h} T_{t,ns,h} \cdot \pi_{Loss,t,ns,h} \cdot P_{Loss,j,t,ns,h} \quad (27)$$

$$NPV(C_j) = C_j \sum_{t=1}^{T_j} \left(\frac{1+InfR}{1+IntR}\right)^t \quad (28)$$
$$, \quad j \in Tech\ (Gas\ or\ Wind)$$

که در آن IC_j عبارتست از هزینه سرمایه‌گذاری یک واحد از تکنولوژی j ام و $P_{Loss,j}$ تلفاتی است که توسط واحدهای گازی و واحدهای بادی ایجاد می‌شود. تلفات توان حقیقی با استفاده از روش ضرایب توزیع جابه‌جایی تولید به دست می‌آید [۲۱] و (۲۹) میزان تلفات مرتبط با تولیدکنندگان گازی را نشان می‌دهد. میزان تلفاتی که تولیدکنندگان بادی مسبب آن می‌باشند نیز مانند روابط مربوط به تولیدکنندگان گازی قابل محاسبه است

$$P_{Loss,j} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{ns=1}^{S} \sum_{h=1}^{N_h} T_{t,ns,h} \cdot P_{Loss,j,t,ns,h} \quad (29)$$

$$P_{Loss,j,t,ns,h} = B_{..} + \sum_{i=1}^{nlb} B_{i\cdot} P_{j,i,t,ns,h} + \sum_{i=1}^{nlb} \sum_{m=1}^{nlb} P_{j,i,t,ns,h} \cdot B_{im} \cdot P_{j,m,t,ns,h} \quad (30)$$

$$B_{..} = \sum_{i=1}^{nlb} \sum_{m=1}^{nlb} P_{Di,t,ns,h} \cdot B_{im} \cdot P_{Dm,t,ns,h} \quad (31)$$

$$B_{i\cdot} = -\sum_{m=1}^{nlb} (B_{im} + B_{mi}) P_{Dm,t,ns,h} \quad (32)$$

$$P_{i,t,ns,h} = PG_{i,t,ns,h} - P_{Di,t,ns,h} \quad , \quad i = 1,\ldots,nlb \quad (33)$$

$$B_{im} = \frac{R_{im}}{\left|V_{i,t,ns,h}\right|\left|V_{m,t,ns,h}\right|} \frac{\cos(\theta_{i,t,ns,h} - \theta_{m,t,ns,h})}{\cos\varphi_{i,t,ns,h} \cos\varphi_{m,t,ns,h}} \quad (34)$$
$$i = 1,\ldots,nlb \quad , \quad m = 1,\ldots,nlb$$

$$\theta_{i,t,ns,h} = \delta_{i,t,ns,h} - \varphi_{i,t,ns,h} \quad (35)$$

$$\varphi_{i,t,ns,h} = \tan^{-1} \frac{Q_{i,t,ns,h}}{P_{Di,t,ns,h}} \quad (36)$$

که در آن $B_{..}$، $B_{i\cdot}$ و B_{im} ضرایب تلفات بوده و در (۳۱) تا (۳۴) بیان شده‌اند. $P_{D,i}$ بار حقیقی شینه iام، R_{im} مقاومت خط بین شینه iام و mام، P_i توان تزریقی به شینه iام، $\left|V_i\right|$ دامنه و δ_i زاویه ولتاژ و ضریب توان شینه iام است.

در این مقاله بازی با اطلاعات کامل در نظر گرفته شده و از روش کارنو برای به دست آوردن نقطه تعادل نش استفاده گردیده و قیود مسأله در (۳۶) تا (۳۹) آمده است.

رابطه (۳۷) تعادل توان را نشان می‌دهد

$$Ptrade_{t,ns,h} + \sum_{i=1}^{nlb} (P_{G,i,t,ns,h} + P_{W,i,t,ns,h}) - \sum_{i=1}^{N} \sum_{m=i+1}^{N} \left|P_{im,t,ns,h} - P_{mi,t,ns,h}\right| = d_{\cdot}(t,ns,h) + \sum_{i=1}^{IntLoad} P_{DR,i,t,ns,h} \quad (37)$$

که جمله اول نشان‌دهنده تبادل توان با شبکه بالادست، جمله دوم میزان توان تولیدی توسط واحدهای بادی و گازی، جمله سوم تلفات توان، جمله چهارم بار سیستم توزیع و جمله آخر توان منابع پاسخ‌گویی بار است.

قید ظرفیت خطوط توزیع: با استفاده از پخش بار توزیع، توان عبوری از هر خط به دست آمده که این توان نباید از ظرفیت حرارتی آن خط بیشتر شود

$$P_{ij} \le P_{ij}^{\max} \quad (38)$$

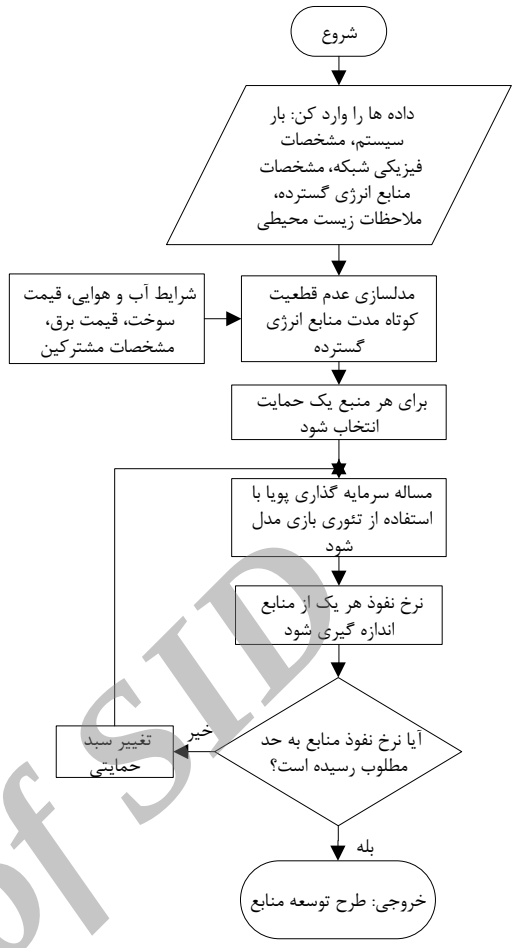
قید ظرفیت پست توزیع: مجموع توانی خروجی از خطوط پست نباید از ظرفیت آن پست بیشتر باشد

$$Ptrade_{t,ns,h} \le P_{ss}^{\max} \quad (39)$$

قید بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده: توان تولیدی توسط هر منبع تولید پراکنده کوچک نباید از ظرفیت آن منبع بیشتر باشد

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳: روندنمای ارائه‌شده برای تحلیل تأثیر سیاست‌های حمایتی در حالت پشتیبانی چندمنبعی در مسأله توسعه منابع انرژی گسترده.

$$P_j^{\min} \le P_{j,i,h} \le P_j^{\max} \qquad (۴۰)$$

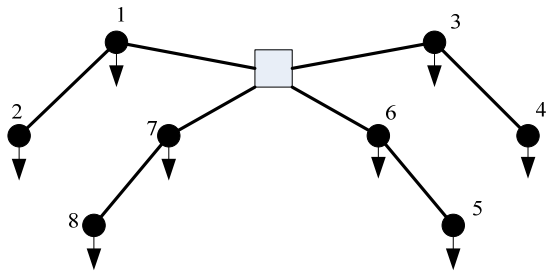
برای تعیین قیمت برق، در هر سناریو تئوری بازی کارنو اجرا شده که بر مبنای این تئوری، بهینه‌سازی‌های فوق‌الذکر بایستی به طور هم‌زمان توسط بازیگران انجام شود. هر سرمایه‌گذار تولید خود را با استفاده از روابط بیان‌شده در این بخش محاسبه می‌کند و روندنمای حل این مسأله در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۵- مطالعات عددی

گرچه مدل پیشنهادشده در این مقاله یک مدل کلی بوده و برای هر شبکه‌ای قابل پیاده‌سازی است، لیکن در اینجا کارایی آن را با بهره‌گیری از یک شبکه توزیع نشان داده‌ایم.

۵-۱ شبکه مورد مطالعه

شبکه توزیع مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده [۵] که این شبکه ۱۳۲/۳۳ کیلوولت دارای ۸ باس است و به وسیله پست ۴۰ مگاولت‌آمپری به شبکه بالادست متصل می‌شود. دوره مطالعه ۵ ساله در نظر گرفته شده و هر سال دارای ۴ فصل و هر فصل دارای سه سطح بار پایه، متوسط و پیکاست. از آنجا که منابع بادی وابسته به مکان فیزیکی هستند، احتمال وجود باد در شینه‌های ۱ و ۲ صفر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه عدم قطعیت منابع بادی از داده‌های باد آرشیو ملی کانادا [۲۲] در این مطالعات عددی استفاده شده و مقادیر μ و δ برای داده‌های موجود به ترتیب برابر ۶/۱۶ و ۳/۲ هستند.



شکل ۴: سیستم مورد مطالعه.

جدول ۲: سطوح بار و قیمت بازار مورد استفاده در مطالعه.

سطح بار	درصد بار پیک	مدت زمان (ساعت)	قیمت بازار ($/MWh)
۱	۱۰۰	۱۵۰۰	۷۰
۲	۷۰	۵۰۰۰	۴۹
۳	۵۰	۲۲۶۰	۳۵

در این مطالعه، ضریب مشارکت منابع پاسخ‌گویی بار بر اساس [۲۳] برابر ۳۰٪ و نرخ انصراف از برنامه‌ها بر اساس [۲۴] برابر ۱۰٪ در نظر گرفته شده است.

منحنی تداومی بار به صورت تکه‌ای خطی بوده و برای هر فصل سه سطح در نظر گرفته شده است. مشخصات فنی سیستم توزیع در [۵]، سطوح بار و قیمت بازار در جدول ۲ و داده‌های فناوری‌های تولید در جدول ۳ آمده است.

در این مطالعه نرخ بهره ۱۲٪، نرخ رشد سالانه بار ۵٪ و ضرایب فصلی برای بار به ترتیب ۱، ۱/۱، ۱/۲ و ۰/۹ در نظر گرفته شده و میزان پیک بار پیش‌بینی شده شبکه توزیع ۵۷/۲۷ مگاوات است. بار پیش‌بینی‌شده شبکه توزیع مورد مطالعه از منابع انرژی گسترده یا از خرید از پست بالادست تأمین می‌گردد و برای انجام مطالعات سه حالت در نظر گرفته شده که در جدول ۴ آمده است.

۵-۲ نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج مطالعات عددی آورده شده و نتایج نشان‌دهنده راهبردهای برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده برای یک شبکه نمونه است.

مطالعه حالت اول

در این حالت هیچ برنامه پاسخ‌گویی باری وجود ندارد ولی به منابع بادی در طول دوره مطالعه تشویقی (FIT) اعطا خواهد شد. میزان تشویقی که منجر به تعادل نش در مسأله خواهد شد برابر ۲۸ $/MWh است و در این حالت فرض می‌شود در سال مبنا منابع به میزان نشان داده شده در جدول ۵ موجود باشند. این جدول همچنین نشان‌دهنده میزان رشد منابع بادی در طی ۵ سال برنامه‌ریزی می‌باشد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، به دلیل سودآوری، هم سرمایه‌گذاران منابع گازی در برخی سال‌ها به سرمایه‌گذاری ترغیب خواهند شد و هم سرمایه‌گذاران منابع بادی. هر چند منابع گازی در طی دوره مطالعه رشد داشته‌اند ولی نرخ نفوذ آنها در سال افق نسبت به سال مبنا کاهش داشته، این در حالی است که نرخ نفوذ منابع بادی افزایش داشته و به عبارت دیگر ترکیب تولید به سمتی پیش رفته که میزان مشارکت منابع بادی در شبکه افزایش یابد. از آنجا که منابع پاسخ‌گویی بار در این مطالعه در نظر گرفته نشده، در جدول ۵ نرخ نفوذ آنها با صفر نشان داده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳: داده‌های فناوری‌های تولید.

تکنولوژی تولید	هزینه سرمایه‌گذاری ($/kW)	هزینه متغیر ($/MWh)	کاندید توسعه ظرفیت (MW)	طول عمر مفید	NO_x (lb/MWh)	SO_2 (lb/MWh)	CO_2 (lb/MWh)
گازی	۳۰۰	۳۰	۱	۲۰	۱٫۱۵	۰٫۰۰۸	۱٫۴۹۴
بادی	۹۰۰	۱٫۵	۱	۳۰	۰	۰	۰

جدول ۴: حالت‌های در نظر گرفته شده برای مسأله توسعه.

حالت اول	برنامه پاسخ‌گویی بار در سبد منابع تعریف نشده ولی به منابع بادی تشویقی اعطا می‌شود.
حالت دوم	سیاست‌های حمایتی برای منابع پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته شده ولی از منابع بادی حمایتی به عمل نمی‌آید.
حالت سوم	سیاست‌های حمایتی هم برای منابع پاسخ‌گویی بار و هم برای منابع بادی اعمال می‌گردد.

جدول ۵: نتایج مطالعه حالت اول.

سال	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع گازی (MW)	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع بادی (MW)	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع پاسخ‌گویی بار (MW)	میزان توان مبادله‌شده با شبکه بالادست (MW)	نرخ نفوذ منابع گازی (٪)	نرخ نفوذ منابع بادی (٪)	نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار (٪)	هزینه آلودگی (M$)	تلفات (MW)
مبنا	۳۹	۱۳	۰٫۲۸	۵	۶۸٫۰۹	۲۲٫۷۰	۰٫۴۹	۱۱٫۶	۲٫۰۱
اول	۴۲	۱۳	۰	۵	۷۰٫۰۰	۲۱٫۶۷	۰	۱۲٫۴	۲٫۱۲
دوم	۴۲	۱۵	۰	۶	۶۶٫۶۷	۲۳٫۸۱	۰	۱۲٫۶	۲٫۲۵
سوم	۴۳	۱۵	۰	۸	۶۵٫۱۵	۲۲٫۷۳	۰	۱۳٫۴	۲٫۳۴
چهارم	۴۳	۱۸	۰	۸	۶۲٫۳۲	۲۶٫۰۹	۰	۱۳٫۴	۲٫۴۹
پنجم	۴۶	۱۸	۰	۸	۶۳٫۸۹	۲۵٫۰۰	۰	۱۴٫۲	۲٫۵۸

جدول ۶: نتایج مطالعه حالت دوم.

سال	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع گازی (MW)	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع بادی (MW)	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع پاسخ‌گویی بار (MW)	میزان توان مبادله‌شده با شبکه بالادست (MW)	نرخ نفوذ منابع گازی (٪)	نرخ نفوذ منابع بادی (٪)	نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار (٪)	هزینه آلودگی (M$)	تلفات (MW)
مبنا	۳۹	۱۳	۰٫۲۸	۵	۶۸٫۰۹	۲۲٫۷۰	۰٫۴۹	۱۱٫۶	۲٫۰۱
اول	۴۴	۱۳	۰٫۱۴	۳	۷۳٫۱۶	۲۱٫۶۲	۰٫۲۴	۱۳٫۲	۲٫۰۸
دوم	۴۷	۱۳	۰٫۱۵	۳	۷۴٫۴۳	۲۰٫۵۹	۰٫۲۴	۱۴٫۱	۲٫۱۶
سوم	۵۱	۱۳	۰٫۳۰	۲	۷۶٫۹۲	۱۹٫۶۱	۰٫۴۶	۱۵٫۳	۲٫۲۰
چهارم	۵۴	۱۳	۰٫۶۲	۲	۷۷٫۵۷	۱۸٫۶۷	۰٫۸۹	۱۶٫۲	۲٫۲۹
پنجم	۵۷	۱۳	۰٫۷۰	۳	۷۷٫۳۴	۱۷٫۶۴	۰٫۹۵	۱۷٫۱	۲٫۳۲

مطالعه حالت دوم

در این حالت منابع پاسخ‌گویی بار نیز به سبد منابع افزوده می‌شود. اثر دخالت‌های سیاست‌گذار در راهبرد توسعه برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نیز لحاظ شده ولی برای منابع بادی، تشویقی در نظر گرفته نشده است. بر مبنای [۲۵] ضرایب تشویقی و تنبیهی برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار معمولاً بین ۰٫۱ تا ۱۰ برابر قیمت بازار در نظر گرفته می‌شود و در این مطالعه هر دو میزان ضریب تشویق و تنبیه برابر ۱٫۹ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد سرمایه‌گذاران منابع بادی هیچ علاقه‌ای به سرمایه‌گذاری پیدا نمی‌کنند. جدول ۶ نتایج عددی را در این حالت ارائه می‌دهد و همان گونه که مشاهده می‌شود، منابع بادی توسعه پیدا نکرده‌اند و بنابراین نرخ نفوذ آنها در سال افق کاهش یافته است و میزان برنامه پاسخ‌گویی بار در طی سال‌های برنامه متغیر می‌باشد.

در مقایسه با حالت اول، میزان برق خریداری‌شده از پست بالادست کاهش یافته و در این حالت هزینه آلودگی در طی سال‌های برنامه‌ریزی به شدت افزایش پیدا کرده که نتیجه می‌شود منابع پاسخ‌گویی بار به تنهایی قادر به کاستن هزینه‌های کلی سیستم نیستند و از این رو رشد نرخ نفوذ منابع انرژی پاک الزامی است.

مطالعه حالت سوم

در این حالت سبد حمایتی هم برای منابع بادی و هم منابع پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته می‌شود. بر اساس این الگوریتم میزان FIT که منجر به تعادل نش می‌گردد برابر ۲۸ $/MWh برای منابع بادی است و همچنین مقادیر ضرایب تشویقی و تنبیهی برابر ۱٫۹ در این حالت خواهد بود. نتایج این حالت در جدول ۷ آورده شده است.

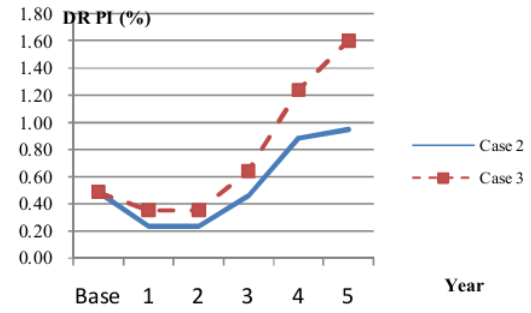
در این حالت که تمام منابع موجود در سبد منابع انرژی توسعه پیدا کرده‌اند، چند مزیت مشاهده می‌گردد:

۱) هزینه آلودگی به دلیل حضور منابع بادی کمتر از حالت دوم شده است.

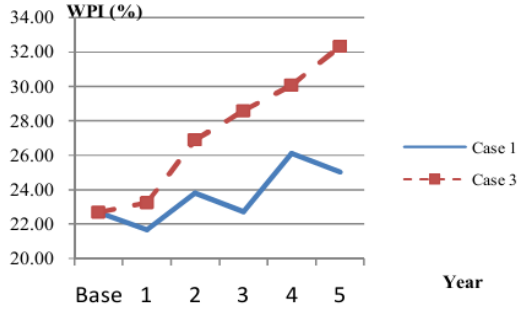
۲) از آنجا که منابع پاسخ‌گویی بار توسعه یافته‌اند، قیمت برق در پیک

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵: مقایسه بین نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار در حالت‌های ۲ و ۳.



شکل ۶: نرخ نفوذ منابع بادی با و بدون در نظر گرفتن منابع پاسخ‌گویی بار.

جدول ۷: نتایج مطالعه حالت سوم.

سال	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع گازی (MW)	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع بادی (MW)	ظرفیت سرمایه‌گذاری شده منابع پاسخ‌گویی بار (MW)	میزان توان مبادله‌شده با شبکه بالادست (MW)	نرخ نفوذ منابع گازی (٪)	نرخ نفوذ منابع بادی (٪)	نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار (٪)	هزینه آلودگی (M$)	تلفات (MW)
مبنا	۳۹	۱۳	۰٫۲۸	۵	۶۸٫۰۹	۲۲٫۷۰	۰٫۴۹	۱۱٫۶	۲٫۰۱
اول	۴۳	۱۴	۰٫۲۱	۳	۷۱٫۴۱	۲۳٫۲۵	۰٫۳۵	۱۲٫۹	۲٫۱۰
دوم	۴۴	۱۷	۰٫۲۲	۲	۶۹٫۵۹	۲۶٫۸۹	۰٫۳۵	۱۳٫۲	۲٫۲۰
سوم	۴۵	۱۹	۰٫۴۲	۲	۶۷٫۷۵	۲۸٫۶۰	۰٫۶۴	۱۳٫۵	۲٫۲۷
چهارم	۴۷	۲۱	۰٫۸۷	۱	۶۷٫۲۷	۳۰٫۰۶	۱٫۲۴	۱۴٫۱	۲٫۳۸
پنجم	۴۸	۲۴	۱٫۱۹	۱	۶۴٫۷۰	۳۲٫۳۵	۱٫۶۰	۱۴٫۴	۲٫۴۳

بار بحرانی کاهش یافته که به دلیل کاهش حداکثر توان خریداری شده است.

۳) به دلیل کاهش خرید توان از شبکه بالادست و افزایش میزان FIT اعطایی، منابع بادی توسعه بیشتری پیدا کرده‌اند، بنابراین نرخ نفوذ منابع بادی نسبت به حالت اول بیشتر شده است. هر چند تعداد منابع گازی هر ساله افزایش داشته که بیانگر وجود انگیزه برای سرمایه‌گذاران منابع گازی است، ولی نرخ نفوذ آنها روند کاهشی داشته است.

۴) در انتهای سال افق میزان مشارکت منابع بادی در ترکیب تولید قابل توجه است.

شکل ۵ مقایسه‌ای بین سرمایه‌گذاری منابع پاسخ‌گویی بار را در حالت‌های دوم و سوم نشان می‌دهد. همان گونه که واضح است، وقتی به منابع بادی تشویقی داده شد، منابع اتکاناپذیر رشد بیشتری کردند و جهت کاهش این اتکاناپذیری، نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار افزایش یافته است.

در شکل ۶ نرخ نفوذ منابع بادی با و بدون در نظر گرفتن منابع پاسخ‌گویی بار نشان داده شده (مقایسه حالت‌های ۱ و ۳) و همان گونه که ملاحظه می‌شود، نرخ نفوذ منابع بادی افزایش یافته است. نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار وقتی به منابع بادی تشویقی داده می‌شود، افزایش می‌یابد که این افزایش بنا به دلایل زیر صورت می‌پذیرد:

- افزایش میزان تشویقی
- افزایش نرخ نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار که سبب کاهش اتکاناپذیری[1] منابع بادی می‌شود و این می‌تواند به افزایش مشارکت منابع بادی کمک نماید. ثانیاً افزایش ضریب نفوذ منابع پاسخ‌گویی بار سبب کاهش قیمت برق شده و به تبع آن، توان خریداری‌شده از شبکه بالادست کاهش می‌یابد و این موضوع سبب افزایش مشارکت منابع بادی شده است.

1. Intermittency

علت کاهش نرخ نفوذ منابع بادی در برخی سال‌ها در حالت اول این است که میزان ظرفیت منابع بادی در این سال‌ها ثابت مانده و به عبارت دیگر منابع بادی توسعه نداشته‌اند، ولی ظرفیت منابع گازی افزایش یافته است.

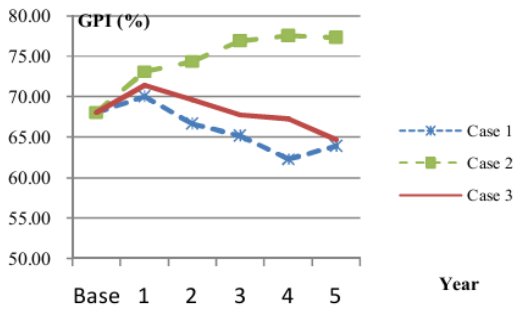
در شکل ۷ نرخ نفوذ منابع گازی برای هر سه حالت با یکدیگر مقایسه شده و ملاحظه می‌شود در حالتی که منابع بادی توسعه نیافته‌اند (حالت ۲) نرخ نفوذ منابع گازی از سایر حالت‌ها بیشتر است. از مقایسه جداول ۵ تا ۷ درمی‌یابیم که میزان توان خریداری‌شده از شبکه بالادست در حالتی که منابع پاسخ‌گویی بار حضور دارند بسیار کمتر از حالتی است که این منابع در سبد توسعه انرژی حضور نداشته باشند. این بدین علت است که تأمین برق از پست فوق توزیع بالادست، گران‌تر از اعطای تشویقی به مشترکین برای شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار تمام می‌شود. مقایسه هزینه آلودگی و تلفات در حالت‌های مختلف در جدول ۸ دوباره نشان شده است. حضور منابع پاسخ‌گویی بار در سبد منابع انرژی سبب کاهش تلفات نسبت به حالتی شده که این منابع توسعه نداشته‌اند ولی از طرف دیگر به دلیل کاهش رشد منابع بادی میزان آلودگی در این حالت نسبت به حالت‌های دیگر بسیار افزایش یافته است.

دلیل افزایش تلفات در حالتی که نرخ نفوذ منابع بادی رشد داشته این است که منابع بادی فقط در بخشی از شبکه توزیع قابل توسعه هستند، در نتیجه الگوی پخش بار به سمتی سوق یافته که سبب افزایش تلفات توان شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تحلیل تأثیر بلندمدت مداخلات سیاست‌گذار در توسعه تولید منابع انرژی گسترده، چارچوبی بر مبنای برنامه‌ریزی دینامیک ارائه شد. ایده چارچوب برنامه‌ریزی ارائه‌شده بر مبنای تنوع در ماهیت، ویژگی‌ها و عدم قطعیت منابع انرژی گسترده شکل گرفته که انعطاف‌پذیر بوده و طراحی ماژولار آن سبب می‌گردد که هر نوع منبع با هر ویژگی که

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷: مقایسه نرخ نفوذ منابع گازی در سه حالت.

جدول ۸: مقایسه تلفات و آلودگی در سه حالت مطالعه.

	نسبت تلفات به تولید (%)	هزینه آلودگی (M$)
حالت اول	۳٫۵۸	۱۴٫۲
حالت دوم	۳٫۱۵	۱۷٫۱
حالت سوم	۳٫۲۸	۱۴٫۴

داشته باشد قابلیت ورود به مسأله برنامه‌ریزی را داشته باشد. از منابع پاسخ‌گویی بار، بادی و گازی به عنوان منابع انرژی گسترده استفاده شده است. به منظور پوشش هزینه سرمایه‌گذاری زیاد و عدم قطعیت تولید منابع بادی و منابع پاسخ‌گویی بار، سیاست حمایتی برای این منابع در نظر گرفته شد و همچنین در این مطالعه از تئوری بازی غیر همکارانه برای مدل‌سازی عدم قطعیت راهبردی رفتار بازیگران استفاده شد. نتایج به دست آمده در این مقاله به صورت زیر دسته‌بندی شده است:

۱) چنانچه به دو نوع منبع از منابع انرژی گسترده تشویقی اعطا شود، میزان تشویقی لازم برای رشد این منابع باید بیشتر از حالتی باشد که فقط به یک منبع تشویقی داده می‌شود. این موضوع به دلیل تأثیر متقابلی است که سیاست‌های حمایتی بر رشد سایر منابع دارند.

۲) توسعه منابع پاسخ‌گویی بار به دو دلیل سبب افزایش نرخ نفوذ منابع بادی می‌شود: یکی این که منابع پاسخ‌گویی بار در حالت بهره‌برداری در شرایط نرمال با هدف کاهش اتکاناپذیری منابع بادی استفاده شوند و دوم این که از این منابع در پیک بحرانی استفاده شود تا از جهش قیمت جلوگیری شود. یکنواخت‌شدن پروفیل قیمت، انگیزه توسعه دیگر منابع را کم می‌کند در حالی که منابع بادی با دریافت تشویقی هنوز انگیزه لازم را برای سرمایه‌گذاری دارند.

۳) به علت این که منابع بادی وابسته به مکان هستند و فقط در جاهای خاصی از شبکه امکان نصب دارند، ممکن است توسعه این منابع سبب افزایش تلفات شبکه شود.

مراجع

[1] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi-Kian, "A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: a case study for Iran," *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp. 5752-5763, Dec. 2009.

[2] G. Carpinelli, G. Celli, and A. Russo, "Embedded generation planning under uncertainty including power quality issues," *European Trans. Electrical Power*, vol. 13, no. 6, pp. 381-89, Nov./Dec. 2003.

[3] G. W. Ault, C. E. T. Foote, and J. R. McDonald, "Distribution system planning in focus," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 1, pp. 60-62, Jan. 2002.

[4] G. W. Ault, J. R. McDonald, and G. M. Burt, "Strategic analysis framework for evaluating distributed generation and utility strategies," *IEE Proceedings Generation, Trans. and Dist.*, vol. 150, no. 4, pp. 475-481, Jul. 2003.

[5] H. Falaghi and M. R. Haghifam, "ACO based algorithm for distributed generation sources allocation and sizing in distributed systems," in *Proc. IEEE Power Tech,* pp. 555-560, Lausanne, Switzerland, 1-5 Jul. 2007.

[6] A. Soroudi and M. Ehsan, "A distribution network expansion planning model considering distributed generation options and techo - economical issues," *Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 3364-3374, Aug. 2011.

[7] S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira, and L. Barreto, "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation - Part I: problem formulation," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 915-923, Apr. 2008.

[8] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, and F. Pilo, "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation," *IEEE Trans. Power System*, vol. 20, no. 2, pp. 750-757, May 2005.

[9] S. Ganguly, N. C. Sahoo, and D. Das, "A novel multi - objective PSO for electrical distribution system planning incorporating distributed generation," *Energy System*, vol. 1, no. 3, pp. 291-337, 2010.

[10] A. P. Agalgaonkar, S. V. Kulkarni, and S. A. Khaparde, "Evaluation of configuration plans for DGs in developing countries using tradeoff analysis and MADM," *IEEE/ PES Transmission and Distribution Conf. and Exhibition,* pp. 275-285, 21-24 May 2006.

[11] G. A. A. Brigatto, C. C. B. Carmargo, and E. T. Sica, "Multiobjective optimization of distributed generation portfolio insertion strategies," in *Proc. of IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition*, pp. 622-628, 8-10 Nov. 2010.

[12] W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, and M. M. A. Salama, "Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, Aug. 2004.

[13] R. Dugan, E. McDermott, and G. Ball, "Distribution planning for distributed generation," in *Proc. of Rural Electric Power Conf.*, pp. C4/1-C4/7, 7-9 May 2000.

[14] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi - Kian, "Uncertainty based distributed generation expansion planning in electricity markets," *Electrical Engineering*, vol. 91, no. 7, pp. 369-382, Mar. 2010.

[15] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi - Kian, "Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2765-2773, Dec. 2009.

[16] A. Zangeneh and S. Jadid, "Fuzzy multiobjective model for distributed generation expansion planning in uncertain environment," *European Trans. Electrical Power*, vol. 21, no. 1, pp. 129-141, Jan. 2011.

[17] R. Karki, "Renewable energy credit driven wind power growth for system reliability," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 7, pp. 797-803, May 2007.

[18] M. Behrang Rad, M. Parsa Moghadam, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Fuzzy evaluation of energy efficiency improvement impact on load shape," *Proc. IEEE Power Tech,* pp. 1429-1434, Lausanne, Switzerland, 1-5 Jul. 2007.

[19] F. Olsina, F. Garces, and H. J. Haubrich, "Modeling long-term dynamics of electricity markets," *Energy Policy*, vol. 34, no. 12, pp. 1411-1433, 2006.

[20] A. Piccolo and P. Siano, "Evaluating the impact of network investment deferral on distributed generation expansion," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1559-1567, Aug. 2009.

[21] L. Singh and J. S. Dhillon, "Best weight pattern evaluation based security constrained power dispatch algorithm," *J. of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 287-307, Sep. 2007.

[22] C. Goldman, N. Hopper, R. Bharvirkar, B. Neenan, and P. Cappers, "Estimating demand response market potential among large commercial and industrial customers: a scoping study," Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, 2007.

[23] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs," *Applied Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 243-250, Jan. 2010.

[24] R. Earle, E. P. Kahn, and E. Macan, "Measuring the capacity impacts of demand response," *The Electricity J.*, vol. 22, no. 6, pp. 47-58, 2009.

[25] A. Abdollahi, M. Parsa Moghaddam, M. Rashidinejad, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Investigation of economic and environmental - driven demand response measures incorporating UC," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 12-25, Mar. 2012.

Archive of SID

www.SID.ir

علیرضا شیخی فینی در سال ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی را از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۷۷ کارشناسی ارشد و در سال ۱۳۹۲ دکتری مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه علم و صنعت ایران و دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. ایشان اکنون به عنوان عضو هیات علمی گروه برق و کامپیوتر در دانشگاه هرمزگان مشغول به کار است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان بازار برق و برنامه‌ریزی توسعه تولید است.

محسن پارسا مقدم مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۵۸ از دانشگاه صنعتی شریف در رشته مهندسی برق- قدرت اخذ نمود. مدرک کارشناسی ارشد خود رادر سال ۱۳۶۵ از دانشگاه صنعتی تویوهاشی و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۶۷ ازدانشگاه توهوکو هر دو ازکشور ژاپن و در رشته مهندسی برق – قدرت دریافت مود. از سال ۱۳۶۷ به عنوان عضو هیات علمی دانشگاه تربیت مدرس در بخشمهندسی برق مشغول به کار است و در حال حاضر استاد تمام دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر در گرایش سیستم‌های قدرت هستند. زمینه‌های تحقیقاتی نام‌برده عبارتند از: برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، سیستم‌های قدرت تجدیدساختار یافته، مدیریت انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و کاربرد هوش محاسباتی در سیستم‌های قدرت.

محمدکاظم شیخ‌الاسلامی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی قدرت در سال ۱۳۷۱ در دانشگاه تهران و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی قدرت به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۴ در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمـینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مطالعات بازار برق و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت.

Archive of SID

www.SID.ir