

برنامه‌ریزی توسعه تولیدات پراکنده در پست‌های فوق‌توزیع با در نظر گرفتن توسعه پست‌های انتقال با استفاده از مدل دوسطحی جدید

فرشید میثاقی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ تقی بارفروشی^۲، استادیار؛ میثم جعفری^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی بابل - بابل - ایران - farshid.misaghi149@gmail.com

۲- گروه پژوهشی پست‌های فشار قوی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی بابل - بابل - ایران - barforoshi@nit.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی بابل - بابل - ایران - m.jafari@nit.ac.ir

چکیده: در این مقاله، چهارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده (DG) در پست‌های فوق‌توزیع با در نظر گرفتن امکان توسعه ظرفیت پست‌های انتقال شبکه در حضور مشوق‌های سرمایه‌گذاری ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی، مشوق‌های سرمایه‌گذاری مورد مطالعه قراردادهای تضمینی خرید برق و پرداخت‌های ظرفیت را شامل می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی در قالب یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود که سطح اول آن شامل بهینه‌سازی تصمیمات سرمایه‌گذار با هدف کسب سود حداکثر و سطح دوم شامل مسئله بهینه‌سازی تسویه بازار و تصمیم‌گیری در مورد توسعه پست انتقال بالادست است. به دلیل وجود متغیر باینری در مسئله سطح پایین و نامحدب بودن آن، تبدیل مسئله دوسطحی به یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل (MPEC) امکان‌پذیر نیست. لذا ترکیبی از الگوریتم یکایک‌شماری و بهینه‌سازی ریاضی استفاده می‌شود. در این روش، با توجه به محدود بودن تعداد گزینه‌های توسعه ظرفیت پست‌های انتقال، تمامی حالات ممکن توسعه به صورت یکایک شماری در نظر گرفته شده و برای هر یک از ترکیب‌ها، مسئله MPEC تبدیل شده به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP)، حل می‌شود. کارایی چهارچوب پیشنهادی بر روی یک شبکه قدرت نمونه ۶ شینه و شبکه فوق‌توزیع غرب استان مازندران با انجام شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های لازم، مورد آزمون قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل، برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته، پرداخت ظرفیت، تولید پراکنده، قرارداد تضمینی، یکایک‌شماری.

Distributed Generation Expansion Planning in Sub-Transmission Substations Considering Transmission Substations Expansions using a Novel Bi-level Model

F. Misaghi¹, MSc Student; T. Barforoshi², Assistant Professor; M. Jafari³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran, Email: farshid.misaghi149@gmail.com

2- Research Department of HV Stations, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran, Email: barforoshi@nit.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran, Email: m.jafari@nit.ac.ir

Abstract: In this paper, a novel framework is proposed to solve distributed generation (DG) expansion planning problem in sub-transmission substations considering expansions of transmission substation capacities in the presence of incentives. The proposed model includes both the firm contract and capacity payment as incentive options. A bi-level model is presented for the problem, where the upper level consists of optimal decision of investor through maximizing profit, while market clearing and substation expansion are considered in lower level. Due to existing of binary variable in the lower level problem and therefore its non-convexity, it is not possible to convert the bi-level problem in to a single level, so-called mathematical problem with equilibrium constraints (MPEC). Thus, an algorithm which gains the combination of enumeration and mathematical optimization is used to tackle with the non-convexity. In the proposed approach, according a few number of expansion strategies of substation upgrading, all strategies are considered and a MILP is solved for each strategy. The efficiency of the proposed model is examined on a six-bus network and on a part of subtransmission network of MAZANDARAN regional electric company (MREC).

Keywords: Mathematical program with equilibrium constraints, mixed integer linear programming, capacity payment, distributed generation, firm contract, enumeration.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۷ و ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳

نام نویسنده مسئول: تقی بارفروشی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

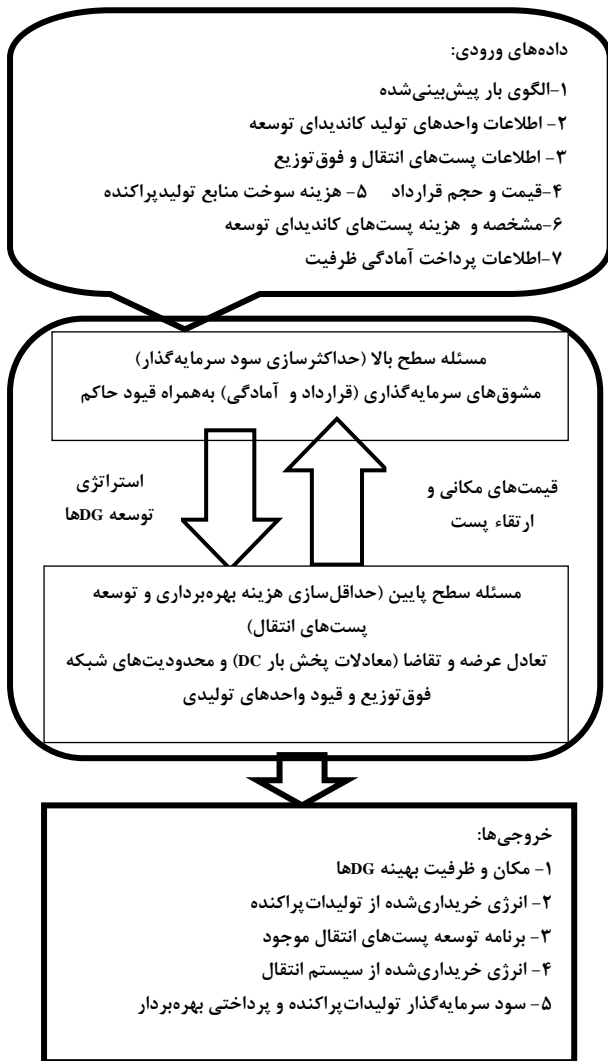
۱- مقدمه

بهره‌برداری و هزینه تلفات به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی می‌باشند. مدل برنامه‌ریزی توسعه پست‌های فوق توزیع مبتنی بر ترکیب ماتریس احتمال و الگوریتم ژنتیک در عدم حضور تولیدات پراکنده در مرجع [۸] ارائه شده است. رویکردی جدید به‌منظور برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه پست‌ها و خطوط انتقال شبکه با استفاده از پخش بار بهینه DC به کمک روش برنامه‌ریزی تصادفی و شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ با هدف حداقل‌سازی پرداختی بهره‌بردار مستقل شبکه در مرجع [۹] ارائه شده است. سرمایه‌گذاری در ظرفیت تولیدات پراکنده از جمله سرمایه‌گذاری‌های برگشت‌ناپذیر به‌شمار می‌آید که به‌علت نصب DGها در مکان‌های غیربهینه و در تعداد و اندازه نامناسب سبب افزایش تلفات و هزینه‌های سیستم شده و نتایج غیرقابل‌انتظاری حاصل خواهد شد، که ممکن است هزینه قابل‌توجهی را به سرمایه‌گذار تحمیل کند. بنابراین برای سرمایه‌گذاری در چنین محیطی باید اطمینان از بازگشت سرمایه در بلندمدت به کمک مکانیسم‌هایی همچون مشوق‌های سرمایه‌گذاری وجود داشته باشد [۱۰].

برای برنامه‌ریزی توسعه DGها و مطالعه تأثیر طرح‌های مختلف بازار در سرمایه‌گذاری، انتخاب مدل مناسب حائز اهمیت است. در [۱۱]، مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال و منابع تولید بادی از دیدگاه بهره‌بردار سیستم ارائه شده است. مدل دوسطحی پیشنهادی برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل می‌باشد. به‌منظور توسعه منابع تولید بادی، یارانه بر هزینه سرمایه‌گذاری این منابع به‌عنوان مشوق در نظر گرفته شده است. در [۱۲] بهره‌برداری بازار برق شیلی در حالت حضور و عدم‌حضور پرداخت بابت آمادگی ظرفیت به‌عنوان مشوق سرمایه‌گذاری بررسی شده است. در مرجع [۱۳] روشی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه در حضور منابع DG با وجود عدم قطعیت در بار و هزینه خرید انرژی در مدلی تک‌سطحی با هدف حداقل‌سازی هزینه خرید انرژی و تلفات و در غیاب توسعه پست‌ها ارائه شده است. در [۱۴] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوسطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته به‌منظور برنامه‌ریزی قرارداد فروش منابع DG در غیاب مشوق‌های سرمایه‌گذاری ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی توسعه توأم پست‌ها و خطوط فوق توزیع در نظر گرفتن امکان احداث منابع DG در پست‌های فوق توزیع در [۱۵] ارائه شده است که در آن از تأثیر شبکه بالادست و پست‌های انتقال صرف‌نظر شده است. در مرجع [۱۶] مکان‌یابی بهینه منابع DG با استفاده از یک مدل دوسطحی استاتیکی در قالب یک مسئله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح در سیستم توزیع تعیین شده است. در [۱۷] مدلی دوسطحی ارائه شده تا خط‌مشی پیشنهاد مالک خصوصی در مورد حجم قرارداد و قیمت توان منابع تولید پراکنده را تعیین کند. بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در تحقیقات گذشته برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه منابع تولید پراکنده و پست‌های انتقال در حضور مشوق‌های سرمایه‌گذاری در شبکه فوق توزیع انجام نشده است.

صنعت برق در دهه اخیر با تغییرات زیادی در زمینه‌های ساختاری، بازار و مدیریتی مواجه بوده است. یکی از این تغییرات ورود به محیط رقابتی توسط سرمایه‌گذاران بخش خصوصی است. در این محیط رقابتی، شرکت‌های برق که مسئول تأمین برق مشترکین با سطح قابل قبولی از هزینه می‌باشند، باید گزینه‌های مختلفی از سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری را در برنامه‌ریزی‌های توسعه انتخاب نمایند. امروزه، استفاده از منابع تولید پراکنده (DG) به‌عنوان یکی از گزینه‌های سرمایه‌گذاری در مسئله برنامه‌ریزی توسعه افزایش یافته است. همچنین پست‌های فوق توزیع که پل ارتباطی بین شبکه انتقال و توزیع و محل تزریق انرژی به شبکه توزیع بوده، مکان مناسبی برای نصب این منابع می‌باشند [۱-۲]. هنگامی که از تکنولوژی‌های DG در برنامه‌ریزی استفاده می‌شود، نوع تکنولوژی، ظرفیت و مکان آن‌ها از فاکتورهای مؤثر بر استراتژی توسعه به‌شمار می‌روند. در غیاب DGها، سیستم‌های سنتی برای پاسخ‌گویی به رشد بار در افق برنامه‌ریزی بلندمدت نیاز به ارتقاء شبکه از طریق توسعه پست‌های موجود با نصب ترانس‌های جدید و یا توسعه پست‌های انتقال موجود دارند [۳-۴]. همچنین ملاحظه هم‌زمان گزینه‌های ارتقاء ظرفیت پست‌های انتقال و مشارکت DGها از موضوعات مهم در برنامه‌ریزی توسعه شبکه است که می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را به‌همراه داشته باشد [۵]. تاکنون الگوریتم‌های مختلفی توسط محققان به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه مولدهای پراکنده و همچنین توسعه شبکه از طریق ارتقاء ظرفیت پست‌های شبکه بالادست ارائه شده که به سه‌دسته عمده روش‌های عددی^۲ و اکتشافی^۳ و تحلیلی^۴ تقسیم می‌شوند. جست‌وجوی گرادیان، برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا و پخش بار بهینه از رایج‌ترین نمونه‌های روش‌های عددی می‌باشند. روش‌های اکتشافی مبتنی بر تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی از قبیل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و جست‌وجوی ممنوعه می‌باشند. از مهم‌ترین ویژگی این روش‌ها، قدرت محاسباتی آن‌ها بوده است. همچنین قاعده ۲/۳ برای مکان‌یابی مولدهای پراکنده در شبکه‌های توزیع شعاعی با بار یکنواخت، یکی از روش‌های تحلیلی برجسته به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه مولدهای پراکنده می‌باشد. روش‌های عددی معمولاً جواب بهینه در آن‌ها دقیق‌تر بوده و به زمان کم‌تر برای محاسبه جواب نیاز دارند. بر اساس نتایج تحقیقات، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP)^۵ کارآمدترین روش از روش‌های عددی و الگوریتم ژنتیک^۶ پرکاربردترین روش در میان روش‌های اکتشافی برای محققان می‌باشند [۶].

در [۷] یک مدل دینامیک به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های فوق توزیع ارائه شده است. در این مدل برای این‌که سیستم قدرت پاسخ‌گوی رشد بار باشد، ادغام DG به‌همراه توسعه پست (نصب ترانس جدید) و نوسازی فیدرها در نظر گرفته شده و این روش‌ها با هم مقایسه شده‌اند. هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های نگهداری و



شکل ۱: شماتیک چهارچوب پیشنهادی

۲-۱- فرمول‌بندی ریاضی مسئله دوسطحی

متغیرها و پارامترهای مسئله در جدول ۱۲ ضمیمه معرفی شده‌اند. تابع هدف (۱) مسئله سطح بالا، سود سرمایه‌گذار منابع DG است و مشتمل بر پنج عبارت است. عبارت اول مربوط به درآمد فروش توان DG در قالب قرارداد تضمینی است که در آن حجم معینی از توان DG با قیمت معین توسط بهره‌بردار شبکه خریداری می‌شود. عبارت دوم مربوط به درآمد حاصل از پرداخت ظرفیت است. شایان ذکر است در صورت عدم نیاز شبکه به تولید توان پرداخت ظرفیت مشروط بر آماده بودن واحد برای تولید، پرداخت می‌گردد. با توجه به مقررات مندرج در دستورالعمل مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو، پرداخت هزینه بهره‌برداری توان تولیدی DG در فروش قراردادی، بر عهده بهره‌بردار شبکه است. نرخ پرداخت ظرفیت (CPR)^۸ برابر $\frac{83}{33}$ درصد قیمت قرارداد است. دو عبارت بعدی، بیان‌گر امکان مشارکت مالکان منابع DG در بازارهای لحظه‌ای علاوه بر بازار قراردادی است. عبارت سوم، درآمد فروش توان تولیدی DG را در بازار لحظه‌ای و عبارت چهارم، مربوط به پرداخت ظرفیت به مالکان DGها در هنگام عدم تولید اجباری در بازار

در این مقاله، چهارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های فوق‌توزیع با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری در ظرفیت منابع DG و ارتقاء ظرفیت پست‌های انتقال (توسعه منابع بالادست) در یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود. در سطح اول سود سرمایه‌گذار DG حداکثر شده و در مسئله سطح دوم هزینه پرداختی توسط بهره‌بردار حداقل می‌شود. مشوق‌های سرمایه‌گذاری شامل قراردادهای تضمینی خرید برق و پرداخت آمادگی ظرفیت است. مسئله بهینه‌سازی دوسطحی با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی ریاضی و به کمک الگوریتم یکایک‌شماری، مشتمل بر محدودیت‌های تعادل به یک مسئله یک سطحی MPEC تبدیل می‌شود و پس از خطی‌سازی، در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته به همراه الگوریتم یکایک‌شماری حل می‌شود. با توجه به مراجع بررسی شده نوآوری‌های مقاله حاضر به شرح زیر است:

- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه هم‌زمان DG و ارتقاء ظرفیت پست انتقال در قالب مسئله بهینه‌سازی دوسطحی.
- ارائه الگوریتم ترکیبی مبتنی بر روش‌های یکایک‌شماری و بهینه‌سازی ریاضی برای حل مسئله، به دلیل نامحدوب بودن مسئله سطح پایین ناشی از حضور متغیر باینری.
- لحاظ نمودن قراردادهای تضمینی به همراه پرداخت‌های ظرفیت به مدل برنامه‌ریزی و ملاحظه هم‌زمان مشارکت DGها در بازارهای قراردادی و انرژی.
- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی روی شبکه فوق‌توزیع واقعی و انجام تحلیل حساسیت، به منظور ارزیابی اثربخشی دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ چهارچوب پیشنهادی و مدل ریاضی آن معرفی می‌شود. در بخش ۳ مدل ارائه‌شده روی شبکه قدرت نمونه ۶ شینه و شبکه واقعی (فوق‌توزیع غرب استان مازندران) تحلیل می‌شود. در بخش انتهایی کار، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲-۲- معرفی چهارچوب پیشنهادی

شکل ۱ شماتیک چهارچوب پیشنهادی را نشان می‌دهد. بلوک اصلی چهارچوب پیشنهادی شامل مدلی دوسطحی هست که در آن مسائل مربوط به هر یک از سطوح نشان داده شده است. مسائل مرتبط با سطح بالا شامل مسئله سرمایه‌گذاری با هدف حداکثرسازی سود سرمایه‌گذار در حضور مشوق‌های سرمایه‌گذاری و همچنین محدودیت‌های حاکم در دوره برنامه‌ریزی است. سازوکارهای قرارداد تضمینی و آمادگی نیز در مسئله سطح بالا لحاظ شده است. مسئله سطح پایین از دیدگاه بهره‌بردار مستقل شبکه است، که در آن هزینه‌های بهره‌برداری و ارتقاء ظرفیت پست‌های انتقال، با ملاحظه محدودیت‌های حاکم حداقل می‌شود. مکان و ظرفیت سرمایه‌گذاری شده DGها، سود مالکان DG، انرژی خریداری‌شده از DGها، برنامه توسعه و انرژی خریداری‌شده از پست‌های انتقال و پرداختی بهره‌بردار مولد از خروجی چهارچوب می‌باشند.

در این مقاله ترکیبی از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی با الگوریتم یکایک‌شماری استفاده می‌شود. در این روش، تمامی حالات ممکن توسعه پست‌های انتقال در نظر گرفته شده و برای هر یک از ترکیب‌ها، یک مسئله برنامه‌ریزی آمیخته صحیح خطی حل می‌شود و جواب متناظر با حداقل هزینه بهره‌برداری و توسعه ظرفیت پست‌های انتقال به‌عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود. به این ترتیب مشکلات خطی‌سازی برطرف شده و در فضای جست‌وجوی موجود، حل مسئله را ممکن می‌سازد.

Max

$$\sum_{l \in \Phi_{ll}} \sigma_l \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} C P_{ln}^{dgc} W_1^{dg} + \sum_{l \in \Phi_{ll}} \sigma_l \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} C P R_1^{dgc} (1 - W_1^{dg})(1 - FOR^{dg}) + \sum_{l \in \Phi_{ll}} \sigma_l \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgp} (\lambda_{lj}^{j \in \Phi_{20}^{bus}} - MC_n) + \sum_{l \in \Phi_{ll}} \sigma_l \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} (X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc}) C P R_1^{dgp} (1 - FOR^{dg}) - \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} X_n^{dg} AIC^{dg}$$

$$X_n^{dg} = \sum_{b \in \Phi_b} u_{bn}^{dg} X_n^{dg} \max : \forall n$$

$$\sum_{b \in \Phi_b} u_{bn}^{dg} = 1, u_{bn}^{dg} \in \{0, 1\} : \forall n$$

$$P_{ln}^{dgc} = C V_n X_n^{dg} : \forall n, \forall l$$

$$\sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} X_n^{dg} AIC^{dg} \leq IC \max$$

$$D_n^{peak} = \max \{ P_{ln}^d, \forall l \} : \forall n$$

$$\sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} X_n^{dg} \leq P.F \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} D_n^{peak}$$

$$P_{ln}^{dgp}, \lambda_{lj}, P_{li}^s \in \arg \min \{ \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} C P_{ln}^{dgc} W_1^{dg} + \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} MC_n W_1^{dg} + \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} C P R_1^{dgc} (1 - W_1^{dg})(1 - FOR^{dg}) + \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} (P_{ln}^{dgp} MC_n + (X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc}) C P R_1^{dgp} (1 - FOR^{dg})) + \sum_{i \in \Phi_{63}^{bus}} P_{li}^s E P_{li} + \sum_{i \in \Phi_{63}^{bus}} u_{li}^s A C_{li}^s$$

لحظه‌ای است که نرخ این پرداخت ۵/۴ دلار بر مگاوات ساعت در محیط بازار است که به ظرفیت ابراز شده به بازار پرداخت می‌شود. بخش پنجم مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری DGها است. رابطه (۲) و (۳) به این معنی است که از بین گزینه‌های مختلف سرمایه‌گذاری فقط یک مورد جهت سرمایه‌گذاری در هر شین کاندیدای نصب، انتخاب شود. با توجه به قرارداد تضمینی در رابطه (۴) بیان شده، محدودیت مالی شرکت سرمایه‌گذار در قید (۵) لحاظ شده است. قید (۶) مربوط به حداکثر میزان تقاضا در هر شین و قید (۷) نیز ضریب نفوذ (PF) منابع DG است. رابطه (۸) پرداختی بهره‌بردار (هزینه بهره‌برداری و توسعه ظرفیت پست‌های انتقال) را نشان می‌دهد که مشتمل بر هفت عبارت است. عبارات اول و دوم به ترتیب مربوط به خرید توان و پرداخت ظرفیت به DGها در قالب قرارداد تضمینی می‌باشند. عبارت سوم، هزینه بهره‌برداری DGها است که مشروط بر فروش تضمینی برق آن‌ها، به‌عنوان مشوق توسط بهره‌بردار پرداخت می‌شود. عبارات چهارم و پنجم، به ترتیب بیان‌گر خرید توان و پرداخت ظرفیت به DGها در بازار می‌باشند. پرداختی بهره‌بردار برای خرید توان از شبکه بالادست در عبارت ششم آمده است. عبارت هفتم مربوط به هزینه توسعه پست‌های بالادست است. رابطه (۹) معادلات پخش بار مستقیم (DC) را نشان می‌دهد. قیمت‌های مکانی^۱ (LMP) متغیرهای دوگان قیود مربوط به تعادل توان هستند. روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب مربوط به محدودیت‌های توان تولیدی شبکه و DGها می‌باشند. قیود (۱۲) و (۱۳) محدودیت‌های خطوط و زاویه ولتاژ شین‌ها را نشان می‌دهند. S_b قدرت مینا است. $k \in \Phi_j$ نشان می‌دهد که شین k متصل به شین j است. رابطه (۱۴) مربوط به زاویه ولتاژ شین مرجع هست. متغیرهای دوگان هر قید در مقابل قید مربوطه بیان شده‌اند. با توجه به تغییرات دوره‌ای نیاز مصرف، سطوح مختلفی برای مصرف در هر شین در نظر گرفته شده است. عبارت $X_i^s u_{li}^s$ در رابطه (۱۰) مربوط به تصمیم‌گیری در مورد توسعه پست‌های انتقال است. بنابراین اگر متغیر باینری برابر "۱" باشد توسعه پست انتقال انجام می‌شود و ظرفیت جدید پست انتقال $X_i^{ES} + X_i^s$ می‌شود؛ در غیراین‌صورت افزایش ظرفیت انجام نخواهد شد و ظرفیت پست انتقال موجود از قبل (X_i^{ES}) است. حضور متغیر باینری در مسئله سطح پایین یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله می‌باشد. وجود این عبارت در مسئله سطح پایین باعث ایجاد ناحیه گسسته و نامحدب در مجموعه ممکن جواب شده و فضای جست‌جو را محدود می‌کند. لذا امکان تبدیل مسئله دوسطحی به یک مسئله MPEC و پس از آن خطی‌سازی در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی MILP و حل مسئله بهینه‌سازی به کمک روش‌های تحلیلی وجود ندارد و امکان تسویه بازار و به‌دست آوردن قیمت‌های مکانی که دارای اهمیت زیادی در بازارهای برق می‌باشند، با روش‌های ریاضی غیرممکن می‌باشد. لذا

$$0 \leq \left[F_{jk}^{\max} - B_{jk}^{PU} S_b (\theta_{lj} - \theta_{lk}) \right] \perp V_{lj}^{\max} \geq 0 \quad (25)$$

$$\forall l, \forall j, \forall k \in \Phi_j$$

$$0 \leq \pi + \theta_{lj} \perp \xi_{lj}^{\min} \geq 0 \quad \forall l, \forall j \quad (26)$$

$$0 \leq \pi - \theta_{lj} \perp \xi_{lj}^{\max} \geq 0 \quad \forall l, \forall j \quad (27)$$

۳-۲- خطی‌سازی مسئله MPEC

مسئله MPEC اشاره‌شده در (۱۵) تا (۲۷) به دلیل وجود عبارت $\sum_n P_{ln}^{dgc} \lambda_{lj}$ در تابع هدف و همچنین روابط (۲۰) تا (۲۷) یک مسئله غیرخطی بوده و باید با استفاده از تکنیک‌های خطی‌سازی، خطی‌سازی شود. هر یک از روابط غیرخطی با توجه به ماهیت آن، به شرح زیر به روابط خطی تبدیل می‌شوند:

(۱) روابط (۲۰) تا (۲۷) به صورت زیر خطی می‌شوند [۲۰]:

$$0 \leq a \perp b \geq 0 \quad (28)$$

$$a \geq 0, b \geq 0, a \leq \tau M, b \leq (1 - \tau)M, \tau \in \{0, 1\} \quad (29)$$

(۲) عبارت غیرخطی موجود در تابع هدف با استفاده از روابط زیر خطی می‌شود [۲۱]:

$$\sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgp} MC_n + \sum_{i \in \Phi_{bus}^{63}} P_{li}^S EP_{li} =$$

$$-\sum_j \pi (\xi_{lj}^{\min} + \xi_{lj}^{\max}) - \sum_j F_{jk}^{\max} (V_{lj}^{\min} + V_{lk}^{\max}) -$$

$$\sum_i X_i^{ES} \mu_{li}^{s \max} - \sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} (X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc}) \mu_{ln}^{dg \max} -$$

$$\sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgc} \lambda_{lj} (j \in \Phi_{bus}^{20}) + \sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^D \lambda_{lj} (j \in \Phi_{bus}^{20}) \quad (30)$$

رابطه (۳۰) معادله دوگان مسئله سطح پایین در شرایط عدم حضور عبارات ثابت تابع هدف سطح پایین بوده که با استفاده از نظریه دوگانی به دست آمده است.

$$\sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgp} \lambda_{lj} = -y - \sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgc} \lambda_{lj} \quad (31)$$

$$y = \sum_{i \in \Phi_{bus}^{63}} P_{li}^S EP_{li} + \sum_j \pi (\xi_{lj}^{\min} + \xi_{lj}^{\max}) +$$

$$\sum_j F_{jk}^{\max} (V_{lj}^{\min} + V_{lk}^{\max}) + \sum_i X_i^{ES} \mu_{li}^{s \max} - \quad (32)$$

$$\sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^D \lambda_{lj}$$

همچنین عبارت غیرخطی رابطه (۳۱)، با استفاده از روابط زیر خطی می‌شود [۲۲]:

$$\sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgc} \lambda_{lj} = CV_n \sum_{b \in \Phi_j} u_{bn}^{dg} X_n^{dg \max} \lambda_{lj}$$

$$= CV_n \sum_{b \in \Phi_j} Z_{lbn} \quad (33)$$

$$\sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^D + \sum_{k \in \Phi_j} B_{jk}^{PU} S_b (\theta_{lj} - \theta_{lk}) - \sum_{i \in \Phi_{bus}^{63}} P_{li}^S$$

$$- \sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgc} - \sum_{n \in \Phi_{bus}^{20}} P_{ln}^{dgp} = 0 : \lambda_{lj}, \forall j \quad (9)$$

$$0 \leq P_{li}^S \leq X_i^{ES} + X_i^s u_{li}^s : \mu_{li}^{s \min}, \mu_{li}^{s \max}, \forall i \quad (10)$$

$$0 \leq P_{ln}^{dgp} \leq X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc} : \mu_{ln}^{dg \min}, \mu_{ln}^{dg \max}, \forall n \quad (11)$$

$$-F_{jk}^{\max} \leq B_{jk}^{PU} S_b (\theta_{lj} - \theta_{lk}) \leq F_{jk}^{\max}$$

$$V_{lj}^{\min}, V_{lk}^{\max}, \forall j, \forall k \in \Phi_j \quad (12)$$

$$-\pi \leq \theta_{lj} \leq \pi : \xi_{lj}^{\min}, \xi_{lj}^{\max}, \forall j \quad (13)$$

$$\theta_{lj} = 0 : \xi_{lj}^1, j = 1 \} \forall l. \quad (14)$$

۲-۲- تبدیل مسئله دوسطحی به MPEC

مسئله دوسطحی (۱) تا (۱۴) را می‌توان با اعمال شرایط "KKT" به مسئله سطح پایین، به مسئله یک‌سطحی MPEC تبدیل کرد [۱۹-۱۸]، که توسط روابط (۱۵) تا (۲۷) بیان شده است.

$$(1) - (6) \quad (15)$$

$$MC_n - \lambda_{lj} (j \in \Phi_{bus}^{20}) + \mu_{ln}^{dg \max} - \mu_{ln}^{dg \min} = 0 \quad \forall l, \forall n \quad (16)$$

$$EP_{li} - \lambda_{lj} (j \in \Phi_{bus}^{63}) + \mu_{li}^{s \max} - \mu_{li}^{s \min} = 0 \quad \forall l, \forall i \quad (17)$$

$$\sum_{k \in \Phi_j} B_{jk}^{PU} S_b (\lambda_{lj} - \lambda_{lk})$$

$$+ \sum_{k \in \Phi_j} B_{jk}^{PU} S_b (V_{lj}^{\max} - V_{lk}^{\max})$$

$$+ \sum_{k \in \Phi_j} B_{jk}^{PU} S_b (V_{lj}^{\min} - V_{lk}^{\min}) + \xi_{lj}^{\max}$$

$$- \xi_{lj}^{\min} + (\xi_{lj}^1)_{j=1} = 0 \quad \forall l, \forall j \quad (18)$$

$$(8) - (13) \quad (19)$$

$$0 \leq P_{li}^S \perp \mu_{li}^{s \min} \geq 0 \quad \forall l, \forall i \quad (20)$$

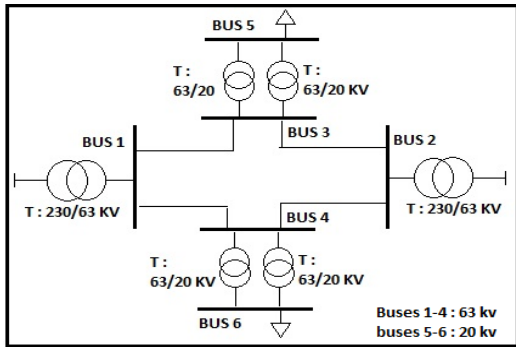
$$0 \leq P_{ln}^{dgp} \perp \mu_{ln}^{dg \min} \geq 0 \quad \forall l, \forall n \quad (21)$$

$$0 \leq X_i^{ES} + X_i^s u_{li}^s - P_{li}^S \perp \mu_{li}^{s \max} \geq 0 \quad \forall l, \forall i \quad (22)$$

$$0 \leq X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc} - P_{ln}^{dgp} \perp \mu_{ln}^{dg \max} \geq 0 \quad \forall l, \forall n \quad (23)$$

$$0 \leq \left[F_{jk}^{\max} + B_{jk}^{PU} S_b (\theta_{lj} - \theta_{lk}) \right] \perp V_{lj}^{\min} \geq 0$$

$$\forall l, \forall j, \forall k \in \Phi_j \quad (24)$$



شکل ۲: شبکه آزمون ۶ شینه

جدول ۱: اطلاعات شبکه ۶ شینه

۴۰	ظرفیت خطوط (مگاوات)
۰/۸	هزینه سرمایه‌گذاری مولدها (میلیون دلار بر مگاوات‌آمپر)
۴۰	هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری مولدها (دلار بر مگاوات ساعت)
۰/۲	هزینه سرمایه‌گذاری ترانسفورماتور (میلیون دلار)
۱۰۰-۸۰-۶۰	قیمت خرید برق از شبکه بالادست در ساعات پر، میان و کم باری (دلار بر مگاوات ساعت)
۶۵-۴۵-۲۵	قیمت خرید برق قراردادی در ساعات پرباری، میان‌باری و کم‌باری (دلار بر مگاوات‌ساعت)
۰/۳	حداکثر ضریب نفوذ
۱۰۰	قدرت مینا (مگاوات‌آمپر)

جدول ۲: سناریوهای شبیه‌سازی شبکه ۶ شینه

شماره سناریو	تکنولوژی DG	قرارداد تضمینی	مشارکت در بازار	شرح سناریو
۱	-	-	-	عدم حضور DG
۲	✓	-	-	حضور DG با تغییرات ضریب نفوذ
۳	✓	✓	✓	تغییرات حجم قرارداد

جدول ۳: نتایج سناریوهای اول تا سوم

شماره سناریو	اول	دوم	دوم	سوم
ضریب نفوذ	۰/۳	۰/۳	۰/۸	۰/۳
حجم قرارداد	۱	۱	۱	۰/۵
مکان و ظرفیت DG نصب‌شده (مگاوات)	--	۶ و ۵ (۱۵)	۶ و ۵ (۱۵)	۶ و ۵ (۱۵)
سود مالکان DG (میلیون دلار)	--	۹/۵۶۸	۱۹/۱۳۶	۸/۱۲۵
توسعه پست‌های بالادست	پست ۲	--	--	--
هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)	۵۷/۱۴	۴۷/۷۰	۳۷/۸۹۳	۴۳/۶۴

جدول ۴: نتایج حاصله در سناریوی اول

حالات توسعه پست‌های انتقال	عدم توسعه	توسعه در ۱ شین	توسعه در ۲ شین	توسعه هر دو شین
هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)	بدون جواب	۵۷/۲۴	۵۷/۱۴	۵۷/۳۳

همچنین قیود زیر باید به مسئله بهینه‌سازی اضافه شود، که λ_{lj} و $\bar{\lambda}_{lj}$ به ترتیب کران بالا و پایین λ_{lj} می‌باشند و همچنین متغیر پیوسته کمکی برای تکمیل روند خطی‌سازی است.

$$Z_{lbn} = X_n^{dg \max} \lambda_{lj} - \eta_{lbn} \quad (34)$$

$$u_{bn}^{dg} X_n^{dg \max} \lambda_{lj} \leq Z_{lbn} \leq \bar{\lambda}_{lj} u_{bn}^{dg} X_n^{dg \max} \quad (35)$$

$$(1 - u_{bn}^{dg}) X_n^{dg \max} \lambda_{lj} \leq \eta_{lbn} \leq \bar{\lambda}_{lj} (1 - u_{bn}^{dg}) X_n^{dg \max} \quad (36)$$

۳- مطالعات عددی

در این بخش، کارایی چهارچوب پیشنهادی بر روی شبکه نمونه ۶ شینه و شبکه فوق‌توزیع غرب استان مازندران بررسی می‌شود.

۳-۱- مورد مطالعاتی اول: شبکه نمونه ۶ شینه

در شکل ۲ شبکه نمونه ۶ شینه نشان داده شده است. در این شبکه دو پست اصلی ۶۳/۲۳۰ کیلوولت در شین‌های ۱ و ۲ به ترتیب با ظرفیت ۶۰ و ۵۰ مگاوات و چهار ترانسفورماتور ۶۳/۲۰ کیلوولت با ظرفیت ۴۰ مگاوات وجود دارد. دو ترانسفورماتور با ظرفیت ۶۰ و ۵۰ مگاوات به ترتیب کاندیدای نصب در شین‌های ۱ و ۲ به منظور توسعه شبکه بالادست می‌باشند. شین‌های ۲۰ کیلوولت کاندیدای محل نصب DG هستند. حداکثر ظرفیت DGهای قابل نصب در هر شین ۲۵ مگاوات، در پله‌های ۵ مگاواتی فرض شده است. در مطالعه بخش اول از پرداخت ظرفیت صرف‌نظر شده و تنها قرارداد تضمینی لحاظ شده است. پیش‌بینی بار در دوره برنامه‌ریزی بدون عدم قطعیت، در یک افق یک‌ساله و در سه سطح بار در اختیار است. در ۳۰٪ زمان، پیک بار، در ۵۰٪ زمان ۶۰٪ بار پیک (میان باری) و در بقیه زمان‌ها ۲۵٪ بار پیک (کم باری) مصرف می‌شود. جداول ۱ و ۲ به ترتیب اطلاعات سیستم و سناریوهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. مدل پیشنهادی با استفاده از حل‌کننده CPLEX [۲۳]، در نرم‌افزار GAMS [۲۴] حل شده است.

۳-۱-۱- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

به منظور صحت‌سنجی نتایج، ابتدا مدل پیشنهادی بر اساس یکی از سناریوهای شبیه‌سازی مرجع [۲۵] پیاده شده است که به نتایج یکسانی با آن مرجع رسیده است. در ادامه شبیه‌سازی‌ها، سناریوهای مختلفی تعریف شده است.

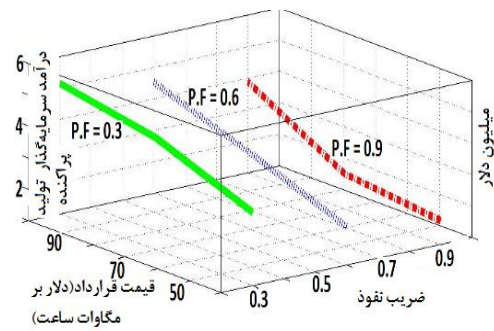
سناریوی اول: در این سناریو، به بررسی شبکه، در غیاب DG و قرارداد تضمینی پرداخته می‌شود. علیرغم وجود امکان توسعه پست بالادست، به دلیل محدودیت انتقال توان در خطوط، جوابی حاصل نشده است. اما همان‌طور که در جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، با حذف محدودیت‌های انتقال، جواب بهینه حاصل شده است که همان توسعه پست بالادست ۲ می‌باشد. مشاهده می‌شود که در صورت عدم حضور DGها در شبکه، نیاز به توسعه شبکه بالادست و تقویت خطوط ضروری است.

سناریوی دوم: نتایج سناریوی دوم در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. با سرمایه‌گذاری ۳۰ مگاواتی در ظرفیت تولید، توسعه شبکه بالادست حذف شده و هزینه کل بهره‌بردار نسبت به سناریوی اول، به میزان ۱۶/۵ درصد کاهش یافته است. شایان ذکر است که عواملی نظیر محدودیت ضریب نفوذ DG در شبکه و هزینه نهایی (MC) آن‌ها بر استراتژی توسعه تأثیرگذار است. مطابق جدول ۳ ملاحظه می‌شود که با افزایش ضریب نفوذ به مقدار ۰/۸، پرداختی بهره‌بردار نسبت به حالت ۲، کاهش ۲۱ درصدی داشته و سود مالکان DGها رشد دو برابر دارد. توسعه DG نسبت به توسعه شبکه بالادست دارای فواید بیشتری نظیر تعویق در توسعه شبکه بالادست و یا تقویت خطوط انتقال است.

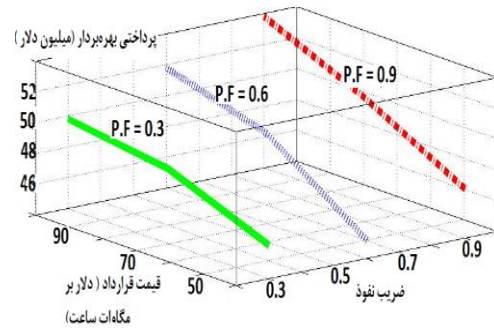
سناریوی سوم: در این سناریو تأثیر حضور DG و تغییرات حجم قرارداد تضمینی (امکان مشارکت در بازار) بررسی می‌شود. مطابق جدول ۳ مشاهده می‌شود که با کاهش حجم قرارداد، ظرفیت سرمایه‌گذاری شده DGها ۵ مگاوات، سود سرمایه‌گذار DG کاهش ۱۵ درصدی و پرداختی بهره‌بردار کاهش ۸/۵ درصدی یافته‌اند. شکل‌های ۳ و ۴، تأثیر تغییرات حجم و قیمت قرارداد، را به ترتیب بر درآمد سرمایه‌گذار و پرداختی بهره‌بردار نشان می‌دهند. مطالعات نشان می‌دهد، قیمت قراردادی مناسب می‌تواند سود مناسبی برای سرمایه‌گذار و نیز هزینه مناسبی برای بهره‌بردار فراهم آورد. ملاحظه می‌شود، هر اندازه قیمت قرارداد بیشتر باشد سرمایه‌گذار میل بیشتری برای احداث واحدهای جدید دارد. زمانی که حجم قرارداد تضمینی افزایش می‌یابد شرکت سرمایه‌گذار در قیمت قراردادی مناسب، به سود بیشتری دست می‌یابد. به همین ترتیب در قیمت قراردادی بالا، پرداختی بهره‌بردار افزایش می‌یابد. اگر قیمت قرارداد پایین‌تر از هزینه نهایی DGها باشد، توسعه DG برای سرمایه‌گذار سودی نخواهد داشت. بنابراین باید قیمت قرارداد همواره متناسب با هزینه نهایی DGها باشد. در قیمت قراردادی مناسب، با افزایش ضریب نفوذ DG، حضور DGها به صورت چشم‌گیری گسترش می‌یابد.

۳-۱-۲- تأثیر تغییرات نرخ رشد بار

میزان تقاضا، عاملی تأثیرگذار بر استراتژی توسعه DGها و پست‌های بالادست است. در این تحلیل حساسیت در غیاب قرارداد تضمینی، تأثیر میزان تقاضا، مطالعه شده است. جدول ۵ نتایج را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزایش تقاضا به میزان ۱۲۵ مگاوات، مشارکت بیشتر DGها و توسعه پست‌ها را به همراه دارد. افزایش مشارکت DGها نسبت به حالت ۱، سود بیشتری را برای سرمایه‌گذار به همراه داشته و پرداختی بهره‌بردار افزایش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. افزایش تقاضا موجب افزایش هزینه خرید برق از شبکه بالادست، سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری DG و افزایش هزینه سیستم می‌شود. شکل ۵، به ترتیب سود سرمایه‌گذار و پرداختی بهره‌بردار و مجموع ظرفیت سرمایه‌گذاری DG را به‌ازای تغییرات تقاضا نشان می‌دهد. شایان ذکر است واحد محور عمودی شکل ۵، برای ظرفیت نصب‌شده مولدها مگاوات و برای منافع و هزینه‌ها برحسب میلیون دلار می‌باشد. با توجه



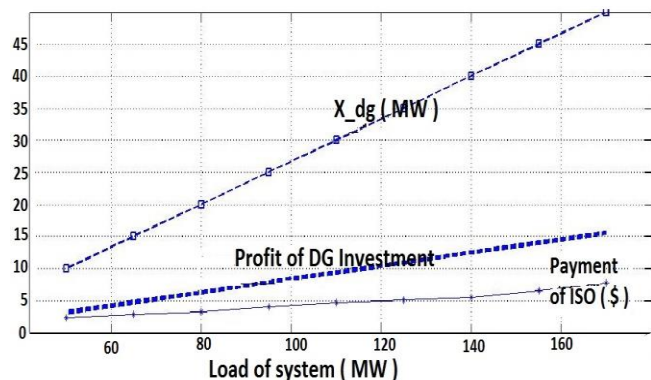
شکل ۳: درآمد سرمایه‌گذار DG در سناریوی سوم



شکل ۴: پرداختی بهره‌بردار در سناریوی سوم

جدول ۵: نتایج تغییر نرخ رشد بار

شماره حالت	۱	۲
تقاضا (مگاوات)	۵۰	۱۲۵
توسعه پست انتقال	--	توسعه شین ۲
مکان و ظرفیت DG نصب‌شده	۵ (۱۰ مگاوات)	۵ و ۶ (۱۰ مگاوات)
سود مالکان DG (میلیون دلار)	۳/۱۸۹	۷/۴۵
هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)	۲/۳۱۳	۵/۰۳
خرید توان از شبکه بالادست (مگاوات)	(۳۹/۵)	(۴۵) و (۶۰)



شکل ۵: تأثیر نرخ رشد تقاضا بر سرمایه‌گذاری

جدول ۶: تأثیر تغییر قیمت خرید از بازار بالادست

شماره حالات	۱	۲
قیمت شبکه بالادست	۵۰	۱۵۰
توسعه پست انتقال	شین ۲	--
مکان و ظرفیت DG نصب‌شده (مگاوات)	--	۵ و ۶ (۱۵)
سود مالکان DG (میلیون دلار)	--	۱۲/۳۴
هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)	۲/۴۳	۶/۵۹
خرید توان از شبکه بالادست (مگاوات)	(۵۰)	(۵۰) و (۶۰)

۳-۲-۱- تحلیل سناریوهای شبیه‌سازی

سناریوی اول: سناریوی اول، سناریوی پایه است که در آن مالکان DGها ملزم به فروش تمام توان تولیدی DG در قالب قرارداد تضمینی می‌باشند [۲۶]. در غیاب DGها به علت محدودیت خطوط انتقال، جوابی حاصل نشده است. در صورت تقویت خطوط و توسعه پست‌های ROYAN در بالادست، پاسخ بهینه در پرداختی ۱۰۳ میلیون دلاری بهره‌بردار حاصل می‌شود. جدول ۸ نتایج سناریوهای اول و دوم را نشان می‌دهد. نتایج حالت ۱ نشان می‌دهد که در حضور DGها، توسعه پست‌های بالادست و تقویت خطوط حذف شده‌اند و هزینه مسئله سطح پایین به میزان ۱۵ درصد کاهش یافته است. سود ۲۳ میلیون دلاری مالکان DG، زمینه مناسب را برای سرمایه‌گذاری نشان می‌دهد. با توجه به رشد بار شبکه، توسعه شبکه در سال‌های آتی برای پاسخ‌گویی به تقاضا ضروری است و مشاهده می‌شود که با وجود مشوق‌ها تمایل به توسعه DG بیش‌تر است.

سناریوی دوم: در این سناریو، تأثیر بازار عمده‌فروشی بر توسعه DGها بررسی می‌شود. به‌طوری‌که حجم معینی از ظرفیت DGها به‌صورت تضمینی توسط بهره‌بردار شبکه خریداری شده و مالکان DGها با باقیمانده ظرفیت DG در بازار شرکت می‌کنند. از جدول ۸ ملاحظه می‌شود که کاهش حجم قرارداد به ۰/۷ سبب کاهش ۴۵ مگاواتی در ظرفیت سرمایه‌گذاری DGها و کاهش سود مالکان به میزان ۳۰ درصد شده است. قیمت مکانی در دوره اوج مصرف، میان‌باری و کم‌باری، به‌ترتیب ۱۸ و ۱۵/۳ و ۱۲/۸ دلار بر مگاوات‌ساعت در شین‌های بار محاسبه شده است. کاهش سود مالکان DGها، با مقایسه قیمت مکانی و قیمت قرارداد تضمینی توجیه می‌شود. با کاهش حجم قرارداد پرداختی بهره‌بردار به میزان ۱۳ درصد کاهش می‌یابد، زیرا بر اساس قوانین بازار عمده‌فروشی، پرداخت هزینه بهره‌برداری DGهای شرکت‌کننده در بازار بر عهده مالکان آن‌ها است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در حجم بالای قرارداد در شبکه، با توجه به مشوق‌های سرمایه‌گذاری مناسب و این‌که هزینه بهره‌برداری DGها بر عهده بهره‌بردار بوده، سرمایه‌گذاری بر روی DGها بسیار مطلوب بوده و برای مالکان آن‌ها سود بالایی را به‌همراه دارد. شکل ۷ تأثیر حجم قرارداد تضمینی را در توسعه ظرفیت DG، سود سرمایه‌گذاری و توسعه پست انتقال نشان می‌دهد. شایان ذکر است واحد محور عمودی شکل ۷، برای ظرفیت نصب‌شده مولدها مگاوات، و برای منافع و هزینه‌ها برحسب میلیون دلار است. ملاحظه می‌شود برای مالکان DGها مشارکت کامل در بازار سود پایینی را به‌همراه دارد. لذا وجود مشوق‌های سرمایه‌گذاری از اهمیت بالایی برخوردار است. در حجم بالای قرارداد، سرمایه‌گذاری DGها مطلوب‌تر است. لذا توسعه پست‌های انتقال انجام نشده و مجموع توان خریداری‌شده از شبکه بالادست تقریباً ۴۷۴ مگاوات است. جدول ۹ نتایج را در حالتی که قیمت قرارداد ۲ برابر شود نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود در این شرایط پست انتقال ROYAN باید توسعه یابد.

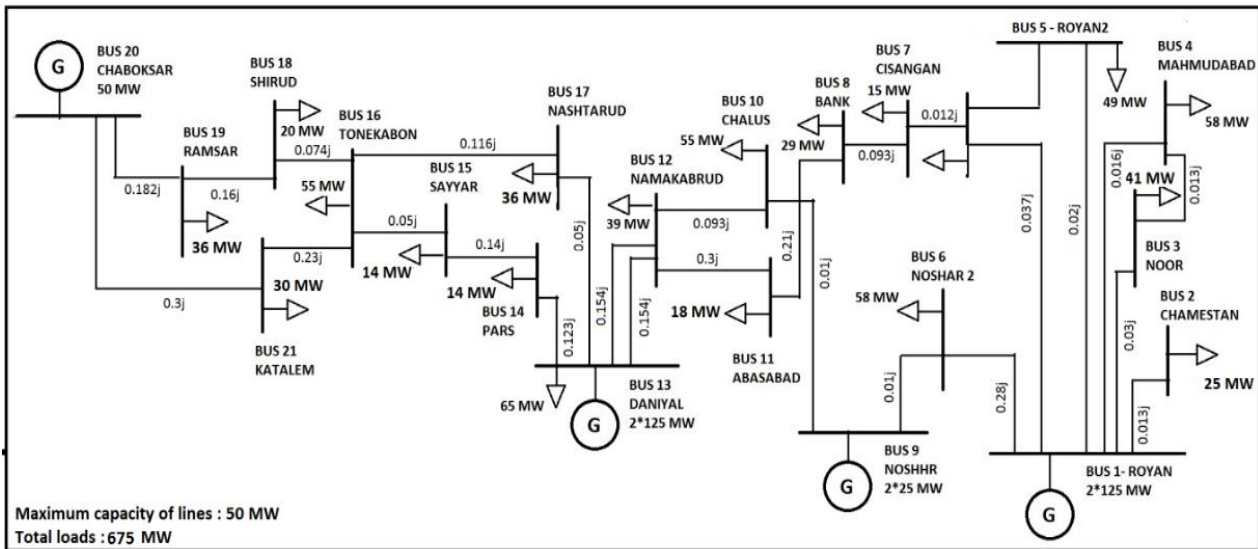
به نمودار، اگر میزان تقاضا افزایش یابد، با وجود این‌که شبکه با تقویت هر دو پست موجود نیز پاسخ‌گوی تقاضا است ولی به‌علت محدودیت توان عبوری از خطوط برنامه جواب ندارد.

۳-۱-۳- تأثیر قیمت انرژی شبکه بالادست

قیمت انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست، یکی از عوامل تأثیرگذار بر استراتژی توسعه DGها و پست‌های بالادست می‌باشد. نتایج حاصل از این تحلیل حساسیت در جدول ۶ آمده است. بالا بودن قیمت بازار بالادست مشوقی خوبی برای توسعه هرچه بیش‌تر DGها است. کاهش قیمت انرژی شبکه بالادست موجب توسعه پست‌های بالادست (توسعه در شین ۲) و خرید انرژی از آن‌ها (افزایش ۳۰ مگاواتی در خرید) شده، به‌طوری‌که کاهش هزینه بهره‌بردار را به میزان ۶۳ درصد، به‌همراه دارد.

۳-۲- مورد مطالعاتی دوم: شبکه فوق‌توزیع غرب مازندران

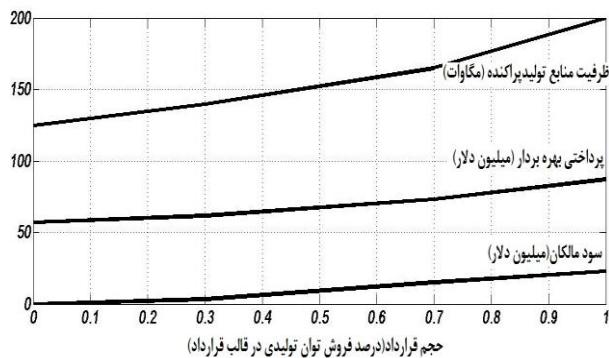
دیاگرام تک‌خطی شبکه فوق‌توزیع غرب استان مازندران در شکل ۶ نشان داده شده است. میزان تقاضا پیش‌بینی‌شده در سال مطالعه ۶۷۵ مگاوات است. ظرفیت خطوط فوق‌توزیع ۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. امیدانس خطوط برحسب پربونیت در قدرت مبنای ۱۰۰ مگاوات آمپر و قدرت قابل‌انتقال آن‌ها برحسب مگاوات روی دیاگرام نشان داده شده‌اند. در این شبکه ۴ پست اصلی ۲۳۰/۶۳ کیلوولت، ROYAN، CHABOKSAR، NOSHahr، DANiyAL وجود دارند که مطابق ظرفیتشان به‌صورت واحد تولید مدل شده‌اند. پست‌های ROYAN و DANiyAL کاندیدای توسعه ظرفیت (به‌ترتیب افزایش ظرفیت ۱۲۵ و ۷۰ مگاواتی) می‌باشند. هزینه ترانسفورماتور ۱۲۵ و ۷۰ مگاواتی به‌ترتیب ۵ و ۲/۵ میلیارد تومان در نظر گرفته شده است که با توجه به نرخ بهره ۱۲ درصدی، هزینه معادل یکنواخت سالیانه آن‌ها محاسبه شده است. ۱۳ شین ۶۳ کیلوولت به‌عنوان کاندیدای نصب DGها می‌باشند. واحدهای DG به شین‌های ۲۰ کیلوولت پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت متصل می‌شوند، لیکن برای سادگی در این شبیه‌سازی، واحدها به شین‌های ۶۳ کیلوولت متصل شده‌اند. حداکثر ظرفیت DGهای قابل‌نصب در هر شین ۲۵ مگاوات (پله‌های ۵ مگاواتی) فرض شده است. قیمت خرید قراردادی توان DGها در همه سطوح بار ۲۶/۵ دلار بر مگاوات ساعت است که با توجه به مشوق‌های سرمایه‌گذاری مندرج در دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیروی ایران، پرداخت این هزینه مشروط بر فروش قراردادی توان بر عهده بهره‌بردار مستقل شبکه است. هزینه نهایی مولدهای گازی ۷/۵ دلار بر مگاوات ساعت است. نرخ پرداخت آمادگی ظرفیت در قرارداد تضمینی ۸۳/۳۳ درصد قیمت قرارداد و در بازار عمده‌فروشی ۵/۴ دلار بر مگاوات ساعت است. قیمت خرید برق از شبکه بالادست در ساعات اوج، میان کم‌باری به‌ترتیب ۱۷-۱۴/۵-۱۲ دلار بر مگاوات ساعت فرض شده است. سایر اطلاعات مشابه شبکه ۶ شینه است. مدل پیشنهادی با استفاده از حل‌کننده CPLEX [۲۳]، در نرم‌افزار GAMS [۲۴] حل شده است. ضمناً سناریوهای مختلفی بر اساس جدول ۷ تعریف شده است.



شکل ۶: دیاگرام تک خطی شبکه فوق توزیع غرب استان مازندران

جدول ۹: تأثیر افزایش قیمت قرارداد تضمینی در سناریوی دوم

توسعه هر دو پست	توسعه پست ROYAN	توسعه پست DANYAL	عدم توسعه	حالات توسعه پست‌های انتقال
۴۶/۰۸	۴۶/۰۸	۴۷/۱۱	۵۰/۲۷	درآمد مالکان DG (میلیون دلار)
۱۱۵/۵۷	۱۱۵/۱۰ بهینه	۱۱۵/۵۰	۱۱۵/۱۹	هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)



شکل ۷: تأثیر حجم قرارداد در سرمایه‌گذاری

جدول ۱۰: تأثیر تغییرات قیمت انرژی در سناریوی سوم

شماره حالت	۱	۲	۳
قیمت شبکه بالادست در پیک بار (دلار بر مگاوات-ساعت)	۱۵/۵	۲۱/۵	۱۵/۵
توسعه پست انتقال	---	---	ROYAN
مجموع ظرفیت DG نصب شده (مگاوات)	۱۸۰	۲۰۰	۲۰
درآمد مالکان DG (میلیون دلار)	۳۷/۱۱	۴۹/۱۴	۲/۱۶
هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)	۷۶/۰۳	۹۵/۴۶	۴۷/۱۸

جدول ۷: سناریوهای شبیه‌سازی شبکه مازندران

شماره سناریو	تکنولوژی DG	مشوق‌های سرمایه‌گذاری	مشارکت در بازار	شرح سناریو
۱	✓	✓	-	سناریوی پایه و بررسی شبکه در غیاب DG در حالت اول و سپس بررسی حضور آن‌ها در حالت دوم
۲	✓	✓	✓	تغییرات حجم قرارداد تضمینی به‌منظور بررسی تأثیر حضور DG در بازارهای لحظه‌ای
۳	✓	✓	✓	تغییر قیمت بازار بالادست

جدول ۸: نتایج سناریوهای اول و دوم

شماره سناریو	۱	۲
حجم قرارداد	۱	۰/۷
مکان و ظرفیت DG نصب شده (مگاوات)	(۳،۱۲)۱۵ (۴)۲۰)۲۵ (۶،۷،۱۰،۱۶،۱۷،۱۹)	(۳)۱۵ (۱۱،۸)۱۰ (۳،۶،۱۰،۱۲)۲۰ (۱۹،۱۷)۲۵
سود مالکان DG	۲۳/۱۲ میلیون دلار	۱۶/۰۸ میلیون دلار
هزینه مسئله سطح پایین	۸۷/۴۱ میلیون دلار	۷۵/۲۴ میلیون دلار
خرید از شین‌های شبکه بالادست (مگاوات)	(۱۳/۳)۹ - (۲۴/۸)۳۱ - (۱۶۳/۶)۱۳ (۵۰)۲۰	(۴۰)۹ - (۲۴۲/۳)۱ - (۱۴۲/۶۶)۱۳ (۵۰)۲۰

فوق توزیع را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، کاهش نرخ رشد بار سبب عدم نیاز به ارتقاء شبکه شده است. به طوری که در حالت رشد بار ۳ درصد، سهم تولید DGها و شبکه بالادست و پرداختی بهره‌بردار کاهش می‌یابد. لذا کاهش نرخ رشد بار سبب عدم نیاز به ارتقاء شبکه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، چهارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده در پست‌های فوق توزیع با در نظر گرفتن امکان توسعه ظرفیت پست‌های انتقال شبکه بالادست در حضور مشوق‌های سرمایه‌گذاری ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند:

✓ با استفاده از الگوریتم تلفیقی پیشنهادی مبتنی بر یکایک‌شماری پیشنهادی و MILP، مشکل عدم‌تحدب و غیرقابل‌خطی‌سازی مسئله دوسطحی حل شده است. در این شرایط، امکان تسویه بازار و به‌دست آوردن قیمت‌های مکانی که دارای اهمیت زیادی در بازارهای برق می‌باشند، در مدل دوسطحی ارائه‌شده ممکن شده است. همچنین مدل برای شبکه‌های آزمون بزرگ هم کارایی دارد.

✓ قرارداد تضمینی (حجم قرارداد و قیمت آن)، پرداخت آمادگی، قیمت خرید انرژی از بازار بالادست، ضریب نفوذ از عوامل اثرگذار در رفتار سرمایه‌گذاری DGها و توسعه پست بالادست شناخته شده‌اند. مشوق‌های قرارداد تضمینی و پرداخت آمادگی ظرفیت، منجر به افزایش میل به سرمایه‌گذاری، احداث واحدهای جدید و سود شرکت‌های تولید می‌شوند؛ اما لزوماً باعث کاهش هزینه‌های پرداختی توسط بهره‌بردار نمی‌شوند. میل به سرمایه‌گذاری در قراردادهای با قیمت بالا نسبتاً بالا کم هست. زیرا توسعه پست‌های انتقال هزینه کم‌تری در بر خواهد داشت.

✓ مشارکت کل ظرفیت DGها در بازار، سود کمی عاید سرمایه‌گذار خواهد شد. از طرفی فروش کامل ظرفیت به صورت قراردادی، پرداختی بهره‌بردار را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

✓ مشارکت هم‌زمان DGها در بازارهای عمده‌فروشی و قراردادی، سود مناسبی برای سرمایه‌گذار داشته و هزینه مسئله سطح پایین را کاهش می‌دهد. مشارکت بخشی از ظرفیت DGها در بازار، کاهش پرداختی بهره‌بردار و سود مناسبی را برای سرمایه‌گذار به همراه دارد.

✓ کاهش قیمت سوخت DGها توسعه ظرفیت این منابع را افزایش و پرداختی بهره‌بردار را کاهش می‌دهد. در این صورت، بالا بودن قیمت خرید انرژی از شبکه نسبت به قیمت خرید تضمینی و افزایش ضریب نفوذ، میل سرمایه‌گذاری را افزایش و پرداختی بهره‌بردار را کاهش می‌دهد.

✓ افزایش نرخ رشد بار، موجب توسعه ظرفیت DGها و توسعه پست‌های انتقال را به همراه دارد.

افزودن امکان توسعه شبکه فوق توزیع، علاوه بر توسعه پست انتقال به مدل دوسطحی ارائه‌شده در این مقاله، از برنامه‌های آینده تحقیق در این زمینه است.

جدول ۱۱: تأثیر تغییرات نرخ رشد بار

نرخ رشد بار (%)	۱۲	۳	۱۵
توسعه پست انتقال	ROYAN	--	DANYAL ROYAN
ظرفیت DG نصب‌شده (مگاوات)	۲۳۵	۱۴۵	۲۱۰
درآمد مالکان DG (میلیون دلار)	۴۹/۱۴	۳۴/۱۱	۴۲/۱۲
هزینه مسئله سطح پایین (میلیون دلار)	۱۰۵/۴۸	۷۴/۰۳	۱۰۰/۶۶
خرید از شین‌های شبکه بالادست (مگاوات)	(۳۱۲)۱	(۲۱۳)۱	(۲۹۳)۱
	(۱۷۵)۱۳	(۱۴۷)۱۳	(۳۷۵)۱۳
	(۳۵)۹	(۰)۹	(۴۹)۹
	(۵۰)۲۰	(۴۶)۲۰	(۵۰)۲۰

سناریوی سوم: در این سناریو تأثیر تغییرات قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست مطالعه می‌شود. جدول ۱۰، نتایج این سناریو را نشان می‌دهد. در حالت ۱ و با کاهش قیمت خرید انرژی، ظرفیت سرمایه‌گذاری شده و پرداختی بهره‌بردار به ترتیب ۲۰ مگاوات و ۱۱ درصد نسبت به حالت پایه کاهش می‌یابند. در حالت ۲، پرداختی بهره‌بردار نسبت به حالت پایه ۹ درصد افزایش می‌یابد. بالا بودن قیمت خرید انرژی از شبکه مشوقی برای مشارکت بیشتر DGها در بخش تولید بوده و نیز قیمت پایین موجب توسعه پست‌های انتقال می‌شود. همچنین محدودیت توان عبوری از خطوط در کنار این تغییرات نقش مهمی دارد. در حالت ۳ و با فرض تقویت خطوط (افزایش دو برابری ظرفیت)، توسعه پست ROYAN انجام شده و ظرفیت سرمایه‌گذاری شده به میزان ۱۶۰ مگاوات نسبت به حالت ۱ کاهش می‌یابد. لذا پرداختی بهره‌بردار به ۲ میلیون دلار کاهش یافته است.

۳-۲-۲- تأثیر تغییرات نرخ رشد تقاضا

برای مطالعه تأثیر تغییرات نرخ رشد بار بر توسعه سیستم سه حالت ۳، ۱۲ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. جدول ۱۱ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با افزایش نرخ رشد بار به ۱۲ درصد، مشارکت DGها در تولید نسبت به حالت پایه به میزان ۳۵ مگاوات افزایش و منجر به ارتقاء شبکه از طریق توسعه پست ROYAN می‌شود. سود سرمایه‌گذاری نسبت به حالت پایه ۱۷ درصد افزایش، و پرداختی بهره‌بردار به میزان ۲۳/۴ درصد افزایش یافته است. در نرخ رشد بار ۱۵ درصدی، توسعه هر دو پست شبکه بالادست حداقل هزینه بهره‌بردار را به همراه دارد. همچنین سهم خرید توان از شبکه (با قیمتی کم‌تر نسبت به قیمت قرارداد) نسبت به حالت رشد بار ۱۲ درصدی به میزان ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. افزایش نرخ رشد بار موجب افزایش مشارکت DGها و نیاز به توسعه پست انتقال می‌شود. این امر افزایش هزینه خرید برق از شبکه، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری DG و نهایتاً افزایش هزینه سیستم را به دنبال دارد. شایان ذکر است که DGها با ظرفیت بالایی در تولید مشارکت داشته که اهمیت حضور آن‌ها را در شرایط افزایش نرخ رشد بار به منظور تعویق در تقویت خطوط

پیوست‌ها

جدول ۱۲: معرفی واژه‌ها و عبارات

مجموعه‌ها	اندیس‌ها	ورودی‌ها	خروجی‌ها
Φ_j : مجموعه شین‌ها Φ_{63}^{bus} : مجموعه شین‌های ۶۳ کیلوولت Φ_{20}^{bus} : مجموعه شین‌های ۲۰ کیلوولت	j / k : شماره شین‌ها $j \in \Phi_j$ n : شماره شین‌های ۲۰ کیلوولت $n \in \Phi_{20}^{bus}$ i : شماره شین‌های ژنراتوری $i \in \Phi_{63}^{bus}$ l : شماره سطوح بار $l \in \Phi_{ll}$ d : شماره تقاضا b : شماره هر یک از بلاک‌های توانی DG $b \in \Phi_b$	CV_n : حجم قرارداد در شین n (درصد معینی از ظرفیت تولیدی منابع DG) CP_{ln}^{dgc} : قیمت قرارداد در شین n و سطح بار l (\$/MWh) EP_{li} : قیمت انرژی در شبکه بالادست W_1^{dg} : احتمال نیاز شبکه به تولید DG σ_l : تعداد ساعت سطوح بار (h) CPR_1^{dgc} : قیمت پرداخت ظرفیت در قالب قرارداد در شین n و سطح بار l (\$/MWh) CPR_1^{dgp} : قیمت پرداخت ظرفیت در بازار در شین n و سطح بار l (\$/MWh) AIC^{dg} : هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه واحد تولیدپراکنده (\$/MW)	MC_n : هزینه نهایی واحد DG در شین n (\$/MWh) B_{jk}^{PU} : سوسپتانس خطوط (p.u.) F_{jk}^{max} : ظرفیت خطوط (MW) X_n^{dgcmax} : ظرفیت‌های قابل سرمایه‌گذاری (MW) X_i^{ES} : ظرفیت پست‌های انتقال موجود (MW) X_i^S : ظرفیت پست‌های کاندیدای نصب در شبکه بالادست (MW) P_{ln}^D : تقاضا (MW) FOR^{dg} : نرخ خروج اجباری DG‌ها AIC_{li}^S : هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری توسعه پست انتقال (\$) IC^{max} : بودجه سرمایه‌گذاری در دسترس (\$)

مورد مطالعه، «مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۲، شماره ۱، صفحات ۶۱-۷۳، ۱۳۹۱».

مراجع

- [9] T. Akbari, and M. Heidarzadeh "Towards integrated planning: Simultaneous transmission and substation expansion planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 86, pp. 131-139, 2012.
- [10] A. Ford, "Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California," *Energy Policy*, vol. 29, pp. 847-869, 2001.
- [11] L. Baringo, and A. J. Conejo, "Transmission and wind power investment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 885-893, 2012.
- [12] A. Galetovic, C. M. Muñoz, and F. A. Wolak, "Capacity payments in a cost-based wholesale electricity market: the case of Chile," *The Electricity Journal*, vol. 28, no. 10, pp. 80-96, 2013.
- [۱۳] نبی طاهری، رحمت‌ا... هوشمند و رضا همتی «برنامه‌ریزی هماهنگ نصب منابع تولیدپراکنده و توسعه شبکه توزیع در حضور نامعینی بار و قیمت انرژی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۱، صفحات ۴۳-۵۶، ۱۳۹۲.
- [14] J. M. López-Lezama, J. Contreras, and A. Padilha-Feltrin "Location and contract pricing of distributed generation using a genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 117-126, 2012.
- [15] H. Asadi Bagal, S. Soleimani, B. Mozafari, and A. Noruzi, "Simultaneous placement sub-transmission substation and distributed generation considering load uncertainty," *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, vol. 4, no. 10, pp. 2884-2896, 2013.
- [1] *Interim Report on Distributed Generation. Maine Public Utilities Commission*, [Online], Available online at: http://www.state.me.us/mpuc/2001legislation/DG_Rpt_Final.htm, 2001.
- [2] X. Wang, and J. R. McDonald, *Modern Power System Planning*, MCGRAW-HILL Publication, 1994.
- [3] T. Gonen, and I. Ramirez-Rosado, "Review of distribution system planning models: A model for optimal multi-stage planning," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pp. 397-408, 1986.
- [4] S. K. Khator, and L. C. Leung, "Power distribution planning: A review of models and issues," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1151-1159, 1997.
- [5] P. Chiradeja, and R. Ramakumar, "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 764-773, 2004.
- [6] H. Kiani Rad "Substation expansion planning based on BFOA," *International Journal of Smart Electrical Engineering*, vol. 4, no. 3, 2015.
- [7] E. Naderi, H. Seifi, and M. S. Sepasian, "A dynamic approach for distribution system planning considering distributed generation," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1313-1322, 2012.
- [۸] سیدمهدی مظفری، حسن منصف و حمید فلقی «رویکردی جدید در توسعه پست‌های فوق‌توزیع مبتنی بر وزن‌دهی فازی ویژگی‌های الکتریکی و جغرافیایی شبکه توزیع

- [21] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and Carlos Ruiz, "Strategic Generation Investment Using a Complementarity Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, 2011.
- [22] L. P. Garcés, A. J. Conejo, R. García-Bertrand, and R. Romero, "A bilevel approach to transmission expansion planning within a market environment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1513-1522, 2009.
- [23] *The ILOG CPLEX*, [Online], Available online at: <http://www.ilog.com/products/cplex>, 2013.
- [24] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, *GAMS: A User's Guide*, Washington, DC: GAMS, 1998.
- [25] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, "Strategic generation investment using a complementarity approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 940-948, 2011.
- [۲۶] دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک، وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر خصوصی‌سازی صنعت برق، ۱۳۸۷.
- [16] M. E. Cebeci, S. Eren, O. B. Tor, and N. Gunven, "Transmission and substation expansion planning using mixed integer programming," *North American Power Symposium*, pp. 1-5, 2011.
- [17] L. Baringo, and A. J. Conejo, "Strategic offering for a wind power producer," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4645-4654, 2013.
- [18] F. Facchinei, and J. S. Pang, *Finite Dimensional Variational Inequalities and Complementarity Problems*, New York, Springer-Verlag, 2003.
- [19] B. F. Hobbs, C. B. Metzler, and J. S. Pang, "Calculating equilibria in imperfectly competitive power markets: An MPEC approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 638-645, 2000.
- [20] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, "Generation investment equilibria with strategic producers—Part II: Case Studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2623-2631, 2013.

زیرنویس‌ها

- ¹ Distributed Generation (DG)
- ² numerical methods
- ³ heuristic methods
- ⁴ analytical methods
- ⁵ Mixed integer non-linear programming (MINLP)
- ⁶ Genetic Algorithm
- ⁷ Monte Carlo (MC) simulation
- ⁸ Capacity payment rate (CPR)
- ⁹ Penetration factor (PF)
- ¹⁰ Local marginal price (LMP)
- ¹¹ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)
- ¹² Marginal cost (MC)