



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 2, 2020
Research Paper

Providing a bi-level model for medium and low voltage distribution network expansion planning

Abdollah Rastgou¹, Sasan Ghasemi², Salah Bahramara³

¹ Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
a.rastgou@iauksh.ac.ir

² Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
ghasemi.sasan@gmail.com

³ Department of Electrical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran
s_bahramara@yahoo.com

Abstract:

In this paper, a bi-level model is proposed for low and medium voltage distribution network expansion planning in the presence of distributed generations (DGs) which are located in the low-voltage network. In the bi-level model, the upper and lower levels are medium and low voltage networks, respectively. The model is decomposed to two sub problems and the final aim is to find the answer with minimum planning and operation costs consisting of the cost of installing and upgrading of new and existing transformers, substations, feeders, distributed generations and cost of losses. The model is a mixed-integer non-linear programming, which is solved by a genetic algorithm with a proposed codification. To show the effectiveness of the proposed model and solution method, the model is implemented in a distribution system in three case studies, including, problem solving with traditional planning, bi-level programming without considering DGs and bi-level programming considering DGs in the low-voltage side. The obtained results show that the importance of incorporating both low and medium voltage networks simultaneously is very effective in reducing costs.

Keywords: Genetic algorithm, Distribution network expansion planning, Bi-level model, Distributed generations.



2252-083X/ © 2020 The Authors. Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2019.118945.1274>

ارائه مدلی دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف

عبداله راستگو^۱، ساسان قاسمی^۲، صلاح بهرام‌آرا^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی برق - واحد کرمانشاه - دانشگاه آزاد اسلامی - کرمانشاه - ایران

a.rastgou@iauaksh.ac.ir

۲- دکتری، گروه مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

ghasemi.sasan@gmail.com

۳- استادیار، گروه مهندسی برق - واحد سنندج - دانشگاه آزاد اسلامی - سنندج - ایران

s_bahramara@yahoo.com

چکیده: این مقاله مدلی دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف با لحاظ کردن منابع تولید پراکنده در شبکه فشار ضعیف ارائه می‌شود. در مدل دوسطحی، سطوح بالا و پایین به ترتیب شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف‌اند. در مدل پیشنهادی با تجزیه مدل به دو زیر مسئله، هدف نهایی، یافتن جوابی است که کمترین هزینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری را در هر دو شبکه متحمل کند. هزینه‌های مسئله شامل هزینه نصب و ارتقای ترانسفورماتورهای جدید و موجود، پست‌ها، فیدرها، منابع تولید پراکنده و هزینه تلفات است. مدل دوسطحی به صورت یک مدل غیرخطی آمیخته عدد صحیح است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک با یک کدبندی پیشنهادی حل می‌شود. به منظور نشان دادن کارایی مدل و روش حل پیشنهادی، سه مورد مطالعاتی شامل، حل مدل به صورت متداول، حل مسئله با استفاده از مدل دوسطحی و حل مدل دوسطحی با لحاظ کردن منابع تولید پراکنده در سمت فشار ضعیف بررسی خواهند شد. نتایج نشان می‌دهند اهمیت لحاظ کردن هم‌زمان هر دو شبکه فشار ضعیف و فشار متوسط در کاهش هزینه‌ها بسیار مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، مدل دوسطحی، منابع تولید پراکنده

۱- مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه و اهداف

برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی سیستم قدرت است که مهم‌ترین هدف آن تأمین بار الکتریکی با مشخص کردن مکان، زمان و ظرفیت احداث پست‌ها و فیدرهای توزیع، متعاقب رشد تقاضای بار الکتریکی با کمترین هزینه است. به عبارت دیگر، ارائه یک

طرح توسعه برای تأمین اقتصادی و فنی توان الکتریکی است؛ به طوری که سطح قابلیت اطمینان شبکه حفظ یا بهبود یابد. منظور از تأمین اقتصادی و فنی توان آن است که نخست هزینه‌های سرمایه‌گذاری حداقل شود و دوم، شبکه محدودیتی در بهره‌برداری اقتصادی نداشته باشد؛ بنابراین، مسئله به صورت یک بهینه‌سازی مقید به فیود فنی شبکه تعریف می‌شود و طرح توسعه باید قادر به عرضه انرژی تقاضاشده باشد، ضمن آنکه استانداردهای فنی را نیز برآورده کند و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه را کاهش دهد.

مطالعات برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع دو مرحله دارد؛ در مرحله نخست، گزینه‌های مختلف توسعه شبکه توزیع در افق برنامه‌ریزی به کمک مدل‌های ساده‌شده‌ای همچون مدل پخش بار DC به دست می‌آیند و در مرحله

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹

نام نویسنده مسئول: عبدالله راستگو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمانشاه - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد کرمانشاه - گروه مهندسی برق

یک مسئله بهینه‌سازی با یک تابع هدف مدل شده و این نوع مدل در بسیاری از مطالعات به کار گرفته شده است. مطرح شدن اهداف جدید، مرتبط و متقابل سبب شده است که رویکرد مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع به سمت مدل‌های برنامه‌ریزی با چند تابع هدف مرتبط به هم سوق پیدا کند؛ به طوری که هر تابع هدف، خود را بدون توجه به هدف قسمت دیگر بهینه کند. نکته مهم آن است که مقدار تابع هدف و فضای تصمیم‌گیری در آن تابع هدف بر توابع هدف دیگر اثر می‌گذارد.

مزیت اصلی این مدل‌ها این است که به برنامه‌ریز سیستم اجازه تحلیل هزینه - فایده را می‌دهد؛ درحالی که در مدل‌های کلاسیک این امر امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل در سالیان اخیر به کارگیری مدل‌های چند معیاری مرتبط به هم بسیار درخور توجه پژوهشگران و برنامه‌ریزان شبکه قدرت قرار گرفته است؛ بنابراین، در این زمینه لازم است روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی با دو سطح مستقل مرور و بررسی شوند.

مطالعات بسیاری در ارتباط با توسعه شبکه توزیع انجام شده که عمده این مطالعات در شبکه توزیع فشار متوسط است [۱-۱۴]. در [۱۵-۲۰]، برنامه‌ریزی شبکه توزیع در سطح ولتاژ فشار ضعیف و در [۲۱-۲۴]، برنامه‌ریزی شبکه توزیع در سطوح فشار متوسط و فشار ضعیف انجام شده است. در [۲۵] مطالعات جامعی در ارتباط با برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع آورده شده است. گفتنی است در مطالعات انجام‌شده، شبکه توزیع در حل مسئله بهینه‌سازی به صورت دو شبکه مجزا در نظر گرفته نشده و یک مسئله سرتاسری با یک بهینه‌سازی تک‌سطحی بیان شده است؛ درحالی که شبکه‌های فشار متوسط و ضعیف، دو شبکه مستقل از هم با نیازمند‌های خاص خود هستند. بیشتر مدل‌های ریاضی شامل یک تصمیم‌گیرنده و یک تابع هدف اند که برای برنامه‌ریزی متمرکز به کار می‌روند؛ اما برنامه‌ریزی دوسطحی برای تصمیم‌گیری غیرمتمرکز توسعه داده شده است. در برنامه‌ریزی دوسطحی که تصمیم‌گیرنده سطح یک آن را رهبر و تصمیم‌گیرنده سطح دو آن را پیرو می‌نامند، هر تصمیم‌گیرنده سعی می‌کند تابع هدف خود را بدون توجه به هدف قسمت دیگر بهینه کند؛ اما تصمیم هر

دوم، ارزیابی گزینه‌های توسعه به کمک تحلیل پخش بار AC در سطح بارهای حداکثر، متوسط و حداقل، آنالیز اتصال کوتاه و قابلیت اطمینان به طور دقیق‌تر بررسی می‌شوند. در بیشتر مراجع و این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی در مرحله نخست بوده است که شامل مدل‌های دقیق‌تر پخش بار در تهیه طرح‌ها نیز هست. روش‌های مختلف ارائه‌شده برای ایجاد طرح‌های توسعه شبکه قدرت، معمولاً تنها معیار کفایت‌مندی را در مدل خود مدنظر قرار می‌دهند و مقوله امنیت را به تحلیل‌های مرحله دوم برنامه‌ریزی موقوف می‌کنند.

برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، در شبکه توزیع اولیه و ثانویه به کار گرفته می‌شود. شبکه توزیع اولیه، شبکه فشار متوسط توزیع و شبکه توزیع ثانویه همان شبکه فشار ضعیف توزیع است. برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در واقع یک مسئله بهینه‌سازی است که این مسئله بهینه‌سازی به دو صورت برنامه‌ریزی توسعه و برنامه‌ریزی تقویت بیان می‌شود. در طرح‌های توسعه، برنامه‌ریز با توجه به محدودیت‌های زیست‌محیطی، مسیرها یا مکان‌های جدیدی برای احداث فیدرها یا پست‌های جدید و منابع تولید پراکنده انتخاب می‌کند و بنابراین، مسیرها یا توان جدیدی به شبکه افزوده خواهد شد. در طرح‌های تقویت، شبکه در بعضی فیدرها تقویت می‌شود. هر دو این برنامه‌ریزی‌ها مقید به قیود فنی شبکه از جمله، قیود مربوط به پخش بار، محدودیت ولتاژ شین‌ها، محدودیت ظرفیت فیدرها و پست‌ها، محدودیت از ترانسفورماتورها و کابل‌ها است.

جایابی و سایز بهینه ترانسفورماتورها، تأثیر بسزایی در میزان تلفات در شبکه فشار ضعیف دارد؛ در غیر این صورت می‌تواند هزینه‌های زیادی داشته باشد. به کارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه فشار ضعیف تأثیر شگرفی بر میزان جریان کشیده‌شده و به تبع آن میزان تلفات دارد؛ از این رو، در این مقاله مدلی دوسطحی ارائه می‌شود که بتواند به طور هم‌زمان در هر دو شبکه فشار ضعیف و فشار متوسط رابطه متقابل برقرار کند و به عبارت دیگر، به یک نقطه بهینه برای هر دو شبکه دست یابد.

۱-۲- مرور ادبیات و نوآوری

مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع از ابتدا به‌عنوان

در زمان معقول پیدا نشده است و به احتمال زیاد در آینده نیز یافت نخواهد شد. اینکه راه حل سریعی برای آنها وجود ندارد نیز اثبات شده است. ثابت شده است اگر فقط برای یکی از این مسئله‌ها راه حل سریعی پیدا شود، این راه حل موجب حل سریع بقیه مسئله‌ها خواهد شد؛ البته احتمال پیداشدن چنین الگوریتمی ضعیف است. منظور از راه حل سریع این است که زمان اجرای آن با اندازه ورودی مسئله به صورت چندجمله‌ای رابطه داشته باشد؛ از این رو، با روش‌های فراابتکاری، مسائل بزرگ تا رسیدن به یک جواب نزدیک به جواب بهینه حل می‌شوند [۲۹]. در این مقاله، حل مسئله دوسطحی توسط الگوریتم ژنتیک با یک کدبندی پیشنهادی بررسی می‌شود. در جدول (۱)، مقایسه مدل پیشنهادی با سایر مطالعات آمده است. به طور خلاصه، نوآوری‌های این مقاله به شرح ذیل اند:

- ارائه مدلی دوسطحی با لحاظ کردن هر دو شبکه توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف؛
- به کارگیری الگوریتم ژنتیک با کدبندی خاص برای حل مسئله.

۱-۳- سازمان‌دهی مقاله

در بخش دوم، مدل ریاضی به همراه توابع هدف و قیود فنی آمده و در بخش سوم، بیان روش حل مدل بررسی شده است. در بخش چهارم، پیاده‌سازی مدل و روش حل پیشنهادی روی یک شبکه توزیع نمونه آورده شده و در نهایت، نتیجه‌گیری از این مقاله در بخش پنجم آمده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی

یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی مطابق رابطه (۱) است. که در آن $f^U(x, y)$ تابع هدف سطح بالا و $f^L(x, y)$ تابع هدف سطح پایین است و h^U, g^U و h^L, g^L به ترتیب قیود سطوح بالا و پایین‌اند [۳۰].

تصمیم‌گیرنده بر مقدار تابع هدف و فضای تصمیم‌گیری سطح دیگر اثر می‌گذارد. در [۲۶] مدلی دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با لحاظ کردن هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف ارائه شده که با تجزیه مسئله اصلی به n زیرمسئله مستقل، حل مسئله بررسی شده است. گفتنی است در این روش دوباره مسئله به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل شده است و آن رابطه متقابل مدنظر در این مقاله لحاظ نمی‌شود. در [۲۷، ۲۸] مدلی چندمرحله‌ای برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است که در این رابطه شایان ذکر است برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای جدا از برنامه‌ریزی دوسطحی است. در برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای در هر مرحله یک بهینه‌سازی تک‌سطحی مستقل انجام می‌گیرد و در انتها با روش‌های تصمیم‌گیری از جمله روش‌های فازی به یک جواب بهینه مطابق میل برنامه‌ریز دست می‌یابند.

یکی از چالش‌های پیش رو در ارتباط با مطالعات برنامه‌ریزی دوسطحی این است که مطابق با [۲۹]، در یک مسئله دوسطحی اگر سطح دوم دارای متغیرهای عدد صحیح باشد، قطعاً مسئله، غیرمحدب است؛ اگرچه همه قیود و توابع هدف به صورت خطی باشند. بنابراین، اگر در یک مسئله دوسطحی، سطح دوم دارای متغیرهای عدد صحیح باشد، با روش‌های کلاسیک ریاضی به دلیل غیرمحدب بودن ذات مسئله، حل نمی‌شود. به عبارت دیگر، حتی اگر همه توابع هدف و قیود خطی شوند، باز هم مسئله غیرمحدب است و با روش‌های معمول ریاضی نمی‌توان مسئله را حل کرد؛ به همین دلیل، برای حل مسائل بهینه‌سازی دوسطحی سعی می‌شود با الگوریتم‌های فراابتکاری این نوع از مسائل را تا نزدیک شدن به یک جواب بهینه پیش برد. دلیل دیگر استفاده از روش‌های فراابتکاری در ارتباط با حل مسائل دوسطحی این است که مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی یک مسئله NP-hard است و در صورتی که تعداد متغیرهای مسئله زیاد باشد، حل آن با روش‌های کلاسیک امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر، روش‌های زیادی برای حل این نوع مسائل ارائه شده است؛ اما کارایی محاسباتی آنها طوری نیست که بتوانند مسائل بزرگ را حل کنند. مجموعه NP-hard شامل چند هزار مسئله مختلف با کاربردهای فراوان است که تاکنون برای آنها راه حل سریع و انجام‌پذیر

فرمول بندی مسئله دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در روابط (۲) تا (۱۸) آمده است. فرمول بندی سطح بالای بهینه سازی در روابط (۲) تا (۹) آمده که به شبکه فشار متوسط مربوط است. همان طور که مشاهده می شود، تابع هدف رابطه (۲) از شش قسمت تشکیل شده است. قسمت یک و دو به ترتیب هزینه نصب فیدهای جدید و ارتقای فیدهای موجود است.

$$\begin{aligned} \min_x \quad & f^U(x, y) \\ \text{s.t.} \quad & h^U(x, y) = 0 \\ & g^U(x, y) \leq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \min_y \quad & f^L(x, y) \\ \text{s.t.} \quad & h^L(x, y) = 0 \\ & g^L(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

جدول (۱): مقایسه مدل پیشنهادی با سایر مطالعات انجام شده

مرجع	سطح ولتاژ			DG	نوع بهینه‌سازی		روش حل
	MV	LV	MV/LV به صورت هم‌زمان		تک سطحی	دوسطحی	
[۷, ۱]	✓	-	-	-	✓	-	فراابتکاری
[۱۱, ۴-۲]	✓	-	-	-	✓	-	فراابتکاری
[۶, ۵]	✓	-	-	✓	✓	-	ریاضی
[۸]	✓	-	-	✓	✓	-	فراابتکاری
[۹]	✓	-	-	-	✓	-	فراابتکاری
[۱۰]	✓	-	-	-	✓	-	ریاضی
[۱۲]	✓	-	-	✓	✓	-	فراابتکاری
[۱۳, ۱۴]	✓	-	-	✓	✓	-	فراابتکاری
[۱۹-۱۵]	-	✓	-	-	✓	-	فراابتکاری
[۲۰]	-	✓	-	✓	✓	-	فراابتکاری
[۲۱]	✓	✓	-	-	✓	-	ریاضی
[۲۳, ۲۲]	✓	✓	-	-	✓	-	فراابتکاری
[۲۴]	✓	✓	-	✓	✓	-	فراابتکاری
این مقاله	-	-	✓	✓	-	✓	فراابتکاری

فرمول بندی مربوط به سطح پایین مسئله در روابط (۱۰) - (۱۸) آمده است. تابع هدف این سطح مطابق رابطه (۱۰)، کاهش هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری در شبکه فشار ضعیف است که از پنج قسمت تشکیل شده است. قسمت اول و دوم به ترتیب بیان کننده هزینه نصب خطوط جدید و ارتقای خطوط موجود است. قسمت سوم بیان کننده هزینه نصب منابع تولید پراکنده است. قسمت چهارم مربوط به هزینه تلفات در شبکه فشار ضعیف و قسمت پنجم مربوط به هزینه تلفات ترانسفورماتورها است. قیود مربوط به سطح پایین در روابط (۱۱) تا (۱۸) آمده است. قید (۱۱) بیان کننده تعادل توان در یک شین یا نقطه است. قید (۱۲) و (۱۳)

قسمت سوم و چهارم بیان کننده هزینه نصب پست های جدید و ارتقای پست های موجود است. قسمت پنجم مربوط به هزینه نصب ترانسفورماتورهای جدید و قسمت ششم مربوط به هزینه تلفات شبکه فشار متوسط است. قیود مربوط به شبکه فشار متوسط در روابط (۳) تا (۹) آمده است. قید (۳) بیان کننده تعادل توان در یک شین یا نقطه است. قیود (۴) و (۵) به ترتیب بیان کننده محدودیت بهره برداری از فیدها و پست ها هستند. قید (۶)، محدودیت ولتاژ در شین های شبکه فشار متوسط را نشان می دهد. قیود (۷) - (۹) بیان می کنند فقط یک نوع المان از قبیل سیم، پست یا ترانسفورماتور می تواند در یک مکان نصب شود.

$$S_{i,l}^{DT} = S_{i,l}^{SD} - S_{i,l}^G + \sum_{j \in \Lambda_{ts}} V_{i,l}^{abcn} \left[\sum_{c \in \Lambda_{TS}} (\delta_{ij,c}^{NS} + \delta_{ij,c}^{ES}) I_{ij,l}^{abcn*} \right] \quad (11)$$

$$\forall i \in \Lambda_{SN}; \forall l \in \Lambda_{NL}$$

$$I_{ij,l}^{abcn} \leq I_{ij,c}^{\max} \quad (12)$$

$$\forall ij \in \Lambda_{SC}; \forall l \in \Lambda_{NL}; \forall c \in \Lambda_{TS}$$

$$S_{i,l}^{DT} \leq S_{i,d}^{\max} \quad (13)$$

$$\forall i \in \Lambda_{DT}; \forall l \in \Lambda_{NL}; \forall d \in \Lambda_{TD}$$

$$S_{i,l}^{DT} = \left[S_{i,d}^{fe} + S_{i,d}^{cu} \left(\frac{S_{i,l}^{DT}}{S_{i,d}^{\max}} \right)^2 \right] + \sum_{l=1}^{nL} \sum_{ij \in \Lambda_{SC}} \sum_{c \in \Lambda_{TS}} R_{ij}^c \left[|I_{ij,l}^{abcn}|^2 \right] + S_{i,l}^{SD} \quad (14)$$

$$\forall ij \in \Lambda_{SC}; \forall i \in \Lambda_{DT}; \forall l \in \Lambda_{NL}$$

$$S_{i,l}^G \leq S_{i,g}^{\max} \quad \forall i \in \Lambda_{NG}; \forall l \in \Lambda_{NL}; \forall g \in \Lambda_{TG} \quad (15)$$

$$V_{i-abcn}^{\min} \leq V_{i,l}^{abcn} \leq V_{i-abcn}^{\max} \quad \forall i \in \Lambda_{SN}; \forall l \in \Lambda_{NL} \quad (16)$$

$$\sum_{c \in \Lambda_{TS}} (\delta_{ij,c}^{NS} + \delta_{ij,c}^{ES}) \leq 1 \quad \forall ij \in \Lambda_{SC} \quad (17)$$

$$\sum_{g \in \Lambda_{TG}} \delta_{i,g}^{NG} \leq 1 \quad \forall i \in \Lambda_{NG} \quad (18)$$

در شکل (۱)، استراتژی برنامه ریزی بین هر دو شبکه توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف مشاهده می شود. به منظور ارزیابی و بررسی تابع هدف سطح بالا ابتدا لازم است مکان، ظرفیت و میزان توان تزریق شده به ترانسفورماتورها ($S_{i,l}^{DT}$) تعیین شود که با روابط سطح بالا پیشنهاد می شود ($S_{i,d}^{\max}$)؛ با وجود این، معادلات پنخس بار در شبکه اولیه به دلیل مشخص نبودن میزان توان تزریق شده به ترانسفورماتورها محاسبه نمی شوند. به عبارت دیگر، قسمت های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۶ در تابع هدف رابطه (۲) به همراه قیود مربوط به سطح بالا زمانی مشخص می شوند که میزان توان تزریق شده به هریک از ترانسفورماتورها تعیین شود. زمانی که مکان و ظرفیت ترانسفورماتورها با سطح بالا تعیین شوند، مسئله سطح پایین برای تعیین میزان توان تزریق شده به ترانسفورماتورها حل می شود.

به ترتیب محدودیت بارگذاری خطوط و بهره برداری از ترانسفورماتورها را بیان می کنند. قید (۱۴)، میزان توان تزریق شده در هر ترانسفورماتور را تعیین می کند. قید (۱۵)، محدودیت بهره برداری از منابع تولید پراکنده را بیان می کند. قید (۱۶) بیان کننده محدودیت ولتاژ در شین های شبکه فشار ضعیف است. قید (۱۷) اتصال یا نصب فقط یک خط بین دو نقطه را در شبکه فشار ضعیف تضمین می کند و در نهایت، قید (۱۸) تضمین می کند فقط یک نوع منبع تولید پراکنده قابلیت نصب در یک نقطه یا شین را در شبکه فشار ضعیف دارد.

$$\min \left(\sum_{ij \in \Lambda_{NP}} \sum_{p \in \Lambda_{TP}} C_{ij,p}^{NP} \delta_{ij,p}^{NP} + \sum_{ij \in \Lambda_{EP}} \sum_{p \in \Lambda_{TP}} C_{ij,p}^{EP} \delta_{ij,p}^{EP} + \sum_{i \in \Lambda_{NSS}} \sum_{s \in \Lambda_{TSS}} C_{i,s}^{NSS} \delta_{i,s}^{NSS} + \sum_{i \in \Lambda_{ESS}} \sum_{s \in \Lambda_{TSS}} C_{i,s}^{ESS} \delta_{i,s}^{ESS} + k_1 \sum_{l=1}^{nL} \sum_{j \in \Lambda_{PF}} \sum_{p \in \Lambda_{TP}} k_2 I_{ij,l}^2 R_{ij}^p (\delta_{ij,p}^{NP} + \delta_{ij,p}^{EP}) \right) \quad (2)$$

s.t:

$$S_{i,l}^S = S_{i,l}^{DT} + \sum_{j \in \Lambda_{tp}} V_{i,l} \left[\sum_{p \in \Lambda_{TP}} (\delta_{ij,p}^{NP} + \delta_{ij,p}^{EP}) I_{ij,l}^* \right] \quad (3)$$

$$\forall i \in \Lambda_{PN}; \forall l \in \Lambda_{NL}$$

$$I_{ij,l} \leq I_{ij,p}^{\max} \quad (4)$$

$$\forall ij \in \Lambda_{PF}; \forall l \in \Lambda_{NL}; \forall p \in \Lambda_{TP}$$

$$S_{i,l}^S \leq S_{i,s}^{\max} \quad (5)$$

$$\forall i \in \Lambda_{SS}; \forall l \in \Lambda_{NL}; \forall s \in \Lambda_{TSS}$$

$$V_i^{\min} \leq V_{i,l} \leq V_i^{\max} \quad \forall i \in \Lambda_{PN}; \forall l \in \Lambda_{NL} \quad (6)$$

$$\sum_{p \in \Lambda_{TP}} (\delta_{ij,p}^{NP} + \delta_{ij,p}^{EP}) \leq 1 \quad \forall ij \in \Lambda_{PF} \quad (7)$$

$$\sum_{s \in \Lambda_{TSS}} (\delta_{ij,s}^{NSS} + \delta_{ij,s}^{ESS}) \leq 1 \quad \forall ij \in \Lambda_{SS} \quad (8)$$

$$\sum_{d \in \Lambda_{TD}} \delta_{i,d}^{ND} \leq 1 \quad \forall i \in \Lambda_{DT} \quad (9)$$

$$\min \left(\sum_{ij \in \Lambda_{NS}} \sum_{c \in \Lambda_{TS}} C_{ij,c}^{NS} \delta_{ij,c}^{NS} + \sum_{ij \in \Lambda_{ES}} \sum_{c \in \Lambda_{TS}} C_{ij,c}^{ES} \delta_{ij,c}^{ES} + k_1 \sum_{l=1}^{nL} \sum_{ij \in \Lambda_{SC}} \sum_{c \in \Lambda_{TS}} k_2 I_{ij,l}^2 R_{ij}^c \times \left[|I_{ij,l}|^2 (\delta_{ij,c}^{NS} + \delta_{ij,c}^{ES}) \right] + k_1 \sum_{l=1}^{nL} \sum_{i \in \Lambda_{DT}} \sum_{d \in \Lambda_{TD}} k_2 \left[S_{i,d}^{fe} + S_{i,d}^{cu} \left(\frac{S_{i,l}^{DT}}{S_{i,d}^{\max}} \right)^2 \right] \right) \quad (10)$$

گام‌های مهم برای اجرای این روش کدکردن جواب‌ها و تبدیل آنها به کروموزوم، طراحی تابع برازندگی، عملگر جهش و عملگر تقاطع‌اند. در این مقاله، هر کروموزوم به صورت رشته‌ای به طول $k_1 + k_2$ لحاظ می‌شود؛ به طوری که k_1 و k_2 به ترتیب تعداد متغیرهای سطح اول و دوم‌اند. برای طراحی تابع برازندگی از روش موجود در [۳۱] استفاده می‌شود؛ بنابراین، ابتدا مسئله سطح دوم حل می‌شود و جواب‌های آن به صورت $y = Y(x)$ در نظر گرفته می‌شوند که x متغیرهای سطح اول است. فرض می‌شود با مقادیر دلخواه \bar{x} مدل حل شده است و جواب \bar{y} به دست می‌آید، حال اگر (x, y) جواب مسئله باشد، d به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d = \left\| (x_1, y_1) - (\bar{x}, \bar{y}) \right\|^\beta \quad (19)$$

در رابطه بالا، d مقدار جریمه و β پارامتری است که با تغییر آن می‌توان ناحیه جستجو حول (\bar{x}, \bar{y}) را تغییر داد. اگر جواب‌های حاصل شرط $y = Y(x)$ را ارضا کردند، این جواب‌ها بهینه‌اند؛ در غیر این صورت، با تابع جریمه از جواب‌های نزدیک به جواب‌های بهینه استفاده می‌شود. برای طراحی تابع برازندگی ابتدا مقدار Ω به صورت زیر تعریف می‌شود:

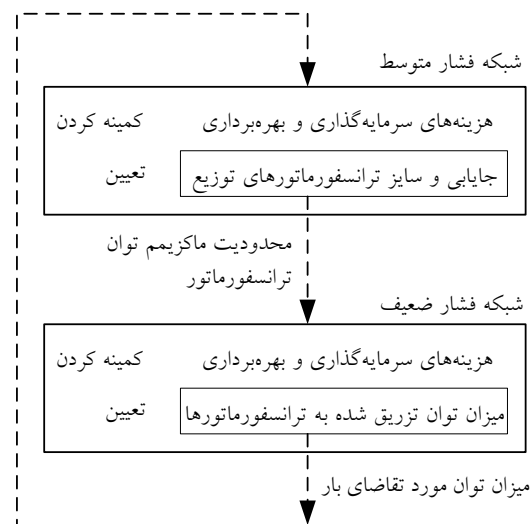
$$\Omega = \begin{cases} 1 & \|(x, y) - (\bar{x}, \bar{y})\| = 0 \\ 1 - \frac{\|(x, y) - (\bar{x}, \bar{y})\|}{d} & 0 < \|(x, y) - (\bar{x}, \bar{y})\| \leq d \\ 0 & \|(x, y) - (\bar{x}, \bar{y})\| > d \end{cases} \quad (20)$$

که (x, y) نقاط یافت‌شده در هر مرحله و Ω درجه نزدیکی به جواب‌های حاصل از حل مسئله سطح دوم است. تابع برازندگی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$fitness(x_k) = F(x_k, y_k) \times \Omega \quad (21)$$

که $F(x_k, y_k)$ مقدار تابع هدف تصمیم‌گیرنده سطح اول است. در ادامه، عمل تقاطع به این صورت انجام شده است که هریک از فرزندان (*child1* و *child2*) با رابطه (۲۲) از والدین (*parent1* و *parent2*) خود به وجود می‌آیند.

$$\begin{aligned} child1 &= \lfloor [C \cdot parent1 + (1 - C) \cdot parent2] \rfloor \\ child2 &= \lfloor [C \cdot parent2 + (1 - C) \cdot parent1] \rfloor \end{aligned} \quad (22)$$



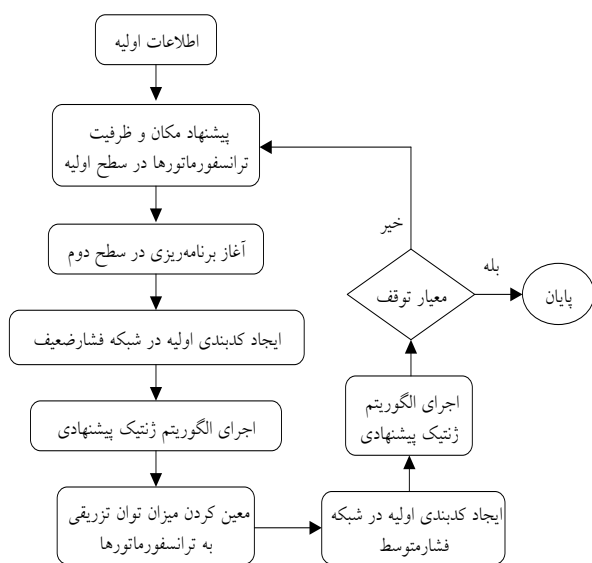
شکل (۱): چارچوب کلی مدل دوسطحی ارائه شده

گفتنی است پارامترهای مکان و ظرفیت که با معادلات سطح بالا پیشنهاد می‌شوند، در معادلات سطح پایین نیز هستند. پس از تعیین میزان توان تزریق‌شده به ترانسفورماتورها، میزان تابع هدف سطح بالا نیز محاسبه می‌شود. همان‌طور که در معادلات (۲) تا (۱۸) مشاهده می‌شود، این مسئله به دلیل وجود ضرب متغیرها در روابط (۳) و (۱۱) و همچنین، وجود توان دوم جریان الکتریکی در روابط (۱۰) و (۱۴)، به شدت غیرخطی و به دلیل وجود متغیرهای عدد صحیح، یک بهینه‌سازی غیرخطی آمیخته عدد صحیح است. در حل مسائل بهینه‌سازی دوسطحی اگر تابع هدف سطح پایین پیوسته و محدب باشد، با استفاده از روشی موسوم به KKT می‌توان مسئله دوسطحی را به یک مسئله تک‌سطحی، تبدیل [۳۰] و آن را با روش‌های معمول حل کرد؛ درحالی که مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع یک مسئله آمیخته عدد صحیح در هر دو سطح بالا و پایین است. بنابراین، مسئله پیش رو غیرمحدب است و با روش‌های ریاضی معمول نمی‌توان آن را حل کرد. در این مقاله با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، حل مسئله بررسی می‌شود.

۳- روش حل

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های فراابتکاری است که کاربردهای فراوانی در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این بردار از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول سایز و جایابی پست‌های موجود و کاندیدا را بررسی می‌کند (سایز $n_1 + n_2$). قسمت دوم شامل بررسی احداث و نصب خطوط موجود و کاندیدا است (سایز $n_3 + n_4$) و قسمت سوم ظرفیت و جایابی ترانسفورماتورها را در برمی‌گیرد (سایز n_5). به طور مشابه در شکل (۵) بردار کدبندی مسئله برای شبکه فشار ضعیف آمده است. این بردار نیز از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول شامل سایز و جایابی خطوط (سایز $m_1 + m_2$)، قسمت دوم شامل مکان بارها در هر فاز (سایز m_3) و قسمت سوم، ظرفیت و جایابی DGها (سایز m_4) بررسی شده‌اند. برای نشان دادن مزایای مدل پیشنهادی سه مورد مطالعاتی بررسی می‌شوند. حالت اول، حل مسئله به صورت متداول صورت می‌گیرد که دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف به صورت مستقل در نظر گرفته می‌شوند. در حالت دوم، مدل بدون لحاظ کردن DGها و در حالت سوم، مدل پیشنهادی با لحاظ کردن DGها در شبکه فشار ضعیف تحلیل می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار (2016a) MATLAB و در سیستم رایانه‌ای Core i7-4770 16 GB RAM پیاده‌سازی شده‌اند. زمان حل مسئله در حالت‌های اول تا سوم به ترتیب برابر ۱۶۱۲، ۳۰۱۸ و ۳۳۰۸ ثانیه است.



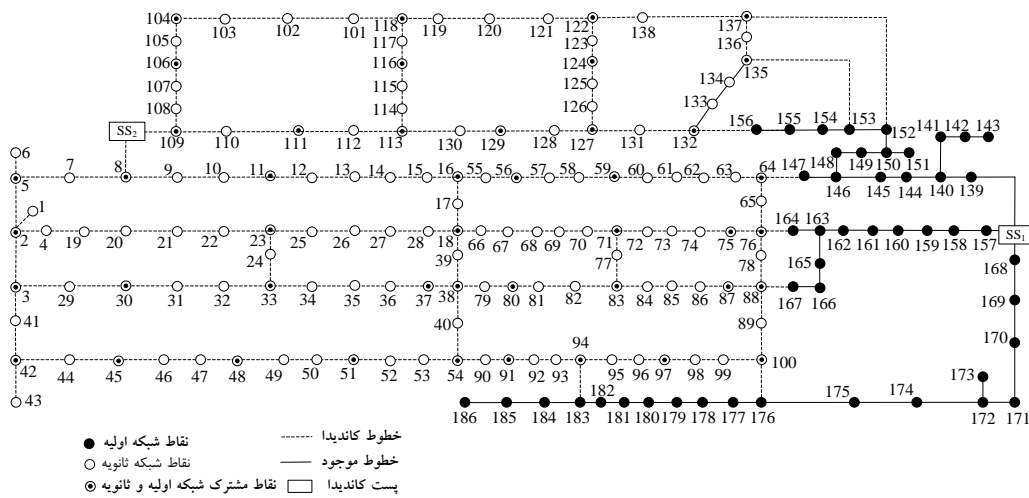
شکل (۲): فلوچارت حل مسئله دوسطحی برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع

که C عددی تصادفی در محدوده بین صفر و یک است. عملگر $[[.]]$ ، جزء صحیح عبارت داخل خود را برمی‌گرداند. عمل جهش نیز به این صورت انجام می‌شود که یک یا چند ژن از ژن‌های کروموزوم مدنظر به صورت تصادفی از بین ژن‌ها انتخاب می‌شوند. عمل انتخاب نیز به روش انتخاب نخبگان صورت گرفته است. با توجه به روش استفاده شده برای تشکیل جمعیت جدید، واضح است روش نخبه‌گرا است؛ زیرا پاسخ‌های مناسب تکرار قبل بدون تغییر به تکرار بعدی ارسال می‌شوند. شرط پایان را می‌توان به روش‌های مختلف از جمله تعیین حداکثر تکرارها یا بهبود نیافتن پاسخ‌ها تعریف کرد. در شکل (۲)، فلوچارت پیشنهادی حل مدل برنامه‌ریزی دوسطحی توسعه شبکه توزیع آمده است.

۴- نتایج عددی

مدل پیشنهادی و روش حل آن روی شبکه توزیع آزمون نمونه پیاده‌سازی شده که در شکل (۳) آمده است. مطابق شکل (۳)، ۱۳۸ نقطه فشار ضعیف جدید، ۳۳ ترانسفورماتور، ۱۵ منبع تولید پراکنده و ۱۴۷ شاخه برای برنامه‌ریزی توسعه در نظر گرفته شده‌اند.

همچنین در شبکه فشار متوسط، تعداد نقاط، پست‌ها (نوع ۲) و خطوط (نوع ۳) به ترتیب برابر ۴۸، ۱ و ۵۱ هستند. به منظور تأمین بار الکتریکی ۶۰ شاخه و یک پست توزیع می‌توانند در شبکه نصب شوند. شایان ذکر است در فرایند جستجوی جواب بهینه، ۵ نوع پست، ۸ نوع سیم، ۸ نوع ترانسفورماتور و چهار نوع DG در نظر گرفته شده‌اند که اطلاعات مربوط به هر کدام از آنها در جدول (۲) آمده است. نقاط قابل نصب و کاندیدا برای ترانسفورماتورها و DGها در جدول (۳) مشخص شده‌اند. سایر اطلاعات مربوط به شبکه مطالعه شده در [۳۲] آمده است. مقدار ولتاژ نامی برای هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف به ترتیب برابر ۱۳/۲ کیلوولت و ۴۰۴ ولت و همچنین، میزان انحراف ولتاژ در هر دو شبکه به ترتیب برابر ۱۰٪ و ۵٪ است. نرخ تورم برابر ۱۰٪، قیمت انرژی الکتریکی برابر ۰/۱۵ دلار بر کیلووات‌ساعت و برنامه‌ریزی برای یک دوره ۲۰ ساله انجام می‌گیرد. در شکل (۴)، بردار کدبندی مسئله برای شبکه فشار متوسط آمده است.



شکل (۳): شبکه توزیع مطالعه شده

جدول (۲): اطلاعات مربوط به پست‌های خطوط، ترانسفورماتورها و DGها

نوع	پست		خط (سیم)		ترانسفورماتور		DG		
	S_{max} (MVA)	هزینه (میلیون دلار)	R (Ω/km)	I_{max} (A)	هزینه (دلار بر متر)	S_{max} (kVA)	هزینه (دلار)	S_{max} (kW)	هزینه (دلار)
۱	۷	۰/۳۳۶	۱/۰۴	۱۵۰	۱۴	۳۰	۳۱۷۷/۵۸	۵۰	۲۵۰۰
۲	۱۰	۰/۶۷۲	۰/۶۵	۱۸۰	۲۰	۴۵	۳۹۵۳/۰۸	۷۵	۳۷۵۰
۳	۲۰	۱/۳۴۴	۰/۵۲	۲۰۵	۲۶	۷۵	۵۵۰۲/۷۰	۱۰۰	۵۰۰۰
۴	۳۰	۲/۰۱۶	۰/۳۲	۲۷۵	۴۰	۱۱۲/۵	۷۴۳۹/۷۲	۱۲۵	۶۲۵۰
۵	۴۰	۲/۶۸۸	۰/۲۶	۳۰۵	۴۷	۱۵۰	۹۳۷۶/۷۵	-	-
۶	-	-	۰/۱۸	۳۹۰	۵۷	۲۲۵	۱۱۰۵۳/۷۲	-	-
۷	-	-	۰/۱۴	۴۶۰	۶۴	۳۰۰	۱۶۸۰/۶	-	-
۸	-	-	۰/۱۲	۶۰۰	۷۲	۴۰۰	۲۲۴۰/۸	-	-

جدول (۳): نقاط قابل نصب برای ترانسفورماتورها

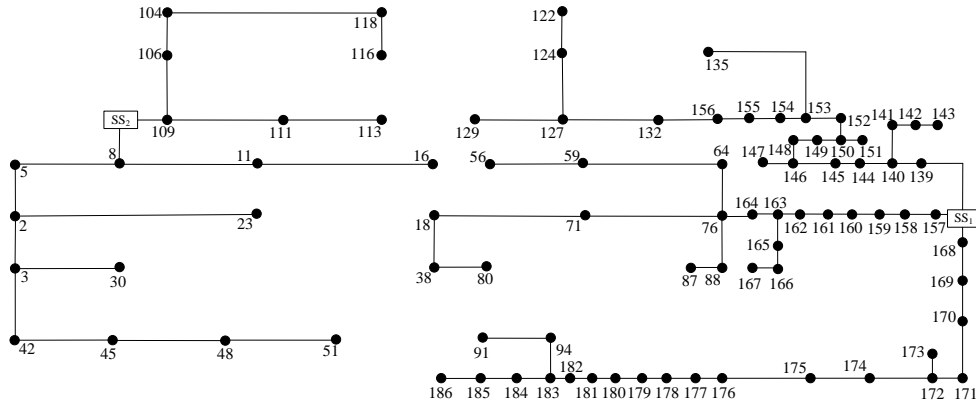
المان	نقاط کاندیدا
ترانسفورماتور	۲، ۸، ۱۱، ۱۶، ۳۰، ۳۳، ۳۷، ۴۵، ۴۸، ۵۱، ۵۶، ۵۹، ۶۴ ۸۰، ۸۳، ۸۷، ۹۱، ۹۴، ۹۷، ۱۰۴، ۱۰۶، ۱۰۹، ۱۱۱، ۱۱۳ ۱۱۶، ۱۱۸، ۱۲۲، ۱۲۴، ۱۲۷، ۱۲۹، ۱۳۲، ۱۳۵، ۱۳۷
DG	۶، ۲۳، ۳۸، ۴۳، ۵۴، ۶۲، ۷۱، ۸۸، ۹۵، ۱۰۳، ۱۱۰، ۱۱۷، ۱۳۰، ۱۳۱

پست			خط			ترانسفورماتور								
1	...	n1	1	...	n2	1	...	n3	1	...	n4	1	...	n5
$\delta_{1,3}^{ESS}$	...	$\delta_{n1,1}^{ESS}$	$\delta_{1,2}^{NSS}$	...	$\delta_{n2,3}^{NSS}$	$\delta_{1,1}^{EP}$	...	$\delta_{n3,2}^{EP}$	$\delta_{1,2}^{NP}$	...	$\delta_{n4,1}^{NP}$	$S_{1,5}^{max}$	...	$S_{n5,3}^{max}$
3	...	1	2	...	1	1	...	2	2	...	1	3	...	3

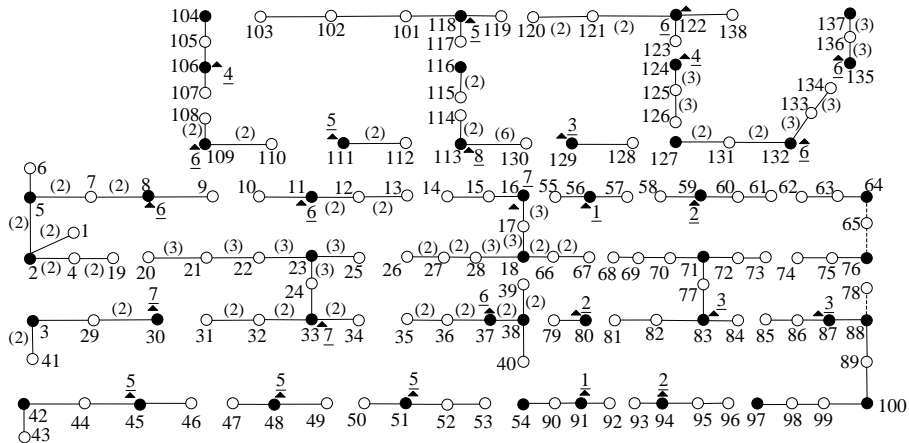
شکل (۴): کدبندی متغیرهای سطح بالا

خط				نقاط						DG					
1	...	m1	1	...	m2	1			m3			1	...	m4	
$\delta_{1,3}^{ES}$	...	$\delta_{m1,2}^{ES}$	$\delta_{1,3}^{NS}$	...	$\delta_{m2,1}^{NS}$	$S_{1,a}^{SD}$	$S_{1,b}^{SD}$	$S_{1,c}^{SD}$	...	$S_{m3,a}^{SD}$	$S_{m3,b}^{SD}$	$S_{m3,c}^{SD}$	$\delta_{m4,2}^{NG}$	...	$\delta_{m4,2}^{NG}$
2	...	2	3	...	1	1	1	1	...	2	1	2	1	...	2

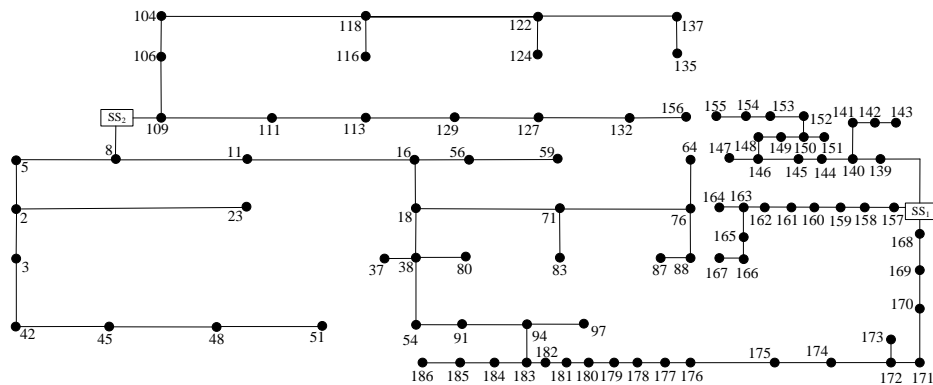
شکل (۵): کدبندی متغیرهای سطح پایین



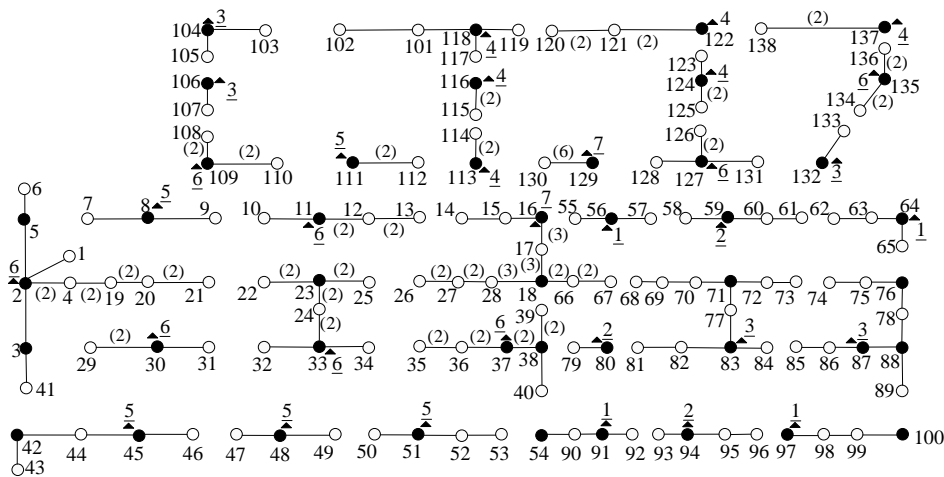
شکل (۶): شبکه فشار متوسط در مورد مطالعاتی اول



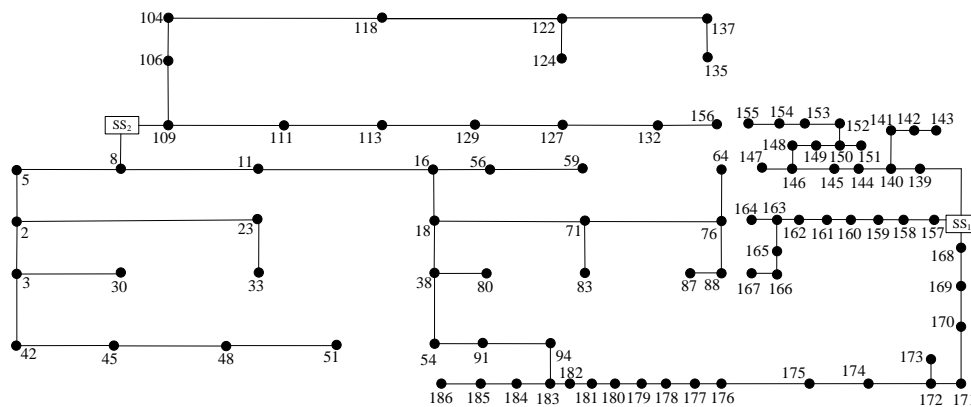
شکل (۷): شبکه فشار ضعیف در مورد مطالعاتی اول



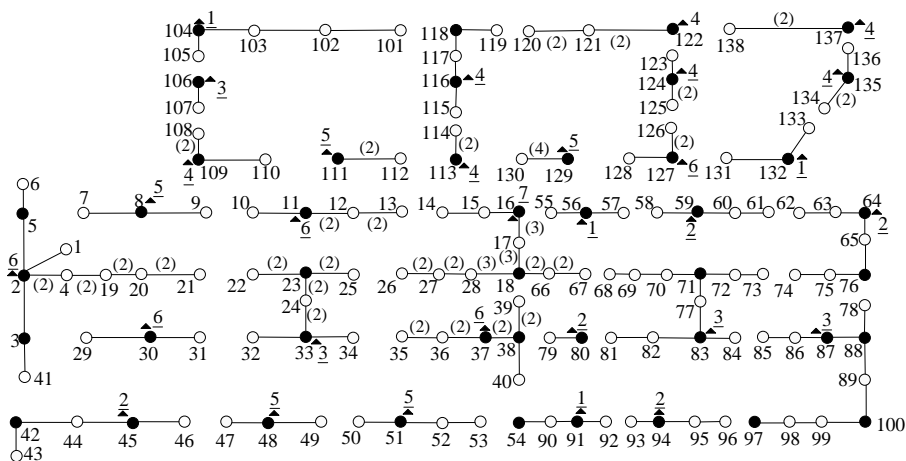
شکل (۸): شبکه فشار متوسط در مورد مطالعاتی دوم



شکل (۹): شبکه فشار ضعیف در مورد مطالعاتی دوم



شکل (۱۰): شبکه فشار متوسط در مورد مطالعاتی سوم



شکل (۱۱): شبکه فشار ضعیف در مورد مطالعاتی سوم

(نوع ۱) نصب می‌شود. در مورد مطالعاتی سوم، نقاط پیشنهادی برای نصب DGها، ۲۳ (نوع ۲)، ۴۳ (نوع ۳)، ۱۰۳ (نوع ۲)، ۱۱۰ (نوع ۲)، ۱۱۷ (نوع ۲)، ۱۳۰ (نوع ۳)، ۱۳۱ (نوع ۲) و ۱۳۶ (نوع ۲) هستند. مکان نصب

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۱-۶) و جدول‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. نوع تاپ خطوط و ترانسفورماتورها در شکل‌ها مشخص شده‌اند. در هر سه مورد مطالعاتی به ارتقای پست‌های موجود نیاز نیست و فقط یک پست جدید

هزینه مورد مطالعاتی دوم کمتر از مورد مطالعاتی اول است؛ بنابراین، مدل دوسطحی به دنبال توپولوژی است که در مجموع هزینه کمتری را داشته باشد. در واقع، کمترین هزینه در مورد مطالعاتی سوم به این دلیل است که نصب DGها در شبکه فشار ضعیف، سبب نصب ترانسفورماتورها و خطوط فشار ضعیف با سایز کوچک می شود که این خود باعث می شود جریان کمتری از سمت فشار متوسط کشیده شود و به تبع آن هزینه بهره برداری و تلفات شبکه کاهش یابد. به عبارت دیگر، بارگذاری خطوط و ترانسفورماتورها در حالت سوم نسبت به حالت اول و دوم کمتر است.

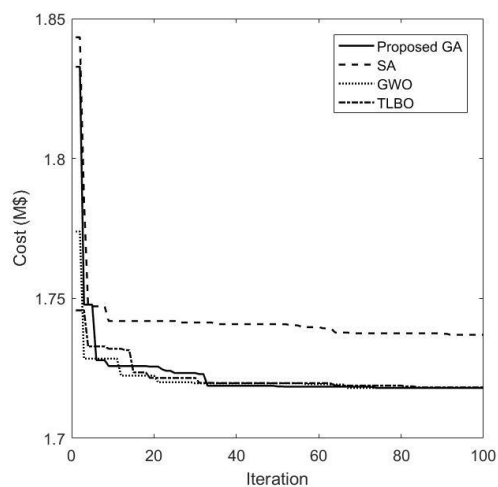
ترانسفورماتورها روی شکل ها با یک مثلث توپیر و نوع آنها با یک عدد مشخص شده اند که خطی در زیر آنهاست. مطابق جدول ها هزینه های کمتری متوجه مورد مطالعاتی دوم و سوم اند و همان طور که انتظار می رود در مورد مطالعاتی سوم، کمترین هزینه به دلیل تزریق توان با DGها صورت می گیرد. نتایج حاصل برای مورد مطالعاتی نوع اول نشان می دهند لحاظ کردن مدل دوسطحی هزینه برنامه ریزی کمتری را شامل می شود. گفتنی است اگرچه هزینه ثابت در مورد مطالعاتی اول نسبت به مورد مطالعاتی دوم کمتر است، هزینه بهره برداری در مورد اول از مورد دوم، بیشتر و در مجموع

جدول (۴): مقایسه هزینه های توسعه (به میلیون دلار)

هزینه		مورد مطالعاتی ۱	مورد مطالعاتی ۲	مورد مطالعاتی ۳
ثابت	پست	۰/۳۳۶	۰/۳۳۶	۰/۳۳۶
	خطوط فشار متوسط	۰/۳۷۴	۰/۴۰۲	۰/۳۹۱
	خطوط فشار ضعیف	۰/۲۸۸	۰/۲۵۵	۰/۲۵۴
	ترانسفورماتور	۰/۲۶۰	۰/۲۶۵	۰/۲۲۵
	DG	-	-	۰/۰۳۲
	جمع هزینه	۱/۲۵۸	۱/۲۵۸	۱/۲۳۸
متغیر	تلفات شبکه فشار متوسط	۰/۴۱۱	۰/۳۳۴	۰/۳۰۱
	تلفات شبکه فشار ضعیف	۰/۲۳۲	۰/۱۸۱	۰/۱۷۹
	جمع هزینه	۰/۶۴۳	۰/۵۱۵	۰/۴۸۰
هزینه کل		۱/۹۰۱	۱/۷۷۳	۱/۷۱۸

جدول (۵): مقایسه هزینه های توسعه شبکه های فشار متوسط و فشار ضعیف (به میلیون دلار)

شبکه		مورد مطالعاتی ۱	مورد مطالعاتی ۲	مورد مطالعاتی ۳
فشار ضعیف	ترانسفورماتور	۰/۲۶۰	۰/۲۶۵	۰/۲۲۵
	DG	-	-	۰/۰۳۲
	خطوط	۰/۲۸۸	۰/۲۵۵	۰/۲۵۴
	تلفات	۰/۲۳۲	۰/۱۸۱	۰/۱۷۹
	جمع هزینه	۰/۷۸۰	۰/۷۰۱	۰/۶۹۰
فشار متوسط	پست	۰/۳۳۶	۰/۳۳۶	۰/۳۳۶
	خطوط	۰/۳۷۴	۰/۴۰۲	۰/۳۹۱
	تلفات	۰/۴۱۱	۰/۳۳۴	۰/۳۰۱
	جمع هزینه	۱/۱۲۱	۱/۰۷۲	۱/۰۲۸
	هزینه کل		۱/۹۰۱	۱/۷۷۳	۱/۷۱۸



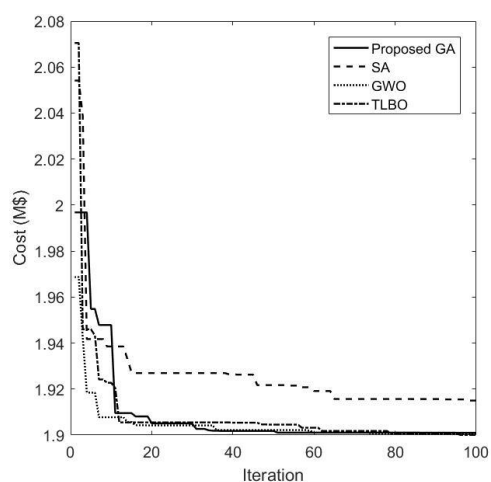
شکل (۱۴): مقایسه روش‌های فراابتکاری، مورد مطالعاتی سوم

جدول (۶): نتایج حاصل از مدل خطی (به میلیون دلار)

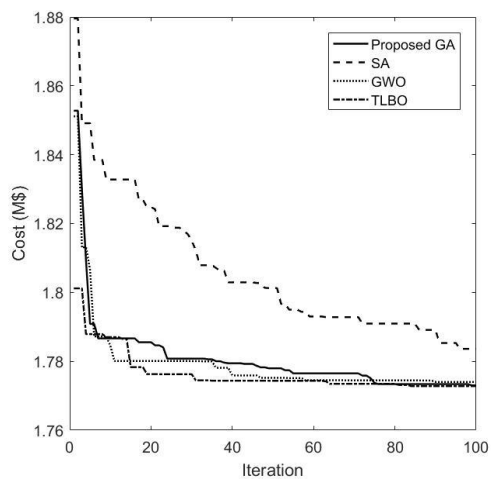
مورد مطالعاتی ۱		شبکه
۰/۲۶۰	ترانسفورماتور	فشار ضعیف
-	DG	
۰/۲۷۲	خطوط	
۰/۲۲۸	تلفات	
۰/۷۶۰	جمع هزینه	
<hr/>		
۰/۳۳۶	پست	فشار متوسط
۰/۳۶۲	خطوط	
۰/۳۹۲	تلفات	
۱/۰۹۰	جمع هزینه	
۱/۸۵۰	هزینه کل	

توانایی کدبندی پیشنهادی در حل مسئله پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک، در مقایسه با روش‌های فراابتکاری جدید در یافتن جواب پیشنهادی مشخص است و گفتنی است زمان حل مسئله با روش پیشنهادی تفاوت زیادی با سایر الگوریتم‌های ذکر شده ندارد؛ برای مثال در الگوریتم GWO، زمان حل مسئله برای موردهای مطالعاتی یک تا سه به ترتیب برابر ۱۶۰۳، ۲۹۹۸ و ۳۲۸۷ ثانیه است و در الگوریتم TLBO به ترتیب برابر ۱۶۰۲، ۳۰۰۱ و ۳۲۹۲ ثانیه است. با توجه به اینکه مطالعه حاضر در فاز برنامه‌ریزی است، بررسی زمان حل مسئله لحاظ نمی‌شود. شایان ذکر است

به‌منظور نشان‌دادن کارایی الگوریتم و کدبندی پیشنهادی، مدل مدنظر با سه الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی سردشدن فلزات^۱ (SA)، بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۲ (GWO) و بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری^۳ (TLBO) پیاده‌سازی شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای مورد مطالعاتی اول، دوم و سوم به ترتیب در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) آمده‌اند. همان‌طور که مشخص است



شکل (۱۲): مقایسه روش‌های فراابتکاری، مورد مطالعاتی اول



شکل (۱۳): مقایسه روش‌های فراابتکاری، مورد مطالعاتی دوم

مجموعه‌ها	
Λ_{DT}	مجموعه ترانسفورماتورهای موجود
Λ_{EP}	مجموعه خطوط موجود در شبکه فشار متوسط
Λ_{ES}	مجموعه خطوط موجود در شبکه فشار ضعیف
Λ_{ESS}	مجموعه پست‌های موجود
Λ_{ip}	نقاط متصل شده با نقطه نام در شبکه فشار متوسط
Λ_{is}	نقاط متصل شده با نقطه نام در شبکه فشار ضعیف
Λ_{ND}	مجموعه ترانسفورماتورهای جدید
Λ_{NG}	مجموعه منابع تولید پراکنده جدید
Λ_{NP}	مجموعه خطوط فشار متوسط جدید
Λ_{NS}	مجموعه خطوط فشار متوسط ضعیف
Λ_{NSS}	مجموعه پست‌های جدید
Λ_{PF}	خطوط موجود و جدید در شبکه فشار متوسط
Λ_{PN}	مجموعه نقاط شبکه فشار متوسط
Λ_{SC}	خطوط موجود و جدید در شبکه فشار ضعیف
Λ_{SN}	مجموعه نقاط شبکه فشار ضعیف
Λ_{SS}	مجموعه پست‌های موجود و جدید
Λ_{TD}	مجموعه نوع ترانسفورماتور
Λ_{TG}	مجموعه نوع منبع تولید پراکنده
Λ_{TP}	مجموعه نوع خطوط فشار متوسط
Λ_{TS}	مجموعه نوع خطوط فشار ضعیف
Λ_{TSS}	مجموعه نوع پست
$C_{ij,p}^{EP}$	هزینه ثابت توسعه خطوط موجود بین نقاط i و j در شبکه فشار متوسط از نوع p
	پارامترها
$C_{ij,c}^{ES}$	هزینه ثابت توسعه خطوط موجود بین نقاط i و j در شبکه فشار ضعیف از نوع c
$C_{i,s}^{ESS}$	هزینه ثابت توسعه پست موجود در نقطه i از نوع s
$C_{ij,p}^{EP}$	هزینه ثابت توسعه خطوط موجود بین نقاط

الگوریتم SA در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها در تکرارهای یکسان عملکرد مناسبی ندارد. همچنین، مدل تک‌سطحی با برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح نیز بررسی شد که نتایج آن در جدول (۶) آمده‌اند. در این حالت تلفات شبکه با الگوریتم تکه‌ای خطی بررسی شد که در مرجع [۳۳] آمده است و با مدل تک‌سطحی و دوسطحی حل شده در مقاله می‌تواند مقایسه شود؛ به طوری که میزان هزینه در مدل تک‌سطحی خطی شده برابر ۱/۸۵ و در مدل دوسطحی با حضور DGها برابر ۱/۷۱۸ میلیون دلار است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند مدل دوسطحی (لحاظ کردن هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف به صورت مستقل) نقش بسزایی در کاهش هزینه‌ها دارد. نتیجه حاصل از خطی‌سازی نسبت به حل مدل تک‌سطحی با الگوریتم پیشنهادی بهتر شد؛ اما نتیجه حاصل از مدل دوسطحی همچنان بهتر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع پیشنهاد شد که هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف را لحاظ می‌کند. تابع هدف ارائه شده برای هر دو سطح بالا و پایین هزینه مربوط به نصب و ارتقای المان‌های هر دو شبکه به همراه هزینه‌های بهره‌برداری و تلفات است. همچنین در مدل ارائه شده، منابع DG با اتصال در شبکه فشار ضعیف نیز بررسی و دیده شد در این حالت کمترین هزینه برنامه‌ریزی برای شبکه را دارد. به طور خلاصه، نتایج حاصل از این مقاله به شرح ذیل‌اند:

- با نصب ترانسفورماتورها و خطوط فشار ضعیف هزینه بهره‌برداری در شبکه فشار متوسط کاهش می‌یابد؛
- نصب DGها در شبکه فشار ضعیف قطعاً هزینه تلفات و بهره‌برداری را کاهش می‌دهد؛
- لحاظ کردن هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف در برنامه‌ریزی توسعه در مدل دوسطحی پیشنهادی هزینه کمتری نسبت به در نظر گرفتن دو شبکه به صورت مستقل دارد؛
- توانایی الگوریتم ژنتیک در حل مسئله دوسطحی با کدبندی پیشنهادی.

$\delta_{ij,c}^{ES}$	متغیر توسعه خط موجود بین نقاط i و j از نوع c در شبکه فشار ضعیف	i و j در شبکه فشار متوسط از نوع p	هزینه ثابت ترانسفورماتور جدید در نقطه i
$\delta_{i,s}^{ESS}$	متغیر توسعه پست موجود در نقطه i از نوع s	$C_{i,d}^{ND}$	از نوع d
$\delta_{i,d}^{ND}$	متغیر نصب ترانسفورماتور در نقطه i از نوع d	$C_{i,g}^{NG}$	هزینه ثابت منبع DG جدید در نقطه i از نوع g
$\delta_{i,g}^{NG}$	متغیر نصب DG در نقطه i از نوع g	$C_{ij,p}^{NP}$	هزینه ثابت خط جدید فشار متوسط بین نقاط i و j از نوع p
$\delta_{ij,p}^{NP}$	متغیر نصب خط جدید بین نقاط i و j از نوع p در شبکه فشار متوسط	$C_{ij,c}^{NS}$	هزینه ثابت خط جدید فشار ضعیف بین نقاط i و j از نوع c
$\delta_{ij,c}^{NS}$	متغیر نصب خط جدید بین نقاط i و j از نوع c در شبکه فشار ضعیف	$C_{i,s}^{NSS}$	هزینه ثابت یک پست جدید در نقطه i از نوع s
$\delta_{i,s}^{NSS}$	متغیر نصب پست جدید در نقطه i از نوع s	$I_{ij,c}^{max}$	حداکثر جریان بین نقاط i و j از خط فشار ضعیف نوع c
$I_{ij,l}$	جریان بین دو نقطه i و j برای بار l در شبکه فشار متوسط	$I_{ij,p}^{max}$	حداکثر جریان بین نقاط i و j از خط فشار متوسط نوع p
$I_{ij,l}^{abcn}$	در شبکه فشار ضعیف برای فازهای a و b و c	R_{ij}^p	مقاومت خط بین نقاط i و j از خط فشار متوسط نوع p
$S_{i,l}^{DT}$	توان تزریقی به ترانسفورماتور نقطه i برای سطح بار l	R_{ij}^s	مقاومت خط بین نقاط i و j از خط فشار ضعیف نوع s
$S_{i,l}^G$	توان تزریقی از DG نقطه i برای سطح بار l	$S_{i,d}^{cu}$	تلفات مسی یک ترانسفورماتور در نقطه i از نوع d
$S_{i,l}^S$	توان تزریقی از پست نقطه i برای سطح بار l	$S_{i,d}^{fe}$	تلفات آهنی یک ترانسفورماتور در نقطه i از نوع d
$V_{i,l}$	ولتاژ نقطه i در شبکه فشار متوسط برای سطح بار l	$S_{i,d}^{max}$	بیشترین توان یک ترانسفورماتور از نوع d
$V_{i,l}^{abcn}$	ولتاژ نقطه i در شبکه فشار ضعیف برای سطح بار l در فازهای a و b و c	$S_{i,g}^{max}$	بیشترین توان یک DG از نوع g
		$S_{i,s}^{max}$	بیشترین توان یک پست از نوع s
		$S_{i,l}^{SD}$	میزان توان بار در نقطه i برای سطح بار l
		V_i^{max}	بیشترین ولتاژ در نقطه i
		V_{i-abcn}^{max}	بیشترین ولتاژ در نقطه i برای فازهای a و b و c
		V_i^{min}	کمترین ولتاژ در نقطه i
		V_{i-abcn}^{min}	کمترین ولتاژ در نقطه i برای فازهای a و b و c
			متغیرها
		$\delta_{ij,p}^{EP}$	متغیر توسعه خط موجود بین نقاط i و j از نوع p در شبکه فشار متوسط

مراجع

- [1] M. Ponnavaikko and K. P. Rao, "Optimal distribution system planning," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, No. 6, pp. 2969-2977, 1981.
- [2] V. Miranda, J. Ranito, and L. M. Proenca, "Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 1927-1933, 1994.
- [3] I. J. Ramirez-Rosado and J. L. Bernal-Agustin, "Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 696-703, 1998.

- through evolutionary algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 205-213, 2005.
- [17] A. M. Cossi, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Planning and projects of secondary electric power distribution systems," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1599-1608, 2009.
- [18] A. Navarr and H. Rudnick, "Large-scale distribution planning—Part I: Simultaneous network and transformer optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 744-751, 2009.
- [19] V. M. VELEZ M. R. A. HINCAPIE I, and R. A. GALLEGO R, "Low voltage distribution system planning using diversified demand curves," *Electrical power & energy systems*, Vol. 61, pp. 691-700, 2014.
- [20] S. Harnisch, P. Steffens, H. H. Thies, K. Cibis, M. Zdrallek, and B. Lehde, "New planning principles for low voltage networks with a high share of decentralized generation," 2016.
- [21] P. Paiva, H. Khodr, J. Dominguez-Navarro, J. Yusta, and A. Urdaneta, "Integral planning of primary-secondary distribution systems using mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 1134-1143, 2005.
- [22] A. Marcos and J. R. Sanches, "Integrated planning of electric power distribution networks," *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 7, No. 2, pp. 203-210, 2009.
- [23] I. Ziari, G. Ledwich, and A. Ghosh, "Optimal integrated planning of MV-LV distribution systems using DPSO," *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 10, pp. 1905-1914, 2011.
- [24] R. Gholizadeh-Roshanagh, S. Najafi-Ravadanegh, and S. H. Hosseinian, "A framework for optimal coordinated primary-secondary planning of distribution systems considering MV distributed generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1408-1415, 2016.
- [25] K. M. Jagtap and D. K. Khatod, "Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 75, pp. 173-186, 2016.
- [26] A. Azizivahed, H. Narimani, E. Naderi, M. Fathi, and M. R. Narimani, "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration," *Energy*, Vol. 138, pp. 355-373, 2017.
- [27] A. Azizivahed, E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, and M. R. Narimani, "A new bi-objective approach to energy management in distribution networks with energy storage systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 1, pp. 56-64, 2017.
- [28] A. Ehsan and Q. Yang, "State-of-the-art techniques for modelling of uncertainties in active distribution network planning: A review," *Applied energy*, 2019.
- [29] J. R. Mantovani, "A decomposition approach for integrated planning of primary and secondary
- [4] F. Riva, and M. R. Irving. "An efficient genetic algorithm for optimal large-scale power distribution network planning." *Power Tech Conference Proceedings*, Vol. 3, 2003.
- [5] W. El-Khattam, Y. Hegazy, and M. Salama, "An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 1158-1165, 2005.
- [6] S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira, and L. S. Barreto, "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation—Part I: Problem formulation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp. 915-923, 2008.
- [7] M. Lavorato, M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "A constructive heuristic algorithm for distribution system planning," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 25, No. 3, pp. 1734-1742, 2010.
- [8] E. Naderi, H. Seifi, and M. S. Sepasian, "A dynamic approach for distribution system planning considering distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 3, pp. 1313-1322, 2012.
- [9] B. R. P. Junior, A. M. Cossi, J. Contreras, and J. R. S. Mantovani, "Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, No. 1, pp. 35-45, 2014.
- [10] R. R. Gonçalves, J. F. Franco, and M. J. Rider, "Short-term expansion planning of radial electrical distribution systems using mixed-integer linear programming," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 3, pp. 256-266, 2014.
- [11] H. Wang and L. Shi, "Optimal distribution network expansion planning incorporating distributed generation," in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016: IEEE, pp. 1714-1718.
- [12] K. M. Jagtap and D. K. Khatod, "Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 75, pp. 173-186, 2016.
- [13] A. Azizivahed, H. Narimani, E. Naderi, M. Fathi, and M. R. Narimani, "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration," *Energy*, Vol. 138, pp. 355-373, 2017.
- [14] A. Azizivahed, E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, and M. R. Narimani, "A new bi-objective approach to energy management in distribution networks with energy storage systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 1, pp. 56-64, 2017.
- [15] E. Díaz-Dorado, J. C. Pidre, and E. M. García, "Planning of large rural low-voltage networks using evolution strategies," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 4, pp. 1594-1600, 2003.
- [16] A. M. Cossi, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Planning of secondary distribution circuits

- [33] A. J. Conejo, E. Castillo, R. Minguez, and R. Garcia-Bertrand, *Decomposition techniques in mathematical programming: engineering and science applications*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [34] G. Wang, Z. Wan, and X. Wang, "Solving method for a class of bi-level linear programming based on genetic algorithms," in *Proceedings of PDCAT conference*, 2005.
- [35] <http://academia.utp.edu.co/planeamiento/files/2017/06/Intgrated-distribution-system.pdf>
- [36] A. Zare, et al. "A distributionally robust chance-constrained MILP model for multistage distribution system planning with uncertain renewables and loads." *IEEE Transactions on Power Systems* 33.5 (2018): 5248-5262.
- distribution networks considering distributed generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 106, pp. 146-157, 2019.
- [30] S. Xie, Z. Hu, L. Yang, and J. Wang, "Expansion planning of active distribution system considering multiple active network managements and the optimal load-shedding direction," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 115, p. 105451, 2020.
- [31] K. Kaewmamuang, A. Siritaratiwat, C. Surawanitkun, P. Khunkitti, and R. Chathaworn, "A novel method for solving multi-stage distribution substation expansion planning," *Energy Procedia*, Vol. 156, pp. 371-383, 2019.
- [32] J. F. Bard, *Practical bilevel optimization: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.

¹ Simulated Annealing (SA)

² Grey Wolf Optimization (GWO)

³ Teaching Learning Based Optimization (TLBO)