

مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازن‌ها به‌طور همزمان در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل بار چندسطحی و وابسته به ولتاژ

محمودرضا شاکرمی^۱، استادیار؛ مسعود طرهانی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ اسماعیل رکرک^۳، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - shakarami.mr@lu.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - masoudtarhani89@gmail.com

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - esmaeel.rokrok@gmail.com

چکیده: در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده (DGs) و خازن‌ها به‌طور همزمان در سیستم‌های توزیع شعاعی ارائه شده است. اهداف این مسئله بهینه‌سازی، بهبود شاخص‌های تلفات توان اکتیو، تلفات توان راکتیو، انحراف ولتاژ، توازن ظرفیت بارگذاری خطوط و پایداری ولتاژ شبکه هستند. یک تابع هدف چندمنظوره همراه با قیود و محدودیت‌های لازم ارائه شده است. جهت مقاوم نمودن مکان DGها و خازن‌ها در برابر تغییرات بار، در تابع هدف پیشنهادی سطوح بارگذاری مختلف به‌طور همزمان در نظر گرفته شده، درحالی‌که میزان تولید DGها و توان راکتیو خازن‌ها برای هر سطح بارگذاری متغیر فرض شده است. در این تحقیق، سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین برای شبکه در نظر گرفته شده است. همچنین، بارها به‌صورت وابسته به ولتاژ در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم TLBO استفاده شده است. روش ارائه‌شده روی سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه استاندارد اجرا شده و نتایج آن با روش‌های تک‌سطحی و ضریب حساسیت تلفات مقایسه شده است. نتایج حاصله برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی DG، سیستم توزیع، پایداری ولتاژ، کاهش تلفات، مکان‌یابی خازن، مدل بار، الگوریتم TLBO.

Optimal Location and Sizing of Distributed Generation Resources and Capacitors Simultaneously in Distribution Systems considering Multi-level Voltage Dependent Load Model

M. R. Shakarami¹, Assistant Professor; M. Tarhani², MSc Student; E. Rokrok³, Assistant Professor

1- Faculty of Engineering, University of Lorestan, Khorramabad, Iran, Email: shakarami.mr@lu.ac.ir

2- Faculty of Engineering, University of Lorestan, Khorramabad, Iran, Email: masoudtarhani89@gmail.com

3- Faculty of Engineering, University of Lorestan, Khorramabad, Iran, Email: esmaeel.rokrok@gmail.com

Abstract: In this paper, an optimization method is proposed to determine the optimal placement and size of Distributed Generation (DG) resources and capacitors simultaneously in radial distribution systems. Improvement of active and reactive power losses, voltage deviation, line load balancing and voltage stability indices of the network are objectives of this optimization problem. A multi-objective function with appropriate constraints has been proposed. In order to robust the location of DGs and capacitors against load variations, different load levels have been incorporated into the objective function simultaneously, while the generated power of DGs and reactive power of capacitors are assumed to be variable for each load level. In this study, light, nominal and heavy load levels have been considered for network. Also, the loads are considered to be voltage dependent. The optimization problem has been solved by TLBO algorithm. The proposed method has been implemented on the 33 and 69 bus radial distribution standard systems and the results have been compared with the methods based on single-level and loss sensitivity factor. The obtained results show superiority of the proposed method.

Keywords: DG location, distribution system, voltage stability, loss reduction, capacitor location, load model, TLBO algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۴

نام نویسنده مسئول: محمودرضا شاکرمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خرم‌آباد - کیلومتر ۵ جاده بروجرد - دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق قدرت.

۱- مقدمه

تولیدات پراکنده^۱ (DGs) واحدهای تولید توان کوچکی هستند که مستقیماً به شبکه توزیع و یا در محل مشترکین وصل می‌شوند. از انواع فناوری‌های تولید پراکنده می‌توان به موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین‌ها، توربین‌های گازی، سلول‌های سوختی، واحدهای برق‌آبی، توربین‌های بادی، فتوولتائیک و باتری‌های ذخیره انرژی اشاره نمود.

حضور منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع دارای مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی از قبیل کاهش تلفات شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ سیستم، بهبود امنیت شبکه، افزایش بازدهی سیستم، بهبود کیفیت توان، افزایش پایداری ولتاژ سیستم، کاهش هزینه‌های شرکت‌های توزیع و کاهش گازهای آلاینده می‌باشند [۱-۳]. از سوی دیگر، خازن‌ها که عموماً برای جبران‌سازی توان راکتیو به‌کار می‌روند، می‌توانند باعث بهبود کیفیت توان، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، آزادسازی ظرفیت خطوط و بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع شوند [۴]. استفاده همزمان از DGها و خازن‌ها باعث افزایش قابلیت‌ها و مزایای بیشتر برای شبکه‌های توزیع می‌شود.

مکان‌یابی و تعیین ظرفیت مناسب منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در سیستم‌های توزیع همواره از مهم‌ترین چالش‌ها برای بهره‌برداران شرکت‌های توزیع بوده است. تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه DGها و خازن‌ها انجام گرفته است. روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تجزیه و تحلیل برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها در شبکه‌های توزیع در [۵، ۶] با هدف کاهش تلفات توان اکتیو سیستم ارائه شده است. الگوریتم PSO برای تعیین مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده با ضریب قدرت غیرواحد در سیستم توزیع با هدف کاهش تلفات توان اکتیو سیستم در [۷] به‌کار برده شده است. در مرجع [۸] مکان‌یابی و تعیین ظرفیت یک واحد DG با ضریب قدرت واحد در سیستم توزیع بر اساس کمینه نمودن یک شاخص عملکرد چندهدفه و با در نظر گرفتن مدل‌های گوناگون بار انجام شده است. در مرجع [۹] یک روش تحلیلی برای تعیین ظرفیت و ضریب قدرت بهینه انواع واحدهای DG در سیستم‌های توزیع ارائه شده است. در مرجع [۱۰] از الگوریتم جستجوی هارمونی برای تعیین مکان و ظرفیت واحدهای DG در سیستم توزیع به‌منظور کاهش تلفات و ارتقای قابلیت اطمینان شبکه استفاده شده است. یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی فاخته برای مکان‌یابی بهینه DGها در سیستم توزیع با هدف کاهش تلفات توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم در [۱۱] پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۲] یک روش برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها در سیستم توزیع به‌منظور افزایش حاشیه پایداری ولتاژ شبکه پیشنهاد شده است. یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم PSO برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت یک واحد DG با ضریب قدرت واحد در سیستم توزیع، با هدف کاهش تلفات توان اکتیو و ارتقای پایداری ولتاژ سیستم در [۱۳] ارائه شده است. یک روش تحلیلی برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت انواع

واحدهای DG در شبکه‌های توزیع با هدف کاهش تلفات در [۱۴] ارائه شده است. در مرجع [۱۵] یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای تعیین مکان و ظرفیت DGها در سیستم توزیع با در نظر گرفتن مدل بار وابسته به ولتاژ ارائه شده است. این مسئله بهینه‌سازی با استفاده از ضریب حساسیت تلفات و الگوریتم جستجوی باکتریایی حل شده است. در مرجع [۱۶] یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی چندزمانه برای مدیریت انرژی در ریزشبکه شامل انواع واحدهای DG ارائه شده است. مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها با ضریب قدرت واحد در سیستم توزیع، با در نظر گرفتن شاخص‌های فنی شبکه در مدل‌های بار گوناگون در [۱۷] ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک برای تعیین مکان و ظرفیت DGها در سیستم توزیع با هدف کاهش هزینه سرمایه‌گذاری DGها، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و بهبود ظرفیت بارگذاری خطوط شبکه در [۱۸] به‌کار برده شده است.

در مرجع [۱۹] مکان‌یابی و تعیین ظرفیت خازن‌ها در شبکه‌های توزیع با هدف کاهش تلفات توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم ارائه شده است. تعیین مکان و ظرفیت خازن‌ها در سیستم توزیع با هدف افزایش ذخیره انرژی و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم در [۲۰] انجام شده است. در این مرجع، از الگوریتم ژنتیک فازی و ضریب حساسیت تلفات برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. از الگوریتم جستجوی هارمونی به‌یادرفته برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت خازن‌ها در سیستم توزیع در [۲۱] استفاده شده است. در مرجع [۲۲] خازن‌گذاری بهینه در سیستم‌های توزیع دارای اغتشاش هارمونیکی به‌منظور کاهش تلفات و کاهش هزینه خازن‌ها انجام شده است. این مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO گسسته و ضریب حساسیت تلفات حل شده است. یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی فاخته برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت خازن‌ها در شبکه‌های توزیع با هدف کاهش تلفات توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ در [۲۳] ارائه شده است. در مراجع [۲۴، ۲۵] مکان‌یابی و تعیین ظرفیت خازن‌ها در سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و کاهش هزینه خازن‌ها ارائه شده است. تعیین مکان و ظرفیت خازن‌ها در سیستم توزیع به‌منظور کاهش تلفات، کاهش هزینه خازن‌ها و افزایش پایداری ولتاژ سیستم در [۲۶، ۲۷] انجام شده است. در این مراجع از ضریب حساسیت تلفات و الگوریتم ABC برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است.

در مرجع [۲۸] از الگوریتم جستجوی باکتریایی جهت داده‌شده با PSO برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت واحدهای DG و خازن‌ها در شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم استفاده شده است. در مرجع [۲۹] مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها و خازن‌ها در سیستم توزیع با هدف بهبود پروفیل ولتاژ سیستم انجام شده است. یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر تجزیه و تحلیل برای تعیین مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در سیستم توزیع با هدف کاهش تلفات توان اکتیو سیستم در [۳۰] ارائه شده است. در مرجع [۳۱] از الگوریتم PSO برای تعیین مکان و ظرفیت DGها و خازن‌ها با هدف

که در سیستم‌های توزیع وجود دارند عبارت‌اند از: خانگی، تجاری و صنعتی. مدل بار وابسته به ولتاژ با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P_i = \rho P_{i0} V_i^\alpha \quad (1)$$

$$Q_i = \rho Q_{i0} V_i^\beta \quad (2)$$

که P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو در شین نام، P_{i0} و Q_{i0} به ترتیب نقطه کار حقیقی و راکتیو شین نام و V_i دامنه ولتاژ شین نام هستند. α و β به ترتیب نماهای توان اکتیو و راکتیو هستند. مقادیر α و β برای انواع مدل‌های بار در جدول ۱ داده شده‌اند [۳۴، ۳۵]. ρ بیانگر ضریب بار در هر سطح بارگذاری است. در این مقاله، پروفیل بار شبکه در طول سال به صورت سه سطحی در نظر گرفته شده است. مقادیر مختلف ضریب بار ρ برای سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین و مدت‌زمان مربوط به هر سطح بار در جدول ۲ داده شده‌اند.

جدول ۱: نوع بار و نماهای مربوط

نوع بار	α	β
توان ثابت	۰	۰
صنعتی	۰/۱۸	۶
خانگی	۰/۹۲	۴/۰۴
تجاری	۱/۵۱	۳/۰۴

جدول ۲: سطوح بارگذاری و مدت‌زمان مربوطه

سطح بار	ρ	مدت‌زمان مربوطه (ساعت بر سال)
سبک	۰/۵	۲۰۰۰
نامی	۱	۵۲۶۰
سنگین	۱/۶	۱۵۰۰

۳- فرمول‌بندی مسئله

در این مقاله، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه DGها و خازن‌ها به‌طور همزمان در شبکه توزیع بر اساس یک روش چندهدفه انجام شده است. تابع هدف پیشنهادی برای این مسئله بهینه‌سازی، مجموع شاخص‌های تلفات توان اکتیو و راکتیو، پروفیل ولتاژ، توازن ظرفیت بارگذاری خطوط و پایداری ولتاژ سیستم را در سطوح بارگذاری مختلف لحاظ نموده است.

۳-۱- شاخص‌های تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم

کاهش تلفات در خطوط سیستم، همواره از مهم‌ترین مزایای حضور DGها و خازن‌ها در شبکه‌های توزیع می‌باشد. شاخص‌های تلفات توان اکتیو و راکتیو در هر سطح بارگذاری به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$LPI_j = \frac{P_{Loss,j}}{P_{base}^{Loss,j}} \quad (3)$$

$$LQI_j = \frac{Q_{Loss,j}}{Q_{base}^{Loss,j}} \quad (4)$$

که $P_{Loss,j}$ و $Q_{Loss,j}$ به ترتیب تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم در سطح بارگذاری نام هستند. $P_{base}^{Loss,j}$ و $Q_{base}^{Loss,j}$ به ترتیب مجموع تلفات توان اکتیو و راکتیو شبکه در سطح بارگذاری نام در حالت پایه هستند.

کاهش تلفات توان اکتیو سیستم استفاده شده است. الگوریتم Memetic برای تعیین مکان و ظرفیت DGها و خازن‌های ثابت به‌طور همزمان در شبکه توزیع با هدف کاهش تقاضای توان اکتیو، بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات و افزایش پایداری ولتاژ سیستم در [۳۲] به‌کار برده شده است. یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها و خازن‌ها به‌طور همزمان بر اساس ترکیب الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک در [۳۳] پیشنهاد شده است. تعیین مکان و ظرفیت DGها و خازن‌ها در سیستم توزیع بر اساس یک روش چندهدفه در [۳۴] ارائه شده است.

از مطالب یادشده، می‌توان به تنوع روش‌هایی که برای حل مسئله مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در شبکه‌های توزیع ارائه شده‌اند، پی برد؛ اما در این روش‌ها برخی کاستی‌ها وجود دارند. در بسیاری از مراجع یادشده، این دو مسئله به‌طور مجزا در نظر گرفته شده‌اند و تنها در مراجع [۲۸-۳۴] این دو مسئله به‌صورت همزمان بررسی شده‌اند. حضور همزمان DGها و خازن‌ها در شبکه، اثر مناسب‌تری بر عملکرد سیستم و بهبود شاخص‌های سیستم دارند. همچنین اثر مدل‌های بار وابسته به ولتاژ تنها در مراجع [۸، ۱۵، ۱۷] بررسی شده‌اند و در بقیه مراجع مدل بار شبکه به‌صورت توان ثابت در نظر گرفته شده‌اند، درحالی‌که مدل‌های بار وابسته به ولتاژ اثر قابل‌توجهی بر برنامه‌ریزی DGها و خازن‌ها در شبکه‌های توزیع دارند. در اغلب تحقیقات یادشده، بار شبکه به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است، در این‌صورت مکان و ظرفیت به‌دست‌آمده برای DG یا خازن‌ها تنها برای همان سطح بارگذاری بهینه می‌باشد. یکی از مسائل مهمی که در مورد DGها و خازن‌ها وجود دارد این است که مکان تعیین‌شده برای DGها و خازن‌ها در سطوح بارگذاری مختلف شبکه قابل‌تغییر نیست. در مراجع [۱۵، ۱۸] مکان DGها بر اساس روش‌های آنالیز حساسیت ولتاژ یا تلفات توان در سطح بار نامی تعیین شده است و با ثابت در نظر گرفتن این مکان، توان‌های تولیدی توسط DGها را در هر سطح بار به‌صورت جداگانه محاسبه نموده‌اند. عیب این روش این است که مکان تعیین‌شده تنها برای یک سطح بارگذاری مناسب است و مکان به‌دست‌آمده برای DGها با تغییر سطح بارگذاری بهینه نمی‌باشد.

در این تحقیق، یک تابع هدف چندمنظوره معرفی شده است. تابع هدف پیشنهادی، شاخص‌های تلفات توان اکتیو، تلفات توان راکتیو، انحراف ولتاژ، توازن ظرفیت بارگذاری خطوط و پایداری ولتاژ سیستم را در نظر گرفته است. در این تابع هدف، برای غلبه بر مشکلات ذکرشده فوق، سطوح بارگذاری مختلفی به‌طور همزمان جهت حل مسئله مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها و خازن‌ها در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده است. میزان تولید DGها و توان راکتیو خازن‌ها برای هر سطح بارگذاری متغیر فرض شده است.

۲- مدل بار

مدل بار در شبکه‌های توزیع، بیانگر رابطه ریاضی میان ولتاژ هر شین و توان یا جریان جاری شده در همان شین می‌باشد. انواع مدل‌های بار عملی

۳-۴- شاخص پایداری ولتاژ سیستم

شاخص پایداری ولتاژ (VSI) در حقیقت معیاری از نزدیکی ولتاژ شین‌ها به نقطه ناپایداری ولتاژ می‌باشد. در این مقاله، از شاخص ارائه شده در مرجع [۳۷] استفاده شده است. رابطه ریاضی این شاخص برای هر سطح بارگذاری مطابق زیر تعریف شده است:

$$SI(ni, j) = \left| V_{mi,j} \right|^4 - 4 \times \left\{ P_{ni,j}(ni, j)R_{ni} + Q_{ni,j}(ni, j)X_{ni} \right\} \left| V_{mi,j} \right|^2 - 4 \times \left\{ P_{ni,j}(ni, j)X_{ni} - Q_{ni,j}(ni, j)R_{ni} \right\}^2 \quad (11)$$

که $V_{mi,j}$ ولتاژ شین mi م در سطح بارگذاری ni م، $P_{ni,j}(ni, j)$ و $Q_{ni,j}(ni, j)$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو در شین mi م در سطح بارگذاری ni م، R_{ni} و X_{ni} به ترتیب مقاومت و راکتانس میان شین‌های mi م و ni م می‌باشند.

در شرایط کاری پایدار، مقدار SI برای تمامی شین‌ها باید بزرگ‌تر از صفر باشد. از آنجایی که مقدار این شاخص باید بیشینه شود، شاخص پایداری ولتاژ سیستم برای هر سطح بارگذاری مطابق زیر تعریف شده است:

$$VSI_j = \frac{I}{\min(SI(ni, j))} \quad ni = 2, 3, \dots, Nb \quad (12)$$

شاخص مجموع پایداری ولتاژ شبکه به صورت زیر ارائه شده است:

$$VSIT = \sum_{j=1}^m VSI_j \times \frac{T_j}{T} \quad (13)$$

۳-۵- تابع هدف مسئله

تابع چندهدفه پیشنهادی برای حل مسئله بهینه‌سازی، شاخص‌های یادشده را با روش وزنی مطابق با رابطه زیر لحاظ نموده است:

$$MOF = \omega_1 LPIT + \omega_2 LQIT + \omega_3 VDIIT + \omega_4 BCIT + \omega_5 VSIT$$

$$\sum_{i=1}^5 \omega_i = 1.0 \quad \wedge \quad \omega_i \in [0, 1] \quad (14)$$

ضرایب وزنی نقش مهمی در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ایفا می‌کنند. مقدار هر یک از این ضرایب وزنی بیانگر اهمیت شاخص مربوطه‌اش می‌باشد. مقادیر این ضرایب وزنی توسط طراح شبکه انتخاب می‌شوند [۱۷]. مقادیر ضرایب وزنی برای این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳: مقادیر ضرایب وزنی شاخص‌ها

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
۰/۳۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲

۳-۶- قیدها و محدودیت‌ها

۳-۶-۱- قیود تعادل توان

معادلات توازن توان اکتیو و راکتیو شبکه به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

شاخص‌های مجموع تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$LPIT = \sum_{j=1}^m LPI_j \times \frac{T_j}{T} \quad (5)$$

$$LQIT = \sum_{j=1}^m LQI_j \times \frac{T_j}{T} \quad (6)$$

که T_j و T به ترتیب مدت‌زمان مربوط به سطح بار ni م و مجموع مدت‌زمان مربوط به سطوح بارگذاری مختلف شبکه و m تعداد سطوح بارگذاری می‌باشند.

۳-۲- شاخص انحراف ولتاژ سیستم

با حضور DGها و خازن‌ها در سیستم، دامنه ولتاژ در شین‌های سیستم افزایش می‌یابد. شاخص انحراف ولتاژ، میزان انحراف ولتاژ شین‌های سیستم را از مقدار نامی ولتاژ سیستم ارزیابی می‌کند. برای عملکرد بهتر شبکه، این شاخص باید تا حد ممکن به صفر نزدیک باشد. شاخص انحراف ولتاژ سیستم در هر سطح بارگذاری مطابق با رابطه زیر بیان شده است:

$$VDI_j = \frac{I}{Nb} \sum_{i=1}^{Nb} \left(\left| \frac{V_{i,j} - V_{nominal}}{V_{nominal}} \right| \right) \quad (7)$$

که $V_{i,j}$ ولتاژ شین ni م در سطح بارگذاری ni م و Nb تعداد شین‌های سیستم هستند. $V_{nominal}$ مقدار ولتاژ نامی شبکه است که در این مقاله دارای مقدار ۱ پریونیت می‌باشد.

شاخص مجموع انحراف ولتاژ سیستم به صورت زیر تعریف شده است:

$$VDIT = \sum_{j=1}^m VDI_j \times \frac{T_j}{T} \quad (8)$$

۳-۳- شاخص توازن ظرفیت بارگذاری خطوط سیستم

هنگامی که DGها و خازن‌ها به شبکه متصل می‌شوند، پخش توان در بخش‌هایی از سیستم به‌طور چشم‌گیری تغییر می‌کند. در این مقاله، یک شاخص جدید تحت عنوان شاخص توازن ظرفیت بارگذاری خطوط تعریف شده است. کاهش این شاخص باعث آزادسازی ظرفیت خطوط سیستم و کاهش استرس بارگذاری در خطوط شبکه می‌شود. رابطه این شاخص برای هر سطح بارگذاری در سیستم به صورت زیر تعریف شده است:

$$BCI_j = \frac{1}{NL} \sum_{i=1}^{NL} \left| \frac{S_{avg,j} - S_{i,j}}{\max(S_{avg,j}, S_{i,j})} \right| \quad (9)$$

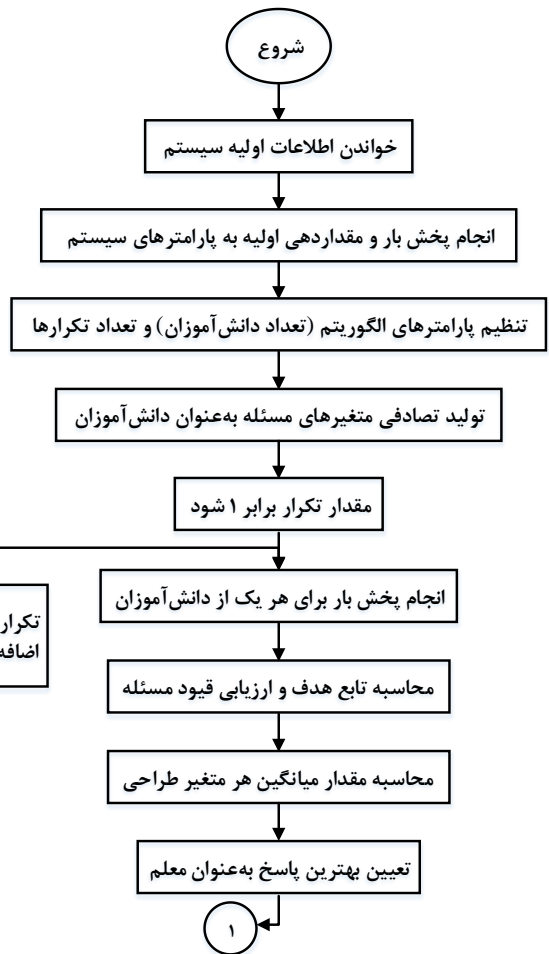
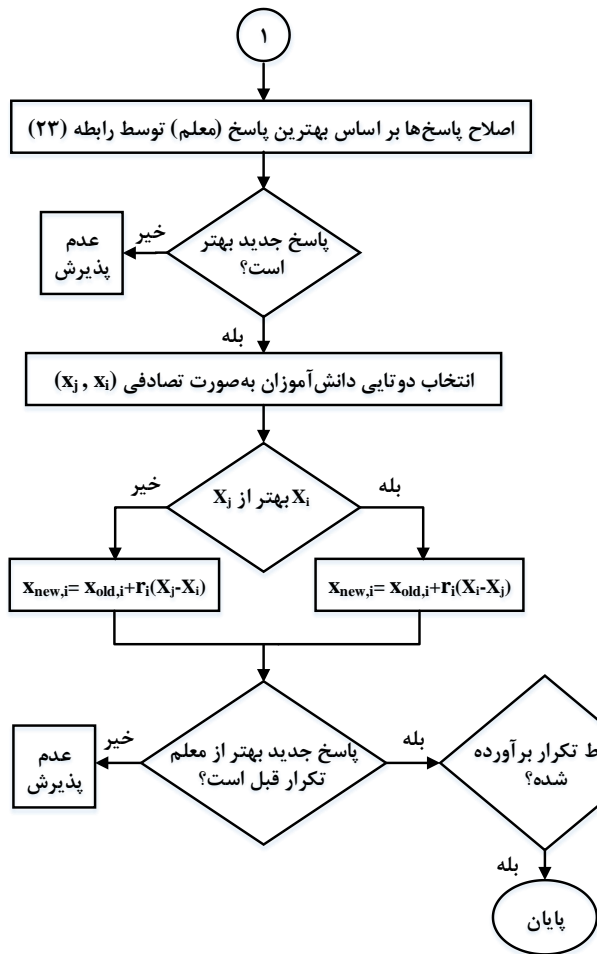
که میانگین ظرفیت بارگذاری خطوط سیستم در سطح بارگذاری ni م، $S_{avg,j}$ میانگین ظرفیت بارگذاری خط ni م در سطح بارگذاری ni م و NL تعداد خطوط سیستم هستند.

شاخص مجموع توازن ظرفیت بارگذاری خطوط شبکه به صورت زیر ارائه شده است:

$$BCIT = \sum_{j=1}^m BCI_j \times \frac{T_j}{T} \quad (10)$$

می‌باشد. سیستم دوم، سیستم توزیع شعاعی ۶۹ شینه استاندارد است. میزان تقاضای توان اکتیو و راکتیو این سیستم در حالت نامی به ترتیب

۳۳ شینه استاندارد می‌باشد. مقدار تقاضای توان اکتیو و راکتیو این سیستم در شرایط نامی به ترتیب برابر با ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار



شکل ۱: فلوجارت اجرای الگوریتم TLBO برای حل مسئله بهینه‌سازی

جداول ۷ و ۸ ارائه شده‌اند. جداول ۵ تا ۸ نشان می‌دهند که مدل‌های بار بر مکان و ظرفیت بهینه DGها و خازن‌ها و همچنین بر شاخص‌های شبکه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌اند.

جدول ۴: پارامترهای الگوریتم TLBO و قیود به‌کاربرده‌شده برای سیستم‌های توزیع

پارامترها	سیستم توزیع ۳۳ شینه	سیستم توزیع ۶۹ شینه
تعداد دانش‌آموزان	۱۰۰	۱۲۰
تعداد تکرارها	۱۰۰	۱۵۰
حدود ولتاژ شبکه	۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت	۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت
حدود ظرفیت واحدهای DG	صفر تا ۲۰۰۰ کیلووات	صفر تا ۲۰۰۰ کیلووات
حدود ضریب قدرت واحدهای DG	۰/۹ تا ۱	۰/۹ تا ۱
حدود ظرفیت خازن‌ها	صفر تا ۲۰۰۰ کیلووار در گام‌های ۵۰ کیلوواری	صفر تا ۲۰۰۰ کیلووار در گام‌های ۵۰ کیلوواری

برابر با ۳۸۰۲ کیلووات و ۲۶۹۴ کیلووار می‌باشد. دیاگرام تک‌خطی این دو سیستم همراه با نوع بارهای متصل به هر شین به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. اطلاعات مربوط به خطوط و بارها برای این دو سیستم در مرجع [۴۲] داده شده‌اند. اطلاعات لازم مربوط به قیود به‌کار برده شده و پارامترهای الگوریتم TLBO برای هر دو سیستم در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در این مقاله از روش پخش بار مستقیم^۳ جهت انجام محاسبات پخش بار سیستم استفاده شده است [۴۳].

۵-۱- نتایج شبیه‌سازی

پس از اجرای روش چندهدفه پیشنهادی، مکان‌های بهینه برای DGها و خازن‌ها و میزان تولید بهینه توسط آن‌ها در هر سطح بارگذاری و در مدل‌های بار گوناگون برای سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه به ترتیب در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. به‌منظور نشان دادن تأثیر DGها و خازن‌ها بر این سیستم‌ها، مقدار شاخص‌های شبکه در حالت پایه و پس از نصب DGها و خازن‌ها در شبکه، برای هر سطح بارگذاری و در انواع مدل‌های بار برای هر دو سیستم توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه به ترتیب در

در جداول ۷ و ۸، میزان تلفات توان اکتیو و راکتیو شبکه در حالت پایه و پس از حضور DGها و خازن‌ها در سیستم، در سطوح بارگذاری مختلف و تمامی مدل‌های بار برای هر دو سیستم نشان داده شده است. این جداول نشان می‌دهند که پس از نصب DGها و خازن‌ها در شبکه،

تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم در تمامی سطوح بارگذاری و در انواع مدل‌های بار به‌میزان چشم‌گیری کاهش یافته‌اند. برای نمونه، در سیستم توزیع ۳۳ شینه و در مدل بار توان ثابت، میزان کاهش در تلفات توان اکتیو سیستم در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین به‌ترتیب برابر

جدول ۵: مکان‌های بهینه DGها و خازن‌ها و میزان تولید بهینه آن‌ها در سطوح بارگذاری مختلف سیستم و در مدل‌های بار مختلف برای سیستم توزیع ۳۳ شینه

مدل بار		ثابت	صنعتی	خانگی	تجاری	مختلط
شماره شین نصب DG		۱۳ ۲۴ ۳۰	۱۳ ۲۴ ۳۰	۱۳ ۲۵ ۳۰	۱۳ ۲۴ ۳۰	۱۳ ۲۴ ۳۰
ظرفیت DG (کیلووات، ضریب قدرت)	سبک	(۵۸۱/۳، ۰/۹۷۹)	(۴۴۰/۸، ۰/۹۷۲)	(۴۳۷/۸، ۰/۹۸۲)	(۴۱۹/۳، ۰/۹۱۱)	(۴۷۶/۴، ۰/۹۳۶)
		(۴۰۲/۷، ۰/۹۰۳)	(۵۶۷/۸، ۰/۹۲۵)	(۳۷۲/۶، ۰/۹۲۷)	(۵۸۱، ۰/۹۶۴)	(۵۸۱/۶، ۰/۹)
		(۵۰۷/۱، ۰/۹۰۶)	(۵۱۴/۳، ۰/۹۶۶)	(۵۴۲/۹، ۰/۹۲۸)	(۵۰۸/۲، ۰/۹۷۸)	(۴۲۲/۱، ۰/۹۸۹)
	نامی	(۸۸۹/۸، ۰/۹۵۵)	(۸۱۳/۶، ۰/۹)	(۸۵۷/۳، ۰/۹۵۴)	(۸۴۷، ۰/۹۴۲)	(۱۰۱۵/۲، ۰/۹۱۵)
		(۱۱۴۱/۳، ۰/۹۵۲)	(۱۱۳۶/۲، ۰/۹۳۹)	(۷۲۷/۹، ۰/۹۸۱)	(۱۱۰۶/۸، ۰/۹۷۷)	(۱۱۴۳، ۰/۹۷۴)
		(۹۴۰/۱، ۰/۹۳۱)	(۱۰۳۲/۷، ۰/۹)	(۱۱۰۴/۷، ۰/۹۶۳)	(۱۰۲۹/۳، ۰/۹۷۶)	(۸۴۴، ۰/۹۸۹)
	سنگین	(۱۴۲۹/۷، ۰/۹۵۵)	(۱۴۳۶/۸، ۰/۹۷۴)	(۱۳۶۳/۱، ۰/۹۶۶)	(۱۳۴۲/۳، ۰/۹۴۶)	(۱۶۷۰/۶، ۰/۹۷۶)
		(۱۷۰۷/۷، ۰/۹۹۳)	(۱۵۹۴/۸، ۰/۹۹۵)	(۱۱۷۶/۹، ۰/۹۷۹)	(۱۳۷۲/۶، ۰/۹۹۳)	(۱۷۸۲/۶، ۰/۹۸)
		(۱۴۵۸/۸، ۰/۹۹۵)	(۱۵۹۵/۹، ۰/۹۶۲)	(۱۷۱۹/۵، ۰/۹۷۷)	(۱۶۷۸/۶، ۰/۹۸)	(۱۳۲۴/۹، ۰/۹۷۷)
شماره شین نصب خازن		۲۳ ۲۸ ۳۰	۱۹ ۲۷ ۳۰	۶ ۲۴ ۳۰	۱۹ ۲۶ ۳۰	۷ ۱۹ ۳۰
ظرفیت خازن (کیلووار)	سبک	۲۰۰	۲۰۰	۴۵۰	۱۵۰	۳۰۰
		۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰
		۱۵۰	۲۵۰	۱۵۰	۴۰۰	۱۵۰
	نامی	۳۰۰	۲۵۰	۵۵۰	۴۵۰	۳۵۰
		۴۰۰	۳۵۰	۵۵۰	۵۵۰	۲۰۰
		۴۵۰	۳۵۰	۶۰۰	۶۰۰	۶۵۰
	سنگین	۹۵۰	۷۵۰	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۲۰۰
		۱۱۵۰	۱۲۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۲۵۰
		۷۵۰	۸۵۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۷۵۰

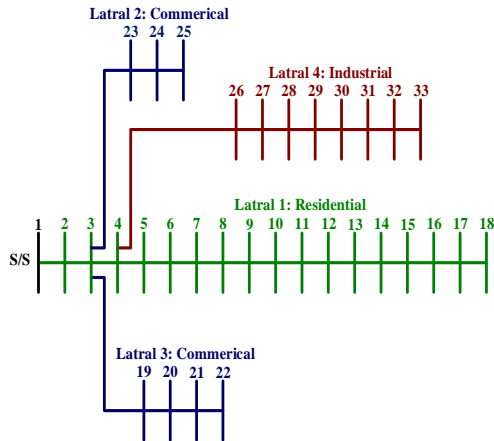
همچنین به‌طور نمونه، نمودارهای پروفیل ولتاژ و لثاژ سیستم در سطح بارگذاری سنگین در انواع مدل‌های بار در حالت پایه و پس از حضور DGها و خازن‌ها در شبکه، برای سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه به‌ترتیب در شکل‌های ۴ (الف - ه) و ۵ (الف - ه) رسم شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که مقدار دامنه ولتاژ در شین‌های شبکه، در تمامی مدل‌های بار پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در سیستم، نسبت به حالت پایه افزایش قابل توجهی داشته، درحالی‌که مقادیر دامنه ولتاژ در شین‌های سیستم در محدوده مجاز باقی مانده‌اند. از مطالب عنوان شده می‌توان نتیجه گرفت که پس از حضور واحدهای DG و خازن‌ها در سیستم، پروفیل ولتاژ شبکه در تمامی سطوح بارگذاری و در مدل‌های بار مختلف، بهبود چشم‌گیری داشته است.

نمودارهای ظرفیت بارگذاری در خطوط سیستم در سطح بارگذاری سنگین برای انواع مدل‌های بار در حالت پایه و پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در سیستم، برای سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه

با ۹۳/۸۱٪، ۹۴/۰۶٪ و ۹۳/۹۲٪ بوده؛ و میزان کاهش در تلفات توان راکتیو سیستم در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین به‌ترتیب برابر با ۹۲/۳۲٪، ۹۲/۷۲٪ و ۹۲/۶۹٪ می‌باشد.

مطابق با آنچه در جداول ۷ و ۸ آمده است، پس از حضور DGها و خازن‌ها در سیستم، مقدار شاخص انحراف ولتاژ شبکه در تمامی شرایط بارگذاری و مدل‌های بار مختلف، کاهش چشم‌گیری داشته و به صفر نزدیک شده است. برای نمونه، در شبکه توزیع ۶۹ شینه و در مدل بار صنعتی، پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در سیستم، مقدار کاهش در شاخص VDI سیستم در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین به‌ترتیب برابر با ۹۲/۱۳٪، ۹۲/۹۲٪ و ۹۲/۶۴٪ می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که پس از نصب DGها و خازن‌ها در سیستم، دامنه ولتاژ در شین‌های شبکه در کلیه سطوح بارگذاری و در مدل‌های بار مختلف به مقدار نامی تعیین‌شده نزدیک شده است.

سطح جریان در خطوط تحت استرس شبکه کاهش یافته است که این امر موجب جلوگیری از کاهش طول عمر مفید خطوط شبکه خواهد شد. از این مطالب می‌توان نتیجه گرفت که حضور واحدهای DG و خازن‌ها در شبکه، در تمامی سطوح بارگذاری و در مدل‌های بار مختلف باعث آزادسازی ظرفیت خطوط شبکه شده‌اند.



شکل ۲: دیاگرام تک‌خطی سیستم توزیع ۳۳ شینه استاندارد

به ترتیب در شکل‌های ۶ (الف - ه) و ۷ (الف - ه) ترسیم شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که پس از حضور DGها و خازن‌ها در سیستم، استرس بارگذاری در بسیاری از خطوط شبکه کاسته شده و پخش توان در خطوط شبکه در حد مجاز باقی مانده‌اند؛ همچنین مقدار کاهش در ظرفیت بارگذاری در خطوط اولیه شبکه که استرس بارگذاری در آن‌ها زیادتر است، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشد. مطابق با آنچه در جداول ۷ و ۸ آمده است، مقدار شاخص توازن ظرفیت بارگذاری خطوط شبکه پس از نصب DGها و خازن‌ها در سیستم، در تمامی مدل‌های بار و در سطوح بارگذاری مختلف شبکه نسبت به حالت پایه کاهش مؤثری یافته است. برای نمونه در سیستم توزیع ۳۳ شینه و در مدل بار مختلط، پس از نصب DGها و خازن‌ها در سیستم، میزان کاهش در شاخص BCI شبکه در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین به ترتیب برابر با ۵۳/۱۵٪، ۴۷/۹۱٪ و ۴۹/۷۷٪ می‌باشد. همچنین در سیستم توزیع ۶۹ شینه و در مدل بار مختلط، پس از حضور واحدهای DG و خازن‌ها در شبکه، مقدار کاهش در شاخص BCI سیستم در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین به ترتیب برابر با ۲۹/۶۰٪، ۳۱/۹۳٪ و ۳۰/۱۶۵٪ می‌باشد. کاهش این شاخص نشان می‌دهد که پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در سیستم، توان عبوری از خطوط شبکه کاهش یافته و از این‌رو

جدول ۶: مکان‌های بهینه DGها و خازن‌ها و میزان تولید بهینه آن‌ها در سطوح بارگذاری مختلف سیستم و در مدل‌های بار مختلف برای سیستم توزیع ۶۹ شینه

مدل بار	ثابت	صنعتی	خانگی	تجاری	مختلط	
شماره شین نصب DG	۱۷	۱۷	۱۷	۱۶	۱۶	
	۴۹	۶۱	۴۹	۶۱	۶۱	
	۶۱	۶۲	۶۱	۶۲	۶۲	
ظرفیت DG، (کیلووات، ضریب قدرت)	سبک	(۲۸۹، ۰/۹)	(۳۱۱/۷، ۰/۹۱۸)	(۲۸۶/۱، ۰/۹)	(۳۱۳/۳، ۰/۹۰۴)	(۳۲۴/۸، ۰/۹)
		(۴۶۱/۱، ۰/۹)	(۷۳۲/۷، ۰/۹۹۹)	(۵۱۰، ۰/۹)	(۴۹۲، ۰/۹۵۶)	(۶۳۱/۲، ۰/۹۴۱)
		(۸۹۲/۶، ۰/۹۹۷)	(۱۹۰/۴، ۰/۹)	(۸۶۴/۶، ۰/۹)	(۴۲۰/۳، ۰/۹۰۷)	(۲۹۱/۷، ۰/۹)
	نامی	(۵۹۷/۲، ۰/۹۰۷)	(۶۰۷/۳، ۰/۹۳۸)	(۵۷۷/۴، ۰/۹)	(۶۵۶/۲، ۰/۹۰۳)	(۶۹۸/۷، ۰/۹)
		(۸۵۱/۳، ۰/۹۵۲)	(۹۰۶/۳، ۰/۹۱۵)	(۸۹۰/۵، ۰/۹۴۹)	(۱۵۵۵، ۰/۹۳۹)	(۱۱۸۸/۸، ۰/۹۹۱)
		(۱۷۹۵/۹، ۰/۹۹۴)	(۹۳۱/۱، ۰/۹)	(۱۷۵۵، ۰/۹۷۲)	(۳۲۰/۶، ۰/۹۷۶)	(۷۲۷/۱، ۰/۹۳)
سنگین	(۱۱۶۶/۹، ۰/۹۲۸)	(۱۰۶۰/۳، ۰/۹۴۷)	(۱۱۳۵/۸، ۰/۹۵۴)	(۱۰۷۱/۹، ۰/۹۳۱)	(۱۱۵۳، ۰/۹۱۶)	
	(۱۷۷۰/۳، ۰/۹۹۹)	(۱۶۴۰، ۰/۹۶۸)	(۱۶۱۴/۲، ۰/۹۱۳)	(۱۱۳۱/۳، ۰/۹۵)	(۱۸۵۷/۱، ۰/۹۵۶)	
	(۲۰۰۰، ۰/۹۱۵)	(۱۱۸۲/۴، ۰/۹۰۵)	(۱۹۹۹، ۰/۹۹۶)	(۱۹۰۵/۴، ۰/۹۳۸)	(۱۲۴۹، ۰/۹)	
شماره شین نصب خازن	۳۹	۱۱	۳۶	۸	۳۶	
	۵۱	۲۸	۵۳	۵۰	۵۰	
	۶۱	۶۱	۶۱	۶۱	۶۱	
ظرفیت خازن (کیلووار)	سبک	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۲۰۰
		۲۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
		۵۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۲۵۰	۳۵۰
	نامی	۳۰۰	۵۵۰	۳۵۰	۵۰۰	۳۵۰
		۵۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۶۰۰
		۱۰۰۰	۳۰۰	۷۵۰	۴۰۰	۸۰۰
	سنگین	۵۵۰	۷۵۰	۷۰۰	۹۰۰	۹۰۰
		۹۵۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱۱۵۰	۸۵۰
		۱۲۰۰	۹۰۰	۱۵۰۰	۷۵۰	۷۵۰

جدول ۷: مقادیر شاخص‌های سیستم توزیع ۳۳ شینه در سطوح بارگذاری مختلف و در انواع مدل‌های بار

	مختلط	تجاری	خانگی	صنعتی	ثابت	سطح بارگذاری		
						شاخص	سبک	
حالت پایه	۴۲/۷۴	۴۲/۴۳	۴۳/۱۱	۴۳/۵۰	۴۸/۷۶	سبک	۴۸/۷۶	
	۱۶۶/۴	۱۵۹/۵۶	۱۶۶/۱۶	۱۷۴/۵۷	۲۱۰/۸۴	نامی	۲۱۰/۸۴	
	۴۲۵/۹۴	۳۸۳/۵۷	۴۱۴/۳۶	۴۶۷/۳۶	۶۰۲/۹۶	سنگین	۶۰۲/۹۶	
	۲۸/۹۳	۲۸/۷۰	۲۹/۱۸	۲۹/۴۷	۳۳/۰۵	سبک	۳۳/۰۵	
	۱۱۲/۶۴	۱۰۷/۹۳	۱۱۲/۴۸	۱۱۸/۴۴	۱۴۳/۱۱	نامی	۱۴۳/۱۱	
	۲۸۸/۴۷	۲۵۹/۱۳	۲۸۰/۶۱	۳۱۷/۷۱	۴۱۰/۱۴	سنگین	۴۱۰/۱۴	
	۰/۰۲۴۵۴۷	۰/۰۲۴۴۱۳	۰/۰۲۴۶۲۳	۰/۰۲۴۷۲۰	۰/۰۲۶۲۳۲	سبک	۰/۰۲۶۲۳۲	
	۰/۰۴۸۲۰۳	۰/۰۴۷۲۶۳	۰/۰۴۸۲۰۹	۰/۰۴۹۱۴۱	۰/۰۵۴۶۴۴	نامی	۰/۰۵۴۶۴۴	
	۰/۰۷۶۱۷۶	۰/۰۷۲۹۶۸	۰/۰۷۱۱۰۷	۰/۰۷۹۱۱۰	۰/۰۹۲۶۳۰	سنگین	۰/۰۹۲۶۳۰	
	۰/۴۹۱۱۴	۰/۴۹۵۲۴	۰/۴۹۳۰۴	۰/۴۸۸۶۲	۰/۴۹۸۷۰	سبک	۰/۴۹۸۷۰	
	۰/۴۸۹۴۸	۰/۴۹۴۶۳	۰/۴۹۰۷۵	۰/۴۸۵۰۳	۰/۵۰۲۴۹	نامی	۰/۵۰۲۴۹	
	۰/۴۹۲۸۰	۰/۴۹۴۲۷	۰/۴۹۰۶۲	۰/۴۸۶۰۶	۰/۵۰۷۸۹	سنگین	۰/۵۰۷۸۹	
	۰/۸۲۸۸ (۱۸)	۰/۸۴۰۲ (۱۸)	۰/۸۳۸۶ (۱۸)	۰/۸۳۷۵ (۱۸)	۰/۸۲۸۵ (۱۸)	سبک	۰/۸۲۸۵ (۱۸)	
	۰/۷۰۲۹ (۱۸)	۰/۷۰۹۲ (۱۸)	۰/۷۰۳۱ (۱۸)	۰/۶۹۶۶ (۱۸)	۰/۶۶۷۷ (۱۸)	نامی	۰/۶۶۷۷ (۱۸)	
	۰/۵۶۵۶ (۱۸)	۰/۵۸۱۷ (۱۸)	۰/۵۶۷۴ (۱۸)	۰/۵۴۸۶ (۱۸)	۰/۴۸۹۲ (۱۸)	سنگین	۰/۴۸۹۲ (۱۸)	
	پس از نصب DGها و خازن‌ها	۳/۳۶	۲/۹۵	۳/۷۳	۳/۰۶	۳/۰۲	سبک	۳/۰۲
		۱۲/۶۲	۱۱/۸۸	۱۳/۱۹	۱۱/۵۴	۱۲/۵۲	نامی	۱۲/۵۲
		۳۲/۱۸	۳۳/۴۸	۳۳/۵۱	۳۶/۷۲	۳۶/۶۸	سنگین	۳۶/۶۸
۲/۷۶		۲/۴۶	۳/۰۱	۲/۵۷	۲/۵۴	سبک	۲/۵۴	
۱۰/۳۹		۹/۹۳	۱۰/۶۶	۹/۶۶	۱۰/۴۳	نامی	۱۰/۴۳	
۲۷/۸۵		۲۷/۲۲	۲۷/۲۸	۲۹/۵۲	۲۹/۹۹	سنگین	۲۹/۹۹	
۰/۰۰۱۲۱۶		۰/۰۰۱۰۸۴	۰/۰۰۱۰۶۲	۰/۰۰۱۶۴۲	۰/۰۰۱۲۲۹	سبک	۰/۰۰۱۲۲۹	
۰/۰۰۲۴۲۲		۰/۰۰۲۱۸۴	۰/۰۰۲۰۲۸	۰/۰۰۲۳۲۶	۰/۰۰۲۷۹۳	نامی	۰/۰۰۲۷۹۳	
۰/۰۰۴۲۶۵		۰/۰۰۴۵۹۹	۰/۰۰۴۰۵۳	۰/۰۰۳۷۳۲	۰/۰۰۴۹۵۲	سنگین	۰/۰۰۴۹۵۲	
۰/۲۳۰۱۱		۰/۲۷۳۹۴	۰/۲۴۲۴۹	۰/۲۶۰۵۹	۰/۲۶۰۵۵	سبک	۰/۲۶۰۵۵	
۰/۲۵۴۹۸		۰/۲۶۶۵۲	۰/۲۶۸۸۴	۰/۲۵۹۶۵	۰/۲۴۴۴۳	نامی	۰/۲۴۴۴۳	
۰/۲۴۷۵۳		۰/۲۹۵۴۷	۰/۲۶۲۹۳	۰/۲۳۰۳۰۶	۰/۲۵۷۹۶	سنگین	۰/۲۵۷۹۶	
۰/۹۸۰۵ (۳۳)		۰/۹۸۹۰ (۲۲)	۰/۹۸۸۲ (۲۲)	۰/۹۸۶۳ (۸)	۰/۹۸۸۳ (۲۲)	سبک	۰/۹۸۸۳ (۲۲)	
۰/۹۷۷۷ (۲۲)		۰/۹۸۱۷۹ (۲۲)	۰/۹۷۶۵ (۲۲)	۰/۹۷۷۸ (۲۲)	۰/۹۷۵۲ (۸)	نامی	۰/۹۷۵۲ (۸)	
۰/۹۶۴۱ (۲۲)		۰/۹۵۳۳ (۲۵)	۰/۹۶۲۵ (۲۲)	۰/۹۶۴۸ (۲۵)	۰/۹۸۹۸ (۸)	سنگین	۰/۹۸۹۸ (۸)	
٪۹۲/۱۵		٪۹۳/۰۳	٪۹۱/۳۴	٪۹۲/۹۷	٪۹۳/۸۱	سبک	٪۹۳/۸۱	
٪۹۲/۴۲		٪۹۲/۵۶	٪۹۲/۰۶	٪۹۳/۴۰	٪۹۴/۰۶	نامی	٪۹۴/۰۶	
٪۹۲/۴۵		٪۹۱/۲۷	٪۹۱/۹۱	٪۹۲/۱۴	٪۹۳/۹۲	سنگین	٪۹۳/۹۲	
٪۹۰/۴۵	٪۹۱/۴۳	٪۸۹/۶۹	٪۹۱/۲۸	٪۹۲/۳۲	سبک	٪۹۲/۳۲		
٪۹۰/۷۷	٪۹۰/۸۰	٪۹۰/۵۲	٪۹۱/۸۵	٪۹۲/۷۲	نامی	٪۹۲/۷۲		
٪۹۰/۳۵	٪۸۹/۵۰	٪۹۰/۲۸	٪۹۰/۷۱	٪۹۲/۶۹	سنگین	٪۹۲/۶۹		

نمودارهای شاخص پایداری ولتاژ سیستم در سطح بارگذاری سنگین و برای انواع مدل‌های بار در حالت پایه و پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در شبکه، برای سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه به ترتیب در شکل‌های ۸ (الف - ه) و ۹ (الف - ه) رسم شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در سیستم، مقدار شاخص پایداری ولتاژ در شین‌های شبکه نسبت به حالت پایه در تمامی مدل‌های بار افزایش قابل توجهی داشته‌اند. به بیان دیگر، شرایط بهره‌برداری طوری تغییر یافته که فاصله از نقطه

ناپایداری ولتاژ بیشتر شده است. همچنین جداول ۷ و ۸ نشان می‌دهند که پس از نصب واحدهای DG و خازن‌ها در شبکه، مقدار شاخص پایداری ولتاژ در ضعیف‌ترین شین سیستم در کلیه سطوح بارگذاری و در مدل‌های بار مختلف نسبت به حالت پایه افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. برای نمونه، در سیستم توزیع ۶۹ شینه و در مدل بار تجاری، ضعیف‌ترین شین سیستم، شین ۶۵ بوده که مقدار شاخص پایداری ولتاژ در آن شین، در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین برابر با ۰/۸۵۰، ۰/۷۲۶۷ و ۰/۶۰۵۲ بوده است، در حالی که پس از نصب DGها و خازن‌ها

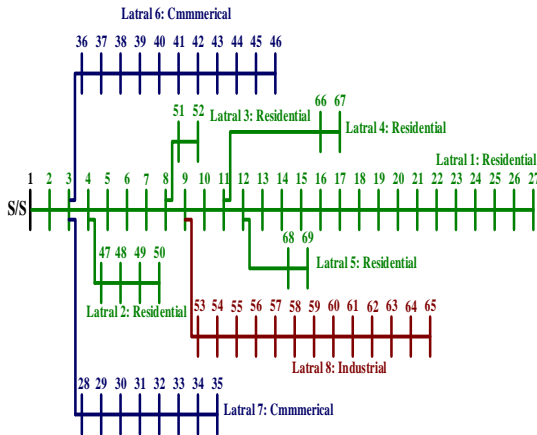
در شبکه، ضعیف‌ترین شین سیستم در سطوح بارگذاری سبک، نامی و سنگین به ترتیب شین‌های ۶۹، ۶۵ و ۴۶ می‌باشد و مقدار شاخص پایداری ولتاژ در آن شین‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۹۵۲، ۰/۹۹۳۴ و ۰/۹۹۰۲ می‌باشد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که حضور DGها و خازن‌ها در شبکه در تمامی مدل‌های بار، باعث بهبود شاخص پایداری ولتاژ سیستم در کلیه سطوح بارگذاری شده و لذا حاشیه پایداری ولتاژ شبکه پس از حضور DGها و خازن‌ها در سیستم بهبود قابل توجهی یافته است.

جدول ۸: مقادیر شاخص‌های سیستم توزیع ۶۹ شینه در سطوح بارگذاری مختلف و در انواع مدل‌های بار

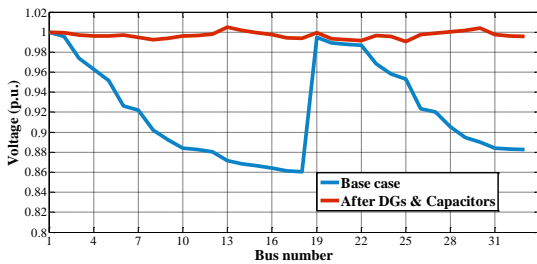
	مختلط	تجاری	خانگی	صنعتی	ثابت	سطح بارگذاری		
						شاخص	سبک	
تفاوت حالت بار	تلفات اکتیو (کیلووات)	۴۳/۸۱	۴۴/۲۴	۴۴/۰۸	۵۱/۵۹	سبک	۴۴/۰۸	
		۱۶۲/۱۲	۱۶۷/۱۷	۱۷۳/۴۲	۲۴۴/۹۴	نامی	۱۷۳/۴۲	
		۳۸۲/۳۸	۴۰۹/۲۱	۴۶۲/۶۰	۶۵۲/۳۵	سنگین	۴۶۲/۶۰	
	تلفات راکتیو (کیلووار)	۲۰/۲۱	۲۰/۴۰	۲۰/۳۳	۲۳/۵۵	سبک	۲۰/۳۳	
		۷۵/۱۹	۷۷/۳۸	۸۰/۰۶	۱۰۲/۱۴	نامی	۷۷/۳۸	
		۱۷۸/۴۴	۱۹۰/۰۱	۲۱۲/۸۵	۲۹۴/۱۸	سنگین	۲۱۲/۸۵	
	شاخص VDI	۰/۰۱۲۰۸۰	۰/۰۱۲۰۵۱	۰/۰۱۲۰۸۷	۰/۰۱۲۸۱۱	سبک	۰/۰۱۲۰۸۰	
		۰/۰۲۴۰۰۶	۰/۰۲۳۶۱۹	۰/۰۲۴۰۷۵	۰/۰۲۶۶۱۴	نامی	۰/۰۲۴۰۰۶	
		۰/۰۳۸۷۳۳	۰/۰۳۷۱۶۴	۰/۰۳۹۰۱۸	۰/۰۴۴۹۷۱	سنگین	۰/۰۳۸۷۳۳	
	شاخص BCI	۰/۷۱۸۶۷	۰/۷۱۸۶۴	۰/۷۱۸۷۸	۰/۷۱۸۸۴	سبک	۰/۷۱۸۶۷	
		۰/۷۱۹۳۱	۰/۷۱۷۹۴	۰/۷۱۸۴۷	۰/۷۱۹۳۵	نامی	۰/۷۱۹۳۱	
		۰/۷۲۱۶۱	۰/۷۱۷۰۷	۰/۷۱۸۳۶	۰/۷۲۱۰۴	سنگین	۰/۷۲۱۶۱	
	کمینه شاخص SI (شماره شین)	۰/۸۴۷۸ (۶۵)	۰/۸۵۰۰ (۶۵)	۰/۸۴۶۸ (۶۵)	۰/۸۳۷۷ (۶۵)	سبک	۰/۸۴۷۸ (۶۵)	
		۰/۷۱۴۰ (۶۵)	۰/۷۲۶۷ (۶۵)	۰/۷۲۰۸ (۶۵)	۰/۶۸۳۳ (۶۵)	نامی	۰/۷۱۴۰ (۶۵)	
		۰/۵۶۸۱ (۶۵)	۰/۶۰۵۲ (۶۵)	۰/۵۹۰۱ (۶۵)	۰/۵۰۵۸ (۶۵)	سنگین	۰/۵۶۸۱ (۶۵)	
	نسب از نصب DGها و خازن‌ها	تلفات اکتیو (کیلووات)	۱/۶۸	۱/۱۵	۱/۷۹	۱/۲۰	سبک	۱/۶۸
			۷/۳۴	۴/۷۳	۷/۴۳	۵/۱۰	نامی	۷/۳۴
			۲۱/۷۱	۳۴/۱۵	۱۸/۳۶	۳۸/۶۱	سنگین	۲۴/۹۸
تلفات راکتیو (کیلووار)		۱/۵۱	۰/۶۴	۱/۹۴	۰/۶۲	سبک	۱/۶۱	
		۶/۲۲	۲/۶۷	۷/۹۱	۲/۸۲	نامی	۶/۸۹	
		۱۷/۶۳	۱۵/۶۸	۱۹/۹۹	۲۱/۶۹	سنگین	۱۸/۳۵	
شاخص VDI		۰/۰۰۰۷۵۰	۰/۰۰۰۶۲۳	۰/۰۰۰۹۵۹	۰/۰۰۰۵۶۹	سبک	۰/۰۰۰۸۰۸	
		۰/۰۰۱۸۶۱	۰/۰۰۱۲۰۷	۰/۰۰۱۷۰۵	۰/۰۰۱۳۱۲	نامی	۰/۰۰۲۲۸۰	
		۰/۰۰۳۰۸۷	۰/۰۰۲۲۶۷	۰/۰۰۲۸۷۳	۰/۰۰۶۰۴۵	سنگین	۰/۰۰۳۸۶۸	
شاخص BCI		۰/۴۹۱۷۱	۰/۴۸۲۴۳	۰/۵۱۲۷۲	۰/۴۶۶۲۲	سبک	۰/۵۰۵۹۲	
		۰/۴۹۰۰۳	۰/۴۹۷۷۲	۰/۴۹۴۰۸	۰/۴۸۷۲۳	نامی	۰/۴۸۹۶۶	
		۰/۵۰۳۴۲	۰/۵۱۵۸۴	۰/۵۳۴۷۳	۰/۵۱۳۱۶	سنگین	۰/۵۰۰۴۳	
کمینه شاخص SI (شماره شین)		۰/۹۹۶۴ (۶۷)	۰/۹۹۵۲ (۶۹)	۰/۹۸۸۷ (۵۰)	۰/۹۹۱۹ (۶۸)	سبک	۰/۹۹۶۴ (۶۷)	
		۰/۹۹۲۱ (۶۵)	۰/۹۹۳۴ (۶۵)	۰/۹۷۷۷ (۵۰)	۰/۹۸۷۰ (۶۹)	نامی	۰/۹۹۲۱ (۶۵)	
		۰/۹۸۷۸ (۴۹)	۰/۹۹۰۲ (۴۶)	۰/۹۶۴۷ (۵۰)	۰/۸۹۹۶ (۶۵)	سنگین	۰/۹۸۷۸ (۴۹)	
درصد کاهش در تلفات اکتیو		٪۹۵/۶۹	٪۹۶/۱۵	٪۹۵/۹۵	٪۹۷/۶۸	سبک	٪۹۵/۶۹	
		٪۹۴/۸۰	٪۹۵/۴۷	٪۹۵/۷۲	٪۹۷/۷۲	نامی	٪۹۴/۸۰	
		٪۹۴/۵۶	٪۹۴/۳۲	٪۹۶/۰۳	٪۹۴/۰۸	سنگین	٪۹۴/۵۶	
درصد کاهش در تلفات راکتیو	٪۹۲/۰۸	٪۹۲/۵۵	٪۹۰/۴۶	٪۹۷/۳۷	سبک	٪۹۲/۰۸		
	٪۹۱/۳۸	٪۹۱/۷۳	٪۹۰/۱۲	٪۹۷/۲۰	نامی	٪۹۱/۳۸		
	٪۹۱/۳۰	٪۹۰/۱۲	٪۹۰/۶۰	٪۹۲/۶۳	سنگین	٪۹۱/۳۰		

۵-۲- مقایسه نتایج

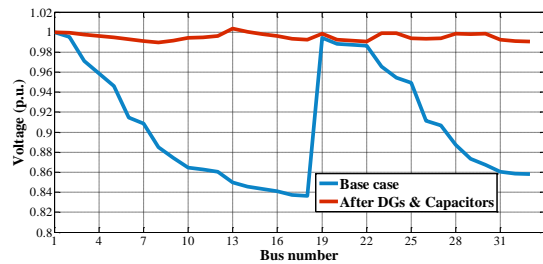
جهت نشان دادن برتری روش ارائه‌شده، نتایج روش چندسطحی پیشنهادی با روش تک‌سطحی و همچنین با روش ضریب حساسیت تلفات که در مراجع [۱۵، ۲۰، ۲۲، ۲۶، ۲۷، ۳۰] برای تعیین مکان‌های نصب DGها و خازن‌ها در سیستم به‌کاربرده‌شده، مقایسه شده است. در روش تک‌سطحی، مکان DGها و خازن‌ها با در نظر گرفتن سطح بارگذاری نامی سیستم در تابع هدف تعیین شده و مقدار تولید DGها و توان راکتیو خازن‌ها در هر سطح بارگذاری به‌صورت جداگانه محاسبه شده‌اند. نتایج این مقایسه به‌طور نمونه برای سطح بارگذاری سنگین با مدل بار مختلط برای سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه به‌ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.



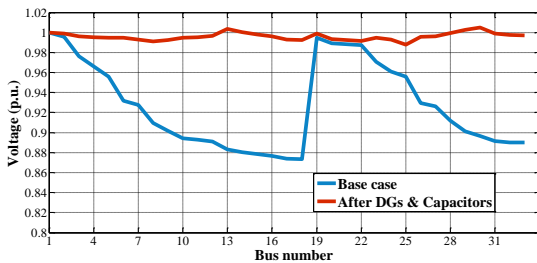
شکل ۳: دیاگرام تک‌خطی سیستم توزیع ۶۹ شینه استاندارد



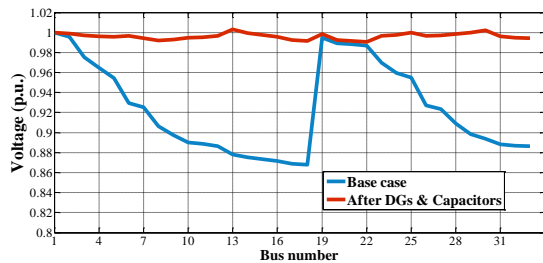
ب: مدل بار صنعتی



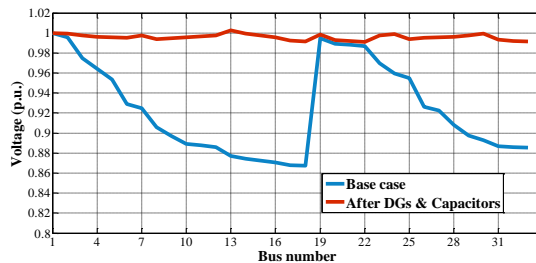
الف: مدل بار توان ثابت



د: مدل بار تجاری

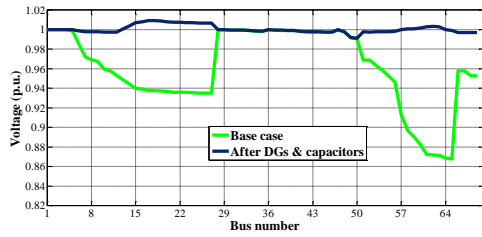


ج: مدل بار خانگی

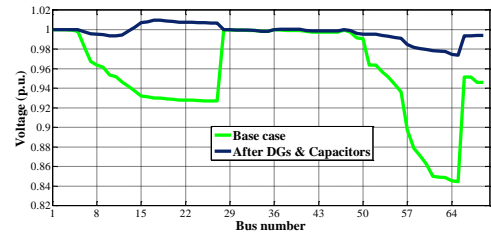


ه: مدل بار مختلط

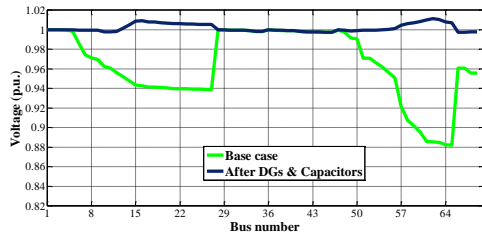
شکل ۴: پروفیل ولتاژ سیستم توزیع ۳۳ شینه در سطح بارگذاری سنگین برای مدل‌های بار مختلف



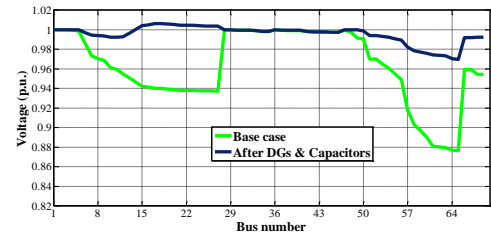
ب: مدل بار صنعتی



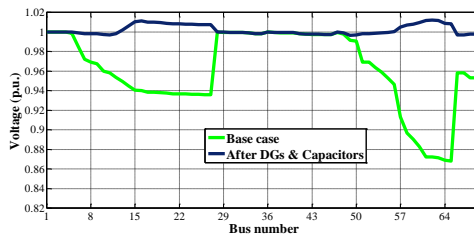
الف: مدل بار توان ثابت



د: مدل بار تجاری

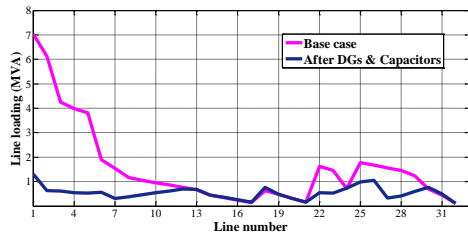


ج: مدل بار خانگی

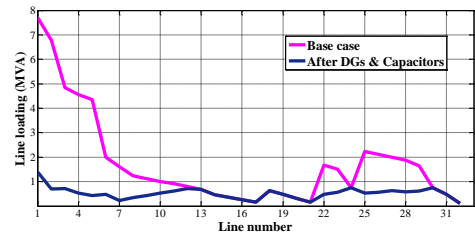


ه: مدل بار مختلط

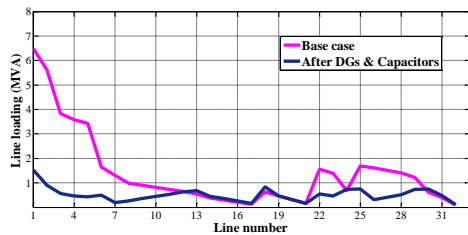
شکل ۵: پروفیل ولتاژ سیستم توزیع ۶۹ شینه در سطح بارگذاری سنگین برای مدل‌های بار مختلف



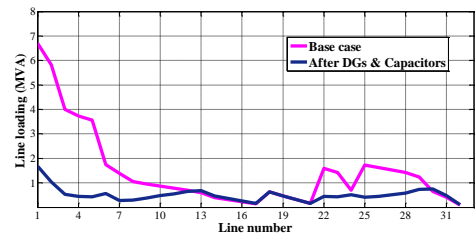
ب: مدل بار صنعتی



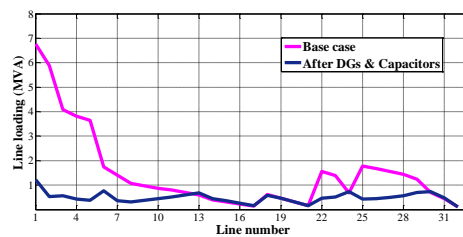
الف: مدل بار توان ثابت



د: مدل بار تجاری

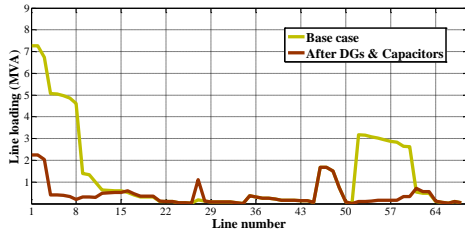


ج: مدل بار خانگی

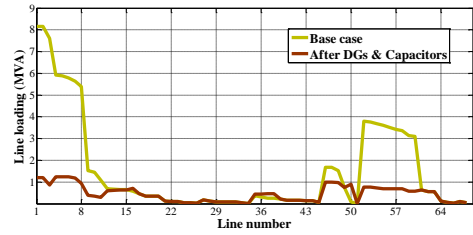


ه: مدل بار مختلط

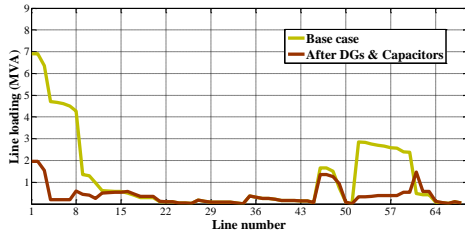
شکل ۶: MVA خطوط سیستم توزیع ۳۳ شینه در سطح بارگذاری سنگین برای مدل‌های بار مختلف



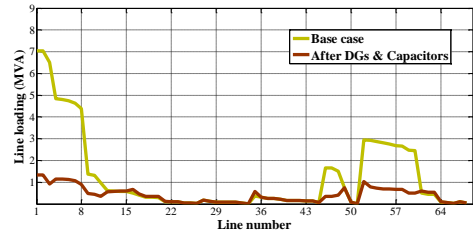
ب: مدل بار صنعتی



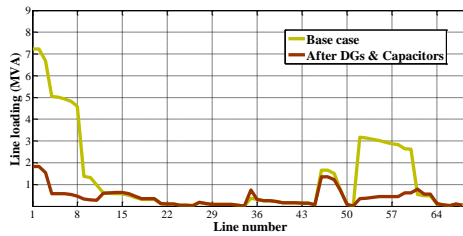
الف: مدل بار توان ثابت



د: مدل بار تجاری

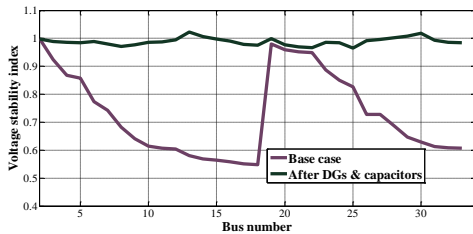


ج: مدل بار خانگی

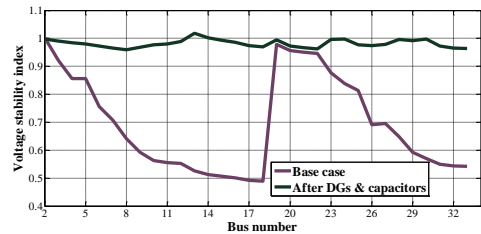


ه: مدل بار مختلط

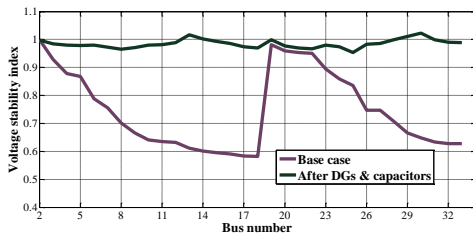
شکل ۷: خطوط سیستم توزیع ۶۹ شینه در سطح بارگذاری سنگین برای مدل‌های بار مختلف



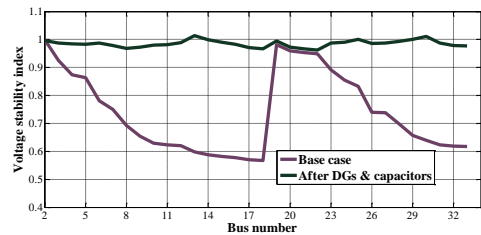
ب: مدل بار صنعتی



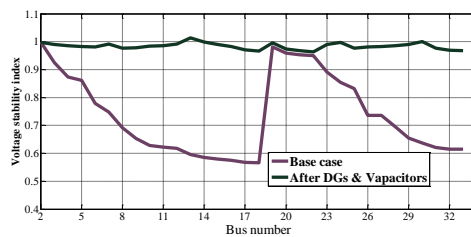
الف: مدل بار توان ثابت



د: مدل بار تجاری

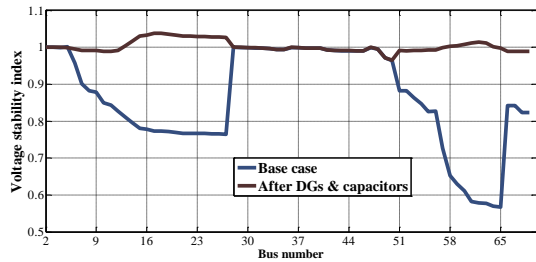


ج: مدل بار خانگی

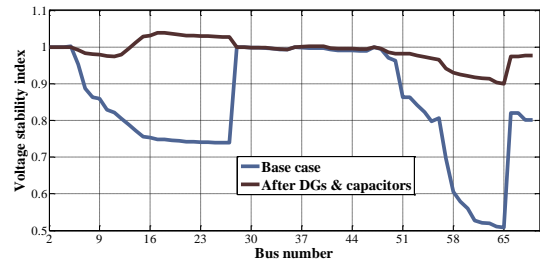


ه: مدل بار مختلط

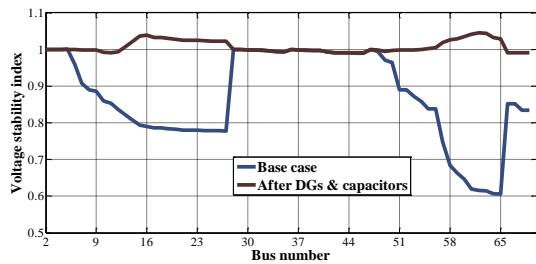
شکل ۸: شاخص پایداری ولتاژ سیستم توزیع ۳۳ شینه در سطح بارگذاری سنگین برای مدل‌های بار مختلف



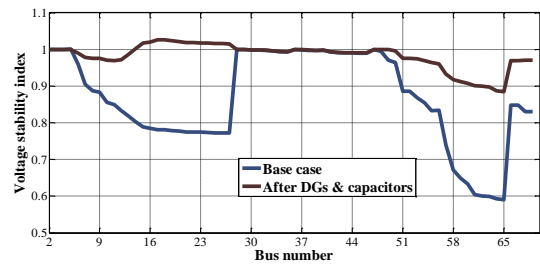
ب: مدل بار صنعتی



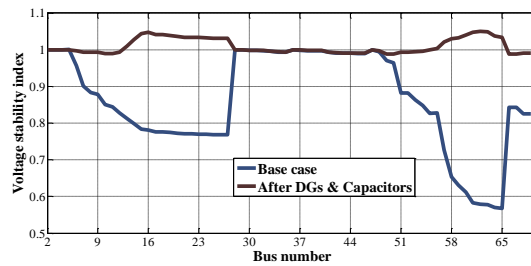
الف: مدل بار توان ثابت



د: مدل بار تجاری



ج: مدل بار خانگی



ه: مدل بار مختلط

شکل ۹: شاخص پایداری ولتاژ سیستم توزیع ۶۹ شینه در سطح بارگذاری سنگین برای مدل‌های بار مختلف

برای DGها و خازن‌ها، سطوح بارگذاری مختلف به‌طور همزمان در نظر گرفته شده است. در این روش، میزان تولید DGها و توان راکتیو خازن‌ها برای هر سطح بارگذاری متغیر فرض شده است. روش پیشنهادی روی سیستم‌های توزیع ۳۳ و ۶۹ شینه استاندارد IEEE در مدل‌های بار گوناگون پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور DGها و خازن‌ها در شبکه، باعث کاهش فراوان در تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم، بهبود قابل توجه پروفیل ولتاژ در شین‌های سیستم، کاهش چشم‌گیر در استرس بارگذاری خطوط شبکه و افزایش حاشیه پایداری ولتاژ سیستم در تمامی سطوح بارگذاری شبکه شده است. از طرفی در نظر گرفتن مدل‌های بار وابسته به ولتاژ در مکان و ظرفیت بهینه DGها و خازن‌ها؛ و شاخص‌های شبکه تأثیرگذار است. نتایج همچنین برتری روش پیشنهادی را در مقایسه با روش تک‌سطحی و روش ضریب حساسیت تلفات نشان می‌دهند.

این جداول نشان می‌دهند که در نظر گرفتن سطوح بارگذاری مختلف شبکه به‌صورت همزمان در تابع هدف، سبب تغییر در مکان و ظرفیت بهینه DGها و خازن‌ها شده است. این جداول نشان می‌دهند که شاخص‌های شبکه در روش پیشنهادی در مقایسه با روش تک‌سطحی و همچنین روش ضریب حساسیت تلفات بهبود یافته‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم TLBO برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه DGها و خازن‌ها به‌طور همزمان در شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل بار وابسته به ولتاژ ارائه شده است. تابع هدف پیشنهادی شاخص‌های تلفات توان اکتیو و راکتیو، پروفیل ولتاژ، توازن ظرفیت بارگذاری خطوط و پایداری ولتاژ سیستم را به‌روش وزنی لحاظ نموده است. برای تعیین مکان بهینه

جدول ۱۰: مقایسه نتایج در مدل بار مختلط در سطح بارگذاری سنگین

برای سیستم توزیع ۶۹ شینه

روش	روش پیشنهادی	روش تک‌سطحی	روش ضریب حساسیت تلفات [۱۵، ۲۰، ۲۲، ۲۶، ۲۷، ۳۰]
شماره شین	۱۶	۱۸	۲۷
نصب DG	۶۱	۴۹	۶۱
	۶۲	۶۱	۶۵
ظرفیت DG (کیلووات)	۱۱۵۳	۱۲۳۴/۶	۷۹۲/۷
	۱۸۵۷/۱	۱۵۳۲/۶	۱۷۷۹/۵
	۱۲۴۹	۱۶۷۷/۲	۱۲۴۴/۴
ضریب قدرت DG	۰/۹۱۶	۰/۹۷۱	۰/۹۲۸
	۰/۹۵۶	۰/۹۸۵	۰/۹۴۳
	۰/۹	۰/۹۷۶	۰/۹۲۶
شماره شین	۳۶	۱۲	۶
نصب خازن	۵۰	۴۹	۵۷
	۶۱	۶۳	۵۸
ظرفیت خازن (کیلووار)	۹۰۰	۷۵۰	۱۲۰۰
	۸۵۰	۶۰۰	۴۵۰
	۷۵۰	۱۷۵۰	۵۵۰
تلفات اکتیو (کیلووات)	۲۴/۹۸	۳۵/۱۳	۵۱/۲۶
تلفات راکتیو (کیلووار)	۱۸/۳۵	۱۹/۱	۳۴/۷۶
شاخص VDI	۰/۰۰۲۸۳۶	۰/۰۰۴۷۶۵	۰/۰۰۴۲۱۲
شاخص BCI	۰/۵۰۰۴۳	۰/۵۲۱۰۴	۰/۵۲۲۸۶
کمینه SI (شماره شین)	۰/۹۸۷۸ (۴۹)	۰/۹۲۰۶ (۶۵)	۰/۹۵۵۲ (۵۰)

جدول ۹: مقایسه نتایج در مدل بار مختلط در سطح بارگذاری سنگین

برای سیستم توزیع ۳۳ شینه

روش	روش پیشنهادی	روش تک‌سطحی	روش ضریب حساسیت تلفات [۱۵، ۲۰، ۲۲، ۲۶، ۲۷، ۳۰]
شماره شین	۱۳	۱۴	۱۴
نصب DG	۲۴	۲۴	۱۸
	۳۰	۳۱	۳۲
ظرفیت DG (کیلووات)	۱۶۷۰/۶	۱۲۳۴/۶	۸۴۱/۷
	۱۷۸۲/۶	۱۵۳۲/۶	۶۳۹/۷
	۱۳۲۴/۹	۱۶۷۷/۲	۱۳۹۵/۸
ضریب قدرت DG	۰/۹۷۶	۰/۹۷۱	۰/۹۹۵
	۰/۹۸	۰/۹۸۵	۰/۹۴
	۰/۹۷۷	۰/۹۷۶	۰/۹۳۲
شماره شین	۷	۱۱	۶
نصب خازن	۱۹	۲۷	۲۸
	۳۰	۳۰	۲۹
ظرفیت خازن (کیلووار)	۱۲۰۰	۵۰۰	۵۰۰
	۲۵۰	۶۵۰	۱۲۵۰
	۷۵۰	۹۵۰	۴۵۰
تلفات اکتیو (کیلووات)	۳۲/۱۸	۳۶/۷۰	۸۲/۲۸
تلفات راکتیو (کیلووار)	۲۷/۸۵	۳۰/۲۸	۶۱/۰۲
شاخص VDI	۰/۰۰۴۲۶۵	۰/۰۰۴۷۶۲	۰/۰۰۸۵۱۲
شاخص BCI	۰/۲۴۷۵۳	۰/۲۶۰۷۳	۰/۳۲۸۸۹
کمینه SI (شماره شین)	۰/۹۶۴۱ (۲۲)	۰/۹۵۹۸ (۲۵)	۰/۸۸۵۶ (۲۷)

Conventional and Heuristic Optimization Methods, Ph.D. Thesis, University of Dalhousie, Halifax, Nova Scotia, 2009.

مراجع

- [8] D. Singh, D. Singh, and K. S. Verma, "Multi-objective optimization for DG planning with load models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 427-436, 2009.
- [9] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, and R. C. Bansal, "Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 814-820, 2010.
- [۱۰] جمال یوسف‌پور و علی عجمی، «یک روش جدید برای جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۲، شماره ۲، صفحات ۶۵-۷۵، ۱۳۹۱.
- [11] Z. Moravej, and A. Akhlaghi, "A novel approach based on cuckoo search for DG allocation in distribution network," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 672-679, 2013.
- [12] M. Etehad, H. Ghasemi, and S. Vaez-Zadeh, "Voltage stability-based DG placement in distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 171-178, 2012.
- [13] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "A new approach for optimum DG placement and sizing based on voltage stability maximization and
- [1] T. Ackermann, G. Andersson, and L. So Der, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, no. 3, pp. 195-204, 2001.
- [2] W. El-Khattam, and M. M. A. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 2, pp. 119-128, 2004.
- [3] M. A. Kashem, A. D. T. Le, M. Negnevitsky, and G. Ledwich, "Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada, 2006.
- [4] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, and M. Karimi, "Optimum shunt capacitor placement in distribution system—A review and comparative study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 429-439, 2014.
- [5] C. Wang, and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, 2004.
- [6] T. Gozel, and M. H. Hocaoglu, "Analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 6, pp. 912-918, 2009.
- [7] M. El-Hajri, *Sizing and Placement of Distributed Generation in Electrical Distribution Systems Using*

- [27] A. A. El-Fergany, and A. Y. Abdelaziz, "Capacitor placement for net saving maximization and system stability enhancement in distribution networks using artificial bee colony-based approach," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 235-243, 2014.
- [۲۸] رحمت‌الله هوشمند، حسین محکمی و امین خدابخشیان، «روشی جدید در جایابی بهینه خازن‌ها و ژنراتورهای توزیع‌شده در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتریایی جهت‌داده‌شده با PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۳۹، شماره ۲، صفحات ۶۱-۷۲، ۱۳۸۸.
- [29] M. Wang, and J. Zhong, "A novel method for distributed generation and capacitor optimal placement considering voltage profiles," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, July 2011.
- [30] S. G. Naik, D. K. Khatod, and M. P. Sharma, "Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 967-973, 2013.
- [31] M. M. Aman, G. B. Jasmon, K. H. Solangi, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Optimum simultaneous DG and capacitor placement on the basis of minimization of power losses," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 5, 2013.
- [32] S. M. Sajjadi, M. R. Haghifam, and J. Salehi, "Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, pp. 366-375, 2013.
- [33] M. H. Moradi, A. Zeinalzadeh, Y. Mohammadi, and M. Abedini, "An efficient hybrid method for solving the optimal siting and sizing problem of DG and shunt capacitor banks simultaneously based on imperialist competitive algorithm and genetic algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 101-111, 2014.
- [34] H. R. Esmailian, O. Darijany, and M. Mohammadian, "Optimal placement and sizing of DG units and capacitors simultaneously in radial distribution networks based on the voltage stability security margin," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, pp. 1-14, 2014.
- [35] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load representation for dynamic performance analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 472-482, 1993.
- [36] D. Singh, R. K. Misra, and D. Singh, "Effect of load models in distributed generation planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 2204-2212, 2007.
- [37] M. Chakravorty, and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 129-135, 2001.
- [38] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Comput-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303-315, 2011.
- [39] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems," *Information Sciences*, vol. 183, no. 1, pp. 1-15, 2012.
- [40] R. V. Rao, and V. Patel, "An elitist teaching-learning-based optimization algorithm for solving complex minimization of power losses," *Energy Conversion and Management*, vol. 70, pp. 202-210, 2013.
- [14] S. Elsaiah, M. Benidris, and J. Mitra, "Analytical approach for placement and sizing of distributed generation on distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 6, pp. 1039-1049, 2014.
- [15] A. M. Imran, and M. Kowsalya, "Optimal size and siting of multiple distributed generators in distribution system using bacterial foraging optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 15, pp. 58-65, 2014.
- [16] M. Marzband, M. Ghadimi, A. Sumper, and J. L. Dominguez-Garcia, "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode," *Applied Energy*, vol. 128, pp. 164-174, 2014.
- [17] N. Mohandas, R. Balamurugan, and L. Lakshminarasimman, "Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using ABC algorithm united with chaos," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 66, pp. 41-52, 2015.
- [18] S. R. Gampa, and D. Das, "Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 66, pp. 25-40, 2015.
- [19] K. Prakash, and M. Sydulu, "Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems," *Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, 2007.
- [20] D. Das, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, no. 6-7, pp. 361-367, 2008.
- [21] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, "An improved harmony search algorithm for optimal capacitor placement in radial distribution systems," *International Power Engineering and Optimization Conference*, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2011.
- [۲۲] عباس کارگر، فهیمه صیادی شهرکی و جعفر سلطانی، «خازن‌گذاری بهینه در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیک برای تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات با استفاده از PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۱، شماره ۱، صفحات ۳۳-۴۳، ۱۳۹۰.
- [23] A. A. El-Fergany, and A. Y. Abdelaziz, "Cuckoo search-based algorithm for optimal shunt capacitors allocations in distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, no. 16, pp. 1567-1581, 2013.
- [24] A. Hamouda, and S. Sayah, "Optimal capacitors sizing in distribution feeders using heuristic search based node stability-indices," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, pp. 56-64, 2013.
- [25] A. A. El-Fergany, "Optimal capacitor allocations using evolutionary algorithms," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 6, pp. 593-601, 2013.
- [26] A. A. El-Fergany, and A. Y. Abdelaziz, "Multi-objective capacitor allocations in distribution networks using artificial bee colony algorithm," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 441-451, 2014.

- [42] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Optimum network reconfiguration based on maximization of loadability using continuation power flow theorem," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 123-133, 2014.
- [43] J. H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 882-887, 2003.
- constrained optimization problems," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 3, no. 4, pp. 535-560, 2012.
- [41] R. V. Rao, and V. Patel, "Comparative performance of an elitist teaching-learning-based optimization algorithm for solving unconstrained optimization problems," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 4, no. 1, pp. 29-50, 2013.

 زیر نویس‌ها

¹ Distributed Generation

² Teaching-learning based optimization (TLBO)

³ Direct load flow