



Distribution spare transformers and optimization of the location of mobile transformers

Aidin Shaghghi¹ | Mohammad Taghitahooneh² | Reza Dashti^{3*}

1. School of advanced technologies, Iran University of Science and Technologies, Tehran, Iran. Email: shaghghi_aidin@nt.iust.ac.ir

2. School of advanced technologies, Iran University of Science and Technologies, Tehran, Iran. Email: m_taghi@nt.iust.ac.ir
2. Corresponding Author, School of advanced technologies, Iran University of Science and Technologies, Tehran, Iran. Email: rdashti@iust.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 06 October 2022
Revised 05 November 2022
Accepted 15 December 2023
Published Online 18 December 2023

Keywords:
Spare transformer
Location
Reliability
Euclidean distance
Monte Carlo
Accessibility.

ABSTRACT

In order to increase the stability of electricity supply in distribution systems, this article has determined the number of transformers needed in the warehouse and their storage location. To ensure reliability in distribution substations, spare transformers are required in each substation. If there is no spare transformer in a post, the fault of the transformer may lead to disconnection of the load connected to it. On the other hand, having a spare transformer at each post would be very costly. For this reason, in this article, the problem of determining the location of spare transformers will be discussed. For this purpose, the desired cost function is considered according to the distance function, and three functions of Euclidean distance, squared Euclidean distance and direct distance are used. What is searched for is a place that can minimize the determined total cost function. For this purpose, a combined method (Markov and Monte Carlo) has been used to model transformer maintenance and then to determine the optimal location of spare transformers, and Matlab software optimization algorithm has been used for simulation. The proposed model has been implemented in a 33-bus IEEE network and it can be seen that the location of the spare transformers also changes with the change in the importance of the load and this change is more intense in the direct distance method.

Cite this article: Shaghghi, A.; Taghitahooneh, M. & Dashti, R. (2023). Distribution spare transformers and optimization of the location of mobile transformers. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 2 (2), 101-121. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2023.363032.1038>



© Aidin Shaghghi, Mohammad Taghitahooneh, Reza Dashti. **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2023.363032.1038>

Introduction

Transformers are considered essential components of any power system [1]. They play a crucial role in reliability and accessibility, making them require significant investment [2]. Additionally, the probability of vital equipment loss, such as transformers, in transmission and distribution systems increases with the age of power assets [3]. Therefore, the investment risk and reliability of transformers should be considered. Repair and replacement are measures used in asset management to enhance reliability and investment, and a balance must be struck between them.

Optimizing the number of spare transformers is a challenging task because having too many spares can jeopardize the company's budget while having too few spares can compromise the system's reliability [3]. Many distribution substations operate radially, and a transformer failure in such substations can lead to a power outage. Indeed, the failure and aging of transformers play a crucial role in power outages, as the process of purchasing and installing these equipment takes significant time

[2]. Therefore, to reduce the downtime, minimize costs, and enhance accessibility to spare equipment, it is essential to have the storage of spare transformers in suitable locations.

Model description

The proposed model in this article develops a method for determining the optimal locations of backup transformers in a way that addresses the limitations present in previous models, such as not considering preventive maintenance of transformers, different load levels for various load points, and even load response methods. It also takes into account factors like determining the state of transformer aging, various statistical distributions for the lifespan, and modeling random faults and aging to find the optimal number and locations of backup transformers. Parameters that have not been considered in existing references or were not previously feasible to incorporate are included in this proposed model.

Results and discussions

In this article, analytical approaches are presented to solve some of the location-allocation problems of standby transformers using three methods: Euclidean distance, squared Euclidean distance, and straight-line distance. These methods provide optimal locations for standby transformers to reduce costs, particularly emphasizing the location-allocation issues where the relocation cost of each candidate site is modeled as a linear, Euclidean, and quadratic function of the Euclidean distance.



ترانسفورماتورهای یدکی توزیع و بهینه‌سازی مکان ترانس‌های متحرک

آیدین شقاقی^۱ | محمدتقی طاحونه^۲ | رضا دشتی^{۳*}

۱. کارشناس ارشد، گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران. رایانامه: shaghghi_aidin@nt.iust.ac.ir
۲. کارشناس ارشد، گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران. رایانامه: m_taghi@nt.iust.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، استاد، گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران. رایانامه: rdashti@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

کلیدواژه:

ترانسفورماتور یدکی

مکان‌یابی

قابلیت اطمینان

فاصله اقلیدسی

مونت کارلو

دسترس‌پذیری

در این مقاله به منظور افزایش پایداری تأمین انرژی برق در سیستم‌های توزیع به تعیین تعداد ترانسفورماتورهای مورد نیاز در انبار و مکان نگهداری آن‌ها پرداخته است. برای تضمین قابلیت اطمینان در پست‌های توزیع، ترانسفورماتورهای یدکی در هر پست مورد نیاز هستند. در صورت نبود ترانسفورماتور یدکی در یک پست، ممکن است خطای ترانسفورماتور منجر به قطع بار متصل به آن شود. از طرف دیگر، وجود ترانسفورماتور یدکی در هر پست بسیار پرهزینه خواهد بود. به همین دلیل در این مقاله به مسئله تعیین مکان محل نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی پرداخته خواهد شد. برای این منظور، تابع هزینه مورد نظر مطابق تابع فاصله در نظر گرفته شده است و از سه تابع فاصله اقلیدسی، مجذور فاصله اقلیدسی و فاصله مستقیم استفاده می‌شود. آنچه جست‌وجو می‌شود، مکانی است که بتواند تابع هزینه کل تعیین‌شده را کمینه کند. برای این مهم یک روش ترکیبی (مارکوف و مونت کارلو) برای مدل‌سازی تعمیر و نگهداری ترانسفورماتور و سپس به تعیین مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی پرداخته شده و از الگوریتم بهینه‌سازی نرم‌افزار Matlab جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل پیشنهادی در یک شبکه ۳۳ شینه IEEE پیاده‌سازی شده و مشاهده می‌شود با تغییر اهمیت بار مکان ترانسفورماتورهای یدکی نیز تغییر می‌کند و این تغییر در روش فاصله مستقیم شدیدتر است.

استناد: شقاقی، آیدین؛ طاحونه، محمدتقی و دشتی، رضا (۱۴۰۲). ترانسفورماتورهای یدکی توزیع و بهینه‌سازی مکان ترانس‌های متحرک. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۲(۲) ۱۰۱-۱۲۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2023.363032.1038>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© آیدین شقاقی، محمدتقی طاحونه، رضا دشتی.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2023.363032.1038>

۱. مقدمه

ترانسفورماتورها به عنوان یکی از قسمت‌های اصلی هر سیستم قدرت در نظر گرفته می‌شوند [۱]. ترانسفورماتورها نقش اساسی در قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری ایفا می‌کنند، به همین دلیل به سرمایه‌گذاری زیادی نیاز دارند [۲]. علاوه بر این، احتمال از دست رفتن تجهیزات حیاتی موجود در سیستم‌های انتقال و توزیع مانند ترانسفورماتورها با افزایش سن دارایی‌های سیستم قدرت افزایش می‌یابد [۳]. بنابراین باید ریسک سرمایه‌گذاری و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورها در نظر گرفته شود. تعمیر و تعویض مواردی هستند که در مدیریت دارایی برای افزایش قابلیت اطمینان و سرمایه‌گذاری استفاده می‌شوند و باید میان آن‌ها تعادل ایجاد شود.

بهینه‌سازی یدکی‌ها به این دلیل که تعداد اضافی آن‌ها ممکن است بودجه شرکت را به خطر بیندازد و تعداد کم آن‌ها ممکن است قابلیت اطمینان سیستم را در معرض خطر قرار دهد، کار دشواری است [۳]. بسیاری از پست‌های توزیع به صورت شعاعی کار می‌کنند و خرابی ترانسفورماتور آن‌ها باعث خاموشی می‌شود. خرابی و فرسودگی ترانسفورماتورها نقش مهمی در قطعی برق دارد، زیرا هنگام قطع برق، خرید و نصب این تجهیزات زمان بسیاری می‌برد [۲]. به همین دلیل برای کاهش زمان دسترسی به تجهیزات یدکی، به حداقل رساندن هزینه‌ها و کاهش زمان خاموشی انبار ذخیره ترانسفورماتورها باید در مکان مناسبی باشد. همان طور که بیان شده، به دلیل گران بودن این تجهیزات انبار کردن بیش از حد این تجهیزات هزینه بسیار گزافی برای شرکت‌ها دارد و عدم انبارش مناسب سبب طولانی شدن خاموشی‌ها و خسارت‌های ناشی از آن می‌شود، لذا بهینه کردن مکان نگهداری تجهیزات و ترانس‌های ذخیره می‌تواند نقش بسزایی در بهینه کردن شاخص‌های قابلیت اطمینان و اقتصادی شرکت‌ها داشته باشد.

در برخی موارد بازایی ترانسفورماتور آسیب‌دیده به وسیله تعمیر یا خرید یک جایگزین جدید ممکن است زمان زیادی به طول بینجامد. مدت زمان قطع برق با استفاده از ترانسفورماتورهای یدکی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مقالات و پژوهش‌های زیادی در زمینه طراحی، برنامه‌ریزی و قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع ارائه شده‌اند [۴-۶]. برای مثال در مرجع [۷] یک روش جدید برای محاسبه نرخ خرابی شبکه توزیع برق ارائه شده است. منبع [۸] یک روش احتمالی برای تعیین تعداد بهینه ترانسفورماتورهای یدکی به وسیله کمینه کردن هزینه سرمایه‌گذاری قطعات یدکی و هزینه‌های قطع ترانسفورماتور ارائه می‌کند. منابع [۹ و ۱۰] توسط زنجیره مارکوف روشی برای تخمین مکان و تعداد ترانسفورماتورهای یدکی ارائه می‌دهد. منبع [۱۱] دو روش جدید احتمالی برای محاسبه تعداد بهینه قطعات یدکی ترانسفورماتور برای پست‌های توزیع برق ارائه کرده است. در روش اول، حالت‌های سیستم با فرایند مارکوف نشان داده می‌شوند. روش دوم از مدل شبیه‌سازی مونت کارلو برای بهینه‌سازی ترانسفورماتورهای یدکی استفاده می‌کند.

[۱۲] از یک روش احتمالی مبتنی بر مدل‌های ثابت مارکوف و دو معیار عملکرد یعنی معیار در دسترس بودن گروه و معیار هزینه کل در ارزیابی استفاده کرد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد تعداد ترانسفورماتورهای یدکی مورد نیاز برای گروه‌های درگیر در سیاست اشتراک‌گذاری ترانسفورماتور یدکی کاهش می‌یابد، در حالی که تقریباً همان سطوح قابلیت اطمینان گروه‌های جداگانه حفظ می‌شود. همچنین [۱۳] یک روش احتمالی مبتنی بر مدل‌های مارکوف ثابت را برای ارزیابی تأثیرات انتقال بار بر قابلیت اطمینان ایستگاه‌های توزیع توصیف می‌کند. منبع [۱۴] یک تحلیل هزینه/سود بر اساس مدل مارکوف برای مشخص کردن تعداد بهینه واحدهای یدکی برای اتوترانسفورماتورهای ولتاژ بالا ارائه می‌دهد. منبع [۱۵] یک روش بر اساس مدل مارکوف برای مشخص کردن سود ناشی از پست‌های متحرک در پست‌های ولتاژ بالا به کار گرفته است که سود حاصل از آن به صورت کاهش سالانه کل هزینه‌های قطع مشتری بیان می‌شود.

روش‌های بهینه‌سازی متعددی در مقالات مختلف برای بهینه کردن توابع مختلف در سطح انرژی به کار برده شده است. برای مثال در [۱۶] به بهینه‌سازی روش‌های مدیریت خاموشی در شبکه‌های توزیع برق می‌پردازد. به این منظور روش‌های کلیدزنی، استفاده از تولیدات پراکنده و پاسخ‌گویی بار از منظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در [۱۷] انواع انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده در تولید برق در ایران بررسی و بهینه شده است. در [۱۸] ابتدا روند افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی در تولید انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته و سپس به بهینه‌سازی تولید در این امر پرداخته شده است.

[۱۹] یک روش احتمالی برای تعیین تعداد ترانسفورماتورهای یدکی و پست‌های متحرک برای گروهی از ترانسفورماتورهای توزیع به منظور دست یافتن به سطح مشخصی از دسترس‌پذیری ارائه کرده است. مرجع [۲۰] نیز یک روش احتمالاتی بر اساس مدل مارکوف به منظور ارزیابی تعداد ترانسفورماتورهای یدکی و واحدهای متحرک برای یک گروه از پست‌های توزیع ارائه داده است. مراجع [۲۱ و ۲۲] مروری بر تحقیقات، مدل‌ها و ادبیات بهینه‌سازی مسئله مکان‌یابی تسهیلات ارائه کرده‌اند. مرجع [۲۳] یک سیستم تصمیم‌گیری حمایتی را بر اساس ویژگی چندگانه با p نقطه میانی ارائه داده و مکان ترانسفورماتورهای پشتیبان را مشخص و تحلیل کرده است. در منبع [۲۴] به منظور فراهم کردن حداکثر قابلیت اطمینان، دو روش برای پیدا کردن مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی پیشنهاد کرده است. مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی در منبع [۲۴] به منظور فراهم کردن حداکثر قابلیت اطمینان، دو روش برای پیدا کردن مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی پیشنهاد کرده است. فرمول بهینه‌سازی اول ارزش بار ازدست‌رفته را با حداکثر کردن کاربردپذیری ترانسفورماتور یدکی، به حداقل می‌رساند. فرمول بهینه‌سازی دوم، مکان ترانسفورماتور یدکی را در پستی تعیین می‌کند که احتمال خطا در پست‌های مجاور آن بالا باشد. مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی در مرجع [۲۴] با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به دست آمده است. در منبع [۲۵] روشی برای مشخص کردن تعداد ترانسفورماتورهای یدکی برای دسته‌ای از ترانسفورماتورها و زمان‌بندی مورد نیاز برای هر ترانسفورماتور یدکی ارائه داده است تا معیار قابلیت اطمینان خاصی را برآورده سازد. عملکرد قابلیت اطمینان اختصاص داده‌شده به عنوان شاخص متوسط مدت زمان قطع سیستم (SAIDI) به منظور ایجاد قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. [۲۶] از شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند احتمال، فرکانس و مدت زمان خطا در سیستم‌های توزیع با عناصر یدکی استفاده کرده است. در مقالات قبلی ترانسفورماتورهای یدکی را در پست‌هایی قرار می‌دادند که تابع هدف را بهینه‌سازی کند و امکان جابه‌جایی ترانسفورماتورهای یدکی امکان‌پذیر نبود، اما در این مقاله هر نقطه‌ای از صفحه می‌تواند مکان نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی باشد و امکان حمل‌ونقل این‌گونه تجهیزات برای جایگزینی با ترانسفورماتورهای آسیب‌دیده وجود دارد. چنین روشی می‌تواند برای شبکه‌های توزیع ولتاژ پایین مورد استفاده قرار گیرد.

در قدم اول در بخش مدل پیشنهادی، سه روش برای تعیین مکان نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی از جمله روش مجذور فاصله اقلیدسی، فاصله اقلیدسی و روش فاصله مستقیم پیشنهاد می‌شود. سپس مدلی بر مبنای روش مونت کارلو توسعه داده می‌شود تا در مسئله مکان‌یابی تجهیزات یدکی عواملی از قبیل اثر ترانسفورماتورهای متحرک، تعمیرات پیشگیرانه ترانسفورماتور، وضعیت فرسودگی ترانسفورماتورها، راهبرد استفاده از ترانسفورماتور متحرک و... در نظر گرفته شود. الگوریتم پیشنهادی قدمبه قدم توضیح داده شده و در انتها نتایج روش ارائه‌شده بیان خواهد شد.

۲. مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در این مقاله برای تعیین مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی به گونه‌ای توسعه می‌یابد تا محدودیت‌های موجود در مدل‌های قبلی از قبیل در نظر نگرفتن تعمیرات پیشگیرانه ترانسفورماتور، مقدار بارهای مختلف برای نقاط بار مختلف و حتی روش‌های پاسخ‌گویی بار، تعیین وضعیت فرسودگی، توزیع‌های آماری مختلف برای توزیع عمر، مدل‌سازی خطاهای تصادفی و فرسودگی در تعیین تعداد و سپس مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی امکان‌پذیر شود؛ پارامترهایی که در مراجع موجود در نظر گرفته نشده‌اند یا امکان در نظر گرفتن آن‌ها وجود نداشت.

۲.۱. مدل پیشنهادی - مفاهیم کلی

در بسیاری موارد، هزینه هر واحد مسافت مقداری ثابت است. بنابراین، مسئله کمینه‌سازی غالباً به تعیین مکانی که در آن مسافت کمینه می‌شود، تبدیل خواهد شد. سؤالی که باقی می‌ماند به این معناست که «مسافت مناسب چگونه تعیین می‌شود؟» مسافتی که فوراً به ذهن متبادر می‌شود؛ مسافت راست خط یا اقلیدسی است. اگر مختصات مکان نگهداری ترانسفورماتور x و y و مختصات ترانسفورماتورهای موجود عبارت باشند از a_i و b_i ، فاصله اقلیدسی بین آن‌ها از معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$\left[(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ابتدا توجه خود را به معیار فاصله اقلیدسی معطوف می‌کنیم، اما به جای اینکه ابتدا در مورد مسئله فاصله اقلیدسی بحث کنیم، مسئله مکان‌یابی تک‌تجهیزاتی را بررسی می‌کنیم که در آن هزینه با مجذور فاصله اقلیدسی متناسب است. به بیان دیگر هزینه تابع خطی ساده‌ای از مسافت نیست. به طور مثال، انتظار می‌رود هزینه مربوط به خودروهای آتش‌نشانی به منظور مقابله با آتش سوزی رابطه‌ای غیرخطی با مسافت داشته باشد. بسته به مسئله مکان‌یابی، تابع هزینه می‌تواند صورت‌بندی‌های گوناگونی به خود بگیرد.

۲.۱.۱. مکان‌یابی با مجذور فاصله اقلیدسی

در این بخش، مکان‌یابی تک‌تجهیزاتی (تنها ترانسفورماتور) بررسی می‌شود که در آن هزینه با مجذور فاصله اقلیدسی متناسب است. دست‌کم دو دلیل برای مطالعه مسئله مجذور فاصله وجود دارد. اول اینکه مسائل مکان‌یابی با فاصله اقلیدسی بین تجهیزات موجود و جدید یافت می‌شوند که در آن‌ها هزینه‌ها، به جای خطی، به صورت مجذوری افزایش می‌یابد. دوم اینکه بررسی مسئله گرانشی، پایه‌مقدماتی را برای مسئله مسافت اقلیدسی فراهم می‌آورد. مسئله گرانشی را می‌توان در معادله ۲ به این صورت نوشت:

$$\underset{x, y}{\text{minimize}} f(x, y) = \sum_{i=1}^m w_i [(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2] \quad (2)$$

از لحاظ ابعادی $f(x, y)$ بر حسب دلار، w_i بر حسب دلار در مسافت بیان می‌شود.

هر نقطه (x^*, y^*) که معادله ۲ را کمینه می‌کند، باید در معادله ۳ صدق کند.

$$\left(\frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial x^*}, \frac{\partial f(x^*, y^*)}{\partial y^*} \right) = (0, 0) \quad (3)$$

محاسبه مشتقات جزئی روابط یادشده نسبت به x, y و سپس صفر قرار دادن آن‌ها، به جواب یکتای معادلات ۴ و ۵ می‌انجامد.

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^m w_i a_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (4)$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m w_i b_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (5)$$

پس، مختصات x^*, y^* ترانسفورماتورهای جدید را می‌توان به عنوان میانگین وزنی مختصات x, y ترانسفورماتورهای موجود تعبیر کرد و در واقع آن‌ها مختصاتی هستند که معادلات یادشده را کمینه می‌کنند.

شرایط یادشده می‌توانند شرایط لازم و کافی برای یک کمینه باشند. به این ترتیب، مسئله گرانشی دارای یک جواب ساده است. این جواب را گاهی جواب «مرکزوار یا گرانیگاه» می‌گویند. عنوان مسئله گرانشی نیز از اینجا می‌آید. (بنا بر نظر کلی [۲۷]، توجه به مسئله گرانشی تک‌تجهیزات به کار لاگرانژ در قرن نوزدهم برمی‌گردد).

۲.۱.۲. مکان‌یابی با فاصله اقلیدسی

فاصله اقلیدسی را می‌توان طبق معادله ۶ بیان کرد.

$$\underset{x, y}{\text{minimize}} f(x, y) = \sum_{i=1}^m w_i [(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2]^{1/2} \quad (6)$$

به مسئله اقلیدسی به اشکال متعددی به صورت مسئله اشتاینر-وبر^۱ یا مسئله کلیفرما نیز اشاره می‌شود و دارای پیشینه بسیار درازی است. این مسئله را اشتاینر، ریاضی‌دان سوئیسی در قرن نوزدهم و وبر، اقتصاددان آلمانی، در اوایل قرن بیستم بررسی کردند. جالب اینکه تا سال ۱۹۶۳ طول کشید تا به اعتبار کارهای کوهن این مسئله اساساً به طور کامل حل شده تلقی شود.

رهیافتی که در اینجا در حل مسئله فاصله اقلیدسی بی‌درنگ به ذهن خطور می‌کند، محاسبه مشتقات جزئی معادله ۶ و مساوی قرار دادن آن‌ها با صفر است. اگر $(x, y) \neq (a_i, b_i), i = 1, 2, \dots, m$ ، آن‌گاه مشتقات جزئی عبارت خواهند بود از:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = \sum_{i=1}^m \frac{w_i(x - a_i)}{[(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = \sum_{i=1}^m \frac{w_i(y - b_i)}{[(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2]^{1/2}} \quad (8)$$

توجه شود که مساوی قرار دادن معادله ۷ با صفر به معادلات ۹-۱۱ می‌انجامد.

$$\sum_{i=1}^m \frac{w_i x}{[(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2]^{1/2}} \quad (9)$$

$$- \sum_{i=1}^m \frac{w_i a_i}{[(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2]^{1/2}} = 0$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^m a_i g_i(x, y)}{\sum_{i=1}^m g_i(x, y)} \quad (10)$$

که در آن:

$$g_i(x, y) = \frac{w_i}{[(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + \varepsilon]^{1/2}} \quad (11)$$

ε یک ثابت اختیاری کوچک و مثبت است. توجه شود که معادله ۹ همیشه تعریف‌شدنی است. این روش راه‌کار تقریب هذلولوی بار^۱ (HAP) نامیده می‌شود [۲۷].
به همین ترتیب از معادله ۸ می‌توان یافت:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m b_i g_i(x, y)}{\sum_{i=1}^m g_i(x, y)} \quad (12)$$

مادامی که $g_i(x, y)$ تعریف شده (معین) باشد، روش تکراری معادلات ۱۳ و ۱۴ می‌تواند به کار گرفته شود.

$$x^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^m a_i g_i(x^{(k-1)}, y^{(k-1)})}{\sum_{i=1}^m g_i(x^{(k-1)}, y^{(k-1)})} \quad (13)$$

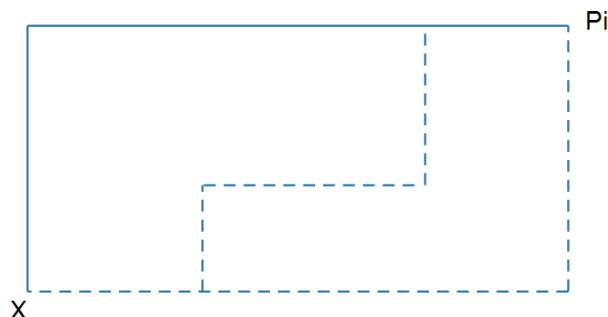
$$y^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^m b_i g_i(x^{(k-1)}, y^{(k-1)})}{\sum_{i=1}^m g_i(x^{(k-1)}, y^{(k-1)})} \quad (14)$$

اندیس‌ها بر تعداد تکرار دلالت دارند. بنابراین، یک مقدار آغازین $(x^{(0)}, y^{(0)})$ برای تعیین $(x^{(1)}, y^{(1)})$ ضروری است. مقدار $(x^{(1)}, y^{(1)})$ برای تعیین مقدار $(x^{(2)}, y^{(2)})$ به کار برده می‌شود و به همین ترتیب الی آخر. معمولاً جواب گرانشی به عنوان مقدار شروع در روش تکراری به کار گرفته می‌شود. این راهکار تکراری تا وقتی ادامه می‌یابد که هیچ‌گونه بهبود محسوسی در تخمین مکان بهینه تجهیزات جدید صورت نگیرد. راهکار تکراری، همگرایی به سمت مکان بهینه را تضمین می‌کند؛ بحثی درباره همگرایی این موضوع و نیز روایت‌های کلی‌تر مسئله، به وسیله کتز، کوهن و وایزفلد ارائه شده است [۲۷].
برای حل مسئله مکان‌یابی با فاصله اقلیدسی از الگوریتم ژنتیک نیز می‌توان استفاده کرد. در این حالت نقطه (x^*, y^*) به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مجموع فاصله بین (x^*, y^*) و نقاط خرابی (a_i, b_i) حداقل شود.

۳.۱.۲ مکان‌یابی با فاصله مستقیم

فاصله مستقیم در برخی تحلیل‌های مکان‌یابی شهری که رفت‌وآمد در امتداد مجموعه خیابان‌هایی متعامد انجام می‌گیرد، مناسب است. در شکل ۱ چند مسیر مختلف بین X و P_i مشاهده می‌شود که فاصله مستقیم برای آن‌ها یکی است، این شکل در اصل

یک نمای ساده از مدل تابع فاصله مستقیم است که به فاصله بلوک شهری نیز مشهور است. در شکل ۱ مشاهده می‌شود برای رفتن از یک نقطه به نقطه دیگر دو تغییر در طول و عرض رخ می‌دهد و به مقصد می‌رسیم. البته، تعداد چنین مسیریابی نامحدود است. این امر در مورد فاصله اقلیدسی صادق نیست؛ در این حالت فقط یک مسیر منحصر به فرد وجود دارد.



شکل ۱. مسیرهای مختلف مستقیم بین X و P_i که فواصل مستقیم مشابهی دارند.

مسئله مکان‌یابی با فاصله مستقیم (متعامد) می‌تواند به صورت ریاضی توسط معادله ۱۵ بیان شود.

$$\underset{x, y}{\text{minimize}} f(x, y) = \sum_{i=1}^m w_i (|x - a_i| + |y - b_i|) \quad (15)$$

از معادله ۱۵ مشاهده می‌شود که می‌توان مسئله را به صورت معادله ۱۶ بیان کرد.

$$\underset{x, y}{\text{minimize}} f(x, y) = \min_x \sum_{i=1}^m w_i |x - a_i| + \min_y \sum_{i=1}^m w_i |y - b_i| \quad (16)$$

که هر یک از مقادیر سمت راست در معادله ۱۶ را می‌توان به صورت مسائل بهینه‌یابی جداگانه‌ای مطرح کرد.

$$\underset{x}{\text{minimize}} f_1(x) = \sum_{i=1}^m w_i |x - a_i| \quad (17)$$

$$\underset{y}{\text{minimize}} f_2(y) = \sum_{i=1}^m w_i |y - b_i| \quad (18)$$

HAP را می‌توان برای حل کردن مسائل مکان‌یابی مستقیم نیز به کار گرفت [۲۷]. برای مشاهده واقیعت این امر، فرض می‌شود که تمامی ترانسفورماتورها روی محور y قرار گرفته‌اند.

$$\underset{x, y}{\text{minimize}} f(x, y) = \sum_{i=1}^m w_i [(x)^2 + (y - b_i)^2]^{1/2} \quad (19)$$

برای معادله ۱۹ واضح است که به ازای هر $x \neq 0$ داریم $f(x, y) > f(0, y)$. بنابراین، فقط لازم است که در امتداد خط $x = 0$ جست‌وجو کنیم تا مکان کمترین هزینه را برای مکان نگهداری ترانسفورماتورها بیابیم. در نتیجه، معادله ۱۹ تبدیل می‌شود به معادله ۲۰:

$$\underset{y}{\text{minimize}} f(0, y) = \sum_{i=1}^m w_i |y - b_i| \quad (20)$$

به این ترتیب، می‌بینیم که یک مسئله مکان‌یابی مستقیم می‌تواند به صورت مجموع دو مسئله اقلیدسی $f(x, 0)$ و $f(0, y)$ ارائه شود. این روش می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی چندتجهیزاتی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۲.۲. مدل پیشنهادی و جامع برای تعیین مکان بهینه ترانسفورماتورهای بدکی

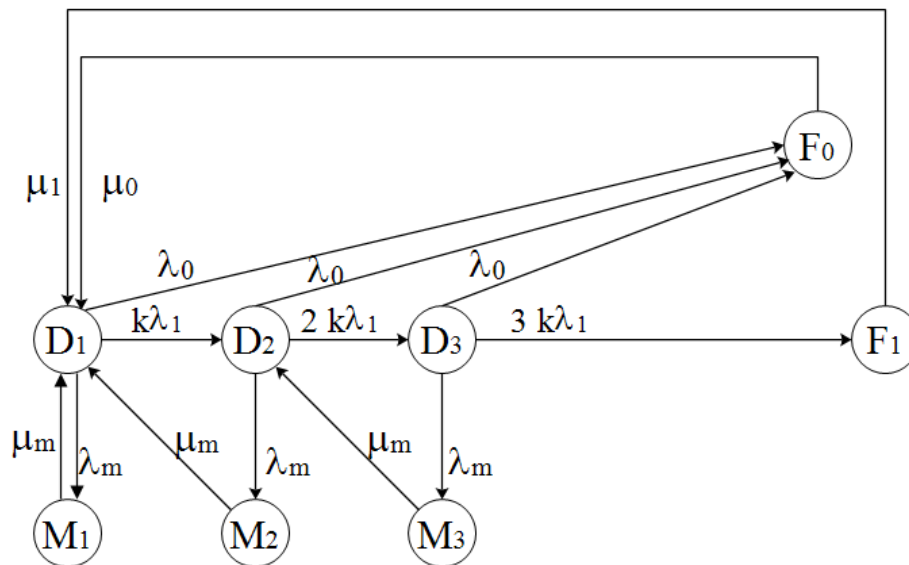
در این روش برای هر ترانسفورماتور یک آرایه سطری با $n + 3$ ستون در نظر گرفته می‌شود. در این مدل n ستون اول آرایه مربوط به نقاط بار، ستون $n + 1$ و $n + 2$ به ترتیب وضعیت آماده به کار و تعمیر و ستون $n + 3$ وضعیت در حال انتقال به محل نصب ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. حال این مدل به کمک مدل تعمیر و نگهداری شکل ۲ به گونه‌ای توسعه داده

می‌شود که بتوان برای هر ترانسفورماتور دو نوع خطا، ۳ حالت وضعیت فرسودگی و ۳ حالت تعمیرات پیشگیرانه را اعمال کرد. در شکل ۲ فرایند فرسودگی ترانسفورماتورها در نظر گرفته شده است. به این منظور برای هر ترانسفورماتور آرایه دیگری تعریف می‌شود که نمایانگر وضعیت ترانسفورماتور در هر یک از مراحل مدل تعمیرات پیشگیرانه است. فرض می‌شود که $\frac{1}{3}$ ترانسفورماتورها در وضعیت D_1 ، $\frac{1}{3}$ در وضعیت D_2 و بقیه در وضعیت D_3 هستند. همچنین ترانسفورماتورهایی که ابتدا در وضعیت آماده به کار (یدکی) هستند کاملاً نو هستند و در وضعیت D_1 ولی خارج از مدار قرار دارند. برای بررسی اثر فرسایش در قابلیت اطمینان سیستم، نرخ خطا از حالت D_2 به D_3 و از حالت D_3 به F_1 به ترتیب دو و سه برابر نرخ خطا از حالت D_1 به D_2 در نظر گرفته می‌شود.

در وضعیت انتقال برای جایگزینی با ترانسفورماتورهای موجود، مکان ترانسفورماتورهای آسیب‌دیده ثبت می‌شود تا مکان بهینه محل نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی و متحرک با استفاده از روش‌های فاصله اقلیدسی، مجذور فاصله اقلیدسی و روش فاصله مستقیم تعیین شود. با روش ارائه‌شده امکان مدل‌سازی خطاهای ترانسفورماتور و نرخ تعمیرات با استفاده از سایر توزیع‌های آماری امکان‌پذیر است.

در این بخش فرض می‌شود که ترانسفورماتور متحرک برای جلوگیری از استفاده بیش از حد در صورتی جایگزین ترانسفورماتور آسیب‌دیده می‌شود که ترانسفورماتور یدکی برای جایگزینی در حالت آماده به کار موجود باشد. به همین دلیل می‌توان آن‌ها را بدون خطا فرض کرد.

شبیه‌سازی مونت کارلوی پیشنهادی شامل تحلیل تعداد زیادی از دوره‌های زمانی و برای مدت زمان طولانی برای سیستمی با تعدادی بهینه از ترانسفورماتورهای یدکی و متحرک است. در این مورد، رخدادهای منجر به خطا، تعمیر و جایگزینی یدکی‌ها و خاموشی مشتری می‌تواند در نظر گرفته شود.



شکل ۲. مدل تعمیر و نگهداری همراه با وضعیت فرسودگی و خطای تصادفی

الگوریتم زیر برای تعیین مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی و متحرک با در نظر گرفتن تعمیرات پیشگیرانه لحاظ می‌شود:
 گام اول: وارد کردن ورودی‌ها از قبیل: تعداد نقاط بار (تعداد ترانسفورماتورها)، تعداد ترانسفورماتورهای یدکی و متحرک، نرخ خطاهای تصادفی و خطاهای مربوط به فرسودگی و نرخ تعمیرات مربوط به آن‌ها در مدل تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، تعداد دوره‌های زمانی، مشخص کردن وضعیت اولیه قرارگیری ترانسفورماتورها از جمله یدکی‌ها، مشخص کردن وضعیت اولیه قرارگیری ترانسفورماتورهای متحرک، تعداد تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو، کل مدت زمان شبیه‌سازی در هر تکرار، مشخص کردن وضعیت فرسودگی ترانسفورماتورها.

گام دوم: تولید اعداد تصادفی جهت تعیین زمان رخداد برای هر ترانسفورماتور؛
 گام سوم: تعیین تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار، در حال انتقال و شماره ترانسفورماتورهای آسیب‌دیده؛
 گام چهارم: تعیین وضعیت قرارگیری ترانسفورماتور در واحد زمانی بعدی
 ۱-۴ اگر در حال کار باشد:

۱-۱-۴ اگر t کوچک‌تر از زمان رخداد باشد (برای ترانسفورماتور مورد نظر)

در همان حالت باقی بمان

۲-۱-۴ اگر t بزرگتر از زمان رخداد باشد

۱-۲-۱-۴ اگر در وضعیت فرسودگی پله اول باشد

۱-۱-۲-۱-۴ اگر رخداد به دلیل تغییر حالت فرسودگی باشد

تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری

قرار دادن ترانسفورماتور در وضعیت فرسودگی مرحله دوم

قرارگیری ترانسفورماتور در همان نقطه کار

تولید عدد تصادفی برای تعیین زمان رخداد تغییر حالت فرسودگی بعدی

انتخاب کوچک‌ترین عدد تصادفی برای تعیین زمان رخداد بعدی؛

۲-۱-۲-۱-۴ اگر رخداد به دلیل خطای تصادفی باشد

تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری

مشخص کردن شماره ترانسفورماتور آسیب‌دیده

مشخص کردن زمان آسیب دیدن ترانسفورماتور

قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر

تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر

به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار

۳-۱-۲-۱-۴ اگر رخداد به دلیل تعمیرات پیشگیرانه باشد

تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری

مشخص کردن شماره ترانسفورماتور تعمیرشونده

مشخص کردن زمان تعمیر پیشگیرانه ترانسفورماتور

قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر

تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر پیشگیرانه

به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار

۲-۲-۱-۴ اگر در وضعیت فرسودگی پله دوم باشد

۱-۲-۲-۱-۴ اگر رخداد به دلیل تغییر حالت فرسودگی باشد

تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری

قرار دادن ترانسفورماتور در وضعیت فرسودگی مرحله سوم

قرارگیری ترانسفورماتور در همان نقطه کار

تولید عدد تصادفی برای تعیین زمان رخداد تغییر حالت فرسودگی بعدی

انتخاب کوچک‌ترین عدد تصادفی جهت تعیین زمان رخداد بعدی

۲-۲-۲-۱-۴ اگر رخداد به دلیل خطای تصادفی باشد

تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری

مشخص کردن مکان ترانسفورماتور آسیب‌دیده
 مشخص کردن زمان آسیب دیدن ترانسفورماتور
 قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر
 تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر
 به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار
 ۴-۲-۳-۱ اگر رخداد به دلیل تعمیرات پیشگیرانه باشد
 تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری
 مشخص کردن مکان ترانسفورماتور تعمیرشونده
 مشخص کردن زمان تعمیر پیشگیرانه ترانسفورماتور
 قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر
 تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر پیشگیرانه
 به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار
 ۴-۲-۱-۳ اگر در وضعیت فرسودگی پله سوم باشد
 ۴-۲-۳-۱ اگر رخداد به دلیل تغییر حالت فرسودگی باشد
 تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری
 مشخص کردن مکان ترانسفورماتور آسیب‌دیده
 مشخص کردن زمان آسیب دیدن ترانسفورماتور
 قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر
 تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر
 به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار
 ۴-۲-۳-۱-۲ اگر رخداد به دلیل خطای تصادفی باشد
 تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری
 مشخص کردن مکان ترانسفورماتور آسیب‌دیده
 مشخص کردن زمان آسیب دیدن ترانسفورماتور
 قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر
 تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر
 به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار
 ۴-۲-۳-۱-۳ اگر رخداد به دلیل تعمیرات پیشگیرانه باشد
 تعیین وضعیت ترانسفورماتور در مدل تعمیر و نگهداری
 مشخص کردن مکان ترانسفورماتور تعمیرشونده
 مشخص کردن زمان تعمیر پیشگیرانه ترانسفورماتور
 قرارگیری ترانسفورماتور در حالت تعمیر
 تولید عدد تصادفی نشان‌دهنده زمان پایان تعمیر پیشگیرانه
 به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار
 ۴-۲-۱ اگر در حالت آماده به کار باشد:

۴-۲-۱ اگر تعداد ترانسفورماتورهای در حال انتقال و در حال کار برابر با تعداد نقاط بار باشد:
 در حال آماده به کار باقی بماند

۲-۲-۴ و در غیر این صورت:

رفتن به حالت انتقال (مدت زمان مورد نیاز برای نصب)

تعیین زمان رسیدن به مکان ترانسفورماتور آسیب‌دیده

به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال انتقال

۳-۴ اگر ترانسفورماتور در حالت انتقال باشد:

۱-۳-۴ اگر t کوچک‌تر از زمان نصب باشد:

در حالت انتقال باقی بمان.

۲-۳-۴ و در غیر این صورت:

تعیین وضعیت فرسودگی

جایگزینی با یک ترانسفورماتور آسیب‌دیده

ثبت مکان نصب ترانسفورماتور

تولید اعداد تصادفی نشان‌دهنده زمان رخداد بعدی

انتخاب کوچک‌ترین عدد تصادفی تولیدشده

به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال حرکت

به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار

۴-۴ اگر ترانسفورماتور در حالت تعمیر باشد:

۱-۴-۴ اگر t کوچک‌تر از زمان تعمیر باشد:

در حالت تعمیر باقی بمان.

۲-۴-۴ اگر t بزرگ‌تر از زمان پایان تعمیر باشد:

انتقال به حالت آماده به کار.

گام پنجم: آیا همه ترانسفورماتورها بررسی شده‌اند؟

۱-۵ بله

برو به گام ششم.

۲-۵ خیر

برو به گام چهارم.

گام ششم: محاسبه تعداد ترانسفورماتورهای متحرک در حالت کار و در حال انتقال

گام هفتم: بررسی وضعیت ترانسفورماتور متحرک

۱-۷ اگر در حالت آماده به کار باشد:

۱-۱-۷ اگر مجموع تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار و تعداد ترانسفورماتورهای متحرک در حال کار و انتقال کمتر

از تعداد نقاط بار باشد و تعداد ترانسفورماتورهای یدکی در حال حرکت، بزرگ‌تر یا مساوی شماره ترانسفورماتور متحرک باشد.

۱-۱-۷-۱ اگر در ۲۴ ساعت آینده ترانسفورماتور یدکی نصب نشود

قرار دادن ترانسفورماتور متحرک در حالت انتقال

مشخص کردن زمان نصب ترانسفورماتور متحرک

به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال انتقال

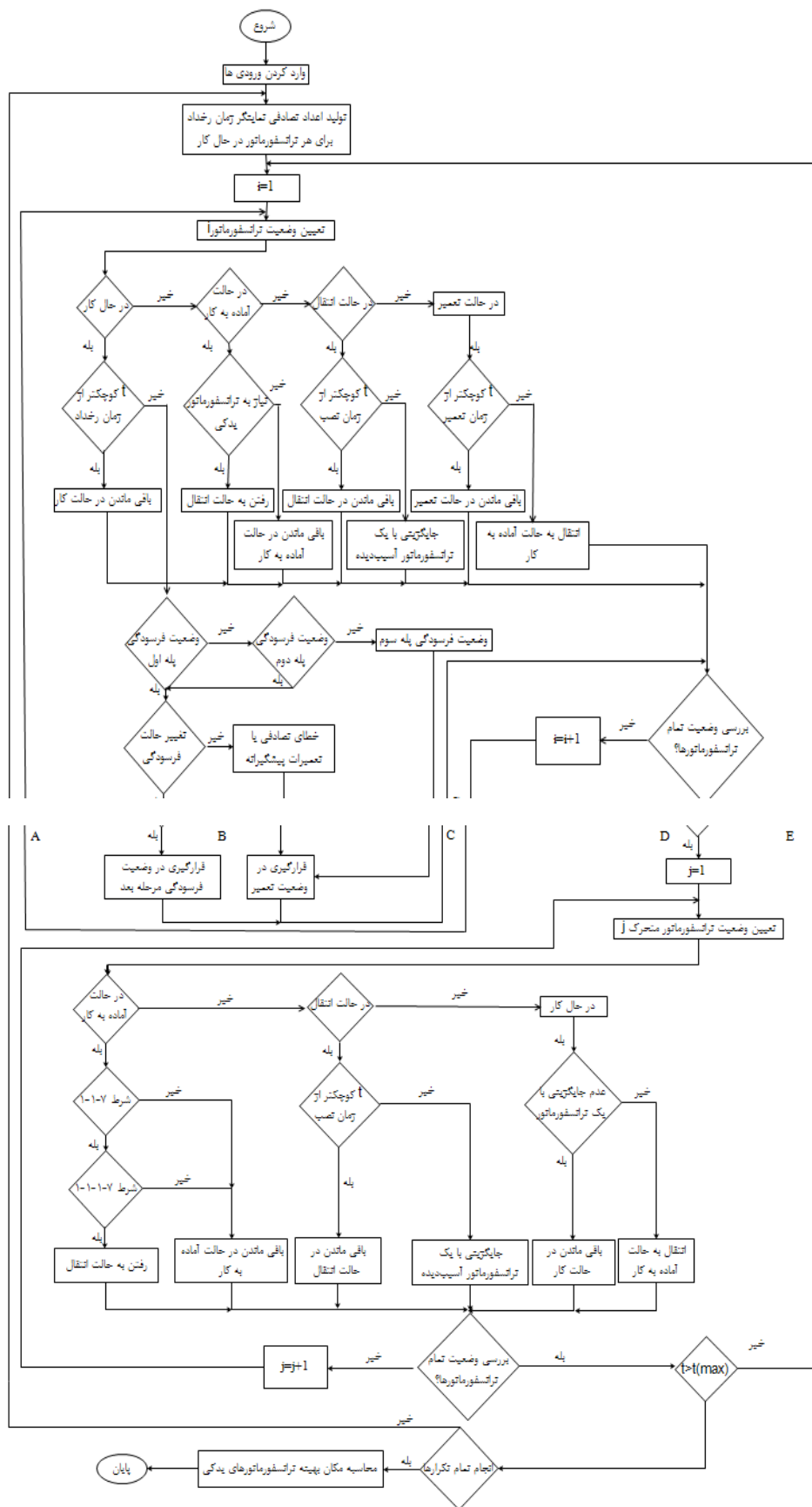
۲-۱-۷-۲ اگر در ۲۴ ساعت آینده ترانسفورماتور یدکی نصب شود

باقی ماندن ترانسفورماتور متحرک در حالت آماده به کار

- ۲-۱-۷ و در غیر این صورت
باقی ماندن ترانسفورماتور متحرک در حالت آماده به کار
۲-۷ اگر ترانسفورماتور متحرک در حالت انتقال باشد
۱-۲-۷ اگر t کوچک‌تر از زمان پایان نصب باشد
باقی‌مانده ترانسفورماتور متحرک در حالت انتقال
۲-۲-۷ و در غیر این صورت
به‌روز کردن تعداد ترانسفورماتورهای در حال انتقال
قرارگیری ترانسفورماتور متحرک در مکان مناسب
ثبت مکان نصب ترانسفورماتور متحرک
افزایش تعداد ترانسفورماتورهای متحرک در حال کار
۳-۷ اگر ترانسفورماتور متحرک در یک نقطه بار در حال کار باشد
۱-۳-۷ اگر ترانسفورماتوری جایگزین ترانسفورماتور آسیب‌دیده نشود
در حالت کار باقی بمان
۲-۳-۷ و در غیر این صورت
انتقال به حالت آماده به کار
کاهش تعداد ترانسفورماتورهای متحرک در حالت کار
گام هشتم: آیا همه ترانسفورماتورهای متحرک بررسی شده‌اند؟
۱-۸ بله
رفتن به گام نهم
۲-۸ خیر
برگشت به گام هفتم
گام نهم: آیا $t > t_{max}$ ؟
۱-۹ بله
رفتن به گام دهم
۲-۹ خیر
بازگشت به گام سوم
گام دهم: آیا تعداد تکرارهای مورد نظر انجام شده است؟
۱-۱۰ بله
رفتن به گام یازدهم
۲-۱۰ خیر
بازگشت به گام دوم

گام یازدهم: محاسبه مکان بهینه نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی با استفاده از مکان‌های ثبت‌شده در گام‌های ۲-۳-۴ و ۲-۲-۷ و شکل ۳ روند نمای خلاصه الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. جهت انجام این مدل ۳ قید مهم برای شبکه باید در نظر گرفته شود:

۱. عدم افزایش هزینه‌های غیر منطقی به بهره‌برداری سیستم
۲. رعایت قیود زمانی رفع خاموشی‌ها
۳. عدم وقع بحران در سیستم و شرایط عادی



شکل ۳. روند نمای الگوریتم پیشنهادی

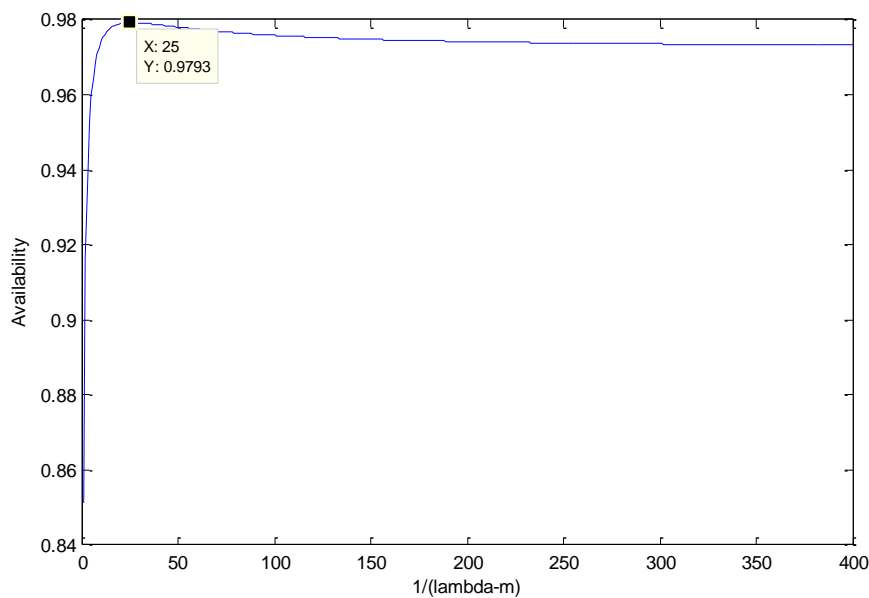
۳. مطالعات عددی

۳.۱. معرفی سیستم مورد مطالعه

روش توصیف‌شده در بخش ۲ برای تعیین مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی و متحرک و مشاهده تأثیر تعمیرات پیشگیرانه در تعیین تعداد بهینه ترانسفورماتورهای یدکی به کار برده می‌شود.

نمودار دسترس‌پذیری نسبت به λ_m به ازای پارامترهای جدول ۱ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود به ازای $\lambda_m^{-1} = 25$ سال، دسترس‌پذیری ترانسفورماتور با در نظر گرفتن فرایند فرسودگی به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

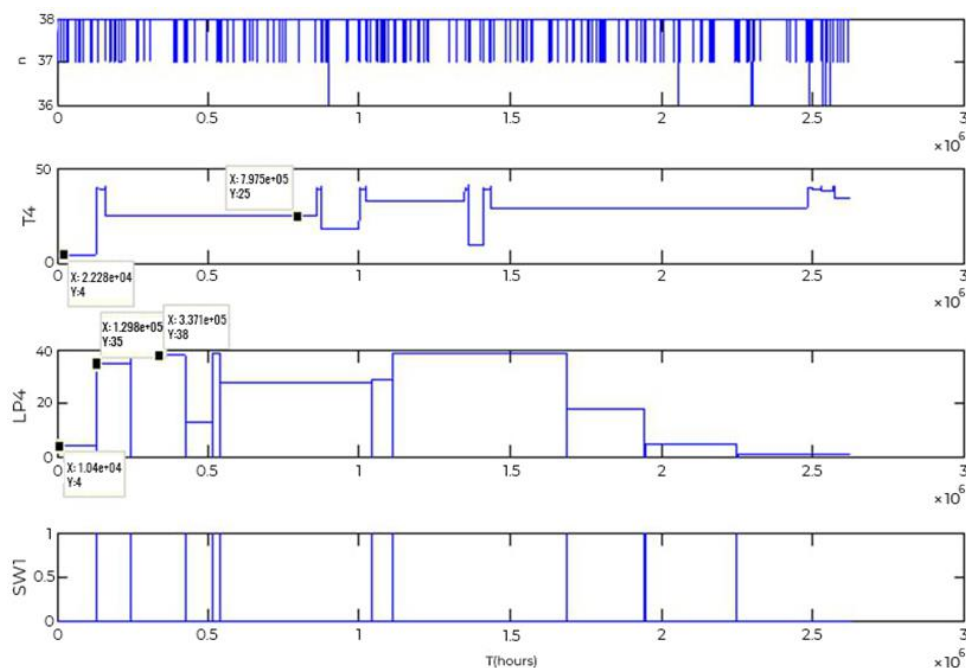
داده‌های قابلیت اطمینان برای ارزیابی سیستم مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۴. نمودار دسترس‌پذیری نسبت به λ_m

جدول ۱. داده‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده در ارزیابی مدل ارائه‌شده

11 - 0,4	سطح ولتاژ (KV)
38	تعداد ترانسفورماتورها
0,0038	نرخ تغییر حالت فرسودگی ترانسفورماتور (تعداد در سال)
0,004	نرخ خطای اتفاقی (تعداد در سال)
0,04	نرخ تعمیرات پیشگیرانه (تعداد در سال)
۲	زمان تعمیر خطای اتفاقی هر واحد (سال به ازای هر خاموشی)
۴	زمان تعمیر خطای فرسودگی هر واحد (سال به ازای هر خاموشی)
۲	زمان تعمیر پیشگیرانه هر واحد (ماه به ازای هر خاموشی)
۵	مدت زمان نصب ترانسفورماتور یدکی (روز)
۴	مدت زمان نصب ترانسفورماتور متحرک (ساعت)
۳	تعداد پله‌های فرسودگی



شکل ۵. نمودارهای وضعیت سیستم، ۳۸ ترانسفورماتور همراه با انتقال بار ثانویه ترانسفورماتور آسیب‌دیده

شکل ۵ حاصل شبیه‌سازی سیستم مورد نظر برای یک تکرار از شبیه‌سازی در مدت زمان ۳۰۰ سال را نشان می‌دهد. در شکل ۵ نمودار اول تعداد ترانسفورماتورهای در حال کار را نشان می‌دهد. نمودار دوم، وضعیت ترانسفورماتور شماره ۴ را که ابتدا در نقطه بار ۴ نصب است را نشان می‌دهد. این ترانسفورماتور پس از مدتی دچار آسیب‌دیدگی شده، سپس به ترتیب در وضعیت تعمیر، آماده به کار و انتقال قرار می‌گیرد و در انتها در نقطه بار ۲۵ نصب می‌شود. نمودارهای سوم و چهارم، شماره ترانسفورماتورهای نصب‌شده در نقطه بار شماره ۴ و وضعیت کلیدی که بار ثانویه نقاط بار شماره ۴ و ۵ را به یکدیگر متصل می‌کند را نشان می‌دهد. در نقطه بار شماره ۴، ابتدا ترانسفورماتور شماره ۴ نصب است، بعد از آسیب‌دیدگی ترانسفورماتور شماره ۴، بار ثانویه ترانسفورماتور آسیب‌دیده از طریق کلید شماره ۱ به ترانسفورماتور شماره ۵ متصل می‌شود. بعد از مدت زمان ۲۴ ساعت (مدت زمان مورد نیاز برای نصب ترانسفورماتور متحرک)، کلید قطع و بار از طریق ترانسفورماتور متحرک تغذیه می‌شود. بعد از مدت زمان مورد نیاز برای جایگزینی ترانسفورماتور آسیب‌دیده با یک ترانسفورماتور سالم، بار نقطه ۴ از طریق ترانسفورماتور شماره ۳۵ تغذیه می‌شود. این فرایند برای مدت زمان و تکرارهای بیشتر مشابه‌سازی می‌شود و سپس شاخص‌های هزینه و قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود.

مختصات نقاط مشخص‌شده بر حسب کیلومتر در سیستم توزیع شکل ۶ طبق جدول ۲ فرض می‌شود. این شبکه یک شبکه ۳۳ شینه استاندارد است که برای بررسی و مطالعات مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۳. مکان‌یابی با مجذور فاصله اقلیدسی

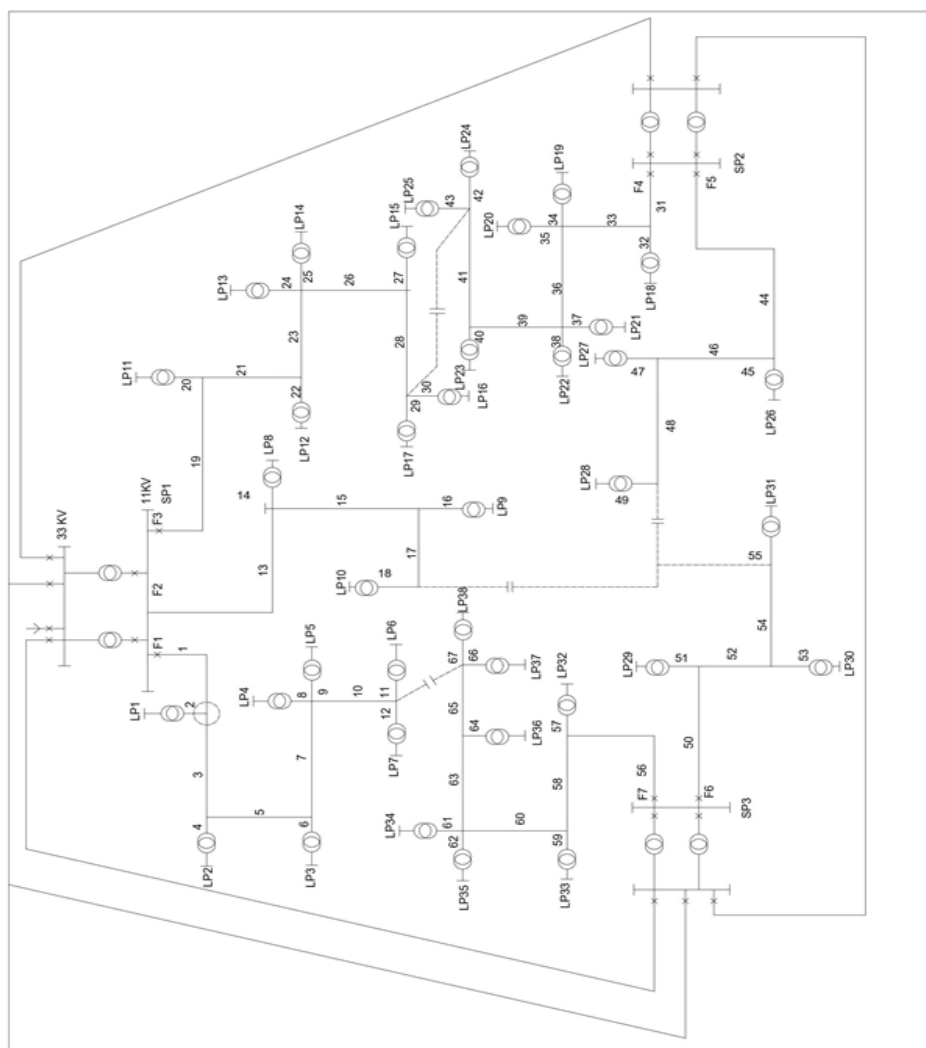
با فرض ۷ ترانسفورماتور یدکی و دو ترانسفورماتور متحرک مکان بهینه ذخیره این تجهیزات با روش مجذور فاصله اقلیدسی به صورت زیر به دست می‌آید. همچنین هزینه بابت حمل‌ونقل بین ترانسفورماتورهای یدکی و آسیب‌دیده، برابر با حاصل ضرب مقدار وزن مربوط و مجذور فاصله در نظر گرفته می‌شود.

$$(x^*, y^*) = (16,73, 11,98)$$

۳.۳. مکان‌یابی با فاصله اقلیدسی

مکان بهینه محل ذخیره ترانسفورماتورهای یدکی و متحرک با استفاده از روش فاصله اقلیدسی طبق شکل ۷ برابر با

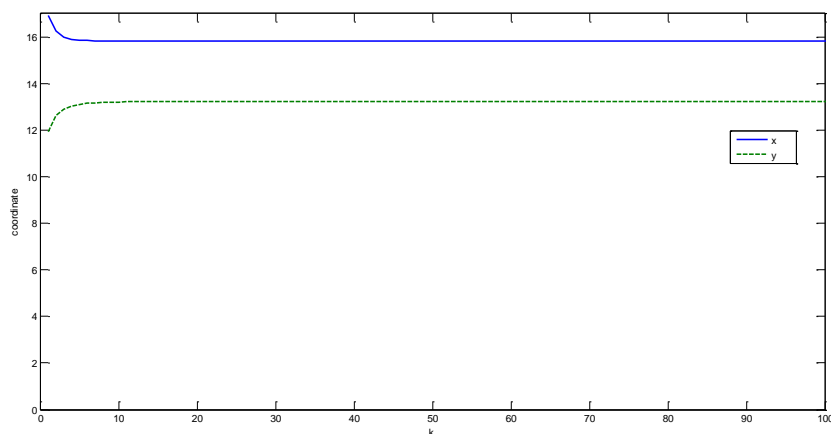
شکل ۷ نتیجه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تابع مورد نظر در نرم‌افزار Matlab است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جواب بهینه به سرعت همگرا می‌شود.



شکل ۶. سیستم توزیع مورد مطالعه

جدول ۲. مختصات نقاط بار

۱	(10,15,10)	۱۴	(10,6,12,15)	۲۷	(15,6,14)
۲	(10,75,8,45)	۱۵	(11,4,12,3)	۲۸	(15,8,13,25)
۳	(11,55,8,6)	۱۶	(12,10,95)	۲۹	(24,30,10,75)
۴	(10,75,9,95)	۱۷	(11,4,10,25)	۳۰	(26,45,10,75)
۵	(11,55,10,7)	۱۸	(17,15)	۳۱	(25,70,12,15)
۶	(12,05,11,55)	۱۹	(16,2,16,35)	۳۲	(24,90,11,6)
۷	(12,05,9,95)	۲۰	(16,45,15,75)	۳۳	(24,90,9,4)
۸	(10,11,4)	۲۱	(16,95,14,95)	۳۴	(23,55,10,2)
۹	(11,55,10,8)	۲۲	(16,2,14,35)	۳۵	(24,15,9,4)
۱۰	(10,10,2)	۲۳	(15,4,14,20)	۳۶	(24,75,10,95)
۱۱	(9,2,10,75)	۲۴	(15,4,16,3)	۳۷	(24,95,11,8)
۱۲	(10,6,10)	۲۵	(14,8,15,55)	۳۸	(24,15,12,4)
۱۳	(9,85,11,55)	۲۶	(17,14)		

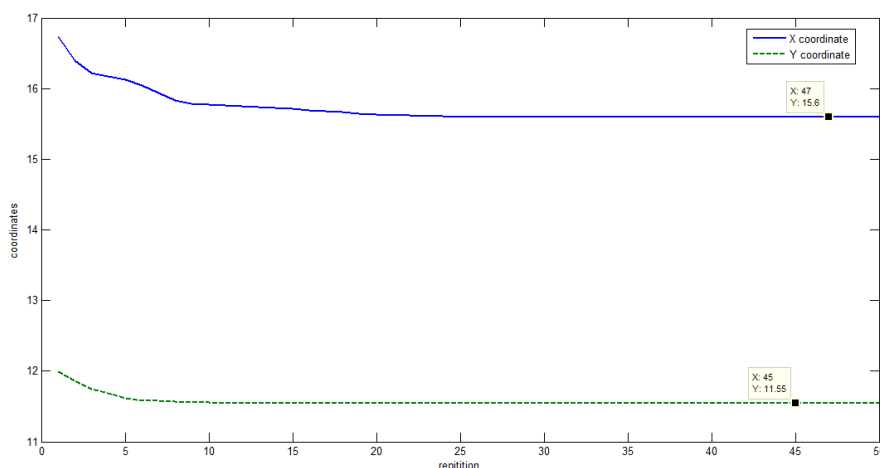


شکل ۷. همگرایی در مسئله مکان‌یابی ترانسفورماتورهای یدکی با فاصله اقلیدسی

برای حل مسئله مکان‌یابی با فاصله اقلیدسی از الگوریتم ژنتیک نیز می‌توان استفاده کرد. در این حالت نقطه (x^*, y^*) به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مجموع فاصله بین (x^*, y^*) و نقاط خرابی حداقل شود. نتایج شبیه‌سازی برای یافتن مکان بهینه با استفاده از *Optimization Tool* نرم‌افزار *MATLAB* برابر با $(15/82, 13/25)$ به دست آمده است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک از قبیل اندازه جمعیت، نوع جمعیت، جمعیت اولیه، تابع جهش، معیارهای توقف و... برابر مقادیر پیش‌فرض ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار *MATLAB* انتخاب شده است.

۴.۳. مکان‌یابی با فاصله مستقیم

شبیه‌سازی مسئله مکان‌یابی با فاصله مستقیم با روش *HAP* نقطه $(15/6, 11/55)$ را می‌دهد. شکل ۸ سرعت همگرایی شبیه‌سازی مسئله را نشان می‌دهد. ترانسفورماتورهای یدکی باید در نقطه $(15/6, 11/55)$ قرار گیرند تا مسافتی- مسافت مستقیم- که ماشین‌ها طی می‌کنند، حداقل شود.

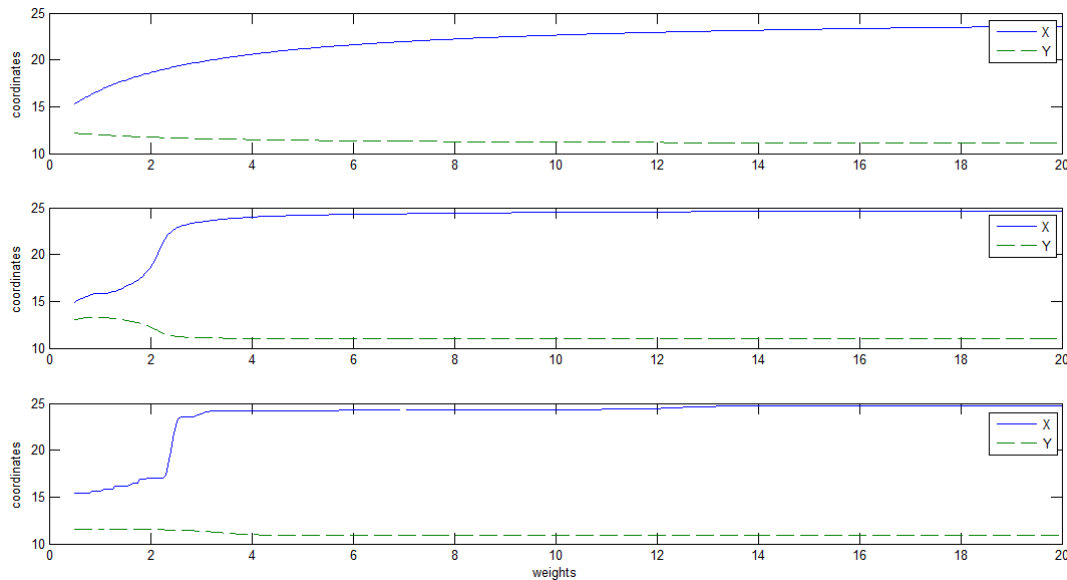


شکل ۸. حل مسئله مکان‌یابی با فاصله مستقیم با روش *HAP*

۵.۳. حساسیت مکان بهینه نسبت به اهمیت بارهای متصل به شین شماره ۳

برای بررسی بیشتر اگر اهمیت بارهای متصل به شین شماره ۳ تغییر کنند، مختصات محل بهینه ترانسفورماتورهای یدکی با روش‌های سه‌گانه به صورت شکل ۹ تغییر می‌یابد. در این شکل نمودار اول، دوم و سوم به ترتیب تغییرات مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی با روش‌های مجذور فاصله اقلیدسی، فاصله اقلیدسی و روش فاصله مستقیم را در صفحه مختصات بر حسب کیلومتر نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش اهمیت بارهای متصل به شین شماره ۳ مکان بهینه محل

نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی از محل نصب بارهای شین ۳ دور می‌شود. با افزایش اهمیت بارهای شین ۳، مکان بهینه محل نگهداری ترانسفورماتورهای یدکی به مختصات آن‌ها نزدیک‌تر می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مختصات مکان بهینه با روش فاصله مستقیم تغییرات شدیدتری را نسبت به روش‌های دیگر نشان می‌دهد.



شکل ۹. تغییرات مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی نسبت به تغییرات وزن بارهای متصل به شین شماره ۳

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله رهیافت‌های تحلیلی را برای حل پاره‌ای از مسایل مکان‌یابی ترانسفورماتورهای یدکی با استفاده از سه روش فاصله اقلیدسی، مجذور فاصله اقلیدسی و فاصله مستقیم ارائه شد. این روش‌ها مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی را برای کاهش هزینه‌ها فراهم می‌کنند. به‌خصوص بر مسائل مکان‌یابی ترانسفورماتورهای یدکی تأکید شد که در آن‌ها هزینه جابه‌جایی هر قلم تابع خطی فاصله مستقیم، اقلیدسی و تابع درجه دومی از فاصله اقلیدسی است. برای این منظور، یک روش ترکیبی (مارکوف و مونت کارلو) برای مدل‌سازی تعمیر و نگهداری ترانسفورماتور و سپس به تعیین مکان بهینه ترانسفورماتورهای یدکی پرداخته شده است. در این روش نه تنها می‌توان تعیین سیاست بهینه برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ترانسفورماتورهای یدکی را هدف قرار داد، بلکه می‌توان محدودیت‌هایی را برای تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورها نیز به راحتی منظور کرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد تغییر ارزش بارهای یک شبکه چگونه می‌تواند مکان بهینه ذخیره ترانسفورماتورها را تغییر دهد و با این روش می‌توان در یک شبکه توزیع برق و برای یک شرکت این امر را پیاده‌سازی کرد.

با استفاده از این روش هزینه‌های شرکت توزیع برق برای ترانسفورماتورهای ذخیره کاهش می‌یابد. به عنوان مثال با اجرای این روش در شبکه توزیع برق شهرستان باغ ملک در استان خوزستان و جابه‌جایی انبار ترانسفورماتور شرکت حدود ۴/۵ درصد در هزینه انتقال ترانس برای رفع خاموشی صرفه‌جویی شد.

منابع

- [1]. R. A. El-Aal, K. Helal, A. Hassan, and S. Dessouky, "Prediction of Transformers Conditions and Lifetime Using Furan Compounds Analysis," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102264-102273, 2019.
- [2]. M. Sedaghati and R. Dashti, "A New Model for Assessment and Optimization of Number of Spare Transformers and Their Locations in Distribution Systems," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 11, no. 4, p. 319, 2015.
- [3]. A. E. Abu-Elanien and M. Salama, "Asset management techniques for transformers," *Electric power systems research*, vol. 80, no. 4, pp. 456-464, 2010.
- [4]. R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, and S. Aboreshaid, "Power system health analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 55, no. 1, pp. 1-8, 1997.
- [5]. R. Allan, R. Billinton, A. Breipohl, and C. Grigg, "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation: 1987-1991," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 41-49, 1994.
- [6]. R. Ghajar and R. Billinton, "A Monte Carlo simulation model for the adequacy evaluation of generating systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 20, no. 3, pp. 173-186, 1988.
- [7]. M. Taghi Tahooneh and R. Dashti, "A new model for calculating rational failure rates based on network assets worth," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 13, no. 5, pp. 2221-2233, 2022.
- [8]. J. M. Nahman and M. R. Tanaskovic, "Probability models for optimal sparing of distribution network transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 758-763, 2009.
- [9]. M. P. Marbun, N. I. Sinisuka, and N. Hariyanto, "The use of Markov Chain method to determine spare transformer number and location," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 1, p. 1, 2019.
- [10]. G. Hamoud, L. Lee, and S. Faried, "Spare Assessment of Distribution Power Transformers using Three Markov Models," in *2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2018: IEEE, pp. 1-5.
- [11]. A. M. L. da Silva, J. G. de Carvalho Costa, and A. A. Chowdhury, "Probabilistic methodologies for determining the optimal number of substation spare transformers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 68-77, 2009.
- [12]. G. A. Hamoud, "Reliability Assessment of Distribution Stations Considering Spare Transformer Sharing," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023.
- [13]. G. A. Hamoud, "Reliability Assessment of Distribution Power Transformers Considering Load Transfer Capability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 1655-1662, 2022.
- [14]. G. Hamoud, F. Qureshy, A. Elen, and L. Lee, "Assessment of high voltage auto-transformer spare requirements in bulk transmission systems," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, 2004: IEEE, pp. 434-439.
- [15]. G. Hamoud, "Cost/benefit analysis for use of mobile unit substations in customer delivery systems," in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006: IEEE*, pp. 1-5.
- [۱۶]. شقاقی، ایدین، and دشتی، "بهینه سازی اقتصادی مدیریت خاموشی در شبکه‌های توزیع برق،" *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*, vol. 2, no. 1, pp. 19-34, 2022.
- [17]. M. Khazaei, R. Zahedi, R. Faryadras, and A. Ahmadi, "Potential assessment of renewable energy resources and their power plant capacities in Iran," *Glob J Ecol*, vol. 7, no. 2, pp. 060-071, 2022.
- [18]. R. Zahedi, s. gitifar, and A. Ahmadi, "Technical-economic feasibility of designing a 10 MW solar power plant of KavirTire Company in Birjand city of South Khorasan province using RET Screen software," (in en), *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 134-148, 2023. [Online]. Available: https://www.jrenew.ir/article_175499.html.
- [19]. G. A. Hamoud, "Assessment of spare transformer requirements for distribution stations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 174-180, 2010.
- [20]. G. A. Hamoud, "Use of Markov models in assessing spare transformer requirements for distribution stations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 1098-1105, 2012.
- [21]. F. Plastria, "Static competitive facility location: an overview of optimisation approaches," *European Journal of Operational Research*, vol. 129, no. 3, pp. 461-470, 2001.
- [22]. R. Z. Farahani, S. Fallah, R. Ruiz, S. Hosseini, and N. Asgari, "OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments," *European journal of operational research*, vol. 276, no. 1, pp. 1-27, 2019.

- [23]. R. J. P. Ferreira and H. L. Ferreira, "Decision support system for location of back-up transformers based on a multi-attribute p-median model," in 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012: IEEE, pp. 629-631.
- [24]. Y. K. Bichpuriya, S. A. Upadhyaya, and S. Soman, "Optimal location of spare transformers at distribution substations for reliability improvement," 2011.
- [25]. W. Wangdee, W. Li, W. Shum, and P. Choudhury, "Applying probabilistic method in determining the number of spare transformers and their timing requirements," in 2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2007: IEEE, pp. 137-140.
- [26]. J. G. d. C. Costa and A. M. L. da Silva, "Monte Carlo simulation to assess the optimum number of distribution spare transformers," in Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008: IEEE, pp. 1-6.
- [27]. J. A. White, R. L. Francis, R. Francis, and L. F. McGinnis, Facility layout and location: An analytical approach. Prentice-Hall, 1992.