

Transformer hot spot temperature estimation with OFWF cooling using grey wolf algorithm

Hadi Abbaci, Mohammad Ali Taghikhani*

¹Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
E-mails: iks996163008@edu.ikiu.ac.ir; taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

*Means corresponding author

Abstract

Transformers are one of the most important and expensive components of the power network. The importance of correct operation of transformer is such that sustainable electricity supply for the consumer and increasing the reliability of the power grid without transformer health is not possible. Transformer health requires careful planning for them. Transformer hot spot temperature (HST) needs to be calculated for accurate transformer planning. Today, very large transformers are made that conventional cooling methods are not efficient for them. Therefore, it is necessary to use newer and more efficient cooling methods. Oil forced - water forced (OFWF) cooling has been less considered from engineers, designers and researchers. This cooling method despite high efficiency has received less attention from researchers. The use of heuristic algorithms for transformer HST estimation, regardless of their high efficiency, accuracy and appropriate speed have been less considered by investigators, therefore in this paper, in order to increase the accuracy of the transformer HST estimation, the grey wolf optimization (GWO) algorithm is used. This algorithm requires less memory to perform optimization calculations, on the other hand has high run speed and accuracy for optimization. Moreover, in order to increase the accuracy of the transformer HST estimation, dynamic model is used. The results show that the GWO algorithm increases speed and accuracy of the transformer HST estimation. Furthermore, the results indicate that the OFWF cooling method is very efficient for large power transformers.

Keywords

Gray wolf optimization (GWO) algorithm, Hot Spot temperature (HST), Oil forced - water forced (OFWF), Power transformer.

Introduction

One of the most important challenges in operation of transformer is its operation. For correct operation of the transformer, HST of the transformer must be estimated. Conventional HST estimation methods include fiber optic temperature sensors, numerical calculation methods, experimental formulas, and thermal equivalent circuits [1,2]. Hill believes that thermal models can be improved by using computational intelligence techniques, so ensuring the accuracy of the responses [3,4]. Zile has determined the power transformer windings temperature using developed Artificial Bee Algorithm [5]; But this method is time-consuming and is not good for large power transformers. To solve this problem, current paper introduces the new method.

Proposed Work and Methodology

For transformer HST estimation, GWO algorithm is used. This algorithm is inspired from grey wolves social life. GWO is able to provide highly competitive results compared to well-known heuristics algorithms such as PSO, GSA, DE, EP, and ES [6]. In this paper, MATLAB 2018 is used for mathematical calculations. On the other hand, transformer HST nonlinear equations are solved using Runge-Kutta method. Then GWO is used to calculate the maximum temperature. The results show that the GWO can improve speed and accuracy of the HST estimation.

Conclusion

In this paper, the efficiency of OFWF cooling method is investigated for a 250 MVA power transformer at different loads using GWO algorithm. The results show that GWO has more accuracy and run speed compared to other methods for transformer HST calculation. Besides, OFWF cooling method is more suitable for large power transformers with high HST compared to other cooling methods. Furthermore, considering the transformer's lifetime depends on its HST, the use of this cooling method will increase the life span of the transformer.

تخمین دمای نقطه داغ ترانسفورماتور قدرت با خنک سازی روغن اجباری - آب اجباری با بهره‌گیری از الگوریتم گرگ خاکستری

هادی عباسی حوریلر

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، دانشکده فنی و مهندسی، قزوین، ایران

محمدعلی تقیخانی

استادیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، دانشکده فنی و مهندسی، قزوین، ایران

چکیده

ترانسفورماتور از اجزای کلیدی و گران قیمت شبکه قدرت است که بهره‌برداری صحیح از آن از مهمترین موارد افزایش قابلیت اطمینان شبکه است. به منظور بهره‌برداری درست از ترانسفورماتور دمای نقطه داغ آن باید محاسبه شود. امروزه ترانسفورماتورهای بزرگی ساخته شده که روش‌های خنک‌سازی مرسوم، برای خنک‌سازی آن‌ها کارآمد نیست. بنابراین باید از روش‌های جدیدتر و کارآمدتر برای خنک‌سازی بهره برد. یکی از روش‌هایی که علی‌رغم کاربرد بالا کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، روش خنک سازی روغن اجباری - آب اجباری (OFWF) می‌باشد. الگوریتم‌های فراابتکاری، علی‌رغم کارایی بالا و دقت و سرعت مناسب آن‌ها کمتر برای محاسبه نقطه داغ ترانسفورماتور مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است؛ در این مقاله به منظور افزایش دقت تخمین دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده می‌شود. این الگوریتم دارای حجم کم محاسباتی و نیز سرعت و دقت مناسب برای انجام محاسبات بهینه‌سازی است. به منظور افزایش دقت تخمین دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، از مدل دینامیکی محاسبه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور استفاده می‌شود. نتایج از افزایش سرعت و دقت تخمین دمای نقطه داغ ترانسفورماتور به کمک الگوریتم گرگ خاکستری حکایت دارد. همچنین با توجه به نتایج استفاده از روش خنک‌سازی OFWF برای ترانسفورماتورهای بزرگ بسیار کاراست.

کلمات کلیدی

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)، دمای نقطه داغ (HST)، خنک سازی روغن اجباری، آب اجباری (OFWF)، ترانسفورماتور قدرت.

نام نویسنده مسئول: محمدعلی تقیخانی

ایمیل نویسنده مسئول: taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

۱- مقدمه

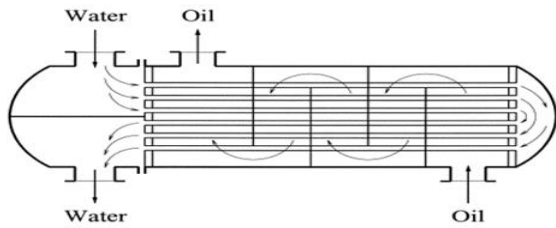
به کمک روش اجزا محدود می‌پردازند [۹]. عربلو و سنول وابستگی طول عمر ترانسفورماتور به دمای نقطه داغ را مورد بررسی قرار می‌دهند [۱۰]. این تلاش‌ها نشانگر اهمیت محاسبه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور در تخمین طول عمر آن است. از طرفی قابلیت اطمینان شبکه برق وابستگی شدیدی به طول عمر ترانسفورماتور دارد؛ بنابراین به منظور برنامه‌ریزی برای شبکه قدرت، لازم است نقطه داغ ترانسفورماتور به صورت دقیق محاسبه شود.

به منظور تخمین دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است. روش‌های مرسوم تخمین نقطه داغ، عبارتند از استفاده از حسگرهای دمای فیبر نوری، روش‌های محاسبات عددی، فرمول‌های تجربی و مدار معادل حرارتی [۱۰ و ۱۱]. هیل معتقد است با استفاده از تکنیک‌های هوش محاسباتی می‌توان مدل‌های حرارتی را بهبود بخشید و در نتیجه اطمینان از دقت پاسخ‌ها را بالا برد [۱۲ و ۱۳]. زیله با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل و با در نظر گرفتن دمای محیط به بررسی دمای داغ ترین نقطه ترانسفورماتور می‌پردازد [۱۴]. استفاده از الگوریتم زنبور عسل، روشی زمانبر می‌باشد. علاوه بر آن روش خنک‌سازی در این مطالعه، برای ترانسفورماتورهای کوچک مناسب است. چرچس و همکاران مطالعه عددی جریان سیال و انتقال حرارت در شرایط پایدار برای یک ترانسفورماتور قدرت سه فاز غوطه ور شده در داخل یک تانک

ترانسفورماتور از اجزا مهم و گران قیمت شبکه قدرت است که بهره‌برداری درست از آن از دیرباز یکی از مهمترین چالش‌های مهندسان بوده است. یکی از چالش‌های بهره‌برداری از ترانسفورماتور، خنک‌سازی درست ترانسفورماتور است. اهمیت خنک سازی ترانسفورماتور به خاطر وابستگی طول عمر ترانسفورماتور به نقطه داغ ترانسفورماتور می‌باشد [۲ و ۱]. آیین‌نامه‌های IEC [۳] و IEEE [۴] روش‌هایی برای اندازه گیری طول عمر مفید ترانسفورماتور پیشنهاد می‌کنند؛ این روش‌ها عمومی هستند و برای استفاده از آن باید دمای نقطه داغ ترانسفورماتور از طریق یک مدل حرارتی تعیین شوند [۵]. در این زمینه، تحقیقات زیادی انجام شده است؛ از جمله، ابراهیم و همکاران که به کمک دمای نقطه داغ ترانسفورماتور به بررسی عوامل موثر در پیری ترانسفورماتور با استفاده از شاخص سلامت (Hi) ترانسفورماتور پرداخته‌اند و قابلیت اطمینان ترانسفورماتور را مورد بررسی قرار داده‌اند [۶]. در سال ۲۰۲۱، اسلام و همکاران به کمک دمای روغن بالا و دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، به بررسی طول عمر ترانسفورماتور ۱۳MVA پرداختند [۷]. طاهری و همکاران نیز به بررسی طول عمر ترانسفورماتوری ۵۰۰KVA در شرایط اضافه بار می‌پردازند [۸]. از طرفی طاهری و همکاران به بررسی طول عمر ترانسفورماتور در بار هارمونیک و عادی

۲- روش خنک‌سازی OFWF

این روش خنک‌سازی مبتنی بر اصل همرفت سیالات است. در این روش خنک‌سازی، روغن خنک‌ساز داخلی و آب خنک‌ساز خارجی است. در این روش خنک‌سازی آب با خنک کردن روغن (که خود وظیفه خنک‌سازی ترانسفورماتور را داراست) به فرآیند خنک‌سازی ترانسفورماتور کمک می‌کند. سیستم خنک‌سازی ترانسفورماتور در این خنک‌سازی در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، روغن از پایین توسط پمپ به رادیاتور وارد شده آب نیز در خلاف مسیر خنک‌سازی روغن توسط پمپ در لوله‌هایی که در روغن هستند عبور می‌کند که این باعث کاهش دمای روغن می‌شود [۲۴].



شکل ۱- خنک‌سازی OFWF در [۲۵]

۳- فرمول‌بندی مسئله و توابع هدف

در این مقاله به منظور محاسبه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، معادله (۱) به کمک الگوریتم گرگ خاکستری محاسبه می‌شود. حاصل همان نقطه داغ ترانسفورماتور خواهد بود [۲۶].

$$\max \sum_1^P \theta_a + \sum_1^P \Delta \theta_w + \sum_1^P \Delta \theta_{tot} \quad (1)$$

روش کار به این صورت است که ابتدا معادلات (۲) و (۳) به کمک روش رانگ کوتا مرتبه ۴، به صورت عددی با دامنه‌های برابر حل می‌گردند؛ سپس به کمک الگوریتم گرگ خاکستری معادله (۱) بهینه‌سازی می‌شود. در معادله (۱)، P تعداد نقاطی است که به کمک روش رانگ کوتا مرتبه ۴، در معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شود.

در رابطه (۱)، $\Delta \theta_w$ افزایش دمای نقطه داغ نسبت به روغن بالای ترانسفورماتور و $\Delta \theta_{tot}$ افزایش دمای روغن بالای ترانسفورماتور نسبت به دمای محیط است. برای محاسبه دمای روغن بالا نسبت به دمای محیط، از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۲۶].

$$\frac{1 + I_f^2 R}{R + 1} (\Delta \theta_{tot,r})^{\frac{1}{n}} = \tau_{to} \frac{d\theta_{tot}}{dt} + (\theta_{tot} - \theta_a)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، τ_{to} ثابت زمانی تغییرات دمای روغن، $\Delta \theta_{tot,r}$ تغییرات دمای روغن بالا نسبت به دمای محیط در بار نامی، I_f میزان بار ترانسفورماتور، n کلاس روغن و R نسبت تلفات بار به تلفات بی‌باری می‌باشد. همچنین برای محاسبه تغییرات دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالا از رابطه زیر استفاده می‌گردد [۲۶].

$$\frac{I_f (1 + P_{EC,r}(pu))}{1 + P_{EC,r}(pu)} (\Delta \theta_{w,r})^{\frac{1}{m}} = \tau_w \frac{d\Delta \theta_w}{dt} + (\Delta \theta_w - \theta_{tot})^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $P_{EC,r}(pu)$ تلفات جریان گردابی در مکان وقوع نقطه داغ، $\Delta \theta_w$ تغییرات دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالا در بار I_f ، τ_w ثابت زمانی سیم‌پیچ در مکان وقوع نقطه داغ و m عددی مربوط به مقاومت غیر خطی

روغن را مورد بررسی قرار می‌دهند. هدف اصلی آنها بهینه‌سازی روش خنک‌کاری ترانسفورماتور قدرت می‌باشد. آن‌ها از یک مانع در بخش‌های پایینی یک ترانسفورماتور به منظور هدایت روغن به سطوح گرم‌تر استفاده می‌کنند [۱۵]. حامدی و مقتدری، مدلی عددی براساس روش حجم محدود برای شبیه‌سازی همزمان جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در ناحیه سیال و هدایت حرارتی در ناحیه جامد یک ترانسفورماتور روغنی ارائه داده‌اند. این ترانسفورماتور دارای سیم‌پیچ‌های مدل دیسکی بوده خنک‌سازی آن توسط یک سیستم خنک‌کننده طبیعی زیگزگ (دارای واشرهای مسدودکننده جریان) انجام می‌گردد [۱۶].

بونستگ و همکاران به طراحی یک ترانسفورماتور پرداخته، دمای سیم‌پیچ‌های آن را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند. ویژگی اصلی این ترانسفورماتور مقاومت بیشتر در برابر اتصال کوتاه می‌باشد [۱۷]. جردینی و همکاران دمای ترانسفورماتور قدرت در شرایط اضافه بار را محاسبه می‌کنند [۱۸]. آن‌ها در این شرایط دمای روغن پایین را به عنوان دمای حداقل در نظر گرفته روش جدیدی برای محاسبه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور ارائه نموده، معادلات جدیدی بدست می‌آورند. عامر و همکاران دمای نقطه داغ و دمای روغن بالا نسبت به دمای محیط در بارهای خطی و غیر خطی را محاسبه می‌نمایند [۱۹]. در سال ۲۰۱۷، دائو و فنگ به کمک نرم افزار COMSOL به بررسی دمای نقطه داغ ترانسفورماتور روغنی و حل معادلات گرما و همرفت و بالا رفتن دمای ترانسفورماتور پرداختند [۲۰]. دوآن با بررسی زمان دقیق وقوع نقطه داغ به کمک فیبرهای نوری به بررسی زمان وقوع دمای نقطه داغ ترانسفورماتور ۳۵KV می‌پردازد [۲۱]. ژانگ و همکاران به کمک روش اجزا محدود به بررسی دمای نقطه داغ ترانسفورماتورهای کششی پرداخته‌اند [۲۲]. مطالعات آن‌ها در برنامه ریزی راه‌آهن برقی اهمیت ویژه‌ای دارد [۲۳ و ۲۴].

تمام روش‌ها برای خنک‌سازی ذکر شده در بالا مربوط به ترانسفورماتورهای کوچک هستند، اما برای ترانسفورماتورهای بزرگتر به دلیل اینکه با افزایش قدرت ترانسفورماتور، تلفات بیشتر شده در نتیجه گرمای بیشتری تولید می‌شود، این روش‌ها کارایی نداشته بایستی از روش خنک‌سازی کاراتری استفاده شود. سوال اینجاست؛ برای خنک‌سازی ترانسفورماتورهای قدرت خیلی بزرگ از چه روشی می‌توان بهره گرفت و این روش به چه میزان کارا است؟ رادوکویچ و پوپویچ پارامترهای گرمایی یک ترانسفورماتور ۳۸۰ MVA با خنک‌سازی روغن اجباری-آب اجباری (OFWF) را مورد بررسی قرار می‌دهند. این روش خنک‌سازی می‌تواند برای ترانسفورماتورهای بزرگتر استفاده شود [۲۵].

با توجه به اهمیت نقطه داغ ترانسفورماتور در طراحی و بهره‌برداری، این دما باید محاسبه گردد. به دلیل دقت پایین و یا پرهزینه بودن روش‌های مرسوم محاسبه نقطه داغ، به روش‌های کاراتری برای محاسبه نقطه داغ ترانسفورماتور نیاز است. با توجه به محاسبات بهینه‌سازی تابع هزینه (تابع دمای ترانسفورماتور) به کمک الگوریتم‌های هوشمند در این مقاله استفاده از یکی از این الگوریتم‌ها پیشنهاد می‌شود. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله الگوریتم گرگ خاکستری است که در سال ۲۰۱۴ معرفی شده و الگوریتمی جدید به حساب می‌آید [۲۶]. از ویژگی‌های این الگوریتم نیاز به حافظه کمتر است [۲۶]. در این مقاله با توجه به اینکه تاکنون محاسبه دمای نقطه داغ به کمک الگوریتم‌های فرآیندکاری علی‌رغم تمام محاسنی که در بالا ذکر شد، مرسوم نبوده و با توجه به اینکه محاسبه دمای نقطه داغ برای ترانسفورماتورهای بزرگی که با روش OFWF خنک‌سازی می‌شوند مد نظر پژوهشگران قرار نگرفته است، به بررسی دمای نقطه داغ ترانسفورماتور بسیار بزرگ با خنک‌سازی OFWF به کمک الگوریتم گرگ خاکستری پرداخته می‌شود و سرعت و دقت محاسبه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور با این روش با سایر روش‌ها مقایسه می‌گردد.

و طول گام برابر حل میگردند.

مرحله ۲: نتایج حل دو معادله (۲) و (۳) به همراه دمای محیط جمع شده و تابع هدف مندرج در رابطه (۱)، تشکیل می‌شود.
 مرحله ۳: به صورت تصادفی جمعیتی به عنوان گرگ‌ها انتخاب شده و برازندگی آن‌ها به کمک رابطه (۱)، محاسبه می‌شود.
 مرحله ۴: بهترین جواب به عنوان گرگ آلفا انتخاب شده، بهترین جواب دوم و سوم به ترتیب گرگ بتا و دلتا می‌نامیده می‌شود.
 مرحله ۵: موقعیت گرگ‌ها به کمک رابطه (۶) و (۷) به روزرسانی می‌شوند.
 مرحله ۶: با فرض اینکه گرگ‌های آلفا، بتا، دلتا دانش بهتری در مورد موقعیت طعمه نسبت به سایرین دارند موقعیت گرگ‌های دیگر باید به کمک رابطه (۸) به روزرسانی گردد.
 مرحله ۷: شرط همگرایی اگر برقرار باشد بهینه‌سازی پایان می‌یابد؛ در غیر این صورت الگوریتم به مرحله ۴ می‌رود.
 در جدول (۱) مشخصات ترانسفورماتور که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ترانسفورماتور مورد بررسی

میزان	مشخصه
۲۵۰	توان (MVA)
۷۸.۱	تلفات بی‌باری (kW)
۵۶۲.۷	تلفات بار داری (kW)
۳۸.۳	$\Delta\theta_{w,r}$ (°C)
۲۰.۲	$\Delta\theta_{tot}$ (°C)
۰.۹	کلاس روغن (n)
۰.۸	M
۲.۷۵	ثابت زمانی سیم‌پیچ (h)
۰.۱	ثابت زمانی روغن (h)

فلوچارت حل مسئله به کمک الگوریتم گرگ خاکستری در شکل (۲) آورده شده است.

روغن می‌باشند. برای محاسبه ثابت زمانی دمای روغن در بار نامی از رابطه زیر می‌توان بهره گرفت [۲۶]:

$$\tau_{ro} = C \cdot \frac{\Delta\theta_{tot,r}}{P_t} \quad (۴)$$

که در آن P_t توان گرمایی و C ظرفیت گرمایی روغن می‌باشند. دمای نقطه داغ و تغییرات اولیه دمای نقطه داغ نیز به بالاترین دمای روغن وابسته هستند. اگر مقدار $\Delta\theta_{w,r,a}$ مقدار نرمال دمای نقطه داغ در دمای محیط باشد از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۶]:

$$\Delta\theta_{w,r} = \Delta\theta_{w,r,a} - \Delta\theta_{tot,r} \quad (۵)$$

$\Delta\theta_{w,r}$ تغییرات دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالا در بار نامی است.

۴- الگوریتم گرگ خاکستری

به منظور حل معادله بهینه سازی رابطه (۱) و یافتن نقطه داغ ترانسفورماتور، از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده می‌شود. الگوریتم گرگ خاکستری در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی و همکاران با الهام از زندگی اجتماعی گرگ‌ها معرفی شد [۲۸ و ۲۷]. سلسله مراتب رهبری گروه در این الگوریتم شامل گرگ آلفا (که در واقع گرگ غالب و رهبر اصلی گروه است این گرگ لوزما قوی‌ترین گرگ گروه نیست ولی مدیرترین آن‌هاست)، گرگ بتا (که این گرگ در درجه دوم رهبری گروه قرار دارد که می‌تواند نر یا ماده باشد اگر گرگ آلفا بیمار شود و یا بمیرد احتمالاً رهبری گروه بر عهده او خواهد بود)، گرگ دلتا (که این گروه از گرگ‌ها باید به آلفا و بتا گزارش دهند اما بر گرگ امگا تسلط دارند این گروه شامل نگهبانان مراقبان و پیش‌آهنگان است) و گرگ امگا (که این گرگ‌ها نقش قربانی را بازی می‌کند و باید طمع باشد) می‌باشد. این جانوران برای شکار، ابتدا دور شکار حلقه زده شکار را محاصره می‌کنند، در مرحله بعد حلقه محاصره را تنگ‌تر کرده شروع به خسته کردن طعمه می‌کنند. سپس با دستور گرگ آلفا، به طعمه حمله کرده و او را از پای درمی‌آورند. الگوریتم گرگ خاکستری به دلیل دقت و سرعت بالای آن نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری [۲۸ و ۲۷]، برای بهینه‌سازی در این مقاله استفاده می‌شود. این الگوریتم سه مرحله اصلی دارد:

۱. مشاهده شکار، تعقیب و رد یابی.
۲. نزدیک شدن به شکار، احاطه آن و گمراه کردن آن تا از حرکت بایستد.
۳. حمله به شکار.

اگر X بردار موقعیت گرگ خاکستری و X_p موقعیت طعمه باشد روابط زیر برقرار است.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (۶)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (۷)$$

اگر X_1, X_2, X_3 به ترتیب موقعیت گرگ‌های دلتا، بتا و آلفا (که به کمک رابطه (۶) و (۷) به روزرسانی شده اند) باشد، به کمک رابطه (۱۰) موقعیت بردار گرگ خاکستری به روز می‌شود.

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۸)$$

در روابط بالا، \vec{A} و \vec{C} بردارهایی به شرح زیر است.

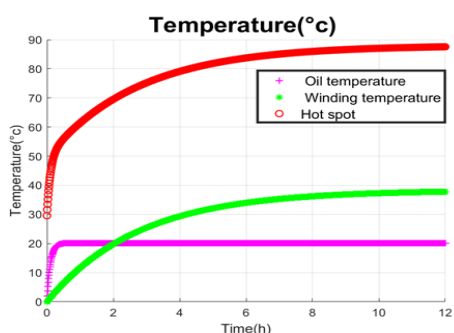
$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (۹)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (۱۰)$$

r_1, r_2 بردارهای تصادفی در بازه $[0, 1]$ و \vec{a} به طور خطی در طول تکرارها، از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد.

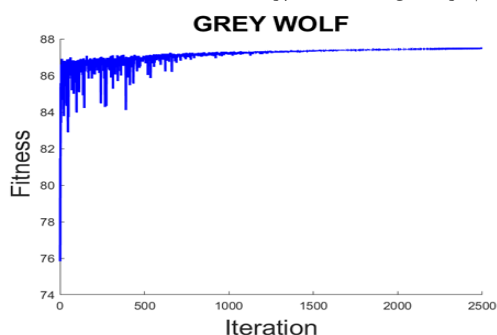
مراحل به دست آوردن دمای نقطه داغ ترانسفورماتور توسط این الگوریتم به شرح زیر است:

مرحله ۱: به کمک روش رانگ کوتا مرتبه‌ی ۴، معادلات (۲) و (۳) با دامنه



شکل ۳- تغییرات دمای نقطه داغ، تغییرات دمای روغن بالا نسبت به محیط و افزایش دمای سیم پیچ نسبت به دمای محیط در بار نامی

در شکل (۳) به دلیل کم بودن ثابت زمانی روغن نسبت به ثابت زمانی سیم پیچ، در ۲ ساعت اول دمای سیم پیچ نسبت به دمای روغن با سرعت کمتری افزایش یافته است. همچنین در شکل (۴)، به بررسی مراحل بهینه سازی این الگوریتم در سیکل های مختلف پرداخته شده است.

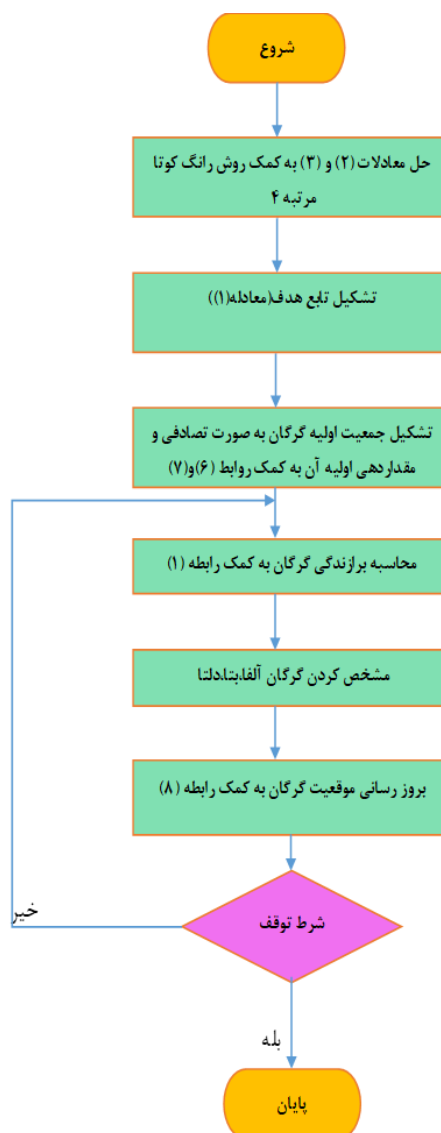


شکل ۴- نتایج بهینه سازی تابع نقطه داغ ترانسفورماتور در بار نامی

جدول ۲- سرعت بهینه سازی و زمان محاسبه شده برای وقوع نقطه داغ در الگوریتم های مختلف

سرعت پاسخ دهی (ثانیه)	زمان وقوع نقطه داغ (ساعت)	گرگ خاکستری
۷.۳۹۶۳	۲۰	رقابت استعماری
۲۷.۰۵۷	۲۰	زنبر عسل
۱۴.۵۲۶	۲۰	

در جداول (۳) و (۴)، HST دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، TO افزایش دمای روغن بالا نسبت به محیط، AWT افزایش دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالا (افزایش دمای نقطه داغ نسبت به روغن) می باشند. با توجه به نتایج جداول ۳ و ۴، تقریبی از دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، افزایش دمای بالای روغن و افزایش میانگین دمای سیم پیچ نسبت به دمای محیط به کمک نرم افزار matlab2018a در بارهای مختلف به دست آمده است. نتایج این تقریب در شکل (۵) نمایش داده می شود. با توجه به نتایج جداول (۲)، (۳) و (۴)، الگوریتم گرگ خاکستری سرعت بالاتری در همگرایی به پاسخ دارد. همچنین دقت این الگوریتم با سایر الگوریتم ها مشابه است.



شکل ۲- فلوچارت حل مسئله به کمک الگوریتم گرگ خاکستری

۵- نتایج شبیه سازی

فرض بر آن است که ترانسفورماتور در محیطی با دمای 30 (°C) مورد بهره برداری قرار می گیرد. در شکل (۳)، نمودار نقطه داغ، نمودار تغییرات دمای سیم پیچ و نمودار افزایش دمای روغن بالا در بار نامی ترانسفورماتور نشان داده شده است. شکل (۳) به کمک نرم افزار matlab2018b و با کمک حل عددی معادلات ترسیم شده است. با توجه به فرض دمای محیط (30°C)، در نتیجه دمای نقطه داغ ترانسفورماتور از این دما شروع می گردد که در شکل (۳) قابل مشاهده است.

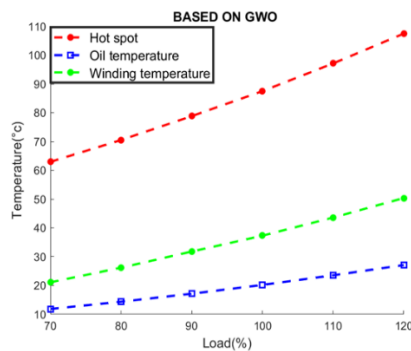
در جدول (۲) نیز به بررسی سرعت بهینه سازی و نیز میزان دقت الگوریتم گرگ خاکستری و مقایسه نتایج آن با نتایج چند الگوریتم معروف بهینه سازی پرداخته شده است. در جداول ۳ و ۴ به بررسی دمای نقطه داغ، افزایش دمای روغن بالا نسبت به دمای محیط و افزایش میانگین دمای سیم پیچ نسبت به دمای محیط در بارهای مختلف پرداخته شده است. در شکل ۴ نیز با توجه به اطلاعات جداول ۲ و ۳ برآزش نقاط ترسیم می گردند.

جدول ۳- نتایج بررسی دمای نقطه داغ، افزایش دمای روغن بالا نسبت به دمای محیط و افزایش دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالا در بارهای کمتر از حالت نامی به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی

	70%			80%			90%		
	HST(°C)	TO(°C)	AWT (°C)	HST(°C)	TO(°C)	AWT (°C)	HST (°C)	TO(°C)	AWT (°C)
رقابت									
استعماری	62.9346	11.84	21.1	70.5256	14.35	26.18	78.829	17.14	31.787
زنبور									
عسل	63.4758	11.84	21.6358	71.1355	14.35	26.79	79.515	17.14	32.375
گرگ									
خاکستری	63.9346	11.84	22.1	71.5256	14.35	27.18	79.829	17.14	32.787

جدول ۴- نتایج بررسی دمای نقطه داغ، افزایش دمای روغن بالا نسبت به دمای محیط و افزایش میانگین دمای سیم پیچ نسبت به دمای محیط در بارهای بیشتر از حالت نامی به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی

	100%			120%		
	HST(°C)	TO (°C)	AWT(°C)	HST(°C)	TO(°C)	AWT(°C)
رقابت						
استعماری	87.4909	20.2	37.2909	107.4808	27.1041	50.3608
زنبور						
عسل	87.4734	20.2	37.2734	108.3539	27.1041	51.2539
گرگ						
خاکستری	87.4909	20.2	37.2909	108.4808	27.1041	51.3608



شکل ۵- برآزش دمای نقاط داغ به دست آمده در بارهای مختلف، محاسبه شده بوسیله الگوریتم گرگ خاکستری

۶- راستی آزمایی نتایج

به منظور بررسی درستی نتایج، به بررسی دمای بالای روغن محاسبه شده ترانسفورماتور ۳۸۰ MVA که در [۲۵] بررسی شده است، پرداخته می‌شود. جدول (۵) مشخصات ترانسفورماتور مورد اشاره را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات ترانسفورماتور ۳۸۰ مگا ولت آمپر [۲۵]

مشخصه	میزان
توان (MVA)	۳۸۰
تلفات بی‌باری (kW)	۳۱۸
تلفات بار داری (kW)	۷۸۰

۲۸.۰۸ $\Delta\theta_{tot}$ (°C)

۰.۹ (n) کلاس روغن

۰.۶ (m) توان

۴.۵ ثابت زمانی روغن (h)

با توجه به شکل ۶، تا ساعت پانزدهم، این ترانسفورماتور در بار ۹۰ درصد مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. به منظور اعتبار سنجی دمای روغن بالا این ترانسفورماتور در دمای محیط (°C) ۴۰ از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده می‌گردد. دمای روغن بالا محاسبه شده به کمک این الگوریتم (°C) ۶۳.۸۷۱

شکل ۹- میزان دمای روغن بالای محاسبه شده در زمان‌های مختلف بین صفر تا ۱۵ ساعت

۷- نتیجه‌گیری

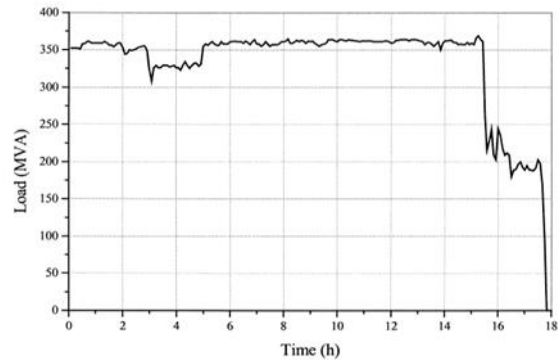
با توجه به اینکه طول عمر ترانسفورماتور به دمای نقطه داغ ترانسفورماتور وابسته است و با توجه به اینکه در ترانسفورماتورهای بزرگ تلفات بیشتر و در نتیجه گرمای بیشتر تولید می‌گردد، در نتیجه برای استفاده از ترانسفورماتورهای بسیار بزرگ به روش‌های جدیدتر و کارآمدتر نیاز است. در این مقاله به بررسی کارایی خنک‌سازی روغن اجباری- آب اجباری یک ترانسفورماتور قدرت ۲۵۰ مگاوات آمپر در بارهای مختلف توسط الگوریتم گرگ خاکستری پرداخته میشود. به این منظور دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، دمای سی‌م پیچ، دمای روغن بالا در بارهای مختلف به کمک الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری محاسبه می‌گردد. نتایج این مقاله حاکی از دقت بالا و سرعت مناسب الگوریتم گرگ خاکستری برای تخمین نقطه داغ ترانسفورماتور است. مقایسه نتایج حاصله از روش خنک‌سازی OFWF با سایر روش‌ها، حاکی از کارایی این روش خنک‌سازی (به دلیل بزرگ بودن نقطه داغ ترانسفورماتور) می‌باشد.

با توجه به اینکه طول عمر ترانسفورماتور به دمای نقطه داغ بستگی دارد، استفاده از این روش خنک‌سازی باعث افزایش طول عمر ترانسفورماتور خواهد شد. استفاده از فناوری‌های جدیدتر در کنار این روش خنک‌سازی می‌تواند به خنک‌سازی بهتر ترانسفورماتور کمک کند و مبنای پژوهش‌های جدیدتر قرار گیرد. تحقیقاتی مانند بررسی اثر هارمونیک‌ها در خنک‌سازی OFWF، تخمین طول عمر ترانسفورماتور با این روش خنک‌سازی و همچنین اثر هسته آمورف در شبیه‌سازی ترانسفورماتور با این روش خنک‌سازی، می‌تواند در آینده مورد بررسی قرار بگیرد.

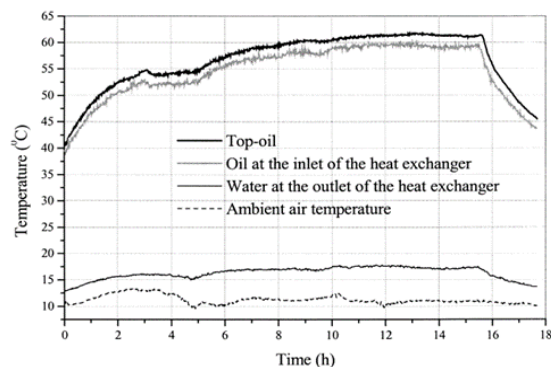
مراجع

- [1] N Abu Bakar, A.Abu-Siada, "Fuzzy logic approach for transformer remnant life prediction and asset management decision", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, no.5, pp. 3199 – 3208, 2016.
- [2] M.R.Arian Nik , A.A.Razi Kazemi "Estimating the lifespan of oil transformers based on the degree of gilmration", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 49, no. 3 ,2019.
- [3] International Standard Loading Guide for Oil Immersed Power Transformer, IEC 354, 1991.
- [4] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Imersed Transformer, IEEE Std C57.91, 1995.
- [5] J.A. Jardini, "Power transformer temperature evaluation for overloading conditions", IEEE Transactions on Power Delivery vol. 20,no. 1, pp. 179-184, 2005.
- [6] K.Ibrahim, R.M.Sharkawy, H.K.Temraz, M.M.A.Salama, "Reliability calculations based on an enhanced transformer life expectancy model", Ain Shams Engineering Journal, vol. 13, no. 4, p. 101661, 2021.
- [7] M.Aslam, I.Haq, M.S.Rehan, F.Ali, A.Basit,M.I.Khan, A.M.Arbab, " Health Analysis of Transformer Winding Insulation Through Thermal Monitoring and Fast Fourier Transform (FFT) Power Spectrum", IEEE Access, vol. 9, pp.11.4207_114217, 2021.
- [8] A.A.Taheri, A.Abdali, A.Rabiee, "Indoor distribution transformers oil temperature prediction using new electro-thermal resistance model and normal cyclic overloading strategy: an experimental case study", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14, no. 24, pp. 5792-5803, 2020.
- [9] Sh.Taheri,A.Gholami,I.Fofana,H.Taheri" Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions", Electric Power Systems Research, vol. 86, pp. 68_75, 2012.

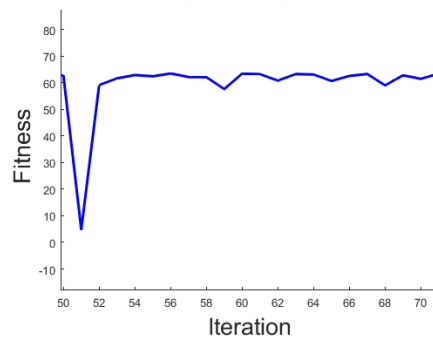
می‌باشد که با توجه به شکل (۷) تخمین معقولی است. در شکل (۸)، میزان دمای روغن بالای محاسبه شده در هر سیکل (تکرار) قابل مشاهده است. در شکل (۹) میزان دمای روغن بالا در زمان‌های صفر تا ۱۵ ساعت نشان داده شده است. از مقایسه شکل (۹) و شکل (۷)، می‌توان صحت نتایج را تایید نمود.



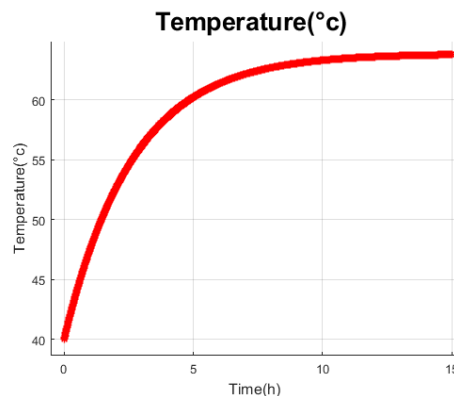
شکل ۶- بارگذاری ترانسفورماتور مرجع [۲۵]



شکل ۷- دمای روغن بالا ترانسفورماتور مرجع [۲۵] GREY WOLF



شکل ۸- میزان دمای روغن بالای محاسبه شده در هر سیکل



- [10] A.Y. Arablu, I.Senol, "Development of a hot-spot temperature calculation method for the loss of life estimation of an ONAN distribution transformer", *Electrical Engineering*, vol. 100, pp. 1651–1659, 2018.
- [11] R.Duan, "Real-Time Hotspot Tracing and Model Analysis of a Distributed Optical Fiber Sensor Integrated Power Transformer", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 57242-57254, 2022.
- [12] M. Hell, "Recurrent nfn in thermal modeling of power transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, pp. 904 – 910, 2007.
- [13] M. Hell, "Participatory learning in power transformers thermal modeling", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 2058 – 2067, 2008.
- [14] M.Zile, "Temperature analysis in power transformer windings using created artificial bee algorithm and computer program", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 60513-60521, 2019.
- [15] N.C. Chereches, M. Chereches, L.Miron, S.Hudisteanu, "Numerical study of cooling solutions inside a power transformer", *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 314-321, 2017.
- [16] F.Hamedi, H. Moghtaderi "Simulation and parametric analysis of the zigzag cooling path in disc transformer windings to investigate the design parameters affecting cooling conditions", *Mogdara Mechanical Engineering*, vol. 19, no 5, pp. 1177–1186, 2019,
- [17] B.Suechoey, C.Boonseng, C.Chompoonwai, C.Chompoo-inwai, "Analysis of winding temperature and design of distribution transformer for improving short circuit withstand capability under renewable generations mixed environment", *International journal intelligent Energy& system*, vol.11, no.6, pp.11-20, 2018.
- [18] J.A. Jardini, J.L.P. Brittes, L.C. Magrini, M.A.Bini, and J.Yasuoka, "Power transformer temperature evaluation for overloading conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp.179-184, 2005.
- [19] Gouda OE, Amer GM, Salem WAA. Predicting transformer temperature rise and loss of life in the presence of harmonic load currents. *Ain Shams Eng J (ASEJ)*, vol. 3, no. 2, pp. 113–121, 2012.
- [20] T. Dao and B. T. Phung, "A study of hot-spot localization in distribution transformers," in *Proc. 1st Int. Conf. Electr. Mater. Power Equip. (ICEMPE)*, pp. 36–40, 2017.
- [21] R.Duan, "Real-Time Hotspot Tracing and Model Analysis of a Distributed Optical Fiber Sensor Integrated Power Transformer", *IEEE Access*, vol. 10, 2022.
- [22] Y.Zhang, X.Weil, X.Fan, K.Wang, R.Zhou, W.Jang, Sh.liang, J.Hao, J.liao "A Prediction Model of Hot Spot Temperature for Split-Windings Traction Transformer Considering the Load Characteristics", *IEEE Access*, vol. 9, 2021.
- [23] J. Liu, X. Fan, Y. Zhang, H. Zheng, and J. Jiao, "Temperature correction to dielectric modulus and activation energy prediction of oil-immersed cellulose insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 3, pp. 956–963, 2020.
- [24] J. Liu, H. Zhang, X. Fan, Y. Zhang, and C. Zhang, "Aging evaluation for transformer oil-immersed cellulose insulation by using frequency dependent dielectric modulus technique," *Cellulose*, vol. 4, pp. 1–15, 2021,
- [25] Z.Radakovic, A.Popovic "Variation of Steady-State Thermal Characteristics of Transformers with OFWF Cooling in Service", *Electric Power Components and Systems*, pp. 817- 829, 2003.
- [26] M.Aslam, I.U.Haq, M.S.Rehan, A.Basit, M.Arife, M.A.Khan, M.Sadiq, M.N.Arbab "Dynamic Thermal Model For Power Transformer" *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71461_71470, 2021.
- [27] S.A.Mirjalili, S.M.Mirjalili, "Grey Wolf Optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, PP. 46-61, 2014.
- [28] I.Behravan, S.H.Zoheyri, S.M.Razavi, R.Trazarti "Using the Grey Wolf Algorithm in Big Data Clustering", *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 41-62, 2020.