

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی به منظور بهره‌وری طول عمر ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تأثیر فرسودگی بر قابلیت اطمینان

پیمان افزلی^۱، فرشید کی‌نیا^{۲*}، سعید اسماعیلی^۳

^۱ کارشناسی ارشد پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی،

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

p.afzali@student.kgut.ac.ir

^۲ استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی،

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

f.keynia@kgut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

s_esmaeili@uk.ac.ir

چکیده: این مقاله یک مدل شاخص بهره‌وری طول عمر و یک روش الگوریتم جستجوی کلاخ توسعه یافته (DCSA) به منظور دستیابی به نگهداری و تعمیرات بهینه برای ترانسفورماتور قدرت ارائه می‌کند. اگر نگهداری و تعمیرات روی ترانسفورماتورهای قدرت صورت نگیرد، نتیجه‌اش ناپایداری سیستم انتقال و عدم تأمین پایدار انرژی الکتریکی در نقاط بار خواهد بود؛ به عبارت دیگر، خرابی سیستم انتقال روی وضعیت سیستم توزیع اثر می‌گذارد و ممکن است باعث وقوع خاموشی برای مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی شود. بنابراین یک استراتژی نگهداری و تعمیرات به منظور کاهش نرخ خرابی و افزایش قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت مورد نیاز است. استراتژی نگهداری و تعمیرات برای ترانسفورماتور قدرت شامل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی است. در این مقاله، نرخ خرابی ترانسفورماتور قدرت توسط تابع توزیع ویبول و طول عمر ترانسفورماتور قدرت با استفاده از سری تیلور در تابع توزیع ویبول با یک تقریب مناسب مدل شده است. استراتژی نگهداری و تعمیرات باید در جهت حداقل هزینه تحت شرط قابلیت اطمینان مورد نیاز بهینه شود. برای حل این مسئله بهینه‌سازی، از روش DCSA استفاده شده و نتایج با روش‌های دیگر مقایسه شده است. نتایج آزمون نشان می‌دهد که روش DCSA پیشنهادی برای مسئله نگهداری و تعمیرات بهینه، قادر به به دست آوردن جواب‌های با کیفیت بالاتر نسبت به روش‌های دیگر است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی کلاخ توسعه یافته (DCSA)، توزیع ویبول، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)، نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)، قابلیت اطمینان.

۱. مقدمه

مورد نیاز است، معمولاً نگهداری و تعمیرات در دو دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شود [۳]. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه^۱ (PM) و اصلاحی^۲ (CM). به‌طور کلی برای یک ترانسفورماتور قدرت، عملیات PM شامل نظارت، تمیز کردن، روغن‌کاری، تطبیق، تنظیم و یا جایگزین کردن است. از طریق عملیات PM، هزینه‌ها کاهش یافته و به دلیل رخداد خطاها کاهش می‌یابد اما منجر به تحمیل هزینه‌های عملیات PM می‌شود. زمانی که در سیستم خطا رخ می‌دهد، به منظور برگرداندن سیستم به وضعیت بهره‌برداری عملیات CM که شامل حداقل تعمیرات اصلاحی و جایگزینی است، انجام می‌شود.

تعداد زیادی از مطالعات روی نگهداری و تعمیرات بحث کرده‌اند. آن‌ها نگهداری و تعمیرات بهینه را توسط روش‌های بهینه‌سازی ریاضی یا ابتکاری کشف کرده‌اند. برای مثال در مرجع [۴]، مسئله نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بهینه برای تجهیزات پست توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو حل شده است، اما بیشتر مطالعات برای حل مسئله نگهداری و تعمیرات بهینه بر روی روش‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ (PSO) یا الگوریتم ژنتیک^۴ (GA) تمرکز کرده‌اند. برای مثال مرجع [۵] درباره کاربرد PSO برای یک استراتژی نگهداری و تعمیرات بهینه در سیستم‌های انتقال است، در حالی که مرجع [۶] درباره کاربرد جمعیت ازدحام ذرات بهبود یافته^۵ (IPSO) به منظور کمینه کردن هزینه دوره‌ای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای سیستم‌های سری-موازی، بحث کرده است.

در این مقاله، احتمال خرابی تجهیز توسط تابع توزیع ویبول مدل شده است. در نتیجه، این مقاله دو نوآوری ارائه می‌دهد. اول یک مدل شاخص بهره‌وری طول عمر برای ترانسفورماتور قدرت ارائه می‌شود، دوم یک روش مؤثر برای حل مسئله نگهداری و تعمیرات بهینه مطرح شده در مرجع [۷] ارائه می‌گردد. بنابراین، روش بر پایه الگوریتم جستجوی کلایغ توسعه یافته^۶ (DCSA) به منظور پیدا کردن استراتژی‌های بهینه نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت، هنگامی که قیود بهره‌برداری و هزینه اقتصادی برآورده شود، قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت را بیشینه یا هزینه‌های سراسری را کمینه می‌کند. در این مقاله، نتایج روش DCSA برای به دست آوردن نگهداری و تعمیرات بهینه ترانسفورماتور قدرت با روش‌های GA و PSO مقایسه شده‌اند. این مقاله نشان می‌دهد که نرخ خرابی افزایشی،

ترانسفورماتورهای قدرت در شبکه‌های انتقال ولتاژ بالا برای افزایش یا کاهش ولتاژ استفاده می‌شوند. قابلیت اطمینان شبکه انتقال بستگی به در دسترس‌پذیری و بهره‌وری ترانسفورماتورهای قدرت دارد [۱]. به عبارت دیگر، ترانسفورماتور قدرت اثر قابل توجهی بر روی امنیت و تداوم پایداری شبکه انتقال می‌گذارد. بنابراین انتخاب ترانسفورماتور مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. نصب و راه‌اندازی صحیح ترانسفورماتور قدرت، بهره‌برداری بهینه و عملیات نگهداری و تعمیرات بهینه در افزایش کارایی و عمر مفید ترانسفورماتور قدرت نقش مؤثری دارند. ترانسفورماتور قدرت با عمل کردن و گذر زمان به تدریج فرسوده و خراب می‌شوند. بنابراین نیاز به اقدامات پیشگیرانه به منظور افزایش عمر مفید ترانسفورماتور قدرت است. واضح است که اقدامات پیشگیرانه بر جایگزین کردن تجهیزات ارجحیت دارد. استراتژی بهره‌وری نگهداری و تعمیرات، یک مسئله مهم در جهت افزایش بهره‌وری تجهیزات است. استراتژی نگهداری و تعمیرات به منظور مدیریت انرژی انجام می‌شود که از جمله اهداف مدیریت انرژی می‌توان به افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات سیستم‌های انرژی اشاره کرد. به منظور حفظ عملکرد مورد انتظار ترانسفورماتور قدرت، انجام نگهداری و تعمیرات مناسب در طی دوران عمر آن‌ها ضروری است. نگهداری و تعمیرات می‌تواند قابلیت اطمینان را بهبود دهد، اما این ممکن است منجر به هزینه‌های نگهداری و تعمیرات غیر ضروری شود. بنابراین قابلیت اطمینان و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات باید در تعادل باشند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت سیستم‌های انرژی، برنامه‌ریزی برای بیشترین بهره‌وری و کمترین هزینه نگهداری و تعمیرات ممکن برای تجهیزات اثرگذار شبکه مانند ترانسفورماتور قدرت است. هدف مدیریت سیستم انرژی، ذخیره انرژی جمع‌آوری شده و در اختیار قرار دادن آن به نقاط بار یا تجهیزات مختلف به‌طور بهینه است [۲]. در این مقاله، به این دغدغه سیستم‌های انرژی الکتریکی از نقطه نظر قابلیت اطمینان شبکه و با در نظر گرفتن فرسودگی تجهیزات پرداخته شده و روش جدید ارائه شده در این مقاله به منظور مدیریت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی و دست یافتن به بیشترین بهره‌وری مطرح شده است. انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نیازمند وجود ترانسفورماتورهای قدرت است که به دلیل افزایش نرخ خرابی و افت مشخصات کیفی ترانسفورماتورهای قدرت، با تلفات انرژی روبرو خواهد شد. استراتژی نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتورهای قدرت باعث کاهش تلفات انرژی الکتریکی می‌شود. براساس زمانی که برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات

1. Preventive Maintenance
2. Corrective Maintenance
3. Particle Swarm Optimization
4. Genetic Algorithm
5. Improved Particle Swarm Optimization
6. Developed Crow Search Algorithm

جزء تجهیز چه مدت می‌تواند وظیفه خود را در یک سطح رضایت بخش انجام دهد؛ به عبارت دیگر، آن اندازه‌گیری شانس در سرویس بودن در یک نقطه از زمان است. به‌طور خاص، قابلیت اطمینان تجهیز، احتمال این است که تجهیز در یک مدت مشخص تحت شرایط عملیاتی طراحی، بدون خرابی و به‌درستی کار کند. قابلیت اطمینان توسط توابعی از یک متغیر تصادفی شرح داده شده است. در مدت دوره عملکردی، متغیر تصادفی زمان گذر از حالت عملکردی به حالت خرابی است که به‌طور کلی «زمان تا خرابی»^۲ (TTF) نامیده شده است. از طرف دیگر، تابع نرخ خرابی نسبت تابع چگالی احتمال (PDF) به تابع قابلیت اطمینان است. تابع PDF یک متغیر تصادفی پیوسته، تابعی است که احتمال نسبی برای این متغیر تصادفی را در یک مقدار داده شده شرح می‌دهد. برخی از اندازه‌گیری‌های مهم بهره‌وری نگهداری و تعمیرات به‌صورت زیرند. روابط (۱) تا (۴) در مراجع [۹ و ۱۰] معرفی شده‌اند.

۱. تابع خرابی: تابع خرابی به‌صورت احتمال اینکه یک جزء قبل یا در لحظه زمان عملکردی خراب شود. تابع خرابی برابر احتمال این است که متغیر تصادفی TTF برابر یا کمتر از یک مقدار خاص از زمان عملکردی باشد. تابع خرابی می‌تواند توسط رابطه (۱) محاسبه شود.

$$F(t) = P(TTF \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1)$$

که در آن، t زمان، $F(t)$ تابع خرابی، P تابع احتمال، TTF زمان تا خرابی [سال]، T زمان عملکردی [سال] و $f(t)$ تابع چگالی احتمال TTF است.

۲. تابع قابلیت اطمینان: تابع قابلیت اطمینان از روی احتمال اینکه تجهیز حداقل برای یک مدت زمان مشخص سالم بماند، تعیین می‌شود. تابع قابلیت اطمینان یک جزء توسط رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$R(t) = P(TTF > T) = \int_T^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^T f(t) dt = 1 - F(t) \quad (2)$$

که در آن، $R(t)$ تابع قابلیت اطمینان بر حسب زمان است.

۳. نرخ خرابی: متوسط فراوانی خرابی‌های تجهیز، نرخ خرابی نامیده می‌شود. نرخ خرابی افزایشی یک ماده دلالت بر قطعی یا فرسودگی آن دارد. به‌خوبی دانسته شده است که تابع نرخ خرابی می‌تواند به‌صورت احتمال خرابی در یک فاصله زمانی بسیار کوتاه تفسیر شود. بنابراین، زمانی که می‌دانید یک جزء در حال عملکرد در زمان t است، احتمال اینکه جزء در فاصله زمانی $[t, t + \Delta t]$ خراب شود می‌تواند توسط رابطه (۳) محاسبه شود.

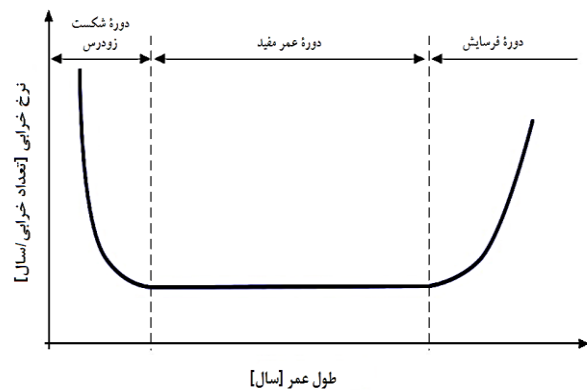
طول عمر تجهیزات را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که طول عمر تجهیزات کمتر از طول عمر موردانتظار آن‌ها باشد. از طرف دیگر، استراتژی نگهداری و تعمیرات می‌تواند عمر مفید ترانسفورماتور قدرت را افزایش دهد. در این مقاله، یک مدل شاخص بهره‌وری طول عمر ترانسفورماتور قدرت به‌منظور اینکه نشان داده شود به چه میزان یک استراتژی نگهداری و تعمیرات در افزایش عمر مفید ترانسفورماتور قدرت مؤثر است، ارائه شده است.

۲. ارزیابی احتمالاتی تجهیزات

در این بخش، ارزیابی احتمالاتی و قابلیت اطمینان تجهیزات شرح داده شده است. مدل خرابی رفتار بخشی از تجهیز برای هر مد خرابی، می‌تواند توسط مدل احتمالاتی توابع قابلیت اطمینان و توانایی نگهداری و تعمیرات تعریف شود. روش ارزیابی احتمالاتی بر روی مدیریت عدم قطعیت رفتارهای تجهیزات تمرکز کرده است. بنابراین قابلیت اطمینان تجهیزات توسط یک تابع احتمالاتی برای تجزیه و تحلیل رفتار تجهیزات ارائه شده است.

۱.۲. خرابی تجهیزات

منحنی نرخ خرابی تجهیزات الکتریکی می‌تواند با منحنی وانی شکل^۱ توصیف شود [۸]. همان‌گونه که در منحنی وانی شکل در شکل (۱) مشخص است، طول عمر یک جزء تجهیز به سه فاصله زمانی تقسیم می‌شود، دوره شکست زودرس، دوره عمر مفید و دوره فرسایش.



شکل (۱): منحنی وانی شکل

برای بیشتر قطعات مکانیکی، تابع نرخ خرابی در دوره عمر مفید میل اندکی به افزایش یافتن دارد.

۲.۲. ارزیابی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان تجهیز به‌معنی اندازه‌گیری احتمال این است که یک

شکل دهی (β) دسته سبک خرابی^۵ را مشخص می‌کند. مقدار پارامتر شکل دهی کمتر از ۱ بیانگر نرخ خرابی کاهشی، مقدار برابر با ۱ بیانگر نرخ خرابی ثابت و مقدار بزرگ‌تر از ۱ بیانگر نرخ افزایشی است. پارامتر مقیاس (η) بر روی مقیاس منحنی عمر جزء تأثیر می‌گذارد.

۴.۲. کاربردهای آماری توزیع ویبول

کاربردهای آماری توزیع ویبول برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان می‌تواند توسط روابط (۶) تا (۹) شرح داده شود [۹].

۱. تابع خرابی

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\eta} \cdot \sum_{i=0}^{\beta-1} \frac{\left(\frac{t}{\eta}\right)^i}{i!}} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

۲. تابع قابلیت اطمینان

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\eta} \cdot \sum_{i=0}^{\beta-1} \frac{\left(\frac{t}{\eta}\right)^i}{i!}} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

۳. نرخ خرابی

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\eta^\beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-t\eta}}{\Gamma(\beta)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

که در آن، $\Gamma(\beta)$ یک رابطه برحسب β است.

۴. میانگین زمان تا خرابی

$$MTTF = [-tR(t)] \Big|_0^\infty + \int_0^\infty R(t) dt = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (9)$$

۳. استراتژی نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت

نگهداری و تعمیرات یک فعالیت تعهد داده شده با هدف مقدور کردن انجام عملکرد مطلوب در یک جزء با باقی ماندن در عملکرد درست یا برگشتن به سطح عملکرد قبلی است. یک استراتژی نگهداری و تعمیرات، قواعد مرحله کار نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده را تعریف می‌کند. آن شامل اطلاعات خاموشی کل است و می‌تواند به تعداد زیادی از جداول وظیفه نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی‌های نگهداری و تعمیرات محول شود. در این بخش، طبقه‌بندی نگهداری و تعمیرات و مدل آن معرفی شده است.

$$\lambda(t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

که در آن، $\lambda(t)$ نرخ خرابی و Δt فاصله زمانی است.

۴. میانگین زمان تا خرابی: میانگین زمان تا خرابی^۱ (MTTF)

متوسط زمانی است که یک جزء قبل از اینکه خراب شود، کار می‌کند. آن طول عمر میانگین یک جزء است. مدت زمان خرابی موردانتظاری که یک جزء بدون خرابی کار می‌کند، می‌تواند توسط رابطه (۴) محاسبه شود:

$$MTTF = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt \quad (4)$$

که در آن، $MTTF$ میانگین زمان تا خرابی است.

۵. شاخص بهره‌وری طول عمر: شاخص بهره‌وری طول عمر

(LEI) به صورت تقسیم میزان طول عمر تجهیز بدون نگهداری و تعمیرات بر میزان طول عمر آن با نگهداری و تعمیرات، شرح داده شده است. توسط این شاخص می‌توان میزان تغییر طول عمر تجهیز با و بدون نگهداری را تجزیه و تحلیل کرد.

۳.۲. تابع توزیع ویبول^۲

احتمال خرابی تجهیزات قدرت معمولاً با یکی از مدل‌های ثابت، خطی یا چندجمله‌ای مدل می‌شود. حالت چندجمله‌ای دقت بیشتری نسبت به دو حالت خطی و ثابت دارد و حالت کلی‌تری محسوب می‌شود. در این حالت تابع چگالی احتمال خرابی از توزیع ویبول پیروی می‌کند [۱۱]. توزیع ویبول یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین مدل‌های در مبحث قابلیت اطمینان و مدل کردن احتمال خرابی تجهیزات به‌شمار می‌رود. تابع توزیع ویبول یک تعمیم از توزیع نمایی است که در تجزیه و تحلیل مسائل به‌کار می‌رود. تابع توزیع ویبول برای مدل کردن طول عمر اجزا با توابع نرخ خرابی نوسانی بسیار مناسب و انعطاف‌پذیر است. تابع چگالی احتمال دوپارامتری می‌تواند توسط رابطه (۵) شرح داده شود [۹].

$$f(t) = \frac{\eta^\beta \cdot t^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \cdot e^{-t\eta} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

که در آن، β پارامتر شکل دهی، η پارامتر مقیاس و Γ تابع گاما است.

توجه شود که توزیع نمایی^۳ و توزیع رایلی^۴، به ترتیب

در $\beta = 1$ و $\beta = 2$ حالات خاصی از تابع توزیع ویبول هستند. پارامتر

1. Mean Time to Failure
2. Weibull Distribution Function
3. Exponential Distribution
4. Rayleigh Distribution

۱.۳. طبقه‌بندی نگهداری و تعمیرات

استراتژی نگهداری و تعمیرات به دو دسته زیر طبقه‌بندی می‌شود:

۱. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه: یک برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) به‌منظور جلوگیری از خرابی زودرس و افت کیفیت اجزا، در نظر گرفته شده است. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، عمل انجام فعالیت‌های تعیین شده روی اجزای سیستم با هدف بهبود قابلیت اطمینان، در دسترس‌پذیری، امنیت و کارایی آن است؛ به عبارت دیگر، PM می‌تواند احتمال خرابی جزء را کاهش دهد. عملیات نگهداری و تعمیرات می‌تواند در چهار دسته طبقه‌بندی شود: نگهداری و تعمیرات بر پایه طول عمر، نگهداری و تعمیرات بر پایه ساعت، نگهداری و تعمیرات بر پایه وضعیت و نگهداری و تعمیرات بهنگام. در این مقاله، روی نگهداری و تعمیرات بر پایه طول عمر تمرکز شده است. در حالت نگهداری و تعمیرات بر پایه طول عمر، عملیات PM در یک عمر مشخص جزء صورت می‌گیرد. طول عمر می‌تواند به‌عنوان زمان عملکرد یا مفاهیم زمانی دیگر اندازه‌گیری شود.

۲. نگهداری و تعمیرات اصلاحی: نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM) بعد از اینکه یک جزء خراب شود، انجام می‌شود. هدف CM برگرداندن جزء به حالت عملکردی، توسط تعمیر یا جایگزینی جزئی که دچار خرابی شده یا سوئیچینگ در یک جزء اضافی، در سریع‌ترین زمان ممکن است.

۲.۳. مدل نگهداری و تعمیرات برای ترانسفورماتور قدرت

مدل تجهیز می‌تواند به وضعیت‌های قطع، خرابی و نگهداری و تعمیرات طبقه‌بندی شود. در وضعیت‌های خرابی و نگهداری و تعمیرات تجهیز نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما در وضعیت قطع تجهیز می‌تواند در حالت استفاده باقی بماند؛ اگرچه از مدار موردنظر جدا شده است. مطالعات قبلی چند روش شناسایی برای مدل‌های خرابی و نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد داده‌اند، مانند مدل مارکوف^۱ چندحالتی [۱۲] و مدل ویبول [۷]. در این مقاله، وضعیت‌های خرابی و نگهداری و تعمیرات تجهیز توسط توزیع ویبول مدل شده‌اند که روابط (۱۰) تا (۱۲) در مراجع [۷] و [۹] معرفی شده‌اند.

۱. مدل نرخ خرابی: نرخ خرابی تجهیز می‌تواند توسط توزیع احتمالاتی که فرایند قطعی را شرح می‌دهد، مدل شود. در طول یک فرایند، تابع نرخ خرابی با گذر زمان یا بهره‌برداری

به‌ازای $\beta > 1$ افزایش و به‌ازای $\beta < 1$ کاهش می‌یابد و به‌ازای $\beta = 1$ ثابت است. بنابراین، آن می‌تواند توسط اندازه‌گیری قابلیت اطمینان از توزیع ویبول درجایی که $\beta > 1$ همان‌گونه که در (۱۰) نشان داده شده، مدل شود. در این مقاله، از توزیع رایلی ($\beta = 2$) که حالت خاصی از توزیع ویبول است، استفاده می‌شود.

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \beta > 1 \quad (10)$$

۲. تأثیر مدل نگهداری و تعمیرات: نگهداری و تعمیرات امنیت را افزایش می‌دهد، به این معنی که وقتی روی یک تجهیز نگهداری و تعمیرات انجام می‌شود، نرخ خرابی تجهیز که می‌توانست منجر به کاهش عمر تجهیز، تخریب محیط یا تلفات اقتصادی شود، کاهش می‌یابد [۱۳]. همان‌گونه که در رابطه (۱۱) ارائه شده است، نرخ خرابی که توسط عملیات نگهداری و تعمیرات در زمان t بهبود یافته است، توسط δ کاهش می‌یابد.

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \delta \quad (11)$$

که در آن، $\lambda(t)$ نرخ خرابی با PM [تعداد خرابی آسال]، $\lambda_0(t)$ نرخ خرابی بدون PM [تعداد خرابی آسال] و δ سطح PM [تعداد خرابی آسال] است.

PM می‌تواند نرخ خرابی را کاهش دهد، اما آن نمی‌تواند امکان خرابی را به‌طور کامل حذف کند. نرخ خرابی بعد از انجام PM ممکن نیست که به‌طور دقیق همانند نرخ خرابی تجهیز اصل و دست‌نخورده باشد.

فرض می‌شود که چنین پیشنهاد شود که در سراسر دوره طول عمر تجهیز، تعداد k عمل PM انجام شود. لحظات زمانی که این عملیات انجام می‌شوند $\{t_j, 1 \leq j \leq k\}$ هستند که به‌ازای $t_i < t_j$ و $i < j$ داده شده‌اند.

در مدت عمل PM، کاهش در تابع شدت برابر δ_j است. همه خرابی‌ها در سراسر دوره طول عمر، از طریق انجام کمینه تعمیرات برطرف می‌شوند [۱۴].

نرخ خرابی قابل اصلاح بعد از k عمل PM، توسط رابطه (۱۲) محاسبه شده است.

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \sum_{i=1}^k \delta_i \quad (12)$$

شکل (۲) نمودار تابع نرخ خرابی با و بدون k عمل PM را نشان می‌دهد.

این سری برای همه مقادیر x برقرار است.

بنابراین، روش‌های بهینه‌سازی می‌توانند مقدار جواب بهینه رابطه (۱۶) را پیدا کنند.

$$t_{WithM} = solve \left\{ \begin{array}{l} \frac{\beta}{\eta} \cdot \left((1 - R_{required}) \cdot \left(\frac{t_{WithM}}{\eta} \right)^{\beta-1} - \left(\frac{t_{WithM}}{\eta} \right)^{2\beta-1} \right) \\ + R_{required} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \delta_i \right) = 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

توزیع رایلی ($\beta = 2$) که در این مقاله استفاده شده، حالت خاصی از توزیع ویبول است.

در نتیجه، مدل شاخص بهره‌وری طول عمر می‌تواند توسط رابطه (۱۷) بیان شود.

$$LEI = \frac{t_{WithM}}{t_{WithoutM}} \quad (17)$$

که در آن، LEI شاخص بهره‌وری طول عمر^۱ است.

۴. بهینه‌سازی استراتژی نگهداری و تعمیرات

این بخش فرمول‌بندی مسئله و روش بهینه‌سازی انتخابی را که روش الگوریتم جستجوی کلاغ توسعه یافته است، پیشنهاد می‌دهد.

۱.۴. فرمول‌بندی مسئله

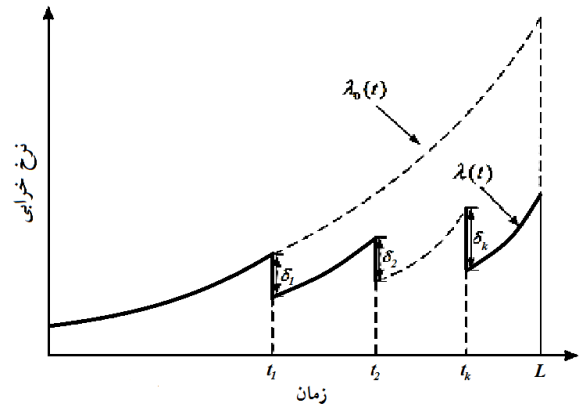
در این مقاله، نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت به منظور کمینه کردن هزینه نگهداری و تعمیرات، بهینه شده است که شامل هزینه‌های PM و CM تحت شرط قابلیت اطمینان مورد نیاز است [۱۵]. تابع هدف کمینه کردن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات است در حالی که قیود رعایت شوند.

۱. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات: هزینه‌های نگهداری و تعمیرات شامل هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی است. روابط (۱۸) تا (۲۳) در مراجع [۷] و [۱۴] معرفی شده‌اند.

الف. هزینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه: هزینه PM شامل دو بخش است. بخش اول هزینه ثابت است، همانند هزینه نگهداری و تعمیرات پایه. بخش دیگر هزینه متغیر است که می‌تواند توسط سطح PM (δ) تعریف شود. هزینه PM توسط رابطه (۱۸) محاسبه شده است.

$$C_{PM} = C_{Fixed} + C_{Variable} \cdot \Delta\delta \quad (18)$$

که در آن، C_{PM} هزینه PM [ریال]، C_{Fixed} هزینه ثابت [ریال]، $C_{Variable}$ هزینه متغیر [ریال]، $\Delta\delta$ نسبت سطح PM است.



شکل (۲): نرخ خرابی با و بدون عمل PM

۳.۳. مدل شاخص بهره‌وری طول عمر

برای مدل کردن شاخص بهره‌وری طول عمر، در ابتدا طول عمر بدون نگهداری و تعمیرات ($t_{WithoutM}$) و طول عمر با نگهداری و تعمیرات (t_{WithM}) به ترتیب توسط روابط (۱۳) و (۱۴) بیان می‌شوند. رابطه (۱۳) توسط رابطه (۷) و رابطه (۱۴) توسط روابط (۳)، (۵) و (۱۲) به دست آمده است.

$$t_{WithoutM} = \eta \cdot \left(-\ln(R_{required}) \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

که در آن، $t_{WithoutM}$ طول عمر بدون نگهداری و تعمیرات و $R_{required}$ حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز است.

$$t_{WithM} = solve \left(\frac{\frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t_{WithM}}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t_{WithM}}{\eta} \right)^{\beta}}}{\lambda_0(t_{WithM}) - \sum_{i=1}^k \delta_i} - R_{required} = 0 \right) \quad (14)$$

که در آن، t_{WithM} طول عمر با نگهداری و تعمیرات است.

توجه شود که t_{WithM} یک متغیر نامعلوم است و δ توسط روش بهینه‌سازی به دست می‌آید و هدف آن است که قابلیت اطمینان برابر یا بیشتر از حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز ($R_{required}$) که یک مقدار معلوم از مسئله است، باشد. این یک فرمول ضمنی است و ممکن است باعث شود که بهینه‌سازی همگرا نشود، اما می‌توان برای بخش نمایی فرمول شاخص بهره‌وری طول عمر از سری تیلور به منظور همگرایی بهینه‌سازی استفاده کرد. سری تیلور برای تابع نمایی طبیعی e^x به صورت رابطه (۱۵) است.

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (15)$$

که در آن، x یک متغیر و $n!$ برابر فاکتوریل n است.

برای این مسئله، یک تقریب مناسب می‌تواند $e^x = 1 + x$ باشد و

۲. قیود: اکنون می‌توان در تابع هدف قیود را به صورت زیر در نظر گرفت که قیود (۲۴) و (۲۵) در مراجع [۷] و [۱۴] و قید (۲۶) در این مقاله تعریف شده است.

الف. قید قابلیت اطمینان: بعد از عمل PM، باید قابلیت اطمینان تجهیز برابر یا بیشتر از قابلیت اطمینان مورد نیاز شود، همان‌گونه که در رابطه (۲۴) نشان داده شده است.

$$R_{equipment} \geq R_{required} \quad (24)$$

که در آن، $R_{equipment}$ قابلیت اطمینان تجهیز و $R_{required}$ قابلیت اطمینان مورد نیاز است.

ب. قید سطح نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه: بعد از عمل PM، نرخ خرابی تجهیز نمی‌تواند کمتر از PM قبلی باشد. این به این معنی است که PM نمی‌تواند یک تجهیز جدید ایجاد کند. قید سطح PM توسط رابطه (۲۵) تعریف شده است.

$$0 < \delta_i < \lambda_0(t_i) - \lambda_0(t_{i-1}) \quad (25)$$

که در آن، δ_i سطح PM در زمان i [رخداد/سال]، $\lambda_0(t_i)$ نرخ خرابی بدون PM در زمان i [رخداد/سال] و $\lambda_0(t_{i-1})$ نرخ خرابی بدون PM در زمان $i-1$ [رخداد/سال] است.

ج. قید شاخص بهره‌وری طول عمر: بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات تجهیز باید تحت شرایطی که بهره‌وری برابر یا بیشتر از بهره‌وری مورد نیاز باشد، انجام شود، همان‌گونه که در رابطه (۲۶) نشان داده شده است.

$$LEI = \frac{t_{WithM}}{t_{WithoutM}} \geq LEI_{required} \quad (26)$$

که در آن، LEI شاخص بهره‌وری طول عمر و $LEI_{required}$ شاخص بهره‌وری طول عمر مورد نیاز است.

۲.۴. الگوریتم جستجوی کلاغ

CSA یک روش بهینه‌سازی بر پایه جمعیت است که الهام گرفته از رفتار دسته کلاغ‌هاست و توسط علیرضا عسکرزاده در سال ۲۰۱۶ معرفی شد [۱۶]. کلاغ‌ها به عنوان هوشمندترین پرندگان در نظر گرفته می‌شوند. کلاغ‌ها می‌توانند چهره‌ها را به یاد بیاورند و وقتی یک پرنده ناآشنا به نظر آید، به یکدیگر هشدار دهند. آن‌ها می‌توانند به شیوه‌های ماهرانه با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و مکانی را که غذایشان را در آنجا مخفی کرده‌اند، تا چندین ماه به یاد بیاورند. کلاغ‌ها دیگر پرندگان را زیر نظر می‌گیرند، آن‌ها جایی را که دیگر پرندگان غذایشان را مخفی می‌کنند، مشاهده می‌کنند و وقتی صاحبشان آنجا را ترک می‌کند، آن را می‌دزدند [۱۶].

نسبت سطح PM ($\Delta\delta$) به صورت تقسیم هریک از سطوح PM بر اولین سطح PM شرح داده شده است.

فرض می‌شود که تجهیز در کل دوره طول عمر k عمل PM داشته باشد. کل هزینه PM توسط رابطه (۱۹) محاسبه شده است.

$$TC_{PM} = \sum_{i=1}^k (C_{Fixed} + C_{Variable} \cdot \delta_i) \quad (19)$$

که در آن، TC_{PM} کل هزینه PM است.

ب. هزینه نگهداری و تعمیرات اصلاحی: وقتی که تجهیز خراب است، نیاز به خدمات نگهداری و تعمیرات دارد. هزینه هر CM بستگی به تعداد مورد انتظار خرابی‌ها در کل زمان بهره‌برداری دارد. تعداد مورد انتظار خرابی‌ها بدون PM توسط رابطه (۲۰) محاسبه شده است.

$$E[N(L)] = \Lambda_0(L) = \int_0^L \lambda_0(t) dt = \left(\frac{L}{\eta}\right)^\beta \quad (20)$$

که در آن، $\Lambda_0(L)$ تابع نرخ خرابی تجمعی بدون PM [رخداد/سال]، N تعداد خرابی‌ها (رخداد) و L عمر تجهیز (سال) است.

تعداد مورد انتظار خرابی‌ها با k عمل PM توسط ناحیه زیر منحنی در شکل (۲) محاسبه شده است و در رابطه (۲۱) نشان داده شده است.

$$E[N(L)] = \Lambda(L) = \Lambda_0(L) - \sum_{i=1}^k \delta_i \cdot (L - t_i) \quad (21)$$

$$= \left(\frac{L}{\eta}\right)^\beta - \sum_{i=1}^k \delta_i \cdot (L - t_i)$$

که در آن، $\Lambda(L)$ تابع شدت خرابی تجمعی با k عمل PM [رخداد/سال] و t_i زمان عملیات PM [سال] است.

هزینه هر عمل CM به صورت C_{CM} نمایش داده می‌شود و کل هزینه CM توسط رابطه (۲۲) محاسبه شده است.

$$TC_{CM} = C_{CM} \cdot E[N(L)] = C_{CM} \cdot \left[\left(\frac{L}{\eta}\right)^\beta - \sum_{i=1}^k \delta_i \cdot (L - t_i) \right] \quad (22)$$

که در آن، TC_{CM} کل هزینه CM [ریال] و C_{CM} هزینه هر عمل CM [ریال] است.

در نتیجه، مسئله بهینه‌سازی به منظور کمینه کردن تابع هدف بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و قیود سطح PM می‌تواند به صورت رابطه (۲۳) بیان شود.

$$Min(TC_{PM} + TC_{CM}) \quad (23)$$

متغیرهای تصمیم تابع هدف در (۲۳) تعداد عملیات PM (k).

زمان PM (t_i) و سطح PM (δ_i) هستند.

۱.۲.۴. الگوریتم جستجوی کلاغ پایه

قواعد کلی CSA به صورت زیر لیست شده‌اند [۱۶]:

- کلاغ‌ها به شکل دسته‌جمعی زندگی می‌کنند؛
- کلاغ‌ها موقعیت مکان‌های مخفی‌شان را به یاد می‌سپارند؛
- کلاغ‌ها برای انجام دزدی یکدیگر را تعقیب می‌کنند؛
- با یک احتمال، کلاغ‌ها ذخایرشان را از دزدیده شدن حفاظت می‌کنند.

در الگوریتم CSA پایه، موقعیت کلاغ i در زمان (تکرار) $iter$ در فضای جستجو توسط $\text{Position}(i, iter)$ مشخص می‌شود که $(i = 1, 2, \dots, N; iter = 1, 2, \dots, iter_{max})$ است. هر کلاغ در $iter_{max}$ حداکثر تعداد $x^{i, iter} = [x_1^{i, iter}, x_2^{i, iter}, \dots, x_d^{i, iter}]$ تکرارهاست و تعداد کلاغ‌ها (جمعیت دسته) برابر N است. هر کلاغ در موقعیتی که مکان مخفی‌اش به یاد سپرده شده است، یک حافظه دارد. موقعیت مکان مخفی کلاغ i در تکرار $iter$ توسط $m^{i, iter}$ نشان داده شده است. این بهترین موقعیتی است که کلاغ i تاکنون به آن رسیده است. در واقع در حافظه هر کلاغ موقعیت بهترین تجربه به یاد سپرده می‌شود. کلاغ‌ها در محیط جابه‌جا می‌شوند و منابع غذایی بهتر (مکان‌های مخفی) را جستجو می‌کنند. فرض می‌شود که کلاغ j می‌خواهد در تکرار $iter$ ، مکان مخفی‌اش ($m^{j, iter}$) را ملاقات کند. در این تکرار کلاغ i تصمیم می‌گیرد که کلاغ j را به منظور دستیابی به مکان مخفی کلاغ j تعقیب کند. در این وضعیت دو حالت ممکن است اتفاق بیفتد:

$$x^{i, iter+1} = x^{i, iter} + r_i \times fl^{i, iter} \times (m^{j, iter} - x^{i, iter}) \quad (27)$$

که در آن، r_i یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ است و $fl^{i, iter}$ طول پرواز کلاغ i را در تکرار $iter$ مشخص می‌کند.

حالت ۲: کلاغ j می‌داند که کلاغ i او را تعقیب می‌کند. به عنوان یک نتیجه، کلاغ j با رفتن به موقعیت دیگری از فضای جستجو به منظور حفاظت از مورد دستبرد قرار گرفتن مکان مخفی‌اش، کلاغ i را فریب خواهد داد.

در مجموع، حالات ۱ و ۲ توسط رابطه (۲۸) بیان می‌شوند [۱۶].

$$x^{i, iter+1} = \begin{cases} x^{i, iter} + r_i \times fl^{i, iter} \times (m^{j, iter} - x^{i, iter}) & r_j \geq AP^{j, iter} \\ \text{a random position} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

که در آن، r_j یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱

و $AP^{j, iter}$ احتمال آگاهی کلاغ j را در تکرار $iter$ مشخص می‌کند.

۲.۲.۴. الگوریتم جستجوی کلاغ توسعه یافته

الگوریتم پیشنهادی به منظور کشف جواب‌های با کیفیت بالاتر (بهره‌وری) و همچنین جستجوی نقاط بیشتری از فضای جستجو (کاوش)، fl را یک عدد کاهشی متغیر با زمان (تکرار) در نظر می‌گیرد. به این صورت که در ابتدا fl مقدار بزرگی داشته باشد و به تدریج کاهش یابد. این باعث می‌شود که الگوریتم بهینه‌سازی در تکرارهای پایین به منظور جلوگیری از همگرایی زودهنگام و جهش از بهینه محلی، کاوش بیشتری انجام دهد و در تکرارهای بالا به سمت بهره‌وری بیشتر پیش رود. این مطلب این‌گونه تفسیر می‌شود که هرچه کلاغ با تجربه‌تر شود و به حافظه خود رجوع کند، از کاوش مکان‌های مخفی به سمت کشف منابع غذایی باکیفیت‌تر میل پیدا می‌کند. شکل (۳) کد روش DCSA پیشنهادی را نشان می‌دهد.

DCSA Method

- 1: Randomly initialize the position of a flock of N crows in the search space
- 2: Evaluate the position of the crows
- 3: Initialize the memory of each crow
- 4: while $iter < iter_{max}$
- 5: for $i = 1: N$ (all N crows of the flock)
- 6: Randomly choose one of the crows to follow (for example j)
- 7: Define an awareness probability
- 8: if $r_j \geq AP^{j, iter}$
- 9: $x^{i, iter+1} = x^{i, iter} + r_i \times (fl_{max} - \frac{fl_{max} - fl_{min}}{iter_{max}} \times iter_i) \times (m^{j, iter} - x^{i, iter})$
- 10: else
- 11: $x^{i, iter+1} =$ a random position of search space
- 12: end if
- 13: end for
- 14: Check the feasibility of new positions
- 15: Evaluate the new position of the crows
- 16: Update the memory of crows
- 17: end while

شکل (۳): کد روش DCSA پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی (DCSA) دو برتری نسبت به الگوریتم پایه (CSA) دارد. اول به دلیل اینکه در تکرارهای پایین ضریب $(fl_{max} - \frac{fl_{max} - fl_{min}}{iter_{max}} \times iter_i)$ مقدار بزرگی است و به مقدار fl_{max} نزدیک است، کاوش بیشتری در فضای جستجو انجام می‌شود. دوم به دلیل اینکه در تکرارهای بالا ضریب ذکر شده مقدار کوچکی است و به مقدار fl_{min} نزدیک است، امکان دستیابی به جواب‌های باکیفیت‌تر بیشتر می‌شود.

۵. روش حل

شکل (۴) روش حل برای بهینه‌سازی پیشنهادی نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت را نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی با یک جمعیت اولیه از پارامترهای نگهداری و تعمیرات شروع می‌شود و زمانی که به همگرایی یا مرتبه تکرار نهایی می‌رسد، به پایان می‌رسد. بر طبق طرح‌واره روش پیشنهادی نشان داده شده در شکل (۴)، مراحل DCSA مسئله ذکر شده به صورت زیر است:

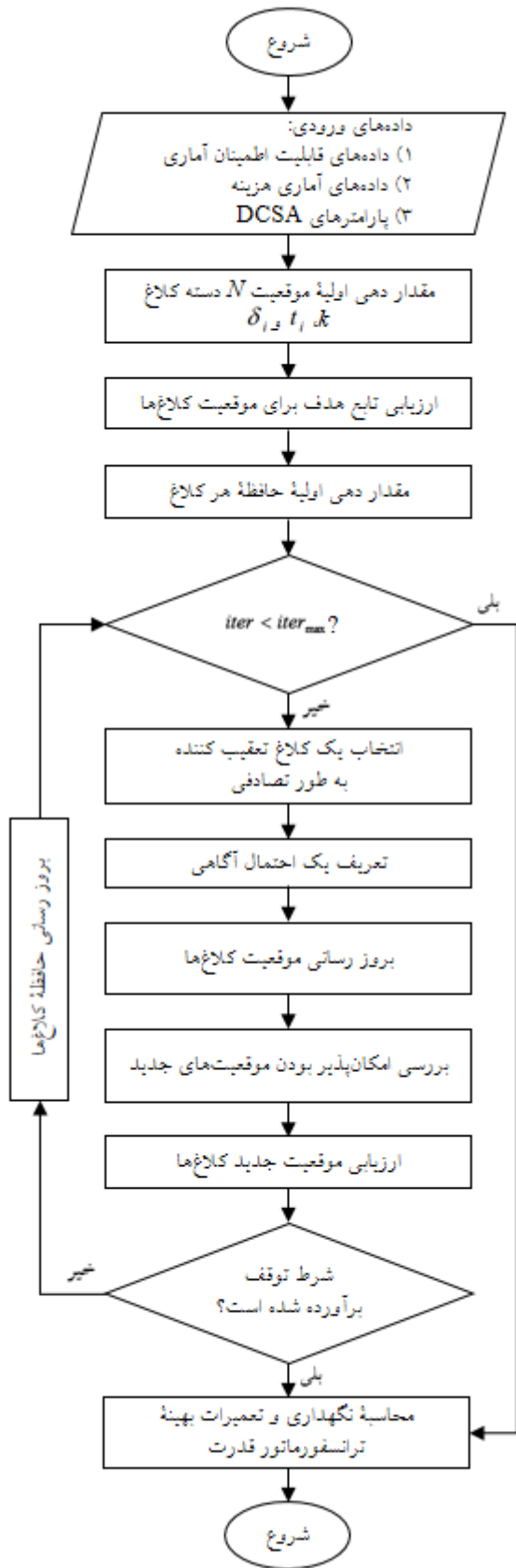
- مرحله ۱: تعیین ورودی‌ها شامل پارامترهای ورودی DCSA، داده‌های آماری قابلیت اطمینان و داده‌های هزینه ترانسفورماتور قدرت.
- مرحله ۲: مقداردهی اولیه موقعیت N دسته کلاغ در فضای جستجو که از دید مسئله، پارامترهای نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت هستند و شامل تعداد عملیات $PM(k)$ ، زمان t و سطح $PM(\delta)$ می‌شوند.
- مرحله ۳: ارزیابی موقعیت کلاغ‌ها.
- مرحله ۴: مقداردهی اولیه برای حافظه هر کلاغ.
- مرحله ۵: انتخاب یک کلاغ تعقیب‌کننده به طور تصادفی برای هر یک از کلاغ‌های دسته.
- مرحله ۶: تعریف یک احتمال آگاهی.
- مرحله ۷: بروزرسانی موقعیت جدید کلاغ‌ها.
- مرحله ۸: بررسی شدنی بودن (امکان‌پذیر بودن) موقعیت‌های جدید.
- مرحله ۹: ارزیابی موقعیت جدید کلاغ‌ها.
- مرحله ۱۰: بروزرسانی حافظه کلاغ‌ها.
- مرحله ۱۱: محاسبه نگهداری و تعمیرات بهینه ترانسفورماتور قدرت در صورت برآورده شدن شرط توقف و در غیر این صورت رفتن به مرحله ۵.

۶. مطالعات عددی

به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی برای به دست آوردن نگهداری و تعمیرات بهینه یک ترانسفورماتور قدرت، نتایج روش DCSA با روش‌های GA و PSO مقایسه شده‌اند. نرخ خرابی ترانسفورماتور قدرت مدل شده توسط توزیع ویبول با پارامترهای شکل و مقیاس در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای مدل کردن نگهداری و تعمیرات در جدول (۲) ارائه شده است و مقادیر محدوده قیود در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای تابع توزیع نرخ خرابی

پارامترهای توزیع ویبول	پارامتر شکل (β)	پارامتر مقیاس (η)
نرخ خرابی	۲	۵۵/۵



شکل (۴): طرح‌واره نگهداری و تعمیرات بهینه ترانسفورماتور قدرت

جدول (۴): پارامترهای DCSA

مقدار	پارامترهای DCSA
۱۰۰	حداکثر تعداد تکرارها (T)
۲۰	تعداد کلاغ‌ها (N)
$fl_{max} = 4$	طول پرواز (fl)
$fl_{min} = 1$	
۰/۱	احتمال آگاهی (AP)

تعداد بهینه عملیات PM (k)، زمان PM (t_i) و سطح PM (δ_i) در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد که روش DCSA پیشنهادی مقدار بیشتری برای شاخص بهره‌وری طول عمر و با هزینه کل کمتر نسبت به روش‌های GA و PSO به دست آورده است. هزینه کل نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت به دست آمده از روش DCSA مقدار ۶۸۳،۷۷۰،۸۰۰ ریال است که مقدار هزینه PM با در نظر گرفتن هزینه قیود مسئله و هزینه CM به ترتیب ۷۸۶،۱۱۲،۰۷۰ ریال و ۱۴،۵۷۱،۷۰۰ ریال است.

جدول (۵): نگهداری و تعمیرات بهینه ترانسفورماتور قدرت

نگهداری و تعمیرات بهینه					
روش	تعداد (k)	زمان (t_i) [سال]	سطح (δ_i) [رخداد/سال]	شاخص بهره‌وری طول عمر (LEI) [%]	هزینه کل [ریال]
GA	۱	۹/۲۵۸۹۹۷	۰/۰۲۴۷۵۲	۱۳۴/۰۹	۲۷۹،۲۷۳،۲۵۵
	۲	۱۸/۵۱۷۹۹۴	۰/۰۲۴۷۵۲	۱۷۸/۷۷	۵۴۶،۱۶۸،۹۱۱
	۳	۲۷/۷۷۶۹۹۱	۰/۰۲۴۷۵۲	۲۱۰/۳۱	۸۰۰،۶۸۶،۹۶۷
PSO	۱	۹/۲۵۸۹۶۷	۰/۰۲۴۹۸۴	۱۳۳/۹۹	۲۷۹،۲۷۲،۴۱۴
	۲	۱۸/۵۱۷۹۳۴	۰/۰۲۴۹۸۴	۱۷۸/۶۵	۵۴۶،۱۶۷،۲۲۸
	۳	۲۷/۷۷۶۹۰۱	۰/۰۲۴۹۸۴	۲۱۰/۱۸	۸۰۰،۶۸۴،۴۴۳
DCSA	۱	۹/۲۵۸۹۵۹	۰/۰۲۴۹۷۲	۱۳۳/۹۶	۲۷۹،۲۷۲،۱۹۰
	۲	۱۸/۵۱۷۹۱۸	۰/۰۲۴۹۷۲	۱۷۸/۶۱	۵۴۶،۱۶۶،۷۸۰
	۳	۲۷/۷۷۶۸۷۷	۰/۰۲۴۹۷۲	۲۱۰/۱۳	۸۰۰،۶۸۳،۷۷۰

شکل (۵) منحنی همگرایی روش DCSA پیشنهادی و مقایسه آن با منحنی‌های همگرایی روش‌های GA و PSO را نشان می‌دهد که برای به دست آوردن نگهداری و تعمیرات بهینه ترانسفورماتور قدرت در راستای کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات و افزایش طول عمر ترانسفورماتور قدرت در یک سطح قابلیت اطمینان مورد نیاز انجام گرفته است.

جدول (۲): پارامترهای فرض شده برای مدل کردن نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت

پارامتر	مقدار
مدت زمان طول عمر (L) [سال]	۴۰
هزینه هر نگهداری و تعمیرات اصلاحی (جایگزینی با یک ترانسفورماتور جدید) (C_{CM}) [ریال]	۲۸،۰۵۲،۸۰۰
هزینه ثابت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (x) [ریال]	۷،۰۱۳،۲۰۰
هزینه متغیر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (y) [ریال]	۸۴،۱۴۵،۴۰۰

جدول (۳): قیود برای مدل کردن نگهداری و تعمیرات

قیود	مقدار
قابلیت اطمینان مورد نیاز	≥ 0.9
شاخص بهره‌وری طول عمر مورد نیاز	$\geq 20\%$

۱.۶. بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور قدرت

به منظور پیدا کردن نگهداری و تعمیرات بهینه برای ترانسفورماتور قدرت، تابع هدف در رابطه (۲۳) توسط DCSA، PSO و GA تحت قیود (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) حل شده است. تنظیمات پارامترهای هر الگوریتم به صورت زیر لیست شده است:

$$\left. \begin{aligned} T &= 100 \\ N &= 20 \\ P_C &= 0.6 \\ P_M &= 0.001 \end{aligned} \right\} \text{GA (۱)}$$

که T تعداد تکرارها، N اندازه جمعیت، P_C احتمال همبندی خطی و P_M احتمال جهش یکنواخت است.

$$\left. \begin{aligned} T &= 100 \\ N &= 20 \\ C_1 &= C_2 = 2 \\ \omega &= 0.9 - 0.3 \end{aligned} \right\} \text{PSO (۲)}$$

که C_1 و C_2 ضرایب سرعت هستند که به ترتیب ثابت‌های تجربه شخصی و تجربه گروه نامیده می‌شوند و ω ضریب وزنی است که یک تابع کاهشی است.

DCSA (۳)

تنظیمات پارامتر برای DCSA پیشنهادی، در جدول (۴) ارائه شده است.

تعداد تجمعی موردانتظار خرابی‌های ترانسفورماتور قدرت با نگهداری و تعمیرات بهینه به‌دست‌آمده از روش DCSA و بدون نگهداری و تعمیرات در جدول (۶) ارائه شده است.

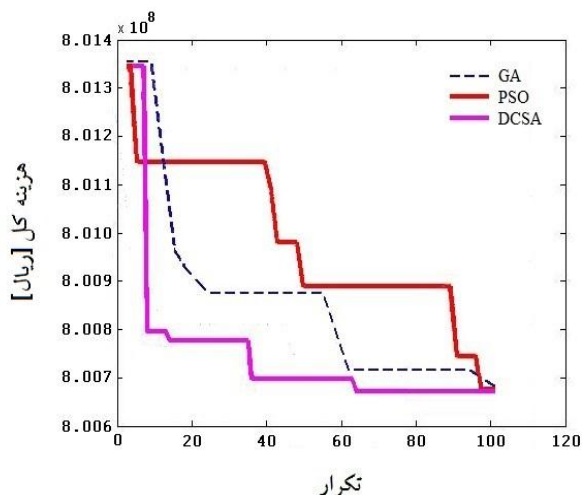
بر طبق جدول (۶)، تعداد تجمعی موردانتظار خرابی‌ها با نگهداری و تعمیرات کمتر از بدون نگهداری و تعمیرات در کل دوره طول عمر است. در نتیجه نگهداری و تعمیرات بهینه می‌تواند تعداد تجمعی موردانتظار خرابی‌ها را تا ۴۸/۲۲ درصد کاهش دهد.

جدول (۶): تعداد تجمعی موردانتظار خرابی‌های ترانسفورماتور قدرت

تعداد	زمان [سال]	تعداد تجمعی موردانتظار خرابی‌ها [رخداد]	
		بدون نگهداری و تعمیرات	با نگهداری و تعمیرات بهینه
۱	۹/۲۵۸۹۵۹	۰/۲۷۸۳۱	۰/۲۷۸۳۱
۲	۱۸/۵۱۷۹۱۸	۰/۸۳۴۹۵	۰/۱۱۱۳۲۶
۳	۲۷/۷۷۶۸۷۷	۰/۱۳۹۱۵۸	۰/۲۵۰۴۸۴
۴	۴۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۲۶۸۹۵۴	۰/۵۱۹۴۳۸

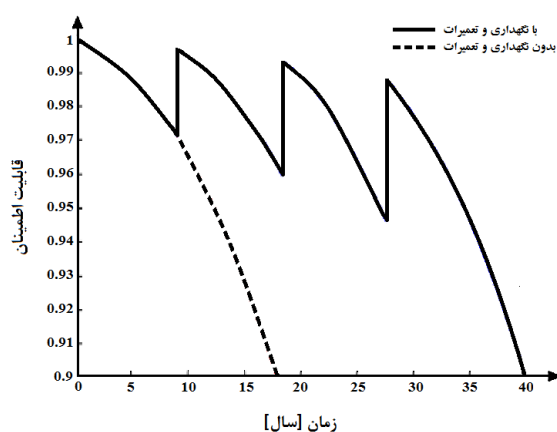
۷. نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل شاخص بهره‌وری طول عمر برای ترانسفورماتور قدرت و یک روش DCSA به‌منظور دستیابی به نگهداری و تعمیرات بهینه برای ترانسفورماتور قدرت ارائه می‌کند. توسط شاخص بهره‌وری طول عمر می‌توان طول عمر ترانسفورماتور قدرت را تحت شرایط با و بدون نگهداری و تعمیرات تجزیه و تحلیل کرد. این مطالعه اثبات می‌کند که روش DCSA پیشنهادی می‌تواند جواب‌های با کیفیت بالاتر برای نگهداری و تعمیرات نسبت به روش‌های GA و PSO به‌دست آورد. نگهداری و تعمیرات بهینه یک تعادل بین PM و CM تحت شرایط شاخص بهره‌وری طول عمر موردنیاز و قابلیت اطمینان موردنیاز است. احتمال خرابی ترانسفورماتور قدرت توسط یک تابع توزیع ویبول مناسب مدل شده که بیانگر سیر خرابی و قطعی‌های ترانسفورماتور قدرت است. استراتژی نگهداری و تعمیرات بهینه می‌تواند تعداد موردانتظار خرابی‌های ترانسفورماتور قدرت را کاهش دهد؛ به عبارت دیگر، نگهداری و تعمیرات بهینه می‌تواند قابلیت اطمینان را بهبود دهد و هزینه کل نگهداری و تعمیرات را هنگامی که قبود بهره‌برداری و هزینه اقتصادی برآورده شوند، کمینه کند.



شکل (۵): منحنی همگرایی روش DCSA پیشنهادی و مقایسه آن با منحنی‌های همگرایی روش‌های GA و PSO

قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت با و بدون نگهداری و تعمیرات در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت 1,000 kVA در حالات با و بدون نگهداری و تعمیرات

بر طبق شکل (۶)، یک ترانسفورماتور قدرت که بتواند حداکثر ۴۰ سال تحت سطح قابلیت اطمینان موردنیاز عمر کند (۰/۹ تا ۱)، بدون نگهداری و تعمیرات کمتر از ۱۹ سال عمر می‌کند و با نگهداری و تعمیرات بهینه می‌تواند حداکثر ۴۰ سال تحت سطح قابلیت اطمینان موردنیاز کار کند.

مراجع

[1] Han, Z., Hai, Q., An, C., Quan, Z., "Study on The Optimization of Maintenance Strategy Based on Life Cycle Cost Estimate of Transformer", Computer

Modelling and New Technologies, Vol. 18, pp. 390-394, 2014.

[2] Liu, X., Chen, S., Pu, J., Wang, X., "A Flexible All-Solid-

- State Micro Supercapacitor and Its Application in Electrostatic Energy Management System*", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 25, pp. 929-936, Oct. 2016.
- [3] Tsai, Y. T., Wang, K. S., Teng, H. Y., "Optimizing Preventive Maintenance for Mechanical Components Using Genetic Algorithms", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 74, pp. 89-97, Oct. 2001.
- [4] Mela, A., "Optimizing Preventive Maintenance of Substation Components Using Monte Carlo", International conference of Smart Grid (SASG), pp. 1-6, 2015.
- [5] Heo, J. H., Park, G. P., Yoon, Y. T., Park, J. K., "Application of Particle Swarm Optimization for an Optimal Maintenance Strategy in Transmission Systems", Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2011.
- [6] Wang, C. H., and Lin, T. W., "Improved Particle Swarm Optimization to Minimize Periodic Preventive Maintenance Cost for Series-Parallel Systems", Expert Systems with Applications, Vol. 38, pp. 8963-8969, 2011.
- [7] Sudket, N., Chaitusaney, S., "Optimal Maintenance of Substation Equipment by Considering Maintenance Cost and Reliability", International Conference of Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, pp. 1-6, 2015.
- [8] Marvin, R., and Arnljot, H., "System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications", John Wiley & Sons, 2004.
- [9] Roy, B., Ronald, N. A., "Reliability Evaluation of Engineering Systems", New York: Plenum press, 1983.
- [10] Dinesh, U. K., John, C., Jezdimir, K., "Reliability, Maintenance and Logistic Support", Springer Science & Business Media, 2012.
- [11] Martin, L. S., "Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance", Analysis, and Design, Wiley-Interscience, 2001.
- [12] Navapol, S., Surachai, C., "Optimization of Substation Equipment Maintenance by Considering Equipment Deterioration", International conference of Electrical Engineering Congress, pp. 1-4, 2015.
- [13] Nggada, S. H., "Characteristics of Exponential Distribution with Respect to Preventive Maintenance", International Journal of Control and Automation, Vol. 8, pp. 179-188, Jan. 2015.
- [14] Khairy, A. H. K., "Complex System Maintenance Handbook", Springer Science & Business Media, 2008.
- [15] Kamran, S. M., John, S. U., "Optimal Preventive Maintenance and Replacement Schedules with Variable Improvement Factor", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.16, pp. 271-287, 2010.
- [16] Alireza, A., "A Novel Metaheuristic Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems: Crow Search Algorithm", Computers & Structures, Vol. 169, pp. 1-12, Jun. 2016.