

A new method for using the UV-Visible spectrum of oil to evaluate the paper insulation quality of used transformers

Reza Emadifar¹, Ph.D. Student, Navid Taghizadegan-Kalantari², Associate professor, Vahid Behjat³ Associate professor, Reza Najjar⁴, Associate professor

1- Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, e-mail: r.emadifar@azaruniv.ac.ir,

2- Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, e-mail: taghizadegan@azaruniv.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, e-mail: vahid.behjat@gmail.com

4- Polymer Research Laboratory, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran, e-mail: Najjar@tabrizu.ac.ir

Abstract:

Power transformers are one of the most vital and expensive devices in the electricity transmission and distribution network. Therefore, monitoring and evaluating their operational condition is a vital issue for managers in the electricity industry to prevent failure in the power distribution network, maintain their highly reliable performance, manage their assets, and increase the productivity of the network. The results of many research works have indicated that the useful life of a transformer is directly related to the life of its paper insulation system. The measurement of furan compounds released into the insulation oil due to the degradation of cellulose in insulation paper is a common method for assessing the operational condition of the transformers. High-performance liquid chromatography (HPLC) has been introduced as one of the relatively well-established methods for measuring furan compounds according to ASTM-D-5837. Regarding the need for high profession and expertise for operating and using HPLC system as well as the high price of this system, it is inevitable to develop fast, simple, cheap, and user-friendly systems and techniques with high precision without any need for high operator profession. The use of ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy has been proposed as a new, effective, and economically preferable alternative method for measuring the concentration of cellulose degradation compounds in insulation oil. However, the excessive turbidity of the oil in older transformers caused by the cellulose degradation products exerts a relatively high ambiguity on the results of this technique and may make its results somehow unreliable. In this paper, a new method is proposed to improve the optical spectrum results and solve the turbidity problem of the used oil samples. This method is composed of the dilution of oil samples with adequate solvents to overcome their high turbidity in combination with the fuzzy logic to evaluate the UV-Vis results. The proposed method was implemented on oil samples taken from 23 transformers. A fuzzy logic algorithm is used to estimate the furan compound contents from the optical spectrum of the oil. The comparison between the results of the method developed in this work and the results of HPLC analysis reveals a relative error as low as 11%, proving that the developed method can be a safe, fast, and cost-effective solution for electricity distribution network operators to assess and monitor the status of network transformers.

Keywords: Transformers, Transformer Insulator Evaluation, Furan, Spectroscopy, High-Performance Liquid Chromatography, Paper Insulation, Fuzzy Logic

Submit date: 2021/05/08

Accepted date: 2022/01/17

Corresponding author Name: Navid Taghizadegan-Kalantari

Corresponding author address: Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

روشی جدید در استفاده از طیف ماوراء بنفش-مرئی روغن برای ارزیابی کیفیت عایق کاغذی ترانسفورماتورهای کارکرده

نوع مطالعه: پژوهشی

رضا عمادی فر^۱، دانشجوی دکتری، نوید تقی زادگان کلانتری^۲، دانشیار، وحید بهجت^۳، دانشیار، رضا نجار^۴، دانشیار

- ۱- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران
R.emadifar@azaruniv.ac.ir -
- ۲- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران
Taghizadegan@azaruniv.ac.ir -
- ۳- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران
Behjat@azaruniv.ac.ir -
- ۴- دانشکده شیمی- دانشگاه تبریز - تبریز- ایران
Najjar@tabrizu.ac.ir -

چکیده: ترانسفورماتورهای قدرت یکی از حیاتی ترین و گران ترین تجهیزات شبکه انتقال و توزیع انرژی الکتریکی هستند. از این رو پایش و ارزیابی وضعیت آن‌ها به منظور جلوگیری از بروز خرابی، مدیریت دارایی و افزایش بهره‌وری شبکه، برای مدیران صنعت برق بسیار حائز اهمیت است. تحقیقات نشان می‌دهد عمر مفید ترانسفورماتور معادل با عمر عایق کاغذی آن است. سنجش ترکیبات فوران آزاد شده ناشی از تخریب عایق سلولزی یک روش متداول برای ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهاست. یکی از روش‌های سنجش ترکیبات فوران، استفاده از HPLC بر اساس استاندارد ASTM-D-5837 است. استفاده از طیف‌نگاری نوری ماوراء بنفش-مرئی به عنوان یک روش جدید و جایگزینی مؤثر و اقتصادی برای اندازه‌گیری غلظت ترکیبات فوران پیشنهاد شده است. اما کدورت بیش از حد روغن ترانسفورماتورهای مسن، نتایج این روش را غیرقابل استناد می‌کند. در این مقاله روشی جدید، جهت بهبود نتایج طیف‌نوری و رفع مشکل نمونه روغن‌های مستعمل، ارائه شده است. روش ارائه شده بر روی نمونه روغن ۲۳ دستگاه ترانسفورماتور پیاده‌سازی شد. از یک الگوریتم فازی برای تخمین غلظت فوران از روی طیف نوری روغن استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که این روش، می‌تواند راهکاری مطمئن، سریع و مقرون به صرفه برای بهره‌برداران شبکه برق، به منظور ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای شبکه باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی عایق ترانسفورماتور، اسپکتروسکوپی، ترانسفورماتور، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا، عایق کاغذی، منطق فازی، فوران.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

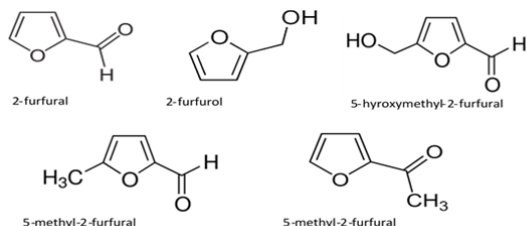
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: نوید تقی زادگان کلانتری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تبریز - کیلومتر ۳۵ جاده تبریز به مراغه - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - دانشکده‌ی فنی و مهندسی

۱- مقدمه

در حین بهره‌برداری ترانسفورماتور امکان‌پذیر نیست استفاده از روش‌های تخمینی مقدار DP جایگزین روش اندازه‌گیری مستقیم DP شده است. در روش‌های تخمینی، مقدار DP عایق کاغذی با اندازه‌گیری غلظت محصولات ناشی از تخریب، مانند ترکیبات فوران که در نتیجه تخریب کاغذ در روغن ترانسفورماتور حل می‌شوند، برآورد می‌شود و دیگر نیازی به نمونه‌برداری از عایق کاغذی نیست و تنها با نمونه‌برداری روغن، حتی بدون نیاز به خاموشی ترانسفورماتور قابل انجام است (عمادی فر و بهجت، ۱۳۹۸). در مرجع (Cheim et al., 2012) مطالعات کاملی در مورد ترکیبات فوران، تاریخچه و نحوه تولید آن‌ها در اثر تخریب عایق کاغذی آورده شده است. شکل ۱، ترکیبات فوران محلول در روغن ترانسفورماتور را نشان می‌دهد که ترکیب ۲- فورفورال در بین آن‌ها از همه پایدارتر بوده و اهمیت بیشتری برای آنالیز دارد (Cheim et al., 2012, De Pablo 1997, Kumar 2007).



شکل (۱): ساختار ترکیبات فوران تولید شده در اثر تخریب عایق کاغذی (Cheim et al., 2012, De Pablo 1997, Kumar 2007) تاکنون روابط متعددی به منظور تخمین مقدار DP از روی غلظت ترکیبات فوران ارائه شده است که از جمله آن می‌توان به روابط ۱ الی ۵، اشاره کرد که توسط پنج گروه تحقیقاتی مختلف مورد مطالعه و صحت آن اثبات شده است (Cheim et al., 2012, De Pablo 1997, Kumar 2007, Ortiz et al., 2016). در روابط (۱) تا (۵)، F غلظت ترکیب ۲-فورفورال بر اساس ppm و DP درجه پلیمریزاسیون کاغذ است.

$$DP = \frac{۲,۶ - \log [F]}{۰,۰۰۰۴۹} \quad (۱)$$

$$DP = \frac{۱,۵۱ - \log [F]}{۰,۰۰۳۵} \quad (۲)$$

$$DP = ۲۳۵ \left(\frac{۱۹}{۱۳} - \log [F] \right) \quad (۳)$$

$$DP = \frac{۱۸۵۰}{[F] + ۲,۳} \quad (۴)$$

$$DP = \frac{۸۰۰}{(۰,۱۸۶۲ \times ۲[F]) + ۱} \quad (۵)$$

ترانسفورماتورهای قدرت یکی از حیاتی‌ترین و گران‌ترین تجهیزات شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی هستند. چنانچه به هر دلیل این ترانسفورماتورها آسیب دیده و از سرویس خارج شوند، انتقال توان قطع و قابلیت اطمینان شبکه در تداوم انتقال انرژی کاهش پیدا می‌کند. به‌علاوه هزینه بالای تعمیرات، تعویض و حمل‌ونقل ترانسفورماتورها بر اهمیت پایش و ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورها در حین بهره‌برداری می‌افزاید. از این‌رو، روش‌هایی که در راستای ارزیابی وضعیت، تشخیص زودهنگام بروز خرابی و به حداقل رساندن احتمال وقوع خطا، به‌ویژه خطاهای منجر به شکست ترانسفورماتور ارائه می‌شوند مورد توجه بهره‌برداران شبکه برق قرار دارند. در سال‌های اخیر چندین مطالعه با هدف توسعه روش‌ها و ابزارهای دقیق و قابل‌اطمینان به منظور ارزیابی وضعیت، پیش‌بینی و تخمین عمر باقیمانده ترانسفورماتورها و تدوین برنامه‌هایی به منظور جلوگیری از خرابی صورت گرفته است (Ghoneim, 2019, Behjat et al. 2021). نفیسی و همکاران (۱۳۹۳) که اجرای آن‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های جاری و سرمایه‌ای بهره بردن شبکه و افزایش کیفیت و بهره‌وری سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی منجر شود. ترانسفورماتورها در طول دوره بهره‌برداری، تنش‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی متعددی را تجربه می‌کنند که منجر به تخریب و پیری سیستم عایقی آن‌ها می‌شود. عایق کاغذی و روغن مهم‌ترین بخش از سیستم عایقی ترانسفورماتورها را تشکیل می‌دهند. ترکیب کاغذ آغشته به روغن موجب ایجاد قدرت عایقی بالاتر و بیشتر از قدرت عایقی تک‌تک آن‌ها می‌شود و همچنین روغن عایقی با تسهیل در خنک کاری و انتقال حرارت سیم‌پیچ‌ها مانع از تسریع در تخریب کاغذ می‌شود (حسینی ۱۳۹۹). روغن ترانسفورماتور در صورت تخریب می‌تواند توسط تکنیک‌های مختلف تصفیه فیزیکی و یا شیمیایی شده و یا حتی می‌توان آن را تعویض کرد اما عایق کاغذی در صورت تخریب غیرقابل تعویض است. عایق کاغذی پس از ساخته شدن ترانسفورماتور قابل‌رؤیت و قابل تغییر نیست به همین دلیل نقش کلیدی در طول عمر ترانسفورماتور دارد (Ancuța-Mihaela et al. 2020). از این‌رو استفاده از تکنیک‌های مختلف جهت بررسی و ارزیابی دوره‌ای عایق کاغذی بسیار مهم است.

مهم‌ترین پارامتر برای ارزیابی وضعیت پیری عایق کاغذی درجه پلیمریزاسیون (DP^۱) است. درجه پلیمریزاسیون نوعی ارزیابی مستقیم خواص مکانیکی سلولز از طریق تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی است. درجه ۳- پلیمریزاسیون ۱۲۰۰ به‌منزله‌ی شرایط بسیار خوب برای عایق کاغذی بوده و کاهش مقدار آن به عدد ۲۰۰، به‌منزله‌ی پایان عمر عایقی کاغذ تلقی می‌گردد (Ancuța-Mihaela et al. 2020). از آنجایی‌که نمونه‌برداری از عایق کاغذی و اندازه‌گیری DP آن

زیاد موجب افزایش بیش از حد شدت جذب در پاسخ طیفی روغن شده به طوری که دقت و صحت اندازه‌گیری قابل استناد نمی‌شود.

به همین منظور در این مقاله راهکاری برای برطرف کردن مشکل شدت جذب برای نمونه روغن‌های مستعمل ترانسفورماتورهای کار کرده ارائه شده است. نوآوری مقاله در روش ارائه شده برای کاهش شدت جذب و شبکه عصبی طراحی شده بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده از نمونه‌های روغن ترانسفورماتورهای میدانی است، که اثر همه شرایط محیطی تأثیرگذار بر فرآیند پیرسازی در داده‌های آزمایش مشهود بوده و در طراحی شبکه عصبی نیز لحاظ شده است.

در این مقاله ابتدا روشی جهت رقیق‌سازی روغن به منظور بهبود نتایج طیف نوری و برطرف کردن مشکل نمونه روغن‌های مستعمل ترانسفورماتورهای کار کرده، ارائه شده است. سپس روش ارائه شده بر روی یک نمونه روغن اخذ شده از یک ترانسفورماتور مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش سوم مطالعات موردی بر روی نمونه‌های روغن ۲۳ دستگاه ترانسفورماتور توزیع در حال بهره‌برداری متعلق به شرکت توزیع برق استان آذربایجان شرقی با محدوده ولتاژ 20KV/400V و میانگین عمر ۷ تا ۳۵ سال مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. در ادامه الگوریتم فازی مورد استفاده معرفی و نحوه عملکرد آن بیان، و در نهایت نتایج روش ارائه شده با نتایج روش HPLC مقایسه شده است.

۲- اندازه‌گیری غلظت فوران به روش طیف نگاری

اسپکتروفتومتر یا طیف‌سنج، دستگاهی است که شدت نور را به صورت تابعی از طول موج اندازه‌گیری می‌کند. این کار با انکسار پرتو نور به طیف طول موج‌ها و آشکارسازی شدت‌ها با دستگاه باردار و نمایش نتایج به صورت گراف انجام می‌شود. در حقیقت با استفاده از میزان جذب نور، غلظت اندازه‌گیری می‌شود.

ماده‌ای که تحت آزمایش با دستگاه اسپکتروسکوپی قرار می‌گیرد باید غلظت و رنگ مناسبی داشته باشد. اگر ماده مورد آزمایش بیش از اندازه غلیظ باشد و همچنین کدورت و تیرگی بالایی داشته باشد، نتایج قابل اطمینان نخواهد بود. یک روغن کارنکرده استاندارد، به رنگ زرد روشن است که پس از تزریق به داخل مخزن ترانسفورماتور و به مرور زمان، تغییر رنگ پیدا می‌کند و بسته به مواد داخل ترانسفورماتور و عمر ترانسفورماتور به رنگ‌های مختلفی درمی‌آید، شکل ۲، رنگ روغن کارنکرده ترانسفورماتور و نتیجه تست اسپکتروفتومتری آن را نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن شرط غلظت ماده انجام شده است.

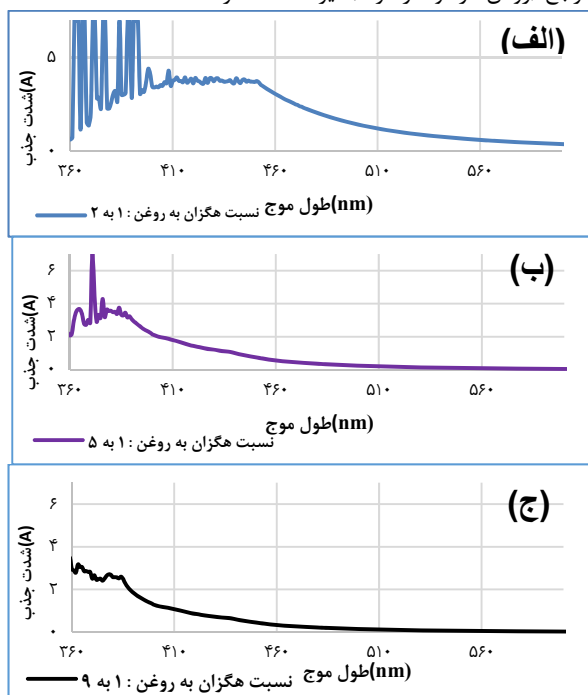
اندازه‌گیری غلظت ترکیبات فوران یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین ابزارها جهت پایش وضعیت عایقی ترانسفورماتورها محسوب می‌شود. برای اندازه‌گیری غلظت ترکیبات فوران استفاده از روش‌های گاز کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC⁺) و اسپکترومتری جرم کروماتوگرافی گاز (GC/MS⁺) پیشنهاد شده است (Ghoneim, 2019, Behjat et al. 2021).

در کار لای وهمکارانش (Lai et al., 2008) با بیان اینکه استفاده از دو روش HPLC و GC/MS نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و مدت‌زمان آزمایش بیشتری است، روش طیف‌سنجی نوری روغن را برای اندازه‌گیری غلظت فوران پیشنهاد کرده و با انجام پیرسازی آزمایشگاهی، همبستگی بین غلظت ترکیبات فوران و طیف جذبی روغن را به اثبات رسانده است. در مرجع (Abu-Siada 2011, Abu-Siada et al., 2012) با استفاده از طیف‌سنجی UV-Vis، پاسخ طیفی نمونه‌های روغن مورد مطالعه را به دست آورده و با ارائه یک الگوریتم منطق فازی، غلظت ترکیبات فوران را از روی پاسخ طیف نوری روغن تخمین زده است. در مرجع (Abu-Siada et al., 2009, Das et al., 2012) نیز با بررسی نمونه روغن چند ترانسفورماتور با استفاده از پاسخ طیف نوری و الگوریتم منطق فازی، عمر باقیمانده ترانسفورماتورها تخمین زده شده است. همه مطالعات صورت گرفته غالباً بر اساس نتایج شبیه‌سازی فرآیند پیرولیز^۴ در محیط آزمایشگاهی و تحت شرایط خاص کنترل شده، انجام پذیرفته است و شبکه عصبی مورد بحث بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده از نمونه‌های آزمایشگاهی طراحی شده است. در حالی که موارد زیر در (Lai et al., 2008, Abu-Siada et al., 2009, Das et al., 2011, Abu-Siada et al., 2012) لحاظ نشده است:

- ۱- تأثیر سایر فرآیندهای پیری (اکسیداسیون^۵ و هیدرولیز^۶) بر روغن عایقی که به تنهایی (بدون حضور کاغذ) موجب تیرگی روغن و افزایش دامنه شدت جذب می‌شود (عمادی فر و بهجت، ۱۳۹۸).
- ۲- تأثیر سایر محصولات شیمیایی حاصل از تخریب سیستم عایقی (اکسیدهای کربن، رطوبت، متانول و...) که در روغن حل می‌شوند و موجب بالا رفتن دامنه شدت جذب می‌شوند.
- ۳- تأثیر سایر اجزای ترانسفورماتور (مانند: پوشش محفظه، هسته آهنی، لجن و...) که در طول بهره‌برداری از ترانسفورماتور در تماس و تبادل با روغن عایقی هستند. مطابق تحقیقات صورت گرفته، شرایط بهره‌برداری از ترانسفورماتورها و فرآیندهای اکسیداسیون، هیدرولیز و پیرولیز، در طول سالیان متمادی موجب کدورت و تیرگی بسیار زیاد روغن در ترانسفورماتورهای کار کرده و مسن می‌شود (Arshad & Islam 2007, Hussain & Karmakar 2014, Karthik et al., 2013). کدورت و تیرگی بسیار

شکل ۳ طیف نوری نمونه روغن کارکرده ترانسفورماتور به ازای نسبت‌های مختلف رقیق‌کننده را نشان می‌دهد که به منظور تعیین نسبت رقیق‌کننده به روغن آورده شده است.

مطابق نتایج شکل ۳، نسبت ۲ به ۱ (الف)، و ۱ به ۵ (ب)، برای رقیق‌سازی مناسب نیستند. چراکه میزان جذب آن بسیار بالاست. با توجه به دامنه جذب نمونه با نسبت ۱ به ۹ (ج)، می‌توان گفت که نسبت ۱ واحد روغن و ۹ واحد رقیق‌کننده برای انجام آزمایش‌های اسپکتروسکوپی روغن مناسب است. شایان ذکر است که برای ماده مرجع (شاهد) در آزمایش باید از همان نسبتی که برای رقیق‌سازی نمونه مجهول استفاده شده است، از همان نسبت برای رقیق‌سازی مرجع (روغن تازه و کارنکرده) نیز استفاده کرد.



شکل (۳): طیف نوری روغن کارکرده ترانسفورماتور،

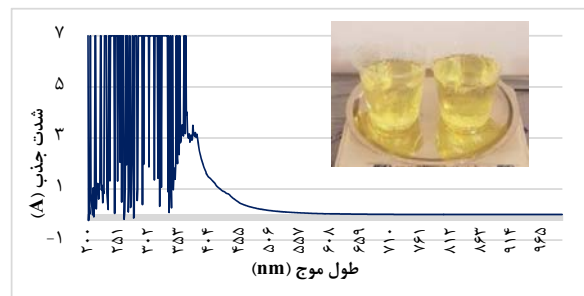
الف- رقیق‌سازی با نسبت ۲ به ۱ (یک واحد روغن و دو واحد هگزان)

ب- رقیق‌سازی با نسبت ۵ به ۱ (یک واحد روغن و پنج واحد هگزان)

ج- رقیق‌سازی با نسبت ۹ به ۱ (یک واحد روغن و نه واحد هگزان)

۲-۲- راستی آزمایی روش ارائه شده

در این پژوهش به منظور راستی آزمایی روش اسپکتروسکوپی ارائه شده، مراحل زیر در آزمایشگاه برای ساخت غلظت‌های مختلف فوران محلول در روغن، صورت گرفت و ۴ نمونه دیگر با غلظت‌های ذکر شده تهیه شد.



شکل (۲): رنگ روغن تازه کارنکرده ترانسفورماتور و طیف نوری آن

در نمودار شکل ۲، شدت جذب بسیار بالا و نويز در طول موج‌های پایین به دلیل غلظت زیاد روغن می‌باشد که قابلیت اطمینان نتیجه آزمایش را پایین آورده است. لذا این نمودار لزوم رقیق‌سازی روغن به منظور بهبود نتایج طیف نوری را نشان می‌دهد. در رقیق‌سازی روغن رعایت نکات زیر ضروری است:

- از رقیق‌کننده‌هایی باید استفاده شود که در طول موج مورد بررسی جذبی نداشته باشند.
- ماده‌ای که به عنوان رقیق‌کننده استفاده می‌شود نباید با ماده اصلی وارد واکنش شده و ساختار آن را تغییر داده و یا موجب تشکیل یک ماده دیگر شود.
- نسبت ترکیب روغن و ماده رقیق‌کننده مشخص شود تا به عنوان الگویی برای انجام آزمایش‌های متوالی تعمیم داده شود.

در این مقاله، ماده رقیق‌سازی، ماده رقیق‌کننده هگزان پیشنهاد شده است که ماده‌ای بی‌رنگ و بدون جذب در بازه مورد آزمایش بوده و با روغن وارد واکنش نمی‌شود.

۲-۱- تعیین نسبت ترکیب رقیق‌کننده

برای تعیین نسبت ترکیب رقیق‌کننده با روغن و بررسی اثر آن بر روی طیف نوری نمونه، یک روغن از یک ترانسفورماتور آسیب دیده از لحاظ عایق کاغذی، که کدورت بسیار زیادی هم داشت نمونه برداری شد. غلظت فوران این نمونه توسط روش HPLC اندازه‌گیری شد که مطابق جدول ۱ مقدار ۲-فورفورال آن ۳۷ ppm بوده است که یک مقدار بسیار زیاد برای یک ترانسفورماتور بشمار می‌رود.

جدول ۱: نتیجه HPLC نمونه روغن کارکرده ۳۷ ppm

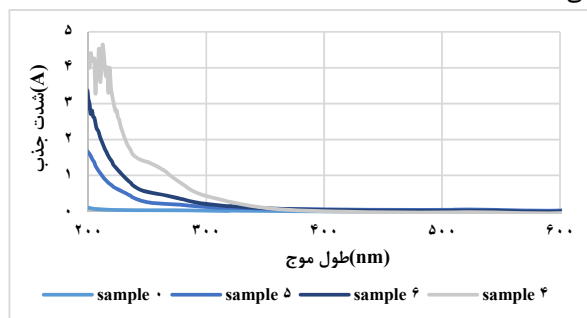
واحد	مقادیر اندازه‌گیری شده	موارد اندازه‌گیری شده
PPB	0.0 BDL	5HMF
PPB	37297.0	2Fal
PPB	20.6	2ACF
PPB	54.6	5MCF

اخذشده مورد آزمایش HPLC قرار گرفت، آزمایش HPLC برای نمونه‌ها به منظور مقایسه و اعتبار سنجی روش پیشنهادی انجام شده است تا قابلیت اطمینان روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد (نتایج این آزمایش‌ها در بخش ضمایم جدول (الف) آورده شده است). ویژگی‌های نمونه‌های اخذشده در این است که علاوه بر اینکه از ترانسفورماتورهای مختلفی در ظرفیت‌های مختلف نمونه‌برداری شده است، نمونه‌ها با کدورت‌های مختلف و در رنگ‌های روشن تا تیره بوده و می‌توانند یک بانک اطلاعاتی مناسب برای بررسی روش پیشنهادی باشند. شکل ۵، نمونه‌های اخذشده جهت تست اسپکتروسکوپی را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمونه روغن‌های اخذشده جهت طیف‌نگاری نوری

تمامی نمونه‌ها به روش توضیح داده و پیشنهادی در این مقاله رقیق‌سازی شده و توسط دستگاه اسپکتروسکوپی، شدت و طول موج جذب نمونه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند (نتایج این آزمایش‌ها در بخش ضمایم جدول (ب) آورده شده است)، در مرحله بعد با توجه به مقادیر به دست آمده از نتایج HPLC و شدت و طول موج جذب، یک الگوریتم منطق فازی طراحی و ارائه شده است که استفاده از این روش را برای کاربر ساده‌تر می‌کند. شکل ۶، نتایج اسپکتروسکوپی چند نمونه را نشان می‌دهد.



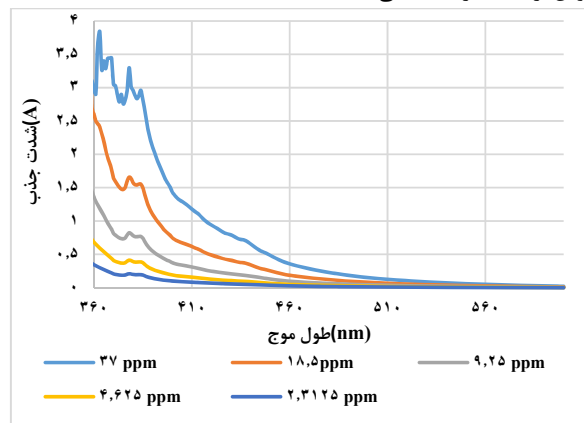
شکل (۶): طیف نوری سه مورد از نمونه‌های اخذشده (Sample 4, 5, 6) در مقایسه با هگزان (Sample 0)

۴- شبیه‌سازی

در این مقاله برای به دست آوردن مقدار عددی غلظت فوران از روی پاسخ طیف نوری روغن از الگوریتم منطق فازی استفاده شده است. دو پارامتر از پاسخ طیف نوری روغن، به عنوان ورودی الگوریتم منطق فازی تعریف شده‌اند، اولین پارامتر، حداکثر مقدار شدت جذب در محدوده طول موج ۱۹۰ نانومتر الی ۶۰۰ نانومتر و دومین پارامتر

- ۱- ترکیب نمونه ۳۷ ppm با روغن کارنکرده به نسبت یک به یک برای ساخت نمونه با غلظت ۱۸/۵ ppm
- ۲- ترکیب نمونه ۱۸/۵ ppm با روغن کارنکرده به نسبت یک به یک برای ساخت نمونه با غلظت ۹/۲۵ ppm
- ۳- ترکیب نمونه ۹/۲۵ ppm با روغن کارنکرده به نسبت یک به یک برای ساخت نمونه با غلظت ۴/۶۲۵ ppm
- ۴- ترکیب نمونه ۴/۶۲۵ ppm با روغن کارنکرده به نسبت یک به یک برای ساخت نمونه با غلظت ۲/۳۱۲۵ ppm

نمونه ۳۷ ppm و همه نمونه‌های ساخته شده به نسبت ۱ به ۹ با هگزان رقیق‌سازی شده و مورد آزمایش اسپکتروسکوپی قرار گرفتند. هدف از انجام این کار، آزمایش دقت تفکیک غلظت‌های مختلف ترکیبات فوران توسط روش اسپکتروسکوپی بود که طیف نوری نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۴، دقت تفکیک غلظت و صحت روش ارائه شده را تأیید می‌کند.

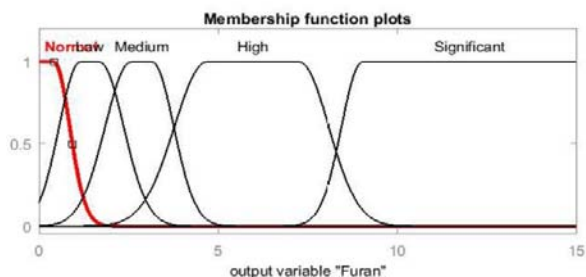


شکل (۴): طیف نوری نمونه ۳۷ ppm و نمونه‌های ساخته شده

همان‌طور که در شکل ۴، مشاهده می‌شود با کاهش غلظت ترکیب ۲- فورفورال شدت جذب در بازه طول موج ۳۶۰ الی ۶۰۰ نانومتر کاهش پیدا می‌کند. بنابراین روش ارائه شده دقت لازم را در تفکیک غلظت‌های مختلف داراست. شایان ذکر است این آزمایش به منظور بررسی تکرارپذیری، برای چندین بار تکرار شد، نتایج حاکی از آن است که روش ارائه شده تکرارپذیر بوده و نتایج هر بار تکرار با دقت قابل قبولی نتیجه قبلی خود را تأیید می‌کند.

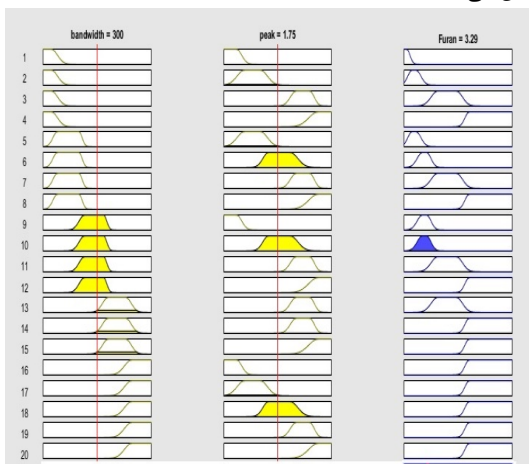
۳- مطالعات موردی و نتایج عملی

به منظور بررسی بیشتر روش پیشنهادی، از ۲۳ ترانسفورماتور در حال سرویس نمونه‌برداری شد و برای انجام مطالعات دقیق، نمونه‌های

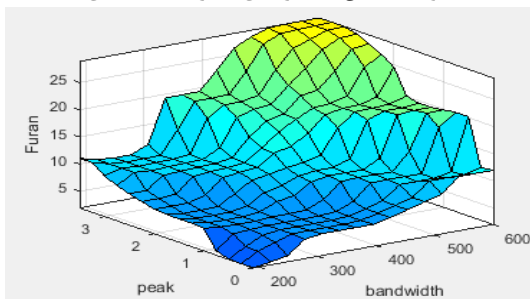


شکل (۸): توابع عضویت برای خروجی منطق فازی

اطلاعات مربوط به آزمایش‌های HPLC و طیف‌نگاری نوری ۲۰ نمونه روغن اخذ شده از ترانسفورماتورهای در حال بهره‌برداری (مطابق جدول الف و ب در ضمیمه)، به منظور آموزش و بهبود مجموعه قوانین الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۹ قواعد تعیین شده بین توابع ورودی و خروجی منطق فازی، و شکل ۱۰، نمودار سه‌بعدی رابطه بین شدت جذب، طول موج و غلظت فوران را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی عملکرد تخمین‌گر طراحی شده داده‌های مربوط به سه نمونه‌ی دیگر از روغن ترانسفورماتورهای توزیع در حال بهره‌برداری به‌عنوان ورودی به سیستم داده شد. جدول ۲، اطلاعات ورودی و خروجی و نتایج تخمین‌گر را برای این سه نمونه نشان می‌دهد.



شکل (۹): قواعد تعیین‌شده بر روی کنترل‌کننده فازی



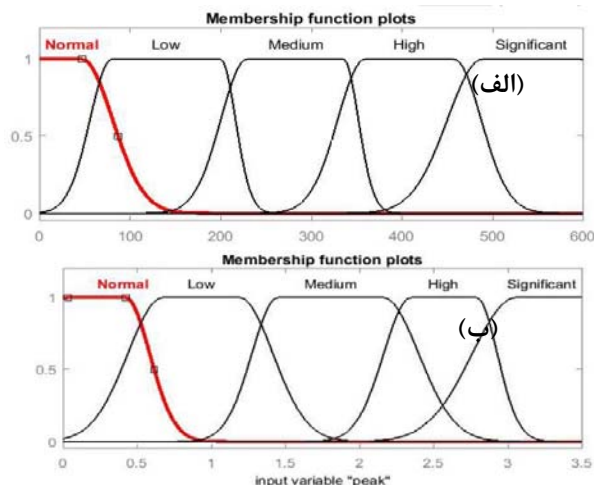
شکل (۱۰): نمودار سه‌بعدی رابطه بین شدت جذب، طول موج و غلظت فوران

طول موجی که در آن حداکثر شدت جذب اتفاق می‌افتد به‌عنوان ورودی‌های الگوریتم انتخاب شد. خروجی الگوریتم نیز مقدار غلظت فوران بر حسب ppm است.

الگوریتم با استفاده از ابزار رابط گرافیکی تعبیه شده در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. هر یک از متغیرهای ورودی به ۵ مجموعه از توابع عضویت ترکیبی گاوس (MF) که توسط معادله شماره (۶) تعریف شده بود فازی سازی شدند.

$$f(\chi; \sigma, c) = e^{-\frac{(\chi-c)^2}{\sigma^2}} \quad (۶)$$

در معادله فوق χ ورودی و c و σ یک عدد حقیقی هستند که مقدار σ هیچ‌گاه صفر نیست. در معادله شماره (۶) هر مجموعه که برای هر ورودی طراحی شده است ترکیبی از پارامترهای c و σ است. مطابق شکل ۷، اولین تابع، $\chi = 1$ ، که توسط c_1 و σ_1 مشخص شده‌اند، شکل اولین منحنی از سمت چپ را تعیین می‌کنند و دومین تابع، $\chi = 2$ ، که توسط c_2 و σ_2 مشخص شده‌اند، شکل اولین منحنی از سمت راست را تعیین می‌کنند. منحنی‌های متناظر با توابع گاوس برای مجموعه متغیرهای ورودی (شدت جذب و طول موج) در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): توابع عضویت ورودی‌های منطق فازی، الف- توابع عضویت

ورودی پهنای باند، ب- توابع عضویت ورودی شدت جذب

روش مرکز ثقل، که به‌طور گسترده در مدل‌های فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد برای فازی زدایی خروجی الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت که با فرض Z_0 به‌عنوان خروجی، مقدار آن بر اساس رابطه شماره (۷) محاسبه گردید:

$$Z_c = \frac{\int z \cdot \mu_c(z) dz}{\int \mu_c(z) dz} \quad (۷)$$

که در آن $\mu_c(z)$ تابع عضویت خروجی است. توابع عضویت برای متغیر خروجی (فوران) در شکل ۸ نشان داده شده است.

۶- نتیجه

اندازه‌گیری غلظت ترکیبات فوران در روغن ترانسفورماتورها به‌عنوان معیاری برای ارزیابی وضعیت عایقی آن‌ها روشی شناخته شده است. در حال حاضر یکی از روش‌های قابل‌اطمینان و متداول برای اندازه‌گیری غلظت فوران در روغن ترانسفورماتور، استفاده از روش HPLC بر اساس استاندارد ASTM-D-5837 است. اگرچه این روش یک روش استاندارد و قابل‌اطمینان برای شرکت‌های برق محسوب می‌شود، اما هزینه‌های گزاف خرید و تعمیر و نگهداری دستگاه، قیمت تمام‌شده آزمایش هر نمونه را بسیار بالا برده و توجیه اقتصادی روش را برای شرکت‌های توزیع از بین می‌برد و به‌ندرت به‌عنوان یک ابزار تشخیصی در شرکت‌های توزیع برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از طیف‌نگاری نوری یک روش جدید و جایگزینی مؤثر و اقتصادی برای اندازه‌گیری غلظت ترکیبات فوران پیشنهاد شده است.

اما کدورت بیش‌ازحد روغن ترانسفورماتورهای مسن که اغلب ناشی از اکسیداسیون روغن، تشکیل ترکیبات قطبی، لجن و سایر آلودگی‌هاست، موجب افزایش بیش از حد شدت جذب شده و نتایج طیف‌نگاری نوری را غیرقابل استناد می‌کند. در این مقاله روشی جهت رقیق‌سازی روغن به‌منظور بهبود نتایج طیف نوری و برطرف کردن مشکل نمونه روغن‌های مستعمل ترانسفورماتورهای کار کرده، ارائه شد. یک الگوریتم فازی برای تخمین غلظت فوران از روی طیف نوری روغن بر اساس حداکثر شدت جذب و طول‌موج آن، به‌عنوان دو پارامتر ورودی الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور تأیید نتایج، نمونه‌های روغن ۲۳ ترانسفورماتور توزیع در حال سرویس شرکت توزیع برق استان آذربایجان شرقی با محدوده ولتاژ 20KV/400V و میانگین عمر ۷ تا ۳۵ سال مطالعه شده است. تسریع فرآیند انجام آزمایش و هزینه پایین هر آزمایش در مقایسه با روش‌های مشابه، از مهم‌ترین مزایای روش ارائه شده در این مقاله است. نتایج حاصل از مطالعات موردی حاکی از آن است که این روش، می‌تواند راهکاری مطمئن، سریع و مقرون‌به‌صرفه برای بهره‌برداران شبکه برق، به‌منظور ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای شبکه باشد.

ضمایم

جدول ۲ نشان می‌دهد که نتایج حاصل از تخمین‌گر بسیار به نتایج آزمایش HPLC، نزدیک است. میانگین خطا و اختلاف تخمین‌گر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط HPLC برابر ۱۴/۴۶ درصد است. با توجه به اینکه تعداد داده‌های مورد‌استفاده در طراحی تخمین‌گر و آموزش شبکه محدود بوده است با افزایش بانک اطلاعاتی و استفاده از داده‌های بیشتر می‌توان الگوریتم تخمین‌گر را بهینه‌سازی کرد.

جدول ۲: اطلاعات ورودی تخمین‌گر فازی و مقایسه آن با

نتایج آزمایش HPLC

نام نمونه	شدت جذب نمونه	طول‌موج نمونه	نتایج حاصل از سیستم HPLC(ppm)	نتایج حاصل از تخمین‌گر (ppm)	درصد خطا
Sample19	۰/۴۷۳۴	۲۶۷	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۳۴۵	۱۱/۰۸
Sample2	۲/۰۰۲۱	۴۹۱	۰/۱۹۲۷	۰/۲۱۸۵	۱۳/۳۸
Sample4	۱/۳۵۶۸	۴۲۵	۰/۰۶۴	۰/۰۵۱۸۹	۱۸/۹۲

۵- مقایسه روش‌های پیشین و روش ارائه‌شده

در این مقاله با ارائه الگویی جدید پاسخ طیف نوری روغن بهبود یافته و دقت و صحت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. جدول ۳ معایب مطالعات پیشین و نوآوری‌های روش ارائه شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه روش‌های پیشین و روش ارائه‌شده

روش‌ها	معایب و نوآوری‌ها
مطالعات پیشین (Lai et al., 2008, Abu-Siada 2011, Abu-Siada et al., 2012, Abu-Siada et al., 2009, Das et al., 2012, Arshad & Islam 2007, Hussain & Karmakar 2014, Karthik et al., 2013)	مطالعه بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی عدم بررسی تأثیر فرآیندهای پیری (اکسیداسیون و هیدرولیز) بر روغن عایقی عدم بررسی تأثیر پیری سایر اجزای داخلی ترانسفورماتور بر نمونه روغن عدم بررسی تأثیر سایر محصولات ناشی از تخریب سیستم عایقی محلول در روغن (انواع گازهای هیدروکربنی، اکسیدهای کربن، متانول، اتیلن، لجن و...) طراحی شبکه عصبی بر اساس داده‌های حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی
روش جدید ارائه‌شده در این مقاله	۱- ارائه یک الگوی رقیق‌سازی نمونه‌های روغن ترانسفورماتورهای مسن توسط هگزان به‌منظور بهبود پاسخ طیف نوری ۲- طراحی شبکه عصبی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی نمونه‌های روغن ترانسفورماتورهای میدانی به‌منظور اعمال تأثیر فرآیندهای پیری اجزای داخلی ترانسفورماتور بر نمونه‌های روغن و بهبود دقت تخمین غلظت ترکیبات فوران

جدول (ب): نتایج HPLC و طیف‌نگاری نوری نمونه‌های مورد

استفاده در بهبود قوانین الگوریتم منطق فازی

ردیف	نام نمونه	شدت جذب	طول موج (nm)	مقدار فوران (ppm)
۱	Sample 14	۰/۱۸۹۹	۲۰۲	۰/۰۰۷
۲	Sample 5	۰/۲۲۶۶	۲۱۹	۰/۰۰۹
۳	Sample 17	۰/۳۵۷۷	۲۲۴	۰/۰۰۱
۴	Sample 6	۰/۵۰۱۵	۲۷۰	۰/۰۲۳
۵	Sample 1	۰/۶۶۶۶	۲۷۵	۰/۰۲۴
۶	Sample 18	۰/۸۵۳۶	۳۱۵	۰/۰۲۸
۷	Sample 12	۰/۵۰۹۷	۳۴۰	۰/۰۳۳
۸	Sample 7	۱/۰۳۸۳	۴۰۴	۰/۰۴۲
۹	Sample 15	۱/۱۰۰۳	۴۱۵	۰/۰۴۷
۱۰	Sample 13	۱/۲۸۰۹	۴۲۱	۰/۰۶۳
۱۱	Sample 9	۱/۴۳۳۱	۴۴۶	۰/۰۷۵
۱۲	Sample 8	۱/۶۵۶۳	۴۶۰	۰/۰۹۶
۱۳	Sample 3	۱/۸۴۴۴	۴۷۲	۰/۰۹۸
۱۴	Sample 11	۱/۹۲۴۱	۴۸۶	۰/۱۵۵
۱۵	Sample 21	۲/۱۴۶۵	۴۸۹	۰/۲۸۴
۱۶	Sample 16	۲/۲۰۲۵	۴۹۹	۰/۲۸۶
۱۷	Sample 22	۲/۳۶۴۹	۵۰۲	۰/۳۸۸
۱۸	Sample 20	۲/۳۰۷۵	۵۱۲	۰/۵۱۹
۱۹	Sample 10	۲/۵۶۸۹	۵۴۶	۱/۴۴۷
۲۰	Sample 23	۲/۷۴۸۰	۵۶۰	۳۷/۲۹۷

جدول (الف): نتایج HPLC، نمونه‌های اخذشده (ppm)

ردیف	نام نمونه	5MCF	2ACF	2FAL	SHMF
۱	Sample 1	۰/۷	۰/۰-BDL	۲۴/۴	۰/۰-BDL
۲	Sample 2	۳۵/۷	۹/۵	۱۹۲/۷	۰/۰-BDL
۳	Sample 3	۵۴/۷	۱۹/۴	۹۸/۶	۰/۰-BDL
۴	Sample 4	۹/۸	۰/۳	۶۴/۰	۰/۰-BDL
۵	Sample 5	۱۰/۳	۳/۱	۹/۱	۰/۰-BDL
۶	Sample 6	۲۳/۶	۱۱/۷	۲۳/۶	۰/۰-BDL
۷	Sample 7	۳۲/۰	۴/۹	۴۷/۵	۰/۰-BDL
۸	Sample 8	۱۵۷/۳	۰/۰-BDL	۹۰/۰	۰/۰-BDL
۹	Sample 9	۰/۰-BDL	۰/۰-BDL	۷۵/۰	۰/۰-BDL
۱۰	Sample 10	۴۶/۱	۶۵/۰	۱۴۴۷/۵	۰/۰-BDL
۱۱	Sample 11	۲۴/۲	۶/۲	۱۵۵/۲	۰/۰-BDL
۱۲	Sample 12	۳۱/۸	۴/۳	۳۲/۹	۰/۰-BDL
۱۳	Sample 13	۶/۷	۱/۴	۶۳/۵	۰/۰-BDL
۱۴	Sample 14	۱۳/۱	۶/۰	۷/۸	۰/۰-BDL
۱۵	Sample 15	۰/۰-BDL	۹۰/۴	۴۲/۳	۱۹۴/۹
۱۶	Sample 16	۷۰/۹	۰/۰-BDL	۲۸۶/۹	۰/۰-BDL
۱۷	Sample 17	۰/۰-BDL	۱/۸	۹/۹	۰/۰-BDL
۱۸	Sample 18	۶۴/۳	۴/۳	۲۷/۹	۰/۰-BDL
۱۹	Sample 19	۱۳/۲	۸/۶	۲۱/۱	۸/۷
۲۰	Sample 20	۱۱۳/۶	۱۱/۳	۵۱۰/۱	۰/۰-BDL
۲۱	Sample 21	۴/۰	۱۲/۵	۲۳۴/۲	۰/۰-BDL
۲۲	Sample 22	۱۳/۴	۱۲/۱	۳۸۸/۹	۰/۰-BDL
۲۳	Sample 23	۵۴/۶	۲۰/۶	۳۷۲۹۷/۰	۰/۰-BDL

مراجع

Cheim, L., Platts, D., Prevost, T. & Xu, S., (2012). Furan analysis for liquid power transformers". IEEE Electrical Insulation Magazine, 28(2), pp. 8-21.

Das, N., Abu-Siada, A. & Islam, S., (2012). New approach to estimate furan contents in transformer oil using spectroscopic analysis. The 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-4.

De Pablo, A., (1997). Interpretation of furanic compounds analysis-degradation models". CIGRE WG D1.01.03, former WG 15-01, Task Force 03.

Ghoneim, S. S. (2019). The Degree of Polymerization in a Prediction Model of Insulating Paper and the Remaining Life of Power Transformers, Energies, 14(3), pp. 670-684.

Hussain, K., & Karmakar, S. (2014). Condition assessment of transformer oil using UV-Visible spectroscopy. The 18th National Power Systems Conference (NPSC), pp. 1-5.

Karthik, R., Raja, T.S.R. & Iruthayarajan, M.W., (2013). Investigations of furanic derivatives in transformer oil using ultra-violet light absorption property. IET Electric Power Applications, 7(2), pp. 123-130.

Kumar, A. (2007). Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers. CIGRE Task Force D1.01.10.

Lai, Sin P., Abu-Siada, A. Islam, S. M. & Lenco. G. (2008). Correlation between UV-Vis spectral response and furan measurement of transformer oil.

Abu-Siada, A. (2011). Correlation of furan concentration and spectral response of transformer oil-using expert systems. IET Science, Measurement & Technology, 5(5), pp. 183-188.

Abu-Siada, A., Lai, S.P. & Islam, S., (2009). Remnant life estimation of power transformer using oil UV-Vis spectral response. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-5.

Abu-Siada, A., Lai, S.P. & Islam, S.M., (2012). A novel fuzzy-logic approach for furan estimation in transformer oil. IEEE Transactions on Power Delivery, 27(2), pp.469-474.

Ancuța-Mihaela, A. C. I. U., NIȚU, M. C. NICOLA, M. NICOLA, C.-I., & LĂZĂRESCU F. (2020). Complementary Analysis of the Degree of Polymerization Based on Chemical Markers 2-Furaldehyde and Methanol Using the Fuzzy Logic. 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), pp. 1-6. IEEE.

Arshad, M., & Islam, S. M. (2007). Power transformer condition assessment using oil UV-spectrophotometry. Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 611-614.

Behjat, V., Emadifar, R., Pourhossein, M., Rao, U.M., Fofana, I., & Najjar, R. (2021). Improved Monitoring and Diagnosis of Transformer Solid Insulation Using Pertinent Chemical Indicators. Energies, 14(13), pp. 3977-3930.

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, IEEE, pp. 659-662.

Ortiz, F., Fernández, C., Santisteban, A., Delgado, F. & Ortiz, A., (2016). Estimating the age of power transformers using the concentration of furans in dielectric oil. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(14), pp. 1011-1015.

حسینی، س. ش. (۱۳۹۹). «بررسی الکتریکی و حرارتی نانو سیالات با پایه روغن ترانسفورماتور»، نشریه علمی و پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، (۱)۹، صص ۴۸-۳۹.

عمادی فر، ر.، و بهجت، و. (۱۸ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۸) «پایش و ارزیابی وضعیت عایق کاغذی ترانسفورماتورهای توزیع با استفاده از روش‌های شیمیایی نوین (مطالعه موردی ترانسفورماتورهای توزیع تبریز)»، سی و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

نقیسی، ح.، عابدی، م.، و قره پتیان، گ. (۱۳۹۱). «مکانیابی تخلیه جزئی با استفاده از مدل مشروح ترانسفورماتورها به کمک شبکه عصبی FAM و بیزین»، نشریه علمی و پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، (۱)۱، صص ۵۷-۴۶.

نقیسی، ح.، عسکریان ابیانه، ح.، و عابدی، م. (۱۳۹۳). «مدل‌سازی احتمالی میزان کاهش عمر ترانسفورماتورهای توزیع با در نظر گرفتن نفوذ خودروهای اتصال الکتریکی هابیریدی»، نشریه علمی و پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، (۵)۳، صص ۷-۱.

زیر نویس‌ها

^۱ Degree of Polymerization

^۲ High-Performance Liquid Chromatography

^۳ Gas Chromatography–Mass Spectrometry

^۴ Pyrolysis

^۵ Oxidation

^۶ Hydrolysis

^۷ Below Detection Limit