به نام خداوند بخشنده مهربان

راهنمـــای جامـع
روغـــن ترانسفورماتور

سی. اس. ناراسیمهان
ترجمه‌ی آرش آقائی‌فر

ویراستاران فنی:
بهروز پهلوانپور
علی سبزی

فهرست مطالب

یادداشت مترجم الف

پیشگفتار پ

مقدمه ث

فصل اول: روغن معدنی در ترانسفورماتور: مشخصات فنی، عملکرد، استانداردها و دلایل ماندگاری آن در صنعت ترانسفورماتور

۱-۱) معرفی ۳

۱-۲) جایگزین‌های روغن معدنی ۴

۱-۳) ترانسفورماتورهای جایگزین ترانسفورماتور روغنی ۵

۱-۴) فناوری‌های پالایش و ارتقای کیفیت روغن معدنی ۱۱

۱-۵) ترکیب شیمیایی روغن ترانسفورماتور ۱۳

۱-۶) استانداردهای روغن ۱۶

۱-۷) تفاوت‌های مفهومی بین استانداردهای IEC 60296 و IEEE C57.106 ۲۳

۱-۸) حمل، انبارش، سیرکوله، جابجایی، نمونه‌برداری و تزریق روغن ترانسفورماتور ۲۷

۱-۹) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۹

فصل دوم: اکسیداسیون و پیری روغن: مکانیزم، اثرات و پایش وضعیت

۲-۱) معرفی ۳۵

۲-۲) ویژگی‌های عملکردی مناسب روغن ۳۵

۲-۳) محصولات ناشی از اکسیداسیون و اثرات منفی آن‌ها ۳۶

۲-۴) مکانیزم اکسیداسیون ۳۸

۲-۵) عوامل تاثیرگذار بر اکسیداسیون در ترانسفورماتور ۳۹

۲-۶) اکسیداسیون روغن در عمل و تاثیر آن بر پارامترهای عملکردی ترانسفورماتور ۴۹

۲-۷) پایش وضعیت روغن ترانسفورماتورهای در حال بهره‌برداری ۵۴

۲-۸) نمونه‌های عملی جالبی از ترانسفورماتورهای در حال بهره‌برداری: گزارش سیگره ۵۷

۲-۹) تصفیه فیزیکی و تصفیه شیمیایی روغن‌های کارکرده ۶۰

۲-۱۰) تکامل استانداردهای مرتبط با اکسیداسیون روغن و پیری اکسایشی تسریع شده ۷۳

۲-۱۱) روش سریع برای تعیین پایداری اکسیداسیون روغن‌های حاوی بازدارنده ۷۵

۲-۱۲) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۷۵

فصل سوم: خوردگی مس در ترانسفورماتور: بررسی علت‌ها و روش‌های پیشگیری و اصلاح

۳-۱) معرفی ۸۳

۳-۲) منشاء خطا ۸۳

۳-۳) شواهدی از تشکیل سولفید مس رسانا بر روی کاغذ و سیم‌پیچی ۸۵

۳-۴) تکامل استانداردهای خورندگی گوگرد ۸۶

۳-۵) تحقیقات صورت گرفته در خصوص گوگرد خورنده ۹۰

۳-۶) اقدامات پیشگیرانه ۹۹

۳-۷) اقدامات اصلاحی در صورت وجود خوردگی ۱۰۲

۳-۸) تصفیه شیمیایی و فیزیکی روغن‌های حاوی غیرفعال‌کننده ۱۰۶

۳-۹) حذف گوگرد خورنده ۱۰۷

۳-۱۰) تعویض روغن ۱۰۷

۳-۱۱) بهبود شرایط بهره‌برداری از ترانسفورماتور ۱۰۸
۳-۱۲) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۰۸

فصل چهارم: رطوبت در ترانسفورماتور

۴-۱) معرفی ۱۱۵
۴-۲) منابع تشکیل آب در ترانسفورماتور ۱۱۶
۴-۳) روش‌های جلوگیری از نفوذ رطوبت به ترانسفورماتور ۱۱۹
۴-۴) تاثیر رطوبت بر عملکرد ترانسفورماتور ۱۲۱
۴-۵) تعریف پارامترهای اساسی رطوبت و روابط آن‌ها با یکدیگر ۱۲۶
۴-۶) روش‌های اندازه‌گیری رطوبت در روغن ۱۲۸
۴-۷) تخمین رطوبت کاغذ با استفاده از نمودارهای تعادلی (روش غیرمستقیم) ۱۳۱
۴-۸) اندازه‌گیری و تحلیل رطوبت روغن ۱۴۰
۴-۹) ارزیابی رطوبت روغن و کاغذ با استفاده از سنسورهای خازنی ۱۴۳
۴-۱۰) اندازه‌گیری مستقیم رطوبت کاغذ به روش طیف‌سنجی فرکانسی عایق (FDS) ۱۴۵
۴-۱۱) روش‌های خشک‌سازی سیستم عایقی روغن/کاغذ ترانسفورماتور ۱۴۶
۴-۱۲) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۴۶

فصل پنجم: تخریب عایق کاغذی: پایش ترکیبات فوران

۵-۱) معرفی ۱۵۳
۵-۲) تشکیل ترکیبات فوران ۱۵۴
۵-۳) اندازه‌گیری درجه‌ی پلیمریزاسیون کاغذ ۱۵۹
۵-۴) عوامل تاثیرگذار بر همبستگی ترکیبات فوران و درجه‌ی پلیمریزاسیون ۱۶۰
۵-۵) تاثیر دما در ترانسفورماتورهای افزاینده‌ی نیروگاهی ۱۶۷
۵-۶) مدل‌هایی برای تخمین درجه‌ی پلیمریزاسیون از روی ترکیبات فوران ۱۷۰
۵-۷) چشم‌انداز عمرسنجی با 2-FAL ۱۷۳

۵-۸) نگاهی کلی به پایش وضعیت ترانسفورماتور با استفاده از FAL-2 ۱۷۶
۵-۹) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۸۰

فصل ششم: متانول به عنوان شاخص شیمیایی برای شناسایی تخریب کاغذ

۶-۱) معرفی ۱۸۵
۶-۲) اندازه‌گیری و کمی‌سازی متانول محلول در روغن ۱۸۶
۶-۳) رابطه‌ی مستقیم متانول با شکسته‌شدن پیوندهای سلولز ۱۸۷
۶-۴) متانول به عنوان شاخصی برای شناسایی تخریب کاغذ در مراحل اولیه ۱۸۹
۶-۵) همبستگی استقامت کششی و درجه‌ی پلیمریزاسیون با متانول ۱۸۹
۶-۶) پایداری متانول در روغن ۱۹۱
۶-۷) عوامل تاثیرگذار بر مقدار متانول در روغن ۱۹۲
۶-۸) مدل‌های تحلیل متانول به عنوان شاخص تخریب کاغذ ۱۹۳
۶-۹) متانول به عنوان شاخص شیمیایی: تجربیات میدانی ۱۹۴
۶-۱۰) مشکلات مرتبط با استفاده از متانول به عنوان شاخص شیمیایی ۱۹۹
۶-۱۱) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۰۳

فصل هفتم: آنالیز گازهای محلول در روغن، گازهای سرگردان و تمایل به تولید گاز

۷-۱) معرفی ۲۰۹
۷-۲) تعریف پدیده‌های مرتبط با گازهای تولید شده در روغن ۲۰۹
۷-۳) تمایل به تولید گاز: اهمیت موضوع، روش‌های تست و تعیین عوامل تاثیرگذار ۲۱۰
۷-۴) اهمیت، روش تست و عوامل تاثیرگذار بر گازهای سرگردان ۲۱۳
۷-۵) آنالیز گازهای محلول در روغن: تئوری، روش‌های تست و تحلیل نتایج ۲۱۷
۷-۶) مکانیزم تولید گاز ۲۱۹
۷-۷) معیار شناسایی خطا ۲۲۴

۷-۸) روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری گازهای محلول در روغن ۲۲۵

۷-۹) روش‌های مختلف شناسایی خطا ۲۲۶

۷-۱۰) تشخیص شدت خطا: یک رویکرد جایگزین براساس مدل ترمودینامیکی ۲۴۰

۷-۱۱) جمع‌بندی و آینده‌پژوهی آنالیز گازهای محلول در روغن ۲۴۱

فصل هشتم: ویژگی‌ها و مزایای عملکردی روغن‌های جایگزین روغن معدنی ترانسفورماتور

۸-۱) معرفی ۲۴۷

۸-۲) روغن‌های جایگزین روغن معدنی: PCBs، Nytro Bio ، GTL، R-TEMP، هیدروکربن‌های سنتزی، روغن‌های سیلیکونی، استرهای طبیعی و سنتزی و سایر روغن‌ها ۲۴۸

۸-۳) دلایل استفاده از روغن‌های جایگزین ۲۵۳

۸-۴) تفاوت‌های مهم در ساختار و ویژگی‌های روغن‌های جایگزین و مقایسه‌ی آن‌ها با روغن معدنی ۲۵۴

۸-۵) مزایای عملکردی روغن‌ها ۲۷۲

۸-۶) ایمنی در برابر آتش در روغن‌های جایگزین ۲۷۷

۸-۷) استانداردهای بین‌المللی روغن‌های استر طبیعی و سنتزی ۲۸۳

۸-۸) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۹۵

فصل نهم: مقایسه‌ی ویژگی‌های عایقی و حرارتی روغن‌های استر با روغن معدنی و تاثیر آن بر طراحی ترانسفورماتور

۹-۱) معرفی ۳۰۳

۹-۲) موضوعات مورد بررسی در این فصل ۳۰۳

۹-۳) ویژگی‌های عایقی ۳۰۴

۹-۴) شکست عایقی AC و LI : نقاط آسیب‌پذیر در ترانسفورماتور قدرت ۳۰۴

۹-۵) کمی‌سازی میدان الکتریکی غیریکنواخت ۳۰۶

۹-۶) روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین شکست AC و LI روغن ۳۰۷

۹-۷) مکانیزم شکست عایقی ۳۰۸

۹-۸) تاثیر ترکیبات شیمیایی روغن معدنی بر استقامت عایق در برابر ضربه‌ی صاعقه ۳۰۹
۹-۹) مطالعات تطبیقی در خصوص ویژگی‌های عایقی روغن‌ها ۳۱۱
۹-۱۰) ملاحظات طراحی حرارتی ترانسفورماتور ۳۲۵
۹-۱۱) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۳۳۱

فصل دهم: استفاده از نانوسیالات به‌عنوان عایق مایع در ترانسفورماتور

۱۰-۱) معرفی ۳۳۹
۱۰-۲) روش‌های آماده‌سازی نانوسیالات ۳۴۰
۱۰-۳) متغیرهای آماده‌سازی و ویژگی‌ها ۳۴۱
۱۰-۴) مکانیزم پایدارسازی، پتانسیل زتا و نظریه‌ی لایه‌ی مضاعف ۳۴۲
۱۰-۵) بهبود ویژگی‌های عایقی ۳۴۳
۱۰-۶) ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی نانوسیالات ۳۴۸
۱۰-۷) نظریه‌های توضیح‌دهنده‌ی علت بهبود ویژگی‌های عایقی نانوسیالات ۳۵۲
۱۰-۸) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری: فرصت‌ها و چالش‌های آتی نانوسیالات ۳۵۴

یادداشت مترجم

کتابی که در دست دارید در سال ۲۰۲۲ توسط آقای دکتر سی. اس. ناراسیمهان به نگارش درآمده و کتاب مرجع سیالات عایقی مورد استفاده در ترانسفورماتور است. نویسنده‌ی کتاب پیش از بازنشستگی، مدیر تحقیق و توسعه‌ی شرکت تولید روغن ساویتا بوده و مقالات متعددی در زمینه‌ی روغن ترانسفورماتور تألیف کرده است. او در حاصل حاضر عضو دو کارگروه IEC و CIGRE با موضوع روغن عایقی است. روغن ترانسفورماتور موضوعی میان‌رشته‌ای بین برق و شیمی است. درست است که روغن معدنی، محصول نهایی پالایشگاه و سیالی با ویژگی‌های خاص شیمیایی است؛ اما کاربرد نهایی آن در تجهیزات الکتریکی به ویژه ترانسفورماتور است. یکی از نقاط قوت کتاب، تخصص بالای نویسنده در هر دو موضوع برق و شیمی است و مطالب کتاب را به گونه‌ای تألیف کرده است که هم برای مهندسین برق و هم برای مهندسین شیمی قابل استفاده باشد.

کتاب‌های متعددی با موضوع روغن ترانسفورماتور در ایران منتشر شده است. اما بیشتر آن‌ها ترجمه یا حداکثر تفسیری بر استانداردهای بین‌المللی روغن هستند. موضوعات مهم مطرح شده در این کتاب که نویسنده آن‌ها را به‌صورت جامع و با زبانی ساده بیان کرده است، عبارت‌اند از: مشخصات فیزیکی و شیمیایی و استانداردهای روغن، اکسیداسیون، تصفیه فیزیکی و شیمیایی، گوگرد خورنده، رطوبت در سیستم عایقی متشکل از روغن و کاغذ، شناسایی میزان تخریب عایق کاغذی با ترکیبات فوران و متانول، ارزیابی وضعیت ترانسفورماتور با آنالیز گازهای محلول در روغن، روغن‌های سیلیکونی، استر و نانوسیالات و تأثیر آن‌ها بر طراحی و بهره‌برداری از ترانسفورماتور.

از این کتاب می‌توان به‌عنوان مرجع کاملی در بحث روغن ترانسفورماتور استفاده کرد. هر فصل از کتاب به ویژگی خاصی از روغن اختصاص دارد و بدون مراجعه به فصل‌های دیگر قابل خواندن است. در ترجمه، تلاش بسیار شده که متن، دقیق و روان باشد و وفاداری به متن اصلی نیز حفظ شود. برخی

اصطلاحات تخصصی برق و شیمی توسط نویسنده و برخی دیگر نیز توسط مترجم و ویراستاران فنی به‌صورت پانویس توضیح داده شده‌اند. توضیحات مترجم و ویراستاران فنی، به‌صورت (م.) در پانویس مشخص شده است تا از متن اصلی کتاب متمایز باشد. تعدادی از شکل‌های کتاب در فصول دوم، سوم و پنجم به‌صورت رنگی است؛ که با کیفیت بالا در وبسایت www.Atecco.ir بارگذاری شده‌اند. این شکل‌ها با عنوان تصویر در متن ذکر شده‌اند. در پایان لازم است از مساعدت بی‌دریغ ویراستاران فنی کتاب آقای دکتر بهروز پهلوانپور (شرکت ERGON) و آقای مهندس علی سبزی (پژوهشگاه نیرو) تشکر و قدردانی کنم. قطعا بدون کمک آن‌ها ترجمه‌ی این کتاب امکان‌پذیر نبود. از کلیه‌ی خوانندگان محترم تقاضا دارم انتقادها، پیشنهادها و ایرادهای مشاهده شده در متن را به‌منظور اصلاح در ویرایش‌های آتی به پست الکترونیک info@atecco.ir ارسال نمایند.

آرش آقایی‌فر
زمستان ۱۴۰۲

پیشگفتار

اگـر ترانسـفورماتور را بـه انسـان تشـبیه کنیـم، روغـن در ایـن تجهیـز همـان نقشـی را ایفـا می‌کنـد کـه خـون در بـدن مـا. همان‌گونـه کـه بـا انجـام برخـی آزمون‌هـا بـر روی خـون می‌تـوان سـلامت انسـان را تشـخیص داد، بـا نمونه‌بـرداری از روغـن و انجـام آزمون‌هـای لازم نیـز می‌تـوان سـلامت ترانسـفورماتور و عمـر باقیمانـده‌ی آن را شناسـایی کـرد. وضعیـت ترانسـفورماتور درحال‌بهره‌بـرداری، وابسـتگی زیـادی بـه سـلامت روغـن دارد. هرچـه کیفیـت روغـن اولیـه بالاتـر و سـرویس‌ونگهداری روغـن بهتـر باشـد، وضعیـت ترانسـفورماتور پایدارتـر و عمـر آن بیشـتر اسـت. در خصـوص ارزیابـی وضعیـت و تعییـن سـلامت ترانسـفورماتور و روغـن، اسـتانداردها و دسـتورالعمل‌های زیـادی تدویـن شـده اسـت کـه بـا رعایـت آن‌هـا می‌تـوان از بهره‌بـرداری ایمـن و بلندمـدت ایـن دو مطمئـن شـد. بهره‌بـردار ترانسـفورماتور بـا انجـام آزمون‌هـای روغـن و تحلیـل نتایـج می‌توانـد بـه سـه سـؤال مهـم ذیـل پاسـخ دهـد:

آیا روغن داخل ترانسفورماتور همچنان قابل استفاده است؟
آیا خطایی در ترانسفورماتور وجود دارد؟
عمر باقیمانده‌ی ترانسفورماتور چقدر است؟

موضـوع کتـاب حاضـر روغـن ترانسـفورماتور اسـت. همـه‌ی آنچـه بایـد دربـاره‌ی روغـن ترانسـفورماتور بدانیـد، از جملـه مشـخصات فیزیکـی و شـیمیایی روغـن، نحـوه‌ی تولیـد و انبـارش، تزریـق روغـن بـه ترانسـفورماتور، پایـش وضعیـت، سـرویس و نگهـداری از روغـن و همچنیـن ارزیابـی وضعیـت و تخمیـن عمـر باقیمانـده‌ی ترانسـفورماتور بـا کمـک روغـن، در ایـن کتـاب شـرح داده شـده اسـت. نویسـنده‌ی ایـن کتـاب تـلاش بسـیاری کـرده اسـت تـا روغـن ترانسـفورماتور را کـه موضوعـی مشـترک بیـن بـرق و شـیمی اسـت، بـه زبـان سـاده بـرای هـر دو گـروه از مخاطبـان توضیـح دهـد. بـا وجـود ایـن ساده‌سـازی، از کتـاب حاضـر می‌تـوان بـه عنـوان مرجـع معتبـری در بحـث سـیالات

عایقی استفاده کرد. از صمیم قلب آرزومندم ترجمه‌ی فارسی این کتاب در افزایش دانش فنی مشاورین، سازندگان و بهره‌برداران ترانسفورماتور، کارشناسان آزمایشگاه، محققین، اساتید دانشگاه و دانشجویان رشته های برق و شیمی در ایران مؤثر باشد.

بهروز پهلوانپور
اسفندماه ۱۴۰۲

مقدمه

ایده‌ی نوشتن کتاب در خصوص روغن ترانسفورماتور در زمان شیوع پاندمی کرونا به ذهن من خطور کرد. در این دوران همه‌ی ما در چهاردیواری خانه محصور شده بودیم و من به دنبال موضوعی بودم که حواسم را از اخبار ناگواری که از سراسر دنیا مخابره می‌شد، پرت کنم. هرچند گرفتن تصمیم در خصوص نوشتن کتاب، یک موضوع است و عملی کردن این تصمیم یک موضوع دیگر. من منابعی که برای نوشتن کتاب نیاز داشتم را بررسی کردم و دیدم تنها داشتن تجربه و تخصص در شیمی کافی نیست. باید این دانش و تجربه را به آنچه به‌صورت کاربردی برای ترانسفورماتور معنا دارد ترجمه کرد. این به‌ویژه برای روغن ترانسفورماتور که مبحثی میان‌رشته‌ای است صادق است. چنین کتابی باید بتواند با ترکیب کردن مباحث شیمی روغن و کاربردهای عملی آن در ترانسفورماتور، هم برای متخصصین برق و هم برای متخصصین شیمی مفید باشد. تمام تلاش من این بوده است که مطالب کتاب برای هر دو گروه از متخصصین به آسانی قابل درک باشد. البته داور نهایی در این خصوص خوانندگان کتاب خواهند بود.

من کتاب را به ده فصل تقسیم کرده و در هر فصل یکی از جنبه‌های کاربردی روغن را معرفی کرده‌ام. فصل اول خوانندگان را با روغن معدنی، شیمی روغن و ویژگی‌های کاربردی آن آشنا می‌کند. در حقیقت همین ویژگی‌های منحصربه‌فرد باعث شده است که روغن معدنی همچنان انتخاب اول در صنعت ترانسفورماتور باشد. در این فصل همچنین ترانسفورماتورهایی که از عایق مایع استفاده نمی‌کنند (مثل ترانسفورماتورهای خشک، گازی و ابررسانا) و روغن‌های جایگزین روغن معدنی نیز به اختصار معرفی شده‌اند. استانداردهای بین‌المللی مهم در خصوص روغن معدنی و اختلاف بین آن‌ها نیز در فصل اول مورد بررسی قرار گرفته است. فصل دوم به موضوع اکسیداسیون و پیری روغن معدنی در ترانسفورماتور در حال بهره‌برداری اختصاص دارد.

بسیاری از مسائل مرتبط با اکسیداسیون روغن مانند علت، نتایج و مکانیزم اکسیداسیون، پایش وضعیت روغن، استانداردهای سرویس و نگهداری از روغن، روش‌های کندکردن روند پیری و از همه مهم‌تر تصفیه فیزیکی و شیمیایی روغن در حال بهره‌برداری در این فصل بررسی شده‌اند.

موضوع فصل سوم کتاب، خوردگی مس است. در این فصل موضوعات مهمی چون گوگرد خورنده، علت، مکانیزم و نحوه‌ی شناسایی خوردگی مس و همچنین اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. فصل چهارم به بررسی مسئله‌ی رطوبت در ترانسفورماتور اختصاص یافته است. رطوبت معضلی است که بسیاری از بهره‌برداران ترانسفورماتور با آن دست‌به‌گریبان هستند. مسئله‌ی رطوبت، پیچیده‌ترین موضوعی است که در این کتاب به آن پرداخته شده است. آب در ترانسفورماتور، هم ناخواسته است و هم نامطلوب. در عین حال شیمی‌فیزیک پیچیده‌ای دارد. رطوبت دائما با کوچک‌ترین تغییر دما از یک قسمت ترانسفورماتور به قسمت دیگر منتقل می‌شود. دنبال کردن مسیر جابجایی رطوبت در ترانسفورماتور بسیار دشوار است. بدین منظور در آزمایشگاه باید آزمون‌های دقیقی، مطابق با شرایط کاری ترانسفورماتور شبیه‌سازی کنیم. تحقیقات بسیار زیادی در سراسر دنیا در این خصوص انجام شده است. من در این فصل تلاش کرده‌ام مهم‌ترین آن‌ها را بررسی کنم. از نتایج این تحقیقات، الزامات استانداردها و داده‌های واقعی از ترانسفورماتور که در این فصل تشریح شده‌اند، می‌توان برای شناسایی دقیق مسئله و تفسیر و تحلیل استفاده کرد.

موضوع فصول پنجم و ششم کتاب شناسایی میزان تخریب عایق سلولزی با استفاده از شاخص‌های شیمیایی فوران و متانول است. تخمین عمر ترانسفورماتور برای بهره‌برداران این تجهیز اهمیت زیادی دارد. در این فصل پیچیدگی‌های مربوط به عوامل تأثیرگذار بر تحلیل نتایج تشریح شده‌اند. بررسی موشکافانه‌ی این پیچیدگی‌ها به بهره‌برداران ترانسفورماتور کمک می‌کند درک صحیحی از موضوع تخمین عمر این تجهیز داشته باشند. مزایا، محدودیت‌ها و آینده‌پژوهی در خصوص این شاخص‌ها نیز در این دو فصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

فصل هفتم به آنالیز گازهای محلول در روغن اختصاص یافته است. این روش عیب‌یابی، به‌صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های تجربی دهه‌های گذشته، منجر به طراحی روش‌هایی کاربردی شده است که شرایط خطا در ترانسفورماتور را شناسایی می‌کنند. روش‌های ارزیابی وضعیت به بهره‌بردار

ترانسفورماتور این امکان را می‌دهد که با انجام اقدام اصلاحی به موقع مانع از وقوع حادثه شود. درخصوص این موضوع، استانداردهای IEC و IEEE متعددی وجود دارد که بر اساس تجارب و داده‌های جدید به‌روزرسانی می‌شوند. در این فصل تلاش شده است این موضوع پیچیده و در حال رشد به دقت بررسی شده و ابزاری برای تحلیل گازهای تولید شده در اختیار بهره‌برداران ترانسفورماتور قرار داده شود. در فصل هفتم همچنین دو موضوع مهم تمایل به تولید گاز و گازهای سرگردان در روغن معدنی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

موضوع فصل هشتم عایق‌های مایع جایگزین روغن معدنی به‌ویژه روغن‌های استر طبیعی و سنتزی است. در این فصل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و عایقی این روغن‌ها بررسی شده است. در ادامه مزایا و معایب استفاده از این روغن‌ها به عنوان جایگزین روغن معدنی معرفی شده است. همچین به ویژگی‌های خاص این روغن‌ها اشاره کرده‌ام؛ که موجب می‌شود در شرایط ویژه، بیشتر از آن‌ها استفاده شود. در فصل نهم، مقایسه‌ی دقیقی بین ویژگی‌های عایقی و حرارتی روغن‌های استر و روغن معدنی صورت گرفته است. تمرکز این فصل، بر ملاحظات طراحی عایقی و حرارتی ترانسفورماتورهای حاوی روغن‌های استر است.

فصل دهم نیز به موضوع جدید نانوسیالات اختصاص یافته است. در این فصل، ویژگی‌های عایقی و حرارتی نانوسیالات بررسی و با روغن‌های دیگر مقایسه شده است. همچنین مکانیزمی که باعث شده نانوسیالات ویژگی‌های عایقی بسیار خوبی داشته باشند، به‌صورت خلاصه بررسی شده است. در انتها چالش‌ها و فرصت‌هایی که نانوسیالات برای استفاده به‌عنوان عایق مایع جایگزین در ترانسفورماتور دارند بیان شده است.

امیدوارم این کتاب برای بهره‌برداران ترانسفورماتور، شرکت‌های تولیدکننده‌ی روغن، شیمی‌دان‌ها و همچنین دانشگاه‌ها، ارزش عملی داشته باشد.

سی. اس. ناراسیمهان

فصل اول

روغن معدنی در ترانسفورماتور

مشخصات فنی، عملکرد، استانداردها و دلایل ماندگاری آن در صنعت ترانسفورماتور

۱-۱) معرفی

تصور ترانسفورماتور بدون وجود روغن سخت است. البته در سال‌های گذشته جایگزین‌هایی برای این نوع ترانسفورماتورها معرفی شده‌اند. اما ترانسفورماتورهای روغنی و روغن عایقی معدنی همچنان دست بالا را در صنعت دارند. چرا؟ چگونه می‌توان ترانسفورماتورهای روغنی را با سایر ترانسفورماتورها مقایسه کرد؟ روغن عایقی معدنی چه ویژگی منحصربه‌فردی دارد که آن را به گزینه‌ی اصلی خریدار ترانسفورماتور تبدیل کرده است؟ این روغن در طی سال‌های گذشته چگونه بهبود یافته است؟ استانداردهای بین‌المللی روغن معدنی چیست و این استانداردها چه اختلاف اساسی با یکدیگر دارند؟ این سؤالات اصلی است که فصل اول به آن‌ها پاسخ خواهد داد.

پیش از آن‌که وارد مبحث اصلی شویم باید ترانسفورماتور را تعریف کنیم. ترانسفورماتور یک تجهیز الکتریکی استاتیک متشکل از حداقل دو سیم‌پیچی عایق‌شده‌ی جداگانه است؛ که در یک مدار مغناطیسی متشکل از هسته‌ی آهنی قرار گرفته‌اند. سیم‌پیچی‌ها نسبت به هم و هسته عایق هستند. ترانسفورماتور، انتقال جریان و ولتاژ بین دو سیم‌پیچی را امکان‌پذیر می‌سازد. انتقال انرژی الکتریکی از یک سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دیگر بر اساس اصول الکترومغناطیس و القای مغناطیسی صورت می‌گیرد. بر اساس اصل الکترومغناطیس، عبور جریان از سیم‌پیچی، میدان مغناطیسی در هسته به وجود می‌آورد. بر اساس اصل القای مغناطیسی، تغییر جریان AC در سیم‌پیچ اولیه موجب تغییر در میدان مغناطیسی شده و در نهایت ولتاژی در سیم‌پیچ ثانویه القا می‌کند. نسبت بین تعداد دورهای اولیه و ثانویه تعیین کننده‌ی کاهش یا افزایش ولتاژ القایی است. برای آشنایی بیشتر با ترانسفورماتور مرجع [۱] را مطالعه کنید.

در ترانسفورماتور معمولا برای عایق کردن هادی‌ها از ترکیب عایق‌های جامد و مایع استفاده می‌شود. کاغذهای ویژه نقش عایق جامد و روغن نقش عایق مایع را ایفا می‌کنند. عایق مایع همچنین وظیفه‌ی خنک‌کنندگی ترانسفورماتور را نیز برعهده دارد. در اوایل دهه‌ی ۱۸۸۰ میلادی از روغن گیاهی به‌صورت آزمایشی به‌عنوان عایق مایع در ترانسفورماتور استفاده شد [۲]. علت این بود که در آن زمان هیچ جایگزین مناسبی وجود نداشت. اما به دلایل ذیل روغن معدنی به‌سرعت جایگزین شد:

۱. روغن گیاهی در آن زمان پالایش مناسبی نداشت و حاوی آلودگی‌های قطبی بود.
۲. افزایش تولید نفت خام و پیشرفت در فناوری‌های پالایش در دهه‌ی ۱۸۸۰، راه را برای

تولید روغن‌های معدنی (روغن پایه) با کیفیت بسیار بهتر از روغن‌های گیاهی، هموار کرد.
۳. هزینه‌ی روغن‌های پایه بسیار کمتر و عملکرد آن بسیار بهتر از روغن‌های گیاهی بود.

در طی ۱۳۰ سال گذشته روغن معدنی به دلایل ذیل بی‌همتا بوده است:

- عمر زیاد
- قابلیت اطمینان
- عملکرد مناسب با قیمت پایین

البته در طی ۵۰ سال گذشته روغن‌های جایگزین روغن معدنی تولید و برخی از آن‌ها به‌صورت تجاری به صنعت معرفی شدند. اما هیچکدام از آن‌ها نتوانستند چالشی اساسی برای کاربرد گسترده‌ی روغن معدنی ایجاد کنند. در بخش بعدی برخی از این روغن‌های جایگزین به اختصار معرفی و با روغن معدنی مقایسه می‌شوند. این مقایسه دلیل ماندگاری روغن معدنی در صنعت ترانسفورماتور را آشکار خواهد ساخت. می‌توان با اطمینان بالا پیش‌بینی کرد که در دهه‌های پیش‌رو روغن معدنی همچنان نقش اصلی را در صنعت ترانسفورماتور بازی خواهد کرد مگر آن‌که به‌دلایل زیست‌محیطی مصرف آن با محدودیت‌هایی همراه شود.

۱-۲) جایگزین‌های روغن معدنی

جایگزین‌های مهم روغن معدنی عبارتند از: عایق‌های مایع[1] سیلیکونی، استر طبیعی و استر سنتزی. این روغن‌ها[2] با جزئیات بیشتر در فصل هشتم کتاب توضیح داده شده‌اند. با این وجود به دلایل ذیل، روغن عایقی معدنی استفاده‌ی بیشتری در صنعت ترانسفورماتور دارد:

- هزینه‌ی پایین نسبت به روغن‌های جایگزین
- قابلیت خنک‌کنندگی: روغن معدنی پایین‌ترین گرانروی را نسبت به روغن‌های جایگزین دارد.
- فناوری تولید امتحان پس داده: فناوری تولید ترانسفورماتور تا سطح ولتاژ ۱۲۰۰ کیلوولت با روغن معدنی کاملا جا افتاده است.
- شناسایی خطای احتمالی ترانسفورماتور با آنالیز گازهای محلول در روغن[3] معدنی با توجه به دهه‌ها تجربه بسیار معمول است.
- روغن معدنی پایداری اکسیداسیون مناسبی دارد.

چرا و چگونه روغن معدنی در ۱۳۰ سال گذشته کاربرد وسیعی یافته است؟ پاسخ در پیشرفت فناوری‌های روغن پایه نهفته است. این فناوری‌ها تولید روغن‌های پالایش شده با پایداری اکسیداسیون خوب، گرانروی پایین، عاری از گوگرد و غیرخورنده را امکان‌پذیر کرده‌اند. توضیح کوتاهی در خصوص فناوری‌های پیشرفته‌ی پالایش روغن معدنی در بخش چهارم فصل حاضر ارائه شده است. در بخش بعدی مروری مختصر بر ترانسفورماتورهایی خواهیم داشت که از روغن استفاده نمی‌کنند.

---

1. Insulating Liquids

۲. در متن اصلی کتاب بیشتر از واژه‌ی «عایق‌های مایع» و در بعضی موارد از واژه‌ی «روغن» برای اشاره به این مواد استفاده شده است. با توجه به اینکه اصطلاحاتی همچون «روغن استر» و «روغن سیلیکونی» در ایران کاملا جا افتاده است، ما نیز از این عبارات در ترجمه و ویراستاری کتاب استفاده کرده‌ایم (م.)

3. DGA: Dissolved Gas Analysis