دانشگاه تهران

پایش شیمیایی-فیزیکی روغن

Chemo Physical Monitoring of Oil Insulation

محمد حامد صمیمی
دانشگاه تهران

دانشگاه تهران

تعیین وضعیت کاغذ

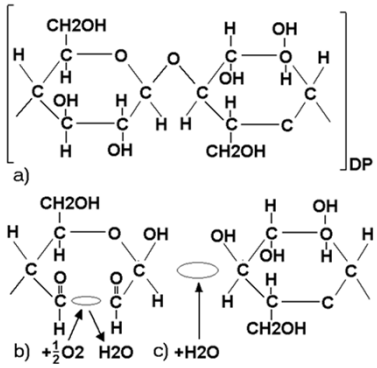
- اندازه‌گیری عدد پلیمریزاسیون (DP)
- اندازه‌گیری مشتقات فوران

تعیین وضعیت روغن

- رنگ
- عدد اسیدی
- کشش بین سطحی
- سولفور خورنده
- بازدارنده‌ها
- منفعل‌کننده‌ها

عدد پلیمریزاسیون

- ✓ سلولز زنجیره‌ای از مولکول‌های گلوکز است که توسط اتم‌های اکسیژن به یکدیگر متصل شده‌اند.
- ✓ شکستن پیوندها در فرآیند پیریپ
- ✓ عدد پلیمریزاسیون یا DP متوسط تعداد مولکول‌های گلوکز در زنجیره‌های سلولز کاغذ است.



شکست زنجیره سلولز

کاهش عدد پلیمریزاسیون

Degree of Polymerization (DP)

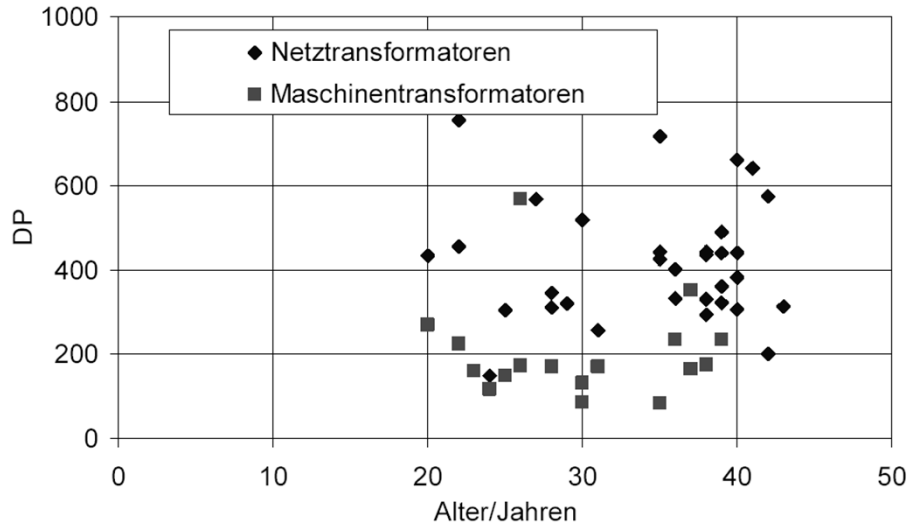
عدد پلیمریزاسیون

- ✓ با پیر شدن کاغذ، الیاف سلولز کوتاه‌تر شده و کاغذ استقامت مکانیکی خود را از دست می‌دهد.
- ✓ DPبرای کاغذ نو عددی بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ است که در فرآیند خشک‌سازی مقداری کاهش می‌یابد و سپس با پیر شدن کاغذ عدد آن کوچک‌تر می‌شود.
- ✓ تحقیقات نشان داده‌اند که استقامت مکانیکی کاغذ در بازه DP 950تا ۵۰۰ تقریبا ثابت است اما در بازه ۵۰۰ تا ۲۰۰ به صورت خطی با DP کاهش می‌یابد.

عدد پلیمریزاسیون

- ✓ زمانی که DP به عددی حدود ۲۰۰ یا ۱۵۰ کاهش می‌یابد، گفته می‌شود که کاغذ به پایان عمر خود رسیده است
- ✓ البته باید ذکر گردد که مطابق تحقیقات میدانی مشخص شده است که تعداد قابل توجهی از ترانسفورماتورهایی که بدون مشکل در حال کار هستند DP کوچک‌تر از ۱۵۰ دارند
- ✓ فرآیند تعیین DP در IEC 60450 و ASTM D4243-86 ذکر شده است. فرآیند معمولا به این صورت است که کاغذ در یک محلول حل شده رقیق می‌گردد و سپس DP بر اساس گران‌روی محلول تعیین می‌شود.
- ✓ مشکل این روش آن است که به نمونه‌برداری کاغذ از تجهیز احتیاج دارد که معمولا میسر نیست.

پیری سلولز در ترانسفورماتورهای بزرگ

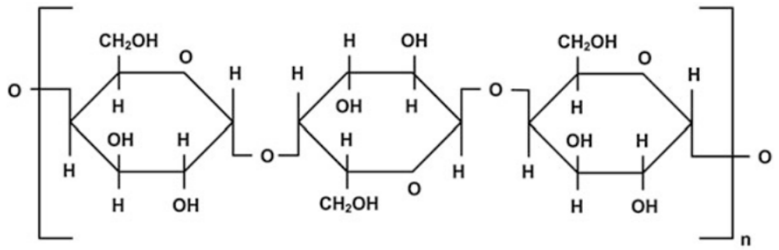


عدد پلیمریزاسیون

- ✓ این فرآیند مطابق استاندارد IEC 450 انجام می‌شود.
- ✓ برای تعیین، سلولز در محلول copper ethyldiamine حل می‌شود. گران‌روی محلول حاصل معیاری از متوسط طول زنجیره سلولز است.
- ✓ سلولز نو عددی حدود ۱۳۰۰ تا ۱۴۰۰ دارد و حد عملکردی آن تا حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ است که در این مقدار کاغذ شکننده و ترد می‌شود.
- ✓ مشکل این روش آن است که به نمونه‌برداری کاغذ از تجهیز احتیاج دارد که معمولا میسر نیست.

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ سلولز زنجیره‌ای از مولکول‌های گلوکز است که توسط اتم‌های اکسیژن به یکدیگر متصل شده‌اند.
- ✓ شکستن پیوندها در فرآیند پیری
- ✓ محصولات عمده: CO، CO_2، رطوبت، اسیدهای ارگانیک و مولکول‌های آزاد گلوکز



آنالیز مشتقات فوران

- ✓ در اثر واکنش‌های ثانوی، مولکول‌های گلوکز تبدیل به ترکیبات آروماتیکی می‌شوند که به نام مشتقات فوران شناخته می‌شوند.
- ✓ به همین دلیل با اندازه‌گیری مشتقات فوران در روغن می‌توان تا حدودی به وضعیت پیری عایق کاغذی پی برد.
- ✓ انجام آزمون زمانی که DGA با نسبت CO_2/CO حضور کاغذ در خطا را نشان می‌دهد.

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ انواع مشتقات فوران:

2-furfuraldehyde (2FAL), 5-hydroxy-methyl 2-furfuraldehyde (5H2F), 2-acetylfuran (2ACF), 5-methyl 2-furfuraldehyde (5M2F), and 2-furfuryl-alcohol (2FOL)

- ✓ به جز 2FAL سایر ترکیبات در روغن ناپایدار هستند و به مرور زمان به مواد دیگر و 2FAL تبدیل می‌شوند.
- ✓ به همین دلیل، در بین ترکیبات فوق تنها 2FAL در حال حاضر برای تشخیص وضعیت کاغذ استفاده می‌شود.
- ✓ مشتقات فوران (مثل فورفورال) توسط کروماتوگرافی مایع و مطابق IEC 61198 انجام می‌شود.

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ ترکیبات فوران معمولا بسیار کم است و ممکن است به جای ppm برحسب ppb (Part per billion) بیان شود.
- ✓ مزیت روش تحلیل مشتقات فوران در آن است که این ترکیبات توسط خود روغن نمی‌توانند تولید شوند و محصول پیری کاغذ هستند.
- ✓ تلاش‌های آزمایشگاهی بسیاری برای ارتباط دادن ترکیبات فوران با پیری کاغذ (خصوصا عدد پلیمریزاسیون) انجام شده است که نتایج مطلوبی داشته است اما بروشور ۴۹۴ سیگره صراحتا قید می‌کند که علی رغم نتایج مناسب آزمایشگاهی، برقراری ارتباط بین مشتقات فوران و عدد پلیمریزاسیون کاغذ در موارد عملی مشکل است.

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ مشتقات فوران حد آستانه ندارد و بایستی به صورت مقایسه‌ای استفاده شود.
- ✓ راه جایگزین استفاده از بانک اطلاعاتی ترانسفورماتورهای موجود است.
- ✓ نباید به تنهایی معیار تصمیم‌گیری باشد.
- ✓ وابستگی فوران به:
  - ➢ رطوبت، دما و اکسیژن
  - ➢ مقدار کاغذ و نوع آن، توانایی کاغذ در نگهداری این مشتقات
  - ➢ حضور بازدارندها در روغن
  - ➢ فیلتر کردن یا تعویض روغن

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ گرچه IEEE C57.152 تلویحا ذکر می‌کند که غلظت ترکیبات فوران معمولا کمتر از 0.5 ppm است اما برشور ۴۹۴ سیگره صراحتا ذکر می‌کند که امکان تعیین یک حد آستانه برای ترکیبات فوران برای تشخیص وضعیت پیری کاغذ امکان‌پذیر نیست.
- ✓ به اختصار می‌توان گفت که به دلیل اینکه غلظت ترکیبات فوران به عوامل بسیاری بستگی دارد، تعیین یک حد آستانه برای آن به منظور عیب‌یابی امکان پذیر نیست.

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ گزارش علمی IEC/TR 62874:2015 در ضمیمه A، مطالعاتی را گزارش کرده است که بر روی حدود ۴۰۰۰ واحد ترانسفورماتور با عمرهای مختلف انجام شده است. نتیجه این مطالعه در ادامه آورده شده است.
- ✓ منظور از ۹۰ و ۹۸ آن است که ۹۰٪ یا ۹۸٪ ترانسفورماتور مقادیری کمتر از آن‌چه که در جدول قید شده است داشته‌اند.
- ✓ خود این گزارش تاکید می‌کند که این مقادیر نبایستی به عنوان حد آستانه در نظر گرفته شود و صرفا جهت اطلاع از حدود فوران ذکر شده است. مقادیری که در جدول با خط تیره نشان داده شده‌اند به دلیل کم بودن داده‌ها محاسبه و گزارش نشده‌اند

نتیجه مطالعات مشتقات فوران

مقادیر معمول 2-FAL برای ترانسفورماتورهای نیروگاهی پرشده از روغن بدون بازدارنده.

عمر ←	کمتر از ۱ سال		۱ تا ۱۰ سال		۱۰ تا ۳۰ سال		بیشتر از ۳۰ سال	
صدک ↓	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.
90	<0.05	<0.01	0.3	0.04	2.0	0.30	3.0	-
98	<0.05	<0.01	1.0	0.10	4.0	0.70	6.0	-

منظور از .Conc مقدار غلظت بر حسب mg/kg (ppm) و منظور از Rol مقدار رشد بر اساس mg/kg/y (ppm در سال) است.

مقادیر معمول 2-FAL برای ترانسفورماتورهای نیروگاهی پرشده از روغن دارای بازدارنده.

عمر ←	کمتر از ۱ سال		۱ تا ۱۰ سال		۱۰ تا ۳۰ سال		بیشتر از ۳۰ سال	
صدک ↓	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.
90	-	-	0.10	-	0.80	0.25	-	-
98	-	-	0.15	-	1.50	0.60	-	-

منظور از .Conc مقدار غلظت بر حسب mg/kg (ppm) و منظور از Rol مقدار رشد بر اساس mg/kg/y (ppm در سال) است.

نتیجه مطالعات مشتقات فوران

مقادیر معمول 2-FAL برای ترانسفورماتورهای انتقال پرشده از روغن بدون بازدارنده.

عمر ←	کمتر از ۱ سال		۱ تا ۱۰ سال		۱۰ تا ۳۰ سال		بیشتر از ۳۰ سال	
صدک ↓	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.	Conc.	Rol.
90	0.10	0.01	0.3	0.06	1.6	0.25	2.0	0.3
98	0.20	0.02	1.1	0.6	3.5	0.80	4.5	1.1

منظور از .Conc مقدار غلظت بر حسب mg/kg (ppm) و منظور از Rol مقدار رشد بر اساس mg/kg/y (ppm در سال) است.

آنالیز مشتقات فوران

- ✓ IEEE و سیگره راهکارهای زیر را برای استفاده از روش مشتقات فوران توصیه می‌کنند:
- ✓ ۱) بهتر است به جای استفاده از مقدار مطلق ترکیبات، به نرخ افزایش آن‌ها توجه شود. به این ترتیب می‌توان بهتر در مورد وضعیت پیری کاغذ اظهار نظر کرد.
- ✓ ۲) برای استفاده از مقادیر مطلق بهترین حالت آن است که از یک بانک اطلاعاتی مربوط به ترانسفورماتورهای مشابه و موجود استفاده شود. به بیان دیگر، در صورتی که متوسط مشتقات فوران در ترانسفورماتورهای غیرمشکوک مشخص باشد بهتر می‌توان در مورد مقدار مطلق مشتقات فوران اظهار نظر کرد.
- ✓ ۳) تصمیم‌گیری نباید بر مبنای تنها یک اندازه‌گیری انجام شود و در صورت شک حتما بایستی اندازه‌گیری تکرار شود.

اسیدیته

- ✓ اکسیداسیون روغن باعث تولید محصولات اسیدی شده و به تدریج عدد اسیدی روغن افزایش می‌یابد.
- ✓ اسیدها و سایر محصولات جانبی اکسیداسیون، همراه با آب و آلودگی‌های جامد، بر روی مشخصات عایقی و همچنین سایر مشخصات روغن تاثیر گذاشته و باعث افزایش نرخ تخریب عایق کاغذی نیز می‌شوند.
- ✓ همچنین اسیدها می‌تواند باعث خوردگی قسمت‌های فلزی در ترانسفورماتور شوند.
- ✓ نرخ افزایش اسیدیته روغن در حال کار می‌تواند نشان‌گر مناسبی برای تعیین شدت پیری روغن باشد.

اسیدیته

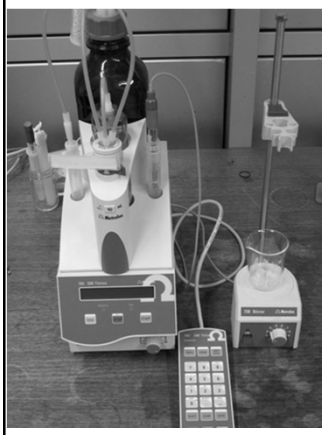
- ✓ اگر روغن وارد مراحل پیشرفته پیری شده باشد اسیدیته بالاتر از 0.1 mg/g خواهد بود.
- ✓ کشش بین سطحی نشان‌گر حساس‌تری در مراحل اولیه پیری روغن است.
- ✓ معمولا عدد اسیدی به عنوان یک راهنمای کلی برای تعیین زمان تعویض یا تصفیه شیمیایی روغن به کار می‌رود.
- ✓ اما زمانی که عدد اسیدی به 0.1 mg/g رسیده باشد، کاغذ نیز از پیری روغن تاثیر پذیرفته است که اثر آن در عدد پلیمریزاسیون عایق کاغذی دیده می‌شود.

اسیدیته

- ✓ به بیان دیگر ممکن است زمانی که عدد اسیدی به حدی می‌رسد که نشان‌گر مناسبی باشد، عایق کاغذی آسیب دیده باشد. به همین دلیل معمولا کشش بین سطحی، مراحل اولیه پیری را بهتر نشان می‌دهد.
- ✓ در مورد روغن‌های دارای بازدارنده، در صورتی که مقدار بازدارنده کافی باشند نبایستی افزایشی در مقدار اسیدیته دیده شود.

تعیین عدد اسیدی

تعیین عدد اسیدی به کمک فرایند تیتراسیون



- ✓ یک محلول با غلظت مشخص از باز (محلول استاندارد) به روغن اضافه می‌شود تا زمانی که محلول به حالت خنثی درآید.
- ✓ میزان عدد اسیدی به صورت زیر تعریف می‌شود: چند mg باز KOH به یک گرم روغن اضافه شده تا ماده به حالت خنثی برسد.
- ✓ یافتن نقطه خنثی به کمک روش پتانسیومتری

ارزیابی عدد اسیدیته

بازه‌های مربوط به آزمون‌های مختلف و اقدامات اصلاحی توصیه‌شده مطابق استاندارد IEC 60422.

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
اسیدیته (mg_{KOH}/g_{oil})	< 0.10	0.1-0.15	> 0.15	***خوب:*** ادامه انجام آزمون به صورت سالیانه ***متوسط:*** نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی کمتر. وجود رسوب و لجن را بررسی کنید. در صورتی که روغن دارای بازدارنده باشد و به وضعیت متوسط رسیده باشد، این احتمال وجود دارد که مقاومت خود در برابر اکسیداسیون را از دست داده است. ***ضعیف:*** زمانی که مقدار اسیدیته از 0.15 فراتر می‌رود، تصمیمی بایستی اتخاذ شود که چه زمانی تصفیه شیمیایی انجام شود و یا در صورتی که اقتصادی‌تر باشد و بقیه آزمون‌ها نیز پیری شدید روغن را نشان دهند، روغن تعویض گردد.

کشش بین سطحی

- ✓ کشش بین سطحی IFT بین روغن و آب روشی برای تعیین میزان آلودگی‌های قطبی حل‌شونده و محصولات جانبی پیری روغن است.
- ✓ این مشخصه در مراحل اولیه پیری تقریبا سریع تغییر می‌کند اما زمانی که پیری در مرحله میانی است تغییرات آن کند می‌شود. لذا به عنوان نشان‌گر پیری در مراحل اولیه، کشش بین سطحی بر سایر روش‌ها ترجیح دارد.
- ✓ در نقطه مقابل، اسیدیته در مراحل اولیه به کندی تغییر می‌کند اما در مراحل نهایی تغییرات سریعی دارد.
- ✓ شاخص کیفیت روغن هر دو مورد را در خود لحاظ کرده است.

کشش بین سطحی

- ✓ با توجه به این که این دو نشان‌گر به صورت مکمل عمل می‌کنند یک شاخص اکسیداسیون یا OQIN تعریف می‌شود که برابر مقدار کشش بین سطحی تقسیم‌بر مقدار اسیدیته است.
- ✓ شاخص اکسیداسیون، شاخص مفیدتری است چرا که این شاخص با پیری روغن تناسب بیشتری دارد. برای ترانسفورماتورهای پربار، تخریب و پیری مواد با سرعت بیشتری رخ می‌دهد و از IFT می‌توان به عنوان ابزاری برای تشخیص پیری استفاده کرد.

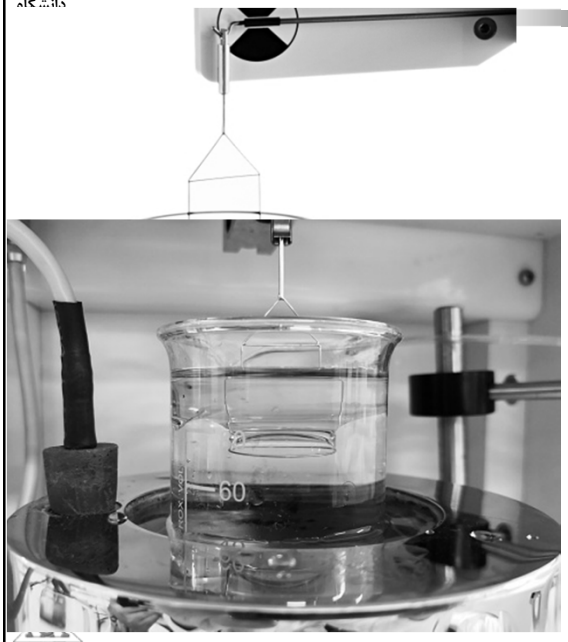
کشش بین سطحی

- ✓ لازم به ذکر است که گرچه آزمون IFTدر استاندارد به عنوان آزمون‌های تکمیلی معرفی شده است اما با توجه به اینکه مراحل اولیه پیری روغن را نشان می‌دهد و همچنین می‌تواند تاییدی بر صحت یا خطای آزمون اسیدیته باشد، از این جهت با پیشنهاد متخصصان در زمره آزمون‌های روتین روغن قرار داده شده است.

کشش بین سطحی

- ✓ در تفسیر نتایج IFT بایستی جانب احتیاط حفظ شود. تغییر سریع IFT می‌تواند نشانه‌ای از مشکلات سازگاری بین روغن و برخی از مواد درون ترانسفورماتور مثل واشرها یا ناشی از آلودگی تصادفی در هنگام پر کردن روغن باشد. جهت کنترل این موارد می‌توان سایر پارامترهای روغن نظیر مشخصات الکتریکی را اندازه‌گیری کرد.
- ✓ در مورد ترانسفورماتورهای پربار، تخریب مواد سریع‌تر است و کشش بین‌سطحی ابزاری برای تشخیص این تخریب محسوب می‌شود.

اندازه‌گیری کشش بین سطحی روغن و آب



- ✓ کالیبراسیون
- ✓ ریختن آب و سپس روغن در یک ظرف
- ✓ قرار دادن یک حلقه در آن و اندازه‌گیری نیرو برای غلبه بر کشش بین سطحی

ارزیابی کشش بین سطحی

دانشگاه تهران

بازه‌های مربوط به آزمون‌های مختلف و اقدامات اصلاحی توصیه‌شده مطابق استاندارد IEC 60422.

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
کشش بین سطحی (mN/m)	روغن دارای بازدارنده			***خوب:*** ادامه انجام آزمون به صورت سالیانه
	> 28	22 – 28	< 22	***متوسط:*** نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی کمتر.
	روغن بدون بازدارنده			***ضعیف:*** وجود رسوب و لجن را بررسی کنید.
	> 25	20 – 25	< 20	

شاخص کیفیت روغن

- ✓ شاخص کیفیت روغن OQIN که به صورت کشش سطحی تقسیم‌بر عدد اسیدیته تعریف می‌شود می‌تواند برای ارزیابی کیفیت روغن نیز استفاده شود. این ضریب به عنوان شاخص اکسیداسیون و شاخص عددی مایر هم شناخته می‌شود.
- ✓ لازم به ذکر است که این شاخص در بروشور سیگره بدون ذکر محدوده مورد اشاره قرار گرفته است و علت آن نیز در بخش مربوط به کشش سطحی این گزارش بیان شده است. محدوده این شاخص هنوز در هیچ یک از استانداردها آورده نشده است و صرفا جنبه کمکی دارد.

شاخص کیفیت روغن

حدود شاخص کیفیت روغن.

وضعیت روغن	محدود شاخص کیفیت
خوب	300 – 1500
تقریبا خوب	271 – 600
مرزی (متوسط)	160 – 318
بد	45 – 159
خیلی بد	22 – 44
به‌شدت بد	6 – 21

رنگ و ظاهر روغن

- ✓ تغییر رنگ روغن می‌تواند نشانه مستقیمی از آلودگی روغن باشد. همچنین تغییر رنگ به طور معمول ناشی از اکسیداسیون روغن است. علاوه بر دو مورد فوق، وجود ذرات کربن نیز باعث تیره‌شدن روغن می‌شوند. بنابراین، توجه به رنگ روغن یکی از ساده‌ترین کنترل‌هایی است که می‌تواند برخی از عوامل پیش‌گفته را آشکار سازد.
- ✓ در صورتی که ظاهر روغن به صورت ابرآلود و یا دارای ذرات باشد، می‌تواند نشانه‌ای از آب آزاد، لجن غیرمحلول، ذرات کربن، ذرات الیاف گونه و یا سایر آلودگی‌ها باشد.

شماره رنگ

- ✓ عدد رنگ روغن نشان می‌دهد که روغن چه میزان پیر شده است.

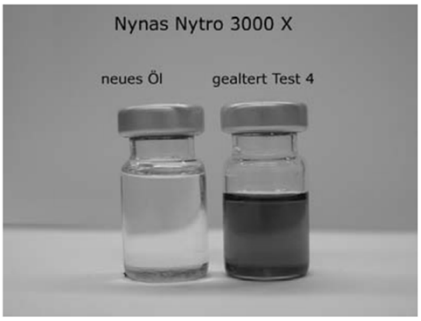
شماره رنگ	رنگ روغن
۱	بی‌رنگ
۲	زرد روشن
۳	زرد
۴	قهوه‌ای روشن
۵	قهوه‌ای
۶	قهوه‌ای تیره
۷	قهوه‌ای-سیاه
۸	قهوه‌ای-سیاه

ارزیابی رنگ روغن

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
رنگ و ظاهر	شفاف و بدون آلودگی قابل رویت		تیره و یا کدر (دارای ذرات)	تصمیم بایستی بر اساس سایر آزمون‌ها اتخاذ شود.

رنگ و ظاهر روغن

- ✓ محصولات جانبی ناخواسته
- ✓آب آزاد
- ✓ لجن غیرمحلول
- ✓ نتایج آن
- ✓کاهش ولتاژ شکست
- ✓ کاهش خنک‌سازی



ارزیابی محتوای بازدارنده‌ها

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
محتوای بازدارنده‌ها	بزرگ‌تر از ۶۰٪ مقدار اولیه	بین ۴۰ تا ۶۰٪ مقدار اولیه	کمتر از ۴۰٪ مقدار اولیه	***متوسط:*** (زمانی که اسیدیته کمتر از $0.08\ mg_{KOH}/g$ و کشش بین سطحی بزرگ‌تر از $28\ mN/m$ باشد) با استفاده از بازدارنده‌ها و بر اساس تجربیات، روغن را مجددا به سطح اول از بازدارنده‌ها برسانید.
				ضعیف: به استفاده از روغن و کنترل کیفیت آن مانند یک روغن بدون بازدارنده ادامه دهید. روغن را تصفیه شیمیایی کرده و یا تعویض کنید.
نکات: این موضوع مختص روغن‌های دارای بازدارنده است. با تولیدکننده روغن مشورت کنید.				

غیرفعال کننده

- ✓ اضافه کردن غیرفعال‌کننده فلز یک روش برای کاهش خطر سولفور خورنده است. مقدار معمول 100 mg/kg (0.01% وزنی) غیرفعال‌کننده برای جلوگیری از واکنش مس با سولفور خورنده به روغن اضافه می‌شود.
- ✓ غیرفعال‌کننده‌ها علاوه بر کنترل واکنش‌های سولفور خورنده در بهبود پایداری در برابر اکسیداسیون نیز نقش دارند. میزان غیرفعال‌کننده‌ها بایستی به صورت منظم در طول دوره کار ترانسفورماتور کنترل شود.

ارزیابی محتوای غیرفعال‌کننده

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
محتوای غیرفعال‌کننده‌ها (mg/kg)	70 < و پایدار (نرخ کاهش کمتر از 10 mg/kg در سال)	50 – 70 یا 70 > با نرخ کاهش بزگتر از 10 mg/kg در سال)	50 > و با نرخ کاهش بزرگتر از 10 mg/kg در سال	***خوب:*** افزایش بازه زمانی اندازه‌گیری قابل قبول است. ***متوسط:*** ادامه انجام آزمون به صورت سالیانه ***ضعیف:*** منبع خورندگی را با تعویض روغن رفع کنید و یا با حذف ترکیبات خورنده به وسیله تصفیه مناسب روغن، به عنوان یک راه‌حل کوتاه‌مدت می‌توان مقدار غیرفعال‌کننده را حداقل تا حد 100 mg/kg افزایش داد.
نکات: روغن‌های با سن بالا، خصوصا روغن‌های فاقد بازدارنده، احتمال بالاتری در کاهش سریع غیرفعال‌کننده‌ها دارند.				

رسوب و لجن

- ✓ رسوب مواد غیر محلولی هستند که در روغن حضور دارند. رسوبات شامل موارد زیر هستند:
  - ✓ ۱- محصولات اکسیداسیون و پیری مواد عایقی جامد و مایع
  - ✓ ۲- ذرات جامدی که از ترانسفورماتور به روغن وارد می‌شود مثل کربن، فلز و اکسیدهای فلزی
  - ✓ ۳- فیبرها و سایر مواد خارجی که می‌تواند منشا متفاوتی داشته باشد.

رسوب و لجن

- ✓ لجن نیز که قبلا توضیح داده شد، محصول نهایی پیری عایق‌های جامد و مایع است که از پلیمریزاسیون روغن ایجاد می‌شود.
- ✓ لجن تا حدی در روغن حل می‌شود که به مشخصات روغن و دمای آن بستگی دارد. در بالاتر از مقدار اشباع، لجن ته‌نشین شده و به رسوبات اضافه می‌شود.
- ✓ لجن و رسوبات می‌توانند مشخصات الکتریکی روغن را تحت تاثیر قرار داده و یا باعث کاهش میزان خنک‌کنندگی ترانسفورماتور شوند و بدین ترتیب نرخ تخریب حرارتی مواد عایقی را افزایش دهند.
- ✓ معمولا توصیه می‌شود که میزان رسوب و لجن پیش از ارسال نمونه روغن برای فرآیند اکسیداسیون اندازه‌گیری شود.

ارزیابی رسوب و لجن

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
رسوب و لجن (%)	روغن بایستی فاقد رسوب یا لجن معلق باشد. مقادیر کمتر از 0.02 % وزنی قابل صرف‌نظر هستند.			در صورت وجود رسوب، روغن را تصفیه فیزیکی کنید. در صورت وجود لجن معلق، روغن را تصفیه شیمیایی کنید. در صورتی که اقتصادی‌تر است و سایر آزمون‌ها نیز دیکته می‌کنند، روغن را تعویض کنید.
نکات: آزمون را تنها زمانی انجام دهید که اسیدیته یا tanδ نزدیک به حدود تعیین‌شده هستند.				

سولفور خورنده

- ✓ . آزمون‌های نظیر DIN 51353 و ASTM D1275 و IEC 62535 این اطمینان را ایجاد می‌کنند که ترانسفورماتور سولفور خورنده ندارد و سطوح فلزی بدون پوشش از خوردگی در امان هستند.
- ✓ البته در IEC 60422 انجام آزمون سولفور خورنده مطابق روش IECتوصیه شده است و آزمون DIN به عنوان مکمل برای اطمینان از عدم خوردگی پیشنهاد شده است.

سولفور خورنده

- ✓ سولفور در روغن پالایش‌شده بسته به درجه پالایش و نفت خام استفاده شده وجود دارد. بعضی از ترکیبات سولفور به عنوان آنتی‌اکسیدان طبیعی عمل کرده و وجود آن‌ها در روغن مفید است.
- ✓ در دماهای بالا، سولفور بر روی سطوح فلزی داغ تجزیه شده و سولفید فلز تولید می‌کند. روش DIN 51353 حساسیت بالاتری برای تشخیص این نوع مشکل دارد. گرچه معمول نیست اما سولفید می‌تواند در دماهای پایین و خصوصا بر روی صفحات نقره‌ای ایجاد شود.
- ✓ آزمایش سولفور خورنده معمولا به ندرت برای ترانسفورماتور مورد نیاز است.

سولفور خورنده

- ✓ تجربیات بین‌المللی نشان داده‌اند که در شرایط خاص مثل دمای کاری بالا، بار زیاد و اکسیژن کم (تجهیزات آب‌بندی‌شده) ممکن است سولفید مس Cu2S در عایق جامد ایجاد شود.
- ✓ وجود این ترکیب هادی می‌تواند باعث بروز عیب در ترانسفورماتور شود.
- ✓ با توجه به اینکه روش‌های پیش‌گفته نمی‌توانند به نحو موثری این ترکیب را شناسایی کنند، روش آزمون جدیدی در IEC 62535 پیشنهاد شده است که تشخیص سولفور بالقوه خورنده نام گرفته است و برای تعیین وجود Cu2S در ترانسفورماتور استفاده می‌شود.

ارزیابی سولفور خورنده

آزمون	حدود توصیه‌شده			اقدامات توصیه شده
	خوب	*متوسط*	*ضعیف*	
سولفور خورنده	غیرخورنده		خورنده	در مورد روغن‌های خورنده: - تحلیل ریسک انجام دهید. - میزان خورندگی روغن را با افزودن غیرفعال‌کننده‌های روغن کاهش دهید (مثل مشتقات triazole) - منبع خورندگی را با تعویض روغن رفع کنید و یا با حذف ترکیبات خورنده به وسیله تصفیه مناسب روغن. (پ را ببینید)
نکات: لزوم اقدامات اصلاحی بایستی به دقت با انجام تحلیل ریسک مشخص شود (بر اساس بروشور سیگره شماره ۳۷۸ سال ۲۰۰۹). پس از غیرفعال‌کردن روغن، کنترل غلظت غیرفعال‌کننده به صورت منظم الزامی است. در صورتی که مقدار غیرفعال‌کننده به صورت مداوم در حال کاهش است، منبع خورندگی را مطابق با اقدامات اصلاحی رفع کنید.				

DBDS

- ✓ DBDS دارای خاصیت خورندگی نسبت به سطوح مسی در دمای معمول کاری ترانسفورماتور است و ممکن است در شرایط خاصی باعث ایجاد سولفید مس شود.
- ✓ در میان ترکیبات خورنده مس، DBDS اصلی‌ترین نقش را در مشکل خورندگی دارد. البته ممکن است روغن خاصیت خورندگی داشته باشد اما فاقد DBDS باشد.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ پایداری در برابر اکسیداسیون توانایی روغن در به تعویق انداختن اکسیداسیون است زمانی که به صورت همزمان در معرض اکسیژن، تنش حرارتی و یک کاتالیزور مس قرار می‌گیرد.
- ✓ اندازه‌گیری پایداری اطلاعات کلی در مورد تخمین عمر روغن در اختیار می‌گذارد. این مشخصه به صورت مقاومت در برابر تشکیل ترکیبات اسیدی، لجن و ترکیبات آن و مقاومت در برابر تغییر $\tan\delta$تحت شرایط مشخص تعریف می‌شود.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ پایداری در برابر اکسیداسیون می‌تواند مطابق روش C در استاندارد IEC 61125:1992 تعیین شود.
- ✓ البته بایستی توجه کرد که حدود تعیین‌شده در این استاندارد مربوط به پایداری روغن‌های نو هستند و تفسیر نتایج مربوط به روغن‌های کارکرده ممکن است سخت باشد.
- ✓ پایداری در برابر اکسیداسیون گاهی به عنوان آزمون برای روغن‌های نو پیش از برق‌دار کردن ترانسفورماتور توصیه می‌شود.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ این مشخصه به طور عمده به فرآیند پالایش روغن بستگی دارد. روغن به صورت طبیعی ترکیباتی دارد که به عنوان بازدارنده در برابر اکسیداسیون عمل می‌کنند.
- ✓ روغن‌هایی که تنها بازدارنده‌های طبیعی دارند به عنوان روغن‌های بدون بازدارنده دسته‌بندی می‌شوند.
- ✓ در نقطه مقابل، بازدارنده‌های مصنوعی نیز می‌توانند به روغن اضافه شوند تا پایداری در مقابل اکسیداسیون را افزایش دهند.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ در روغن ترانسفورماتور به طور عمده از بازدارنده‌های گروه فنول استفاده می‌شود و عمده‌ترین بازدارنده‌ها DBPC و DBP هستند.
- ✓ البته باید توجه داشت که میزان تاثیر بازدارنده‌ها با ترکیب شیمیایی پایه روغن تغییر می‌کند.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ روغن‌های دارای بازدارنده روند اکسیداسیون متفاوتی نسبت به روغن‌های بدون بازدارنده دارند.
- ✓ در روغن‌های دارای بازدارنده و در ابتدای عمر کاری، ترکیبات بازدارنده مصرف می‌شوند اما مقدار کمی محصولات اکسیداسیون تولید می‌شود.
- ✓ پس از مصرف بازدارنده‌ها، شدت اکسیداسیون به طور عمده با پایداری روغن پایه در برابر اکسیداسیون تعیین می‌شود.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ با توجه به اینکه هم فرآیند پیری و هم تصفیه روغن می‌توانند میزان بازدارنده‌ها را کم کنند، توصیه می‌شود که میزان بازدارنده‌ها پس از هر بار تصفیه روغن حتما کنترل شود.
- ✓ روش مرجع برای پایش مصرف بازدارنده‌ها اندازه‌گیری میزان غلظت آن‌ها بر اساس IEC 60666 است.
- ✓ مقدار بازدارنده‌ها نیز بایستی در فواصل زمانی منظم کنترل شود. این فواصل به دمای کاری ترانسفورماتور و میزان بار آن بستگی دارد.

پایداری در برابر اکسیداسیون

- ✓ با توجه به اینکه هم فرآیند پیری و هم تصفیه روغن می‌توانند میزان بازدارنده‌ها را کم کنند، توصیه می‌شود که میزان بازدارنده‌ها پس از هر بار تصفیه روغن حتما کنترل شود.
- ✓ روش مرجع برای پایش مصرف بازدارنده‌ها اندازه‌گیری میزان غلظت آن‌ها بر اساس IEC 60666 است.
- ✓ مقدار بازدارنده‌ها نیز بایستی در فواصل زمانی منظم کنترل شود. این فواصل به دمای کاری ترانسفورماتور و میزان بار آن بستگی دارد.

جمع‌بندی آزمون‌ها

- ✓ بر اساس نظر استانداردهای مختلف و همچنین تجربیات داخلی و نظر متخصصان، زمان‌بندی انجام آزمون و انواع آزمون برای ترانسفورماتورها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:
- ✓ ۱- آزمون‌های زیر بایستی برای همه ترانسفورماتورهای انتقال به صورت سالیانه انجام شوند:
  - ✓آزمون ولتاژ شکست
  - ✓مقدار رطوبت
  - ✓عدد اسیدیته
  - ✓کشش بین‌سطحی

جمع‌بندی آزمون‌ها

- ✓ تبصره ۱: در صورتی که روغن ترانسفورماتور از روز اول دارای منفعل‌کننده (passivator) بوده است، آزمون محتوای منفعل‌کننده‌ها (passivator content) بایستی به صورت سالانه انجام شود.
- ✓ ۲- برای ترانسفورماتورهای با سن بالای ۲۰ سال، آزمون فوران بایستی هر سه سال یک‌بار انجام شود.
- ✓ تبصره ۲: آزمون‌های فوق حداقل آزمون‌هایی است که به صورت سالیانه توصیه می‌گردد. انجام سایر آزمون‌های تکمیلی منوط به نظر متخصصین است.

جمع‌بندی آزمون‌ها

- ✓ تبصره ۳: بازه زمانی که در بالا مشخص شده است مربوط به زمانی است که ترانسفورماتور فاقد مشکل است و همه مقادیر اندازه‌گیری‌شده در بازه‌ای که مشخص شده است قرار دارند.
- ✓ در صورتی که مقادیر اندازه‌گیری‌شده آزمون‌ها از حد تعیین‌شده فراتر رود، بازه زمانی آزمون با نظر متخصصین مربوطه ممکن است کمتر اتخاذ شود. همچنین ممکن است آزمون‌های دیگری در مورد ترانسفورماتورهای مشکوک توسط مختص الزام گردد.

جمع‌بندی آزمون‌ها

- ✓ تبصره ۴: در صورتی که نتایج هر یک از آزمون‌ها خارج از حد تعیین‌شده باشد، اولین اقدام انجام مجدد آزمون جهت اطمینان از نتیجه به دست آمده است.
- ✓ پیش از اطمینان از صحت نتیجه انجام اقدامات بعد ممکن است مفید نبوده و موجب هدررفت سرمایه شود.

جمع‌بندی آزمون‌ها

- ✓ ۴- در صورتی که نتایج آزمون‌ها خارج از حد تعیین‌شده باشد (و صحت نتیجه نیز توسط تکرار تایید شده باشد)، بایستی آزمون‌های تکمیلی انجام شود و بر اساس مجموع نتایج آزمون‌ها سعی در عیب‌یابی ترانسفورماتور صورت گیرد.
- ✓ انجام همه آزمون‌ها با یکدیگر ممکن است به جواب سریع‌تر منجر شود اما هزینه زیادی دارد. بهتر است که با توجه به وضعیت نتایج کسب‌شده آزمون‌های تکمیلی مناسب اتخاذ شود.