



Jerzy SŁOWIKOWSKI, Helena SŁOWIKOWSKA

Rzecznicy SEP

Ewolucja zaleceń dotyczących mineralnych olejów transformatorowych w normach IEC

Streszczenie. W referacie omówiono najważniejsze zmiany, jakie wprowadzono ostatnio w normach IEC dotyczących mineralnych olejów transformatorowych podkreślając jednocześnie pozytywną rolę tych zmian z punktu widzenia zarządzania majątkiem w zakresie olejowych transformatorów energetycznych. Ustosunkowano się do niektórych zaleceń zawartych w tych normach biorąc pod uwagę warunki eksploatacji transformatorów energetycznych w Polsce. Przedstawiono ponadto kilka zastrzeżeń do treści normy IEC 60422 (wyd. 3, 2005-10), które spowodowały, że PKN wstrzymał się od głosowania za jej przyjęciem; aktualnie, treść ww. normy jest ponownie dyskutowana na forum IEC.

Abstract. (Evolution of recommendations in IEC standards for transformer mineral oils). The paper discusses the most important changes which have recently been introduced into the IEC standards related to transformer mineral oils, underlining at the same time the positive role of these changes from the view-point of asset management in the scope of power engineering oil transformers. Attitude was assumed towards some of the recommendations included in those standards, taking into consideration the conditions of the power transformers in service in Poland. Some reservations are presented considering the contents of the IEC 60422 standard (issue 3, 2005-10) which caused that the PKN abstained from voting for it. At present the content of the standard mentioned above are being reconsidered by the members of the Working Group.

Słowa Kluczowe: transformatory olejowe, oleje transformatorowe mineralne.

Keywords: oil transformers, mineral insulating oils.

Wstęp

Od 1973 roku, kiedy ukazało się pierwsze wydanie normy IEC 422 [1], której tytuł w tłumaczeniu polskim brzmiał: "Przewodnik wykonywania zabiegów konserwacyjnych i sprawowania nadzoru nad mineralnymi olejami izolacyjnymi w eksploatowanych urządzeniach elektrycznych", nastąpił duży postęp zarówno w jakości olejów stosowanych w transformatorach jak i w znajomości narażeń, jakim te oleje są poddawane w czasie pracy transformatora i skutków tych narażeń.. Pogłębiona została ponadto wiedza o zjawiskach fizyko-chemicznych występujących w układzie izolacyjnym. Usprawnieniu ponadto uległy procesy preparacji oleju.

Nagromadzone doświadczenia eksploatacyjne wykazały, że przestrzegając reguł obciążania zawartych w normie PN-IEC 60354 "Przewodnik obciążania transformatorów olejowych" [2] i chroniąc układ izolacyjny przed wpływem czynników atmosferycznych, możliwe jest nie tylko przedłużenie okresu życia transformatorów zainstalowanych w sieciach energetycznych do ok. 50 lat, ale również zmniejszenie zakresu badań kontrolnych oraz liczności zabiegów konserwacyjnych, w tym - wymiany oleju.

W nowopowstałym dokumencie IEC, normie 60422 [3], wprowadzono liczne zmiany w stosunku do, wydanej w 1973 roku, normy IEC 422. Dotyczą one przede wszystkim zakresu badań i ich gradacji pod względem roli, jaką pełnią w eksploatacji transformatorów. Daleko idące zmiany dokonane zostały ponadto w zakresie wymagań; poza zaostrzeniem wartości granicznych wprowadzono "trzy poziomy jakości", co umożliwiło rozróżnienie przedziałów wartości poszczególnych wskaźników charakteryzujących stan oleju (pod względem danej właściwości) jako: dobry, zadowolający oraz niezadowolający. Taki podział ułatwia

podejmowanie stosownych decyzji związanych z zarządzaniem majątkiem sieciowym.

W niniejszym referacie odniesiono się przede wszystkim do gospodarki olejem w transformatorach sieciowych. Cytując wymagania zawarte w normie IEC 60422 należy mieć na względzie to, że ustalono je w oparciu o doświadczenia wielu krajów, o różnej strategii zarządzania energetyką i o zróżnicowanym stanie urządzeń. Niezbędne było zatem przyjęcie wielu kompromisowych ustaleń. Jak wiadomo, większość norm straciła znaczenie dokumentów obligatoryjnych, a zatem, w zależności od strategii zarządzania majątkiem sieciowym, a także - od własnych doświadczeń eksploatacyjnych - można się kierować zaostrzonymi lub złagodzonymi kryteriami.

Kategorie transformatorów

W nowej normie IEC 60422, podobnie jak w jej poprzedniej wersji IEC 422, w odróżnieniu od podziału przyjętego w w/w normie PN-IEC 60354 [2], podział transformatorów na kategorie, opiera się na wartości ich górnego napięcia znamionowego. Tabela 1 ilustruje różnice w stosowanych podziałach transformatorów

Tabela 1. Podziały transformatorów przyjęte według norm :PN-IEC 60354 i IEC 60422.

Norma	Kategorie		
PN-IEC 60354	Transformatory dużej mocy : o mocy znamionowej (trójfazowej) > 100 MVA	Transformatory średniej mocy o mocy znamionowej (trójfazowej) ≤ 100 MVA	Transformatory rozdzielcze
IEC 60422	O Transformatory o górnym napięciu znamionowym ≥ 400 kV	A Transformatory o górnym napięciu znamionowym < 400 kV ≥ 170 kV	B Transformatory o górnym napięciu znamionowym > 72,5 kV ≤ 170 kV
			C Transformatory o górnym napięciu znamionowym ≤ 72,5 kV

W elektroenergetycznych sieciach polskich, do klasy O należeć będą jednostki o górnym napięciu znamionowym 400 kV, do grupy A - transformatory o napięciu 200 kV i do grupy B - transformatory o napięciu 110 kV. Jeśli chodzi o transformatory rozdzielcze to już w chwili obecnej, dominują wśród nich i nadal będą instalowane jednostki

hermetyczne, które nie są i nie będą objęte okresowymi badaniami diagnostycznymi [4,5].

Różnice w traktowaniu jednostek należących do poszczególnych kategorii polegają na stopniowym łagodzeniu niektórych wymagań w stosunku do transformatora o górnych napięciach znamionowych niższych od 400 kV oraz - na różnych zalecanych okresach powtarzania badań. W praktyce, te okresy są na ogół wyznaczane na podstawie wyników analizy gazów rozpuszczonych w oleju (DGA).

Zwraca uwagę, szczególna troska autorów nowelizacji normy IEC 422 o utrzymanie dostatecznie wysokiego poziomu wytrzymałości elektrycznej oleju w całym okresie jego użytkowania oraz o niedopuszczenie do wytrącenia się osadu w następstwie jego starzenia.

Zmiany w zakresie kontrolowanych właściwości oleju

Pełny zakres badań właściwości nowego oleju (w stanie dostawy) jako medium izolacyjnego, chłodzącego i kompatybilnego z elementami konstrukcyjnymi transformatora, zawiera norma IEC 60296 [6]. Stanowi ona podstawę do oceny zastosowanego oleju przez producenta transformatorów.

Zmiany zakresu badań w znowelizowanej normie 60422 dotyczą oleju po wlaniu do transformatora, przed włączeniem go do sieci (tabela 2) oraz oleju w transformatorze eksploatowanym (tabela 3)

Przed włączeniem nowego transformatora do sieci, zawarty w nim olej powinien być poddany badaniom właściwości wymienionym w tabeli 2. Zakres tych badań umożliwi kontrolę stanu oleju, a także – poprawności przeprowadzonego procesu suszenia i napełniania transformatora olejem, w tym w szczególności – czystości oleju.

Tabela. 2 Olej bezpośrednio po wlaniu do nowego transformatora; zakres i kolejność badań

Norma IEC 422	Norma IEC 60422
Wygląd	Wygląd
Barwa	Barwa
Gęstość */	Napięcie przebicia
Lepkość (20°C/40°C)	Zawartość wody
Temperatura zapłonu	Kwasowość
Temperatura krzepnięcia	Tangens delta (90°C/40-60 Hz)
Kwasowość	Rezystywność (90°C)
Zawartość wody	Stabilność oksydacyjna
Napięcie powierzchniowe	Napięcie powierzchniowe
Tangens delta (90°C/ 40-60Hz)	Całkowita zawartość PCB
Rezystancja (90°C)	Obecność cząstek substancji stałych
Napięcie przebicia	
Stabilność oksydacyjna	

Uwaga: czcionką wytłuszczoną zaznaczono: w kolumnie dotyczącej normy 422 – właściwości pominięte w normie 60422, w kolumnie dotyczącej normy 60422 – właściwości nie występujące uprzednio w normie 422.

W normie IEC 60422 dokonano podziału badań oleju znajdującego się w eksploatowanym transformatorze na: 3 rodzaje: *badania rutynowe, badania uzupełniające i badania specjalistyczne.*

W zakres badań rutynowych wchodzi pomiary wykonywane okresowo. Ich szczególna ranga wynika z możliwości uzyskania podstawowych informacji o stanie oleju w warunkach pracy ciągłej transformatora.

W zakres badań uzupełniających wchodzi pomiary dodatkowe, wykonywane wówczas, kiedy poziom jednej (lub więcej) z właściwości oleju kontrolowanych, w ramach badań rutynowych, okaże się niezadowolający.

W zakres badań specjalistycznych, wchodzi pomiary wykonywane w szczególnych przypadkach (np. przy wymianie oleju).

Tabela 3. Olej w transformatorze znajdującym się w eksploatacji

Norma IEC 422	Norma IEC 60422
Badania rutynowe	
Kolor + przezroczystość	Kolor +przezroczystość
Napięcie przebicia	Napięcie przebicia
Zawartość wody	Zawartość wody
Kwasowość	Kwasowość
Badania uzupełniające	
Rezystancja	Osad i szlam
Tangens delta	Napięcie powierzchniowe
Napięcie powierzchniowe	Cząstki **/
Badania specjalistyczne	
Całkowita zawartość gazów */	Temperatura zapłonu
Temperatura zapłonu	Kompatybilność
-	Temperatura krzepnięcia
-	Gęstość
-	Lepkość
-	PCB **/
-	Zawartość siarki**/

Uwagi dotyczące zakresu badań (pozycje z gwiazdkami)

*/ Pominięte – badanie całkowitej zawartości gazów

**/ Dodane – badanie zanieczyszczeń oleju cząstkami substancji stałych oraz PCB i zawartość wolnej siarki

Poziomy jakości

Jak już wspomniano, norma IEC 60422 wprowadza do wymagań 3 poziomy jakości. W odniesieniu do każdego z tych poziomów, norma dołącza zalecenia dla użytkownika, dotyczące podjęcia odpowiedniego działania: zwiększenia częstotliwości badań oleju względnie jego obróbkę lub wymianę. Koncepcję tę obrazuje tabela 4 na przykładzie interpretacji wyników pomiaru napięcia przebicia.

Tabela 4. Przykładowa interpretacja stanu oleju odnosząca się do pomiaru napięcia przebicia w zależności od wymagań przyjętych w normie IEC 60422

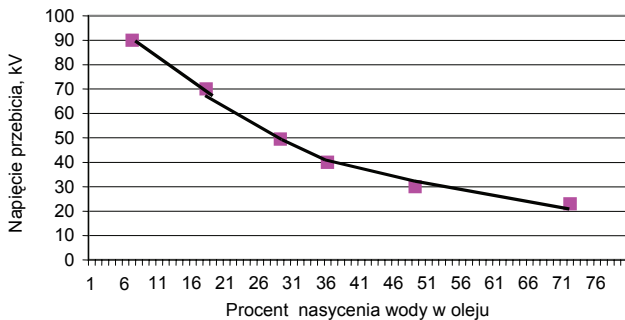
Wartości graniczne określające stan oleju	Rekomendowane postępowanie
$\geq X$ stan dobry	kontynuować pomiary w normalnych odstępach czasu
$Y + X$ stan zadowolający	zwiększyć częstość kontroli oraz rozszerzyć zakres pomiarów (np. o pomiar zawartości wody)
$< Y$ stan niezadowolający	olej poddać regeneracji i/lub wymienić (o ile z punktu widzenia ekonomicznego jest to bardziej korzystne)

Uwagi na temat wymagań dotyczących oleju w transformatorze znajdującym się w eksploatacji

Zawartość wody rozpuszczonej w oleju

Autorzy znowelizowanej wersji normy IEC 60422, przy formułowaniu wymagań na wytrzymałość elektryczną oleju oparli się na empirycznie ustalonej zależności napięcia przebicia U_b , od względnej ilości wody rozpuszczonej w oleju, liczonej w procentach stanu nasycenia tj. koncentracji wody, przy której następuje jej kondensacja (wykroplenie). Na zależność tę nie wywiera wpływu temperatura. Charakterystykę tej zależności podano na rysunku 1 (na podstawie [7]). Można założyć, że w przyjętym, w normie IEC 60422, zakresie dopuszczalnych zmian liczby kwasowej N_a , traktowanej jako wskaźnik stopnia zesterzenia oleju, zależność ta pozostaje nadal ważna (do momentu tworzenia się szlamu). Podkreślić przy tym należy, że charakterystyka rozpuszczalności wody

w "nowym oleju" w funkcji temperatury, mimo korzystania przy wytwarzaniu olejów transformatorowych z surowców (tj. ropy naftowej) pochodzących z różnych źródeł, i mimo stosowania różnego sposobu rafinacji, jest praktycznie jednakowa i daje się wyrazić, przytoczoną w normie, funkcją wykładniczą.



Rys. 1. Zależność napięcia przebicia oleju nowego od zawartości wody rozpuszczonej, liczonej w procentach stanu nasycenia

W tekście normy zaznaczono wprowadzić, że ilość wody rozpuszczonej w oleju, znajdującym się wewnątrz transformatora, zależy od stanu zawilgocenia izolacji papierowej i temperatury to jednak, jako wymaganie przyjęto określoną wartość (ppm) koncentracji wody gwarantującą odpowiedni poziom napięcia przebicia przy 20°C odnoszący się (w domyśle) do oleju o liczbie kwasowej $N_a \approx 0,02$ mg KOH/g. Podany w normie wzór umożliwia sprowadzenie wartości koncentracji wody w_t , zmierzonych przy różnych temperaturach górnej warstwy oleju t_s [°C], do koncentracji w_{20} przy 20°C:

$$(1) \quad w_{20} = w_t / f$$

gdzie: f - współczynnik korekcyjny liczony wg wzoru:

$$(2) \quad f_t = 2,24 \exp(-0,04 t_s)$$

Przy tak sformułowanym wymaganiu, nie podano jednak poprawek na wzrost rozpuszczalności wody towarzyszący starzeniu się oleju, sygnalizowany wzrostem liczby kwasowej N_a . Autorzy nowelizacji normy zdawali sobie sprawę z tego zjawiska informując użytkownika normy, że "charakterystyki rozpuszczalności zmieniają się ze wzrostem N_a ", podając przykład takiej zależności, dodając przy tym uwagę, że "w zależności od pochodzenia oleju, charakterystyki te mogą się różnić między sobą".

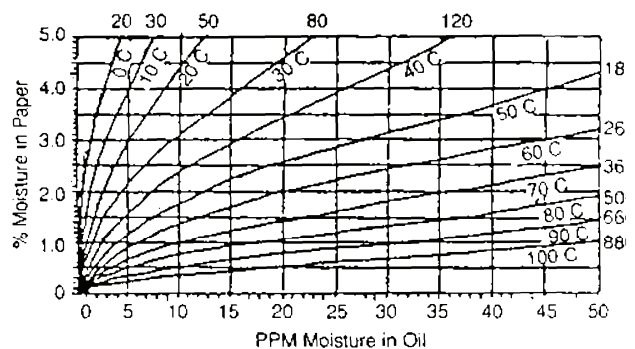
Tabela 5. Wartości współczynnika k korygującego wzrost rozpuszczalności wody w oleju ze wzrostem liczby kwasowej N_a

N_a [mg KOH/g]	Temperatura górnej warstwy oleju [°C] przy jakiej pobierano próbkę				
	40	45	50	55	60
0,05	0,89	0,88	0,87	0,85	0,83
0,10	0,82	0,80	0,78	0,77	0,75
0,15	0,78	0,75	0,70	0,69	0,67
0,20	0,69	0,67	0,64	0,62	0,60

Badaniami powyższych zależności zajmowało się swego czasu LCIE [8]. Wyniki tych badań wykazały liniową zależność rozpuszczalności wody S od N_a , przy danej temperaturze t . Jeśli zatem producent oleju byłby zobowiązany do podania charakterystyk $S = \varphi(N_a)$ np. przy $N_a = 0,1; 0,15$ i $0,2$ mg KOH/g, to uwzględnienie stosownych poprawek stałoby się możliwe. Korzystając z podanych przykładowo charakterystyk S od N_a w normie IEC 60422, autorzy referatu, w tabeli 5 podali wartości współczynnika k odnoszące się do różnych wartości N_a i różnych temperatur t , przy których jest pobierana próbka oleju.

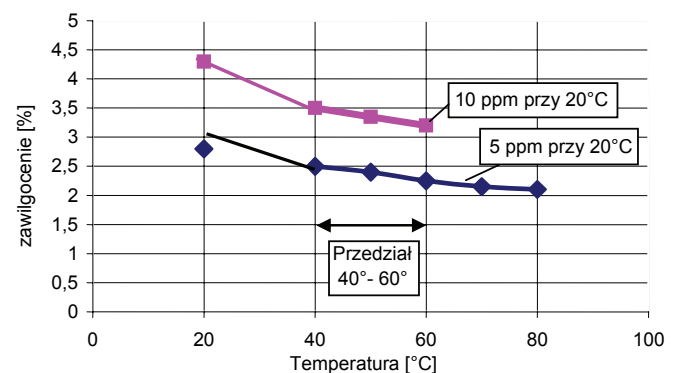
Porównując wartości współczynnika k z tabeli 5 można zauważyć, że wzrostowi N_a od 0,05 do 0,15, w zależności od temperatury, w zakresie 40-60°C, może nastąpić wzrost rozpuszczalności wody w oleju o ok. 20-30%. Zaznaczyć przy tym należy, że zastosowanie tego rodzaju poprawek jest niezbędne przy określeniu stanu zawilgocenia izolacji celulozowej na podstawie charakterystyk Oommena [9, 10] w przypadku oleju o podwyższonej liczbie kwasowej N_a .

Przyjęta, w normie IEC 60422, zasada jednakowej, względnej wartości procentowej zawilgocenia oleju w_r , która gwarantuje utrzymanie jednakowej wartości napięcia przebicia oleju U_b przy różnych temperaturach, koliduje z rzeczywistymi zmianami ilościowymi wody rozpuszczonej w oleju pozostającej w stanie równowagi termodynamicznej z wodą zawartą w izolacji papierowej h_p . Wymuszone tym warunkiem zmiany koncentracji wody rozpuszczonej w oleju opisują, jak wiadomo, charakterystyki Oommena [9] (rys. 2).



Rys. 2. Wykres Oommena stanów równowagi pomiędzy zawartością wody w oleju i izolacji celulozowej w układzie izolacyjnym papierowo-olejowym

Warunkowi $w_r = \text{const.}$, ze wzrostem temperatury, odpowiadają bowiem coraz niższe poziomy zawilgocenia izolacji papierowej h_p . Zależność tę przedstawiono na rysunku 3 dla dwóch przypadków, a mianowicie: przy wymaganiu zawartości wody rozpuszczonej w oleju (przy 20°C) wynoszącej 5ppm i 10ppm.



Rys. 3. Zawilgocenie izolacji papierowej h_p odpowiadające wymaganiom IEC 60422 na zawartość wody rozpuszczonej w oleju: 10 i 5 ppm (20°C)

Praktycznym rozwiązaniem omawianego dylematu byłoby postawienie warunku pobierania próbek oleju w zakresie temperatur górnej warstwy oleju 40°C-60°C. Przypomnijmy, że zalecenie takie figurowało w normie IEC 422. W takim przypadku, jak wynika z rysunku 3, wymagania normy IEC 60422 byłyby spełnione przy poziomach zawilgocenia izolacji papierowej, w zaokrągleniu, odpowiednio: 2,0% i 3,5%. Podkreślić przy tym należy, że transformator pod względem zawilgocenia izolacji zwojowej, tylko wówczas jest przystosowany do spełnienia warunków przeciążalności określonej w normie PN-IEC 60354 [2], jeśli

poziom tego zawilgocenia nie przekroczy 2%. Przekroczenie dwuprocentowego poziomu zawilgocenia zwiększa bowiem ryzyko wystąpienia, w warunkach przeciążeniowych, tzw. "efektu bąblowania" tj. gwałtownego odparowania wilgoci w postaci bąbli z izolacji zwojowej [11]. Jest oczywiste, że efekt ten może doprowadzić do zainicjowania wyładowania łukowego w układzie izolacyjnym transformatora. Jeśli chodzi natomiast o większe zawilgocenie izolacji papierowej to liczne badania [np.12,13] wykazały, że do poziomu zawilgocenia wynoszącego 3,5%, wytrzymałość elektryczna, przesyconej olejem izolacji zwojowej, pozostaje praktycznie bez zmian. Należy mieć jednak na względzie, że ten poziom zawilgocenia znacząco wpływa na przyspieszenie procesu starzenia izolacji celulozowej.

Norma IEC 60422, w przypadku transformatorów należących do kategorii B, do których zalicza jednostki o górnym napięciu znamionowym 110kV, dopuszcza zawartość wody rozpuszczonej w oleju dochodzącą do 15 ppm (przy 20°C), co odpowiada poziomowi zawilgocenia izolacji papierowej wynoszącym ok. 4,5 % (przy próbce oleju pobranej w temp. 40°C). Literatura przedmiotu [14] dla takiego przypadku, przytacza przykłady "wystąpienia wyładowań niezupełnych o dużej intensywności, jeśli lokalne natężenie pola elektrycznego przekroczy 9 kV/mm".

Wytrzymałość elektryczna oleju

Norma IEC 156 [15], opisująca metodę badania wytrzymałości elektrycznej oleju, wymaga przeprowadzania pomiaru napięcia przebicia U_b próbki oleju w temperaturze 20°C. W normie tej, jak również w normie IEC 60422, nie uwzględniono faktu, że zawartość wody rozpuszczonej w tej próbce oleju zależy od temperatury, przy której została ona pobrana z transformatora, co z oczywistych powodów będzie miało wpływ na wynik pomiaru U_b .

Przykładowo: posługując się przedstawioną na rysunku 1 charakterystyką zależności U_b od względnej zawartości wody rozpuszczonej w oleju (w stosunku do stanu nasycenia przy danej temperaturze t_s), U_b próbki oleju pobranej przy 60°C z transformatora o zawilgoceniu izolacji papierowej wynoszącym 2% - nie przekroczy 40 kV, a pobranej przy temperaturze 40°C - nie przekroczy 75 kV.

W przypadku zawilgocenia izolacji papierowej wynoszącego 3,5%, ilość wody rozpuszczonej w próbce pobranej przy 60°C, w warunkach próby, tj. przy 20°C, będzie bliska stanu wykroplenia. Powodem w/w zmian jest spadek rozpuszczalności wody w oleju w miarę obniżania temperatury. Idealnym rozwiązaniem tego problemu byłoby wykonywanie pomiaru U_b próbki oleju nagranej do temperatury, przy której została pobrana z transformatora. Alternatywą w tym względzie byłoby wprowadzenie odpowiedniego współczynnika korygującego.

Następnym problemem, który nie został poruszony w normie IEC 60422, to postępowanie w przypadku wystąpienia dużych rozrzutów mierzonych wartości U_b danej próbki oleju i towarzyszących im dużych rozrzutów wartości wody rozpuszczonej w oleju, mierzonych metodą Karla-Fischera. Rozrzuty te, w przypadku czystego oleju, spowodowane są obecnością klasterów wody tj. aglomeratów molekuł wody połączonych między sobą wiązaniami wodorowymi [16]. Klasterzy te nie są dostrzegane gołym okiem, Tworzenie klasterów przypisuje się wystąpieniu lokalnych warunków kondensacji wody rozpuszczonej w oleju w trakcie jego przepływu przez intensywnie chłodzony radiator. Zjawisko to autorzy referatu nazwali "Katherine effect". Udatnianie oleju eliminuje skutki tego efektu.

Liczba kwasowa

W normie IEC 60422 zwrócono uwagę na przyspieszenie procesu starzenia izolacji celulozowej wywołane wzrostem kwasowości oleju (Autorzy referatu od dawna sygnalizowali ten efekt [16]). Nie podkreślano natomiast w ww. normie, że ze wzrostem wartości liczby kwasowej N_a powyżej 0,1 mg KOH/g wzrasta prawdopodobieństwo wytrącania się osadu, a tego zjawiska norma powyższa nie dopuszcza stawiając warunek ażeby "ilość osadów w badanej próbce oleju była jedynie śladową tj. mniejszą od 0,02%".

W olejach nieinhibitowanych, w przeciwieństwie do inhibitowanych nie jest możliwe zapobieganie wytrącaniu się osadu. Nie istnieje również jednoznaczny związek pomiędzy wartością N_a , a zjawiskiem wytrącania się osadu. Doświadczenia eksploatacyjne wskazują jednak, że do osiągnięcia wartości $N_a = 0,15$ mg KOH/g, wytrącanie się osadu jest mało prawdopodobne; graniczną wartość $N_a = 0,15$ ustala norma IEC 60422 dla transformatorów należących do kategorii O, A. Podkreślić przy tym należy, że warunek ten jest łatwy do spełnienia przez transformatory hermetyzowane, ponieważ odcięcie układu izolacyjnego transformatora od penetracji powietrza powoduje, że proces starzenia oleju przebiega wolniej aniżeli izolacji papierowej, której stan decyduje o trwałości układu izolacyjnego.

W przypadku przekroczenia wartości $N_a = 0,1$ mg KOH/g olej w transformatorze wymaga, niewątpliwie zwiększonej częstości badań – zalecenie takie nie figuruje w normie IEC 60422.

Obecność siarki korozyjnej

Na sesji plenarnej CIGRÉ w 2006 roku [18] zwrócono uwagę na pojawianie się, w niektórych eksploatowanych olejach transformatorowych, związków siarki Cu_2S , o silnym oddziaływaniu korozyjnym. Zjawisko to, w większej liczbie przypadków, wystąpiło w jednostkach hermetyzowanych. Niepokój wzbudził fakt, że wszystkie oleje, w których stwierdzono obecność ww. związku siarki, przeszły z wynikiem pozytywnym próby przewidziane w tym względzie w aktualnych normach. Ten fakt spowodował powołanie specjalnej Grupy Roboczej IEC, która jest w trakcie rozpatrywania powyższego problemu.

Wnioski

- Szczególną zaletą normy 60422 jest podniesienie wymagań na niemal wszystkie właściwości oleju transformatorowego. Ta dbałość o utrzymanie wysokiej jakości oleju koreluje z ogólnie uznawaną dzisiaj ideą "przedłużenia okresu życia transformatora do 50 lat". Podniesienie wymagań wychodzi ponadto naprzeciw współczesnej tendencji modernizacji konstrukcji transformatorów, która pod presją walki o rynek zbytu, tj. dążeniem do obniżenia ceny, prowadzi do większego wykorzystania właściwości materiałów; w przypadku materiałów izolacyjnych - przekłada się to na większe ich narażenie natury elektrycznej.
- Z punktu widzenia użytkownika transformatora, istotne byłoby uzyskanie informacji od dostawcy oleju dotyczących: charakterystyki rozpuszczalności wody i jej zmian przy wzroście liczby kwasowej oraz wartości tej liczby, przy której zachodzi obawa wytrącenia się osadu.
- W świetle zawartych w niniejszym referacie rozważań, w polskich instrukcjach eksploatacji, należy uznać za celowe zaliczenie transformatorów sieciowych o górnym napięciu znamionowym 110 kV, do kategorii A.

Informacje dodatkowe

Niektóre z omawianych powyżej zastrzeżeń do normy IEC 60422 spowodowały, że Polski Komitet Normalizacyjny wstrzymał się od głosowania nad jej przyjęciem. Podkreślić należy, że Grupa Robocza IEC opracowująca treść normy IEC 60422 zajmuje się nadal jej udoskonaleniem.

LITERATURA

- [1] IEC 422 Second edition 1989-04, Supervition and maintenance guide for mineral insulating equipment
- [2] PN-IEC 60354, 1999, Przewodnik obciążania transformatorów olejowych
- [3] IEC 60422 Third edition 2005-10, Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervition and maintenance guidance
- [4] Słowikowski J., Dybowski J., Możliwości wyeliminowania badań okresowych hermetyzowanych transformatorów rozdzielczych, Seminarium Badania Diagnostyczne Transformatorów, Jaszowiec, 1975
- [5] IEC 60296 Third edition 2003-11, Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear
- [6] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, wyd. Energopomiar-Elektryka, Gliwice, 2001
- [7] Transformer oil handbook, NYNAS Naphthenics AB, June 2004
- [8] Fallo B., Summary of Work Done at LCIE on the Paper-Oil Complex, Report of LCIE, France, 1976
- [9] Oommen T.V., Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol PAS -103 No 10, October 1984
- [10] Słowikowski J., Zawilgocenie transformatora; przyczyny, skutki, współczesne kryteria oceny, Konferencja Naukowo-Techniczna *Transformatory w Eksploatacji*, - Sieniawa, kwiecień, 2003
- [11] Oommen T.V., et al., Bubble Generation in Transformer Windings Under Overload Conditions, Proc. of the Sixty-Second Annual Intern. Conf. of Doble Clients, 1995
- [12] Kogan P., K. Proc. IEE, 110, 1963
- [13] Stannett A., Problems of Water in Power Transformers, *Electrical Times*, March, 1965
- [14] Rushall R., T., Proc. IEE 100 Pt IIA, 1953
- [15] IEC 156 Second Edition 1995-07, Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method
- [16] Atkins P., W., Chemia fizyczna, Wyd. PWN, Warszawa, 2001
- [17] Słowikowski S., J., Some remarks on the Rate of Using Life in Sealedoil Transformers, Record of 1988 IEEE Intern. Symp. on Electrical Insulation, Boston, MA, June 1988
- [18] Bengtsson Claes and aths., Oil Corrosion and Conducting Cu₂S Deposition in Power Transformer windings, A2 - 111, CIGRE 2006

Authors: Jerzy Słowikowski, Helena Słowikowska, Rzeczoznawcy Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Warszawa