



Lech Subocz*

STARZENIE IZOLACJI PAPIEROWEJ

Streszczenie: W latach 1995 i 1996 zanotowano w Polsce dużą liczbę uszkodzeń izolatorów przepustowych do autotransformatorów 110/220 kV. Pracowały one przez okres 15 do 20 lat i można było przypuszczać, że nastąpiło znaczne zesterzenie izolacji papierowo-olejowej. Dużą przeszkodą w ocenie stanu izolacji tych izolatorów jest brak systematycznych badań ich stanu lub zupełne ich zaniechanie. Dla powiększenia informacji na temat tempa starzenia izolacji papierowo-olejowej wykonano długotrwałe badania starzeniowe tej izolacji mierząc jej niektóre właściwości elektryczne i mechaniczne w warunkach podwyższonej temperatury.

Słowa kluczowe: izolacja papierowa, starzenie termiczne

1. Wprowadzenie

Izolatory transformatorowe są bardzo ważną częścią izolacji tych urządzeń ponieważ są one zainstalowane w miejscu przejścia izolacji powietrznej w złożony układ izolacji stałej i ciekłej zapewniającej bezpieczną pracę transformatora. Bezpieczeństwo to polega na uszczelnieniu kadzi transformatora przed dostaniem się do jej wnętrza wilgoci osłabiającej izolację transformatora. Równie ważną rolą tych izolatorów jest ograniczenie wyładowań niezupełnych powstających w układach izolacji stałej i gazowej. Zdarzające się awarie izolatorów transformatorowych są powodem poważnych strat gospodarczych związanych z nagłym odłączeniem zasilania w energię elektryczną. Izolatory przepustowe dużych transformatorów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć wykazują obok przełączników zaczepów znaczną zawodność. W literaturze światowej odnotowano liczne awarie przepustów między innymi na terenie Australii [1, 2, 3]. Podjęto tam próby prowadzenia diagnostyki przepustów w czasie

* Instytut Elektrotechniki, Politechnika Szczecińska

eksploatacji na drodze ciągłego pomiaru $\text{tg } \delta$, dla różnych przepustów przy wzajemnym porównywaniu wyników. Założono tu, że $\text{tg } \delta$ przepustów nie ulega jednakowemu pogorszeniu. Jeżeli jeden z nich wykaże znacznie wyższe straty od pozostałych to należy go wymienić i poddać szczegółowym badaniom laboratoryjnym. Stała kontrola stanu izolacji transformatorów z uwzględnieniem stanu izolatorów przepustowych winna być przedmiotem szczególnego zainteresowania służb eksploatacyjnych. Najnowszym osiągnięciem w tej dziedzinie jest stały monitoring stanu izolacji transformatora łącznie z izolatorami przepustowymi. Polega on na przykład na ciągłej chromatografii gazowej oleju, stałym pomiarze poziomu wyładowań niepełnych oraz kontroli wybranych miejsc izolacji transformatora przy pomocy systemu połączeń światłowodowych. W odniesieniu dla izolatorów przepustowych proponuje się częste ich badania porównawcze przy pomocy specjalnej techniki pomiarowej uwzględniającej przesunięcie fazowe napięć. Uzyskane dane na temat stanu izolacji są notowane przez system komputerowy i są one podstawą podejmowania decyzji ruchowych, czasami przy znacznym ograniczeniu roli służb eksploatacyjnych.

W Polsce monitoring izolacji należy jeszcze do rzadkości z powodu dużego kosztu wdrożenia tego systemu. Badania stanu izolacji izolatorów transformatorowych przepustowych wykonywane są sporadycznie, nawet podczas stałych przeglądów transformatorów największych mocy badania te są na ogół zaniebywane. Jest to poważny błąd wielu służb eksploatacyjnych ponieważ nie prowadzą one systematycznego rejestru wyników badań, które mogłyby być podstawą oceny trwałości tych izolatorów. Konieczna jest w związku z tym zmiana sposobu postępowania w zakresie dozoru stanu izolacji transformatorów. Systematyczne badania stanu izolacji oraz odpowiedni system gromadzenia ich wyników mogłyby być pożytecznym zastępczym sposobem monitorowania stanu izolacji. Dla uzyskania pełnej informacji w tym zakresie wskazanym by było wykonywanie pomiarów jakości izolacji ustaloną metodyką badań i aparaturą pomiarową. Uzyskane wyniki badań winny stać się początkiem systematycznego nadzoru nad stanem izolatorów przepustowych.

2. Kryteria oceny stopnia zestarzenia termicznego papieru

Starzenie termiczne jest to proces zmian strukturalnych, zachodzących pod wpływem długotrwałego działania wysokiej temperatury. Długotrwała degradacja (starzenie) izolacji prowadzi do stopniowego i na ogół nieodwracalnego pogarszania się właściwości. Podczas ich eksploatacji, w wyniku procesów starzeniowych następują fizykochemiczne przemiany struktury dielektryków, będące przyczyną powstawania w nich lokalnych defektów (pęknięcia i rozwarstwienia). Intensywność starzenia cieplnego izolacji jest uzależniona nie tylko od temperatury, ale również od rodzaju i struktury dielektryku oraz od obecności tlenu i wilgoci. Szybkość starzenia się papieru jest wprost proporcjonalna do stopnia jego zawilgocenia (w przedziale $0,3 \div 7\%$). Jednocześnie ten sam papier o zawartości wilgoci $0,3 \div 0,5\%$ pracujący w temperaturze $90 \div 110^\circ\text{C}$ starzeje się dwu — a nawet trzykrotnie szybciej w powietrzu niż próżni lub w atmosferze azotu [5]. Oceny długości życia izolacji (czasu jej starzenia się) dokonuje się na podstawie tzw. charakterystyki życia izolacji. W przypadku starzenia cieplnego charakterystyka życia izolacji jest zależnością czasu jej życia od temperatury. Jest to

czas liczony od chwili zmiany własności poniżej określonego, umownego poziomu np. poziom 50% początkowej wartości wytrzymałości elektrycznej lub wytrzymałości mechanicznej. Niekiedy uwzględnia się ubytek wagi lub zmiany własności chemicznych. Zależność czasu życia izolacji τ od temperatury T odpowiada w szerokich obszarach zależności:

$$\tau = A \exp \frac{B}{T} \quad (1)$$

gdzie: A, B — stałe zależne od materiału i warunków pracy.

W obszarze temperatur leżących w pobliżu granicy uznawanej za dopuszczalną w pracy, czas życia zmniejsza się dwa razy przy wzroście temperatury o ok. 10°C , natomiast dziesięć razy przy wzroście o kilkadziesiąt $^{\circ}\text{C}$. Zależności te pozwalają ocenić skutki przeciążenia termicznego izolacji. Odporność na starzenie papierów elektroizolacyjnych można kontrolować porównawczo przez pomiar zmian wytrzymałości mechanicznej, wywołanych długotrwałym działaniem podwyższonej temperatury. Stopień zestarzenia termicznego papierów izolacyjnych w eksploatacji można jednak znacznie lepiej określić przez kontrolę zmian chemicznych, powstających w skutek odbudowy celulozy oraz otwieranie pierścieni glikozy z wydzielaniem cząsteczek wody. W stadiach pośrednich powstają grupy aldehydowe ($-\text{CHO}$) i ketonowe ($=\text{C}=\text{O}$), które następnie przechodzą w grupy karboksylowe ($-\text{COOH}$). Dobrymi wskaźnikami odbudowy celulozy są więc:

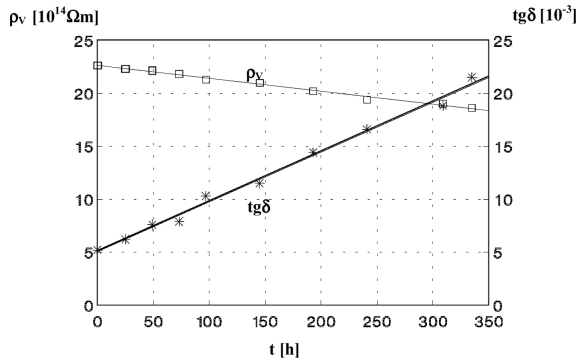
- stopień polimeryzacji DP jako wskaźnik liczby pierścieni w łańcuchu celulozy,
- liczba miedziowa, jako wskaźnik pośredni zawartości aldehydów i ketonów,
- liczba kwasowa,
- przewodność wyciągu wodnego.

Dla zmierzenia większości z tych parametrów konieczna jest ingerencja do izolacji połączona z jej zniszczeniem. Znalezienie korelacji między nie niszczącymi badaniami parametrów elektrycznych a parametrami mechanicznymi, dla określenia których konieczne są badania niszczące, byłaby bardzo pomocnym narzędziem w ocenie stanu izolacji oraz prognozowaniu jej żywotności.

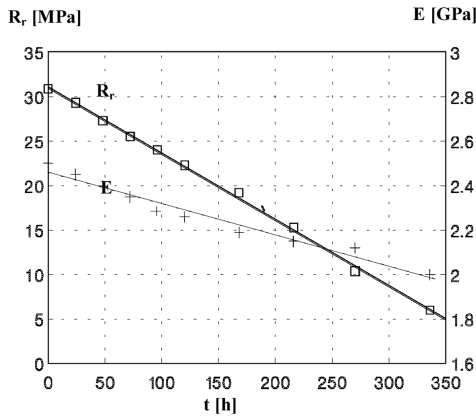
3. Przedmiot, metodyka starzenia i wyniki badań

Próbki materiałowe zostały wycięte z fragmentu przepustu transformatorowego Haeffely eksploatowanego przez około 4 lata przy obciążeniu równym około 30% obciążenia nominalnego (próbki te uznano za nie eksploatowane, prawie nowe). Poddano je działaniu temperatury $T = 135 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

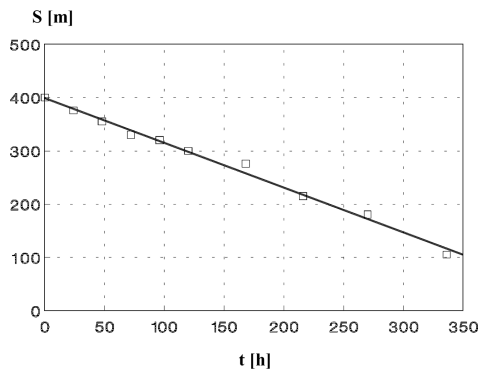
Do badania próbki wyjmowano z komory klimatycznej co 24 godziny w ilościach 10 sztuk. Następnie poddawano je klimatyzacji w temperaturze otoczenia $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ przy wilgotności względnej $\phi = 65\%$. Po różnych czasach starzenia badano dielektryczne i mechaniczne właściwości papieru izolacyjnego. Średnie wyniki pomiarów dla 10 próbek materiałowych podano na rys. 1–3.



Rys. 1. Zmiany właściwości elektrycznych papieru izolacyjnego (rezystywności ρ_V i stratności dielektrycznej $tg\delta$) w czasie t starzenia termicznego



Rys. 2. Zmiany właściwości mechanicznych papieru izolacyjnego (wytrzymałości na zerwanie R_r i modułu sprężystości E) w czasie t starzenia termicznego



Rys. 3. Zmiany samozerzalności S papieru izolacyjnego w czasie t starzenia termicznego

4. Wnioski

W wyniku długotrwałego starzenia papieru izolacyjnego w podwyższonej temperaturze zmieniały się jego właściwości elektryczne i mechaniczne. Zmiany te polegały na obniżaniu (pogorszeniu) tych właściwości w miarę wzrostu czasu starzenia. Szczególnie wyraźne pogorszenie zanotowano w przypadku właściwości mechanicznych. Zmiany tych właściwości w miarę wzrostu czasu starzenia można zapisać zależnością:

$$W = W_0(1 - at) \quad (2)$$

gdzie: W oznacza określoną właściwość, a — tempo zmian w czasie t .

Dla czasu starzenia około 350 godzin właściwości mechaniczne mierzone szczególnie wytrzymałością na rozerwanie R_r oraz długością samozerwania S zmieniały się w dużym zakresie: około 6 razy dla R_r i 4 razy dla S . Właściwości elektryczne papieru nie wykazały równie dużych zmian w czasie starzenia jak właściwości mechaniczne. Największy zmiany (wzrost) zanotowano w przypadku stratności $\text{tg } \delta$, która wzrosła około 2,2 raza. Najbardziej skuteczne w ocenie stopnia zestarzenia izolacji są zatem pomiary niszczące izolacji, które w czasie eksploatacji nie są możliwe. Przybliżone wartości współczynnika a określającego tempo zmian niektórych właściwości badanej izolacji podczas starzenia termicznego podano w tabeli 1.

Tabela 1. Tempo zmian niektórych właściwości badanej izolacji podczas starzenia termicznego

Właściwość W	Wartość początkowa W_0	Tempo zmian a [%/h]
$\text{tg } \delta$	$[10^{-3}]$	-0,993
ρ_V	$[10^{14} \Omega \text{ m}]$	+0,063
R_r	[MPa]	+0,240
E	[GPa]	+0,065
S	[m]	+0,291

Ocena taka jest natomiast możliwa na podstawie przedstawionych wyników badań wykonanych, dla realnej izolacji po niewielkim czasie eksploatacji. Dla skuteczności tej oceny konieczna jest wiedza na temat dopuszczalnych parametrów izolacji, które mogą przesądzić o jej remoncie lub wymianie. Jest to możliwe na podstawie kolejnych badań starzeniowych na izolacji papierowo-olejowej. Badania takie będą podjęte podczas opracowywania kolejnej prognozy trwałości przepustu transformatorowego [4].

Literatura

- [1] Allan D. M., Windle P. J.: 6 ISH New Orlean USA, 1989, pap. 41.09
- [2] Allan D. M., Boyd K. J.: 7 ISH Dresden, 1991, pap. 74.01
- [3] Malewski R.: *Diagnostyka transformatorów w eksploatacji*. III Symp. IW96, Kiekrz, s. 15

- [4] **Subocz L., Zajac W.:** *Prognoza trwałości transformatorowych izolatorów przepustowych.* Instytut Elektrotechniki Politechniki Szczecińskiej DT 042-7984/97

AGEING OF PAPER INSULATION

To establish a life-span prognosis of paper-oil insulation and the transformer bushings produced of the same insulation, the insulation mentioned had the ageing testes carried on using the actual insulation of the low degradation rate. The results, comprising electric and mechanical properties of insulation tested, were subject to preliminary evaluation and their correlative relations. The correlation, based on ageing test results, is expected to be more comprehensive and completed as soon as further results from exploitation tests will have been obtained.