

Waldemar Skomudek<sup>1)</sup>Marek Szrot<sup>2)</sup>

## Ocena stanu technicznego wysokonapięciowych izolatorów przepustowych transformatorów mocy

### Assessment of technical condition of high voltage studs type insulators of power transformers

W praktyce inżynierskiej izolator jest traktowany jako układ konstrukcyjny, który dla osprzętu elektrycznego lub przewodów, między którymi występuje różnica potencjałów, spełnia dwie funkcje:

- mechanicznego zamocowania i stabilnego utrzymania,
- elektrycznego izolowania.

Specyficzną odmianą izolatora jest izolator przepustowy. Służy on do przeprowadzenia przewodu roboczego przez uziemioną przegrodę (np. przez ścianę kadzi transformatora) z jednoczesnym odizolowaniem od przegrody. Konstrukcja izolatora przepustowego jest oparta na budowie kondensatora zwijanego. Przesądza to o większości właściwości elektrycznych i cieplnych tych elementów. W szczególności wielowarstwowy rdzeń izolacyjny<sup>3)</sup>, zwijany z wielu warstw papieru o właściwościach zbliżonych do papieru kablowego, musi odznaczać się dużą wytrzymałością elektryczną i jak największą chłonnością syciwa [5,6,8].

Z względu na rolę i warunki pracy izolatorów przepustowych ich budowa jest dość skomplikowana. Podstawowym narażeniem konstrukcji tych izolatorów są niekorzystne wyładowania ślizgowe mogące wystąpić w części wewnętrznej izolatora. Są one efektem nierównomiernego rozkładu napięcia powstającego wskutek przebiegu linii sił pola elektrycznego równoległe i poprzecznie do osi izolatora. Można jednak już na etapie prac projektowych obejmujących taką konstrukcję zastosować rozwiązania, które zoptymalizują poziom promieniowych i osiowych

naprężeń pojawiających się w procesie eksploatacji tych izolatorów. Jednym z najskuteczniejszych sposobów zmniejszenia nierównomierności pola elektrycznego i jednocześnie podwyższenia wartości napięcia początkowego wyładowań niezupełnych jest zastosowanie metalowych ekranów wewnętrznych między kolejnymi warstwami izolacji zwijanej.

Asortyment wykonania i parametrów konstrukcyjnych izolatorów przepustowych jest bardzo szeroki i uzależniony między innymi od miejsca zastosowania i poziomu napięcia znamionowego sieci. Liczną grupę tych elementów stanowią wysokonapięciowe izolatory przepustowe transformatorów mocy. Zastosowanie tych izolatorów w transformatorach utwierdza w przekonaniu, że muszą one spełniać szereg wymagań jakościowych rzutujących na niezawodność i ciągłość dostaw energii elektrycznej. Oznacza to, że izolatory przepustowe muszą być w stanie obecnie i w przyszłości realizować żądane funkcje w określonych warunkach i w określonym czasie [10,11].

#### Awaryjność wysokonapięciowych izolatorów przepustowych

We współczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych wysokonapięciowych izolatorów przepustowych można wyróżnić cztery zasadnicze części:

- rdzeń izolacyjny ukształtowany w formie kondensatora w trzech wersjach technologicznych, tj. z papieru sklejanego żywicą (RBP), z papieru impregnowanego żywicą (RIP) lub z papieru impregnowanego olejem (OIP);
- głowicę umożliwiającą połączenie toru prądowego z zaciskiem sieciowym przepustu oraz hermetyzację przestrzeni między górną osłoną izolacyjną a rdzeniem izolacyjnym; kształt głowicy wpływa również na rozkład pola elektrycznego wokół górnej części konstrukcji izolatora przepustowego;

<sup>1)</sup> dr hab. inż. Waldemar Skomudek, prof. PO, Politechnika Opolska, Katedra Zarządzania Projektami; w.skomudek@po.opole.pl

<sup>2)</sup> dr inż. Marek Szrot, *Energo-Complex Sp. z o.o.*; marek.szrot@energo-complex.pl

<sup>3)</sup> Układ izolacyjny zwijany z wielu warstw papieru utwardzony żywicą fenolowoformadehydową (tzw. izolacja stała) lub olejem mineralnym o małej lepkości (tzw. izolacja miękka)

- osłonę porcelanową części napowietrznej dobraną z uwzględnieniem odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej, stopnia zanieczyszczenia atmosferycznego, wytrzymałości mechanicznej na oddziaływanie sił elektrodynamicznych występujących podczas zwarć;
- osłonę części dolnej.

Izolatory przepustowe z rdzeniem izolacyjnym wykonanym z papieru sklejonego żywicą były pierwszymi izolatorami o izolacji papierowo-żywicznej, tzw. twardej, z powodzeniem stosowanymi w Europie. Ze względu jednak na ograniczenia dotyczące szerokości powlekanego papieru, w szczególności w przypadku izolatorów na najwyższe napięcie robocze ( $U_m$ ) przekraczające 245 kV, ta wersja technologiczna jest wykorzystywana do produkcji izolatorów przepustowych o najwyższym napięciu roboczym do 123 kV włącznie.

W przypadku izolatorów przepustowych z rdzeniem izolacyjnym, wykonanym z zastosowaniem technologii impregnacji papieru kablowego w próżni, jednym z ważniejszych etapów procesu jest suszenia papieru. Rygorystyczne wymagania dotyczące największego dopuszczalnego poziomu zawilgocenia papieru są podyktowane koniecznością zapewnienia dobrych właściwości elektroizolacyjnych papieru oraz wyeliminowania niebezpiecznych szczelin gazowych, stanowiących potencjalne źródło wyładowań niezupełnych, które mogą powstać podczas impregnacji żywicą lub olejem. Należy również podkreślić, że niewłaściwie przeprowadzone procesy suszenia i impregnacji rdzenia izolacyjnego wykonanego w tej technologii znacznie bardziej zmniejszają odporność na destrukcyjne działanie wyładowań niezupełnych niż w przypadku przepustów z rdzeniem o izolacji papierowo-żywicznej.

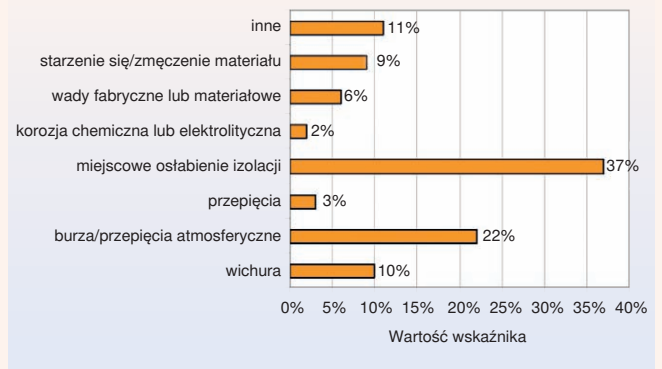
W literaturze fachowej opisującej zagadnienia związane z budową wysokonapięciowych izolatorów przepustowych [3,5,13] dużo uwagi poświęca się czynnikom oddziałującym na ich niezawodność, gdyż mają one silny związek z najliczniejszą grupą urządzeń elektroenergetycznych, jaką są transformatory. Urządzenia te posiadają również stwierdzoną wysoką niezawodność. Jeśli jednak dochodzi do awarii tych urządzeń, to są one często spektakularne i mają bardzo poważne konsekwencje, zarówno natury technicznej jak i ekonomicznej (rys. 1). Skutki awarii z udziałem transformatorów nie ograniczają się najczęściej tylko do tych urządzeń, ale także przenoszą się na inne elementy systemu elektroenergetycznego, nierzadko powodując ograniczenia w dostawie energii elektrycznej. Stąd też elementy te są traktowane jako jedno ze słabych ogniw transformatora.

Uzyskanie wysokiego poziomu niezawodności transformatorów jest celem wielu analiz wykonywanych już na etapie doboru tych urządzeń. Wczesne podejmowanie takich działań sprzyja optymalizacji kosztów transformacji, eksploatacji i strat. I choć obecnie koszty bezpośredniej obsługi technicznej transformatorów (koszty bieżącego serwisowania), bez względu na poziom napięcia znamionowego, są stosunkowo niskie w porównaniu z kosztami obsługi innych aparatów elektroenergetycznych, to jednak znaczenia nabierają zaawansowane metody diagnostyczne i systemy bieżącego monitorowania sprawności technicznej poszczególnych jednostek, połączone z aplikacjami wczesnego wykrywania defektów transformatora.

Wśród przyczyn awarii transformatorów i/lub jego elementów najistotniejsze są: miejscowe osłabienie izolacji, przebiecia atmosferyczne, starzenie/zmęczenie materiału oraz wady fabryczne lub materiałowe (rys. 2) [4,13,14].



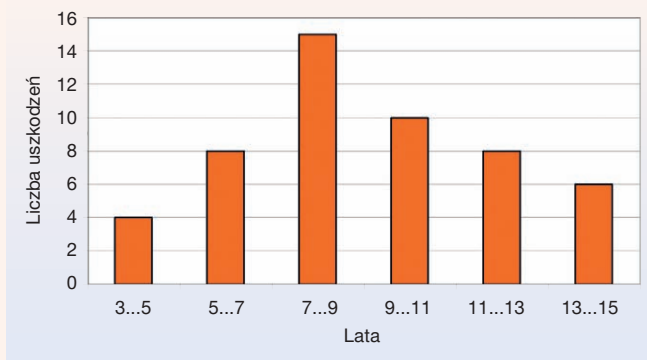
Rys. 1. Skutki uszkodzenia wysokonapięciowego izolatora przepustowego (a) i widok zniszczonej izolacji papierowo-olejowej rdzenia izolacyjnego (b)



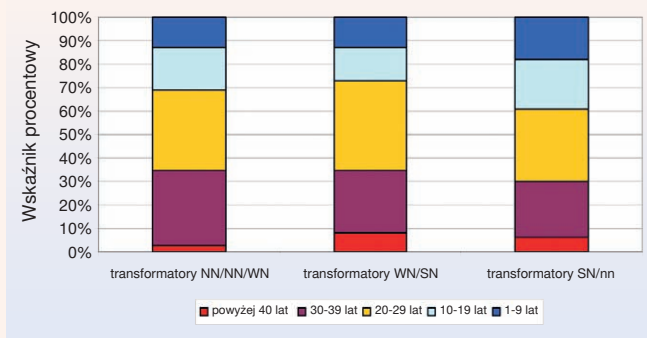
Rys. 2. Główne przyczyny uszkodzeń transformatorów

Jednym z ważniejszych elementów wyposażenia transformatora są izolatory przepustowe. Już niesprawność pojedynczego izolatora przepustowego powoduje unieruchomienie całej jednostki. Europejskie statystyki, zazwyczaj prezentowane w trakcie sesji plenarnych różnych międzynarodowych konferencji naukowo-technicznych (np. CIGRE), informują o tym, że uszkodzenia izolatorów przepustowych są przyczyną ok. 5-10% awarii transformatorów sieciowych. W przypadku transformatorów blokowych wskaźnik ten może wynosić nawet ok. 30%. Statystyki potwierdzają również i to, że w ponad połowie przypadków uszkodzeń izolatorów przepustowych dochodzi do pożaru transformatora [1,4].

Analiza awaryjności transformatorów spowodowanych uszkodzeniem pojedynczego izolatora lub kilku izolatorów przepustowych dowodzi, że przedziałem wiekowym, w którym najczęściej dochodzi do uszkodzenia tych elementów transformatora (ok. 80% zdarzeń awaryjnych) jest okres 10-20 lat eksploatacji (rys. 3). Stąd, uwzględniając w analizie stanu technicznego transformatorów uzyskane dane o ich awaryjności i dane statystyczne odzwierciedlające strukturę wiekową transformatorów eksploatowanych w krajowej sieci elektroenergetycznej, można z niepokojem obserwować pracę niespełna 40% transformatorów mocy wysokiego i najwyższych napięć (rys. 4).



Rys. 3. Zestawienie uszkodzeń izolatorów przepustowych na napięcie 110 kV w zależności od czasu pracy [1]



Rys. 4. Struktura wiekowa transformatorów mocy wysokiego i najwyższych napięć eksploatowanych w krajowych sieciach elektroenergetycznych

Do najbardziej prawdopodobnych przyczyn uszkodzeń izolatorów przepustowych należą przebicie izolacji papierowej rdzenia izolatora i procesy starzeniowe izolacji olejowej. W pierwszym przypadku mechanizm uszkodzenia polega na punktowym przebiciu najstabszej warstwy izolacji rdzenia. Tego typu uszkodzenia najczęściej występują w okolicy kotłownika i metalowego korpusu izolatora.

Wskutek osłabienia wytrzymałości izolacji wywołanej degradacją termiczną izolacji stałej następuje przyspieszona degradacja kolejnych warstw rdzenia, co prowadzi do całkowitego przebicia izolacji. W wyniku rozwoju uszkodzenia, według drugiego z mechanizmów o charakterze defektu dielektrycznego, inicjatorem są wyładowania niezupełne, które z czasem przerażają się w wyładowania powierzchniowe wzdłuż warstw papieru, powodując zwęglanie izolacji i tworząc tzw. ścieżki przewodzące.

Oprócz typowych procesów starzeniowych związanych z ermicznym rozkładem izolacji równie często dochodzi do przyspieszenia degradacji oleju w izolatorach przepustowych. Proces ten jest wynikiem utraty szczelności izolatora przepustowego wskutek zachodzących procesów starzeniowych jego elementów uszczelniających. W konsekwencji dochodzi do ubytków oleju izolacyjnego oraz penetracji wnętrza izolatora przez wilgoć. Nieszczelność izolatorów przepustowych nie jest problemem osobnym i najczęściej dotyczy izolatorów o kilkunastoletnim okresie eksploatacji.

Z analizy danych określających przyczyny niesprawności izolatorów przepustowych wynika, że w większości przypadków są to zdarzenia nagłe, które są trudne do wykrycia tradycyjnymi metodami diagnostycznymi, w szczególności takimi, które opierają się na pomiarach wykonywanych w pewnych – z góry określonych – odstępach czasu, w stanie beznapięciowym badanego urządzenia.

## Metody badań wysokonapięciowych izolatorów przepustowych

Do podstawowych badań stanu izolacji przepustów w eksploatacji należy zaliczyć pomiary rezystancji, współczynnika strat dielektrycznych  $\tan\delta$  oraz wyładowań niezupełnych, mierzonych przede wszystkim metodą emisji akustycznej [5]. Pomiary rezystancji, współczynnika strat dielektrycznych i pojemności wykonuje się z przewodzących układów do diagnozowania stanu izolacji urządzeń elektroenergetycznych lub za pomocą przewodzącego mostka ( $C$ - $\tan\delta$ ), przystosowanego do pomiarów strat dielektrycznych eksploatowanych transformatorów. Mostek ten zawiera specjalny układ do kompensacji prądu płynącego od sąsiednich torów prądowych (będących pod napięciem) przez pojemność do badanego transformatora. Bardzo istotny jest problem oceny i eliminowania lub ograniczania wyładowań niezupełnych występujących w izolatorach przepustowych. Pomiary wyładowań niezupełnych dostarczają bowiem ważnych informacji o stanie pracującego transformatora. W eksploatacji stosuje się układy do pomiaru wyładowań niezupełnych w trybie on-line (w czasie rzeczywistym) umożliwiające ich ciągłą kontrolę i lokalizację w pracującym transformatorze. Najczęściej wykorzystuje się w tym celu metodę emisji akustycznej [2,4]. Trwają również prace nad udoskonaleniem elektrycznych metod pomiaru wyładowań niezupełnych w trybie on-line.

W izolatorach przepustowych z rdzeniem z papieru impregnowanego olejem można stosować również metodę chromatografii gazowej do oceny ich stanu technicznego. Wychodzi się bowiem z założenia, że gazy wytworzone w przepuście są efektem procesu starzenia cieplnego i elektrycznego jego izolacji wewnętrznej. Należy jednak podkreślić, że ze względu na niewielką objętość oleju ilościowe kryteria oceny stanu izolacji przepustu mogą być inne niż w przypadku transformatorów. Dlatego też stan izolacji przepustów powinien być oceniany niezależnie od oceny stanu izolacji transformatora, w którym są zainstalowane.

W transformatorach o bardzo dużej mocy i o strategicznym znaczeniu dla systemu elektroenergetycznego coraz częściej instalowane są systemy ciągłego monitorowania między innymi stanu izolacji przepustów. Działanie takiego systemu oparte jest na rejestrowaniu i monitorowaniu prądu upływu wszystkich przepustów w trójfazowym transformatorze. Jednakowa wartość tego prądu we wszystkich trzech fazach świadczy o poprawnej pracy izolatorów przepustowych.

Przedstawiony powyżej ogólny opis metod badań wysokonapięciowych izolatorów przepustowych, których wyniki umożliwiają sporządzenie kompleksowej oceny stanu technicznego transformatora i oceny ryzyka eksploatacji tego urządzenia, zostanie szerszej opisany w kolejnej publikacji.

## Podsumowanie

W ostatnich latach problematyka zagwarantowania niezawodności i ciągłości dostaw energii elektrycznej do odbiorców spowodowała zwrócenie szczególnej uwagi na nowe inwestycje, których potrzebuje krajowa elektroenergetyka. Jeśli jednak uwzględnić w wykazanej skali potrzeb realne możliwości finansowe podsektora, to problematyka alokacji środków finansowych wskazuje na to, że nie należy koncentrować się wyłącznie na nowych inwestycjach i modernizacjach. W tym przypadku bardzo ważnym elementem jest racjonalna gospodarka istniejącą infrastrukturą sieciową. Zatem należy spodziewać się, że w najbliższych latach zaangażowanie operatorów sieci przesyłowej i dystrybucyjnych w proces utrzymania majątku będzie rosło.

Na zwrócenie szczególnej uwagi zasługuje fakt, iż w ostatnich latach znacząco wzrosło zapotrzebowanie na wielofunkcyjne systemy badawcze i diagnostyczne wyposażone w zaawansowane techniki pomiarów oraz dedykowane systemy gospodarki urządzeniami. Spotkało się to z pozytywną odpowiedzią rynku producenckiego, na którym nastąpił niezwykle dynamiczny rozwój technik diagnostycznych urządzeń elektrycznych. Jest to spowodowane przede wszystkim znaczącym postępem w rozwoju takich dziedzin, jak elektronika, informatyka, automatyka oraz teoria przetwarzania sygnałów. W rezultacie znacząco wzrosły również możliwości diagnozowania technicznego urządzeń elektroenergetycznych i ich elementów w systemach on-line jak i off-line oraz tworzenia komplementarnych systemów zarządzających ryzykiem eksploatacyjnym. Wdrożenie takich rozwiązań, poza wieloma zaletami technicznymi, będzie również prowadziło do uzyskania wymiernych efektów ekonomicznych.

Wzmocnienie działalności eksploatacyjnej jest jak najbardziej wskazane w szczególności, gdy dotyczy urządzeń, których sprawność działania decyduje o bezpieczeństwie dostaw energii elektrycznej. Do takich urządzeń należą między innymi transformatory.

Obecnie proces eksploatacji transformatorów opiera się głównie na oględzinach zewnętrznych i na analizie informacji uzyskanych z różnego rodzaju czujników zainstalowanych na tych urządzeniach. Jednak efektywność tego procesu spełnia wyłącznie podstawowe wymagania. W dążeniach do ograniczenia ryzyka zawodności działania tych urządzeń nieodzowne stają się zaawansowane techniki diagnostyczne pozwalające lepiej ocenić stan techniczny transformatora i jego elementów i wielokrotnie umożliwiające dokonanie pomiarów w tzw. stanie pod napięciem. Ma to szczególne znaczenie z punktu widzenia operacyjnego zarządzania siecią elektroenergetyczną.

W konkluzji można stwierdzić, że w najbliższej przyszłości należy się spodziewać rosnącego zapotrzebowania na inicjatywy usprawniające bieżące utrzymanie infrastruktury sieciowej i na kompleksowe propozycje zaawansowanych technik eksploatacyjnych, spośród których dominujące znaczenie będą miały diagnostyka i monitoring urządzeń.

## LITERATURA

- [1] Buchacz J., Olech W., Warczyński P.: Metodyka oraz oprogramowanie do oceny stanu technicznego izolatorów przepustowych transformatorów oraz ich doboru dla jednostek pracujących: baza danych. Praca rozwojowa ZPBE Energopomiar-Elektryka, Gliwice 2009

- [2] Cichoń A., Borucki S., Subocz J.: Ocena możliwości wykorzystania sygnałów emisji akustycznej do detekcji wylądowań niezpełnych w izolatorach przepustowych. Pomiary, Automatyka, Kontrola 2011, nr 4, s. 348-351
- [3] Figura M., Mański P.: Izolatory przepustowe dużych transformatorów sieciowych – doświadczenia eksploatacyjne oraz ich wpływ na zarządzanie populacją izolatorów. Konferencja naukowo-techniczna pt.: „Zarządzanie eksploatacją transformatorów”. Wiśła 2010.
- [4] Figura M., Skomudek W.: Problematyka diagnostyki transformatorowych izolatorów przepustowych. Międzynarodowa Konferencja „TRANSFORMATOR'11”, Toruń 2011
- [5] Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006
- [6] Kujszczyk S.: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. PWN, Warszawa 1994
- [7] Mikulecky A.: How to prevent transformer bushing failures?. International Colloquium “Transformer Research and Asset Management”, Cavtat, November 2009
- [8] Natowski Z.: Stacje elektroenergetyczne 110-750 kV. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984
- [9] Pohl Z. i in.: Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
- [10] Skomudek W.: Gospodarka rynkowa i jej wpływ na jakość dostarczanej energii elektrycznej. Wiadomości Elektrotechniczne 2003, nr 4, s.136-138
- [11] Skomudek W.: Wpływ rozwoju sieci najwyższych napięć na poziom zdolności przesyłu i transformacji energii elektrycznej. Pomiary, Automatyka, Kontrola 2011, nr 4, s. 417-420
- [12] Subocz J., i in. (praca zbiorowa): Transformatory w eksploatacji. Wydawnictwo Energo-Complex, Piekary Śląskie 2007.
- [13] Subocz J., Zenker M., Mrozik A.: Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną przepustów transformatorowych wysokiego napięcia z izolacją stałą. Pomiary Automatyka, Kontrola 2011, nr 4, s. 376-379
- [14] Subocz J., Zenker M.: Wpływ zesterzenia i inkruzi z produktami rozkładu kompozytu papierowo-żywicznego na odpowiedź dielektryczną modelu przepustu typu RIP. Konferencja Naukowo-Techniczna NIWE'2011, Szklarska Poręba 2011