



## Próby napięciowe transformatorów energetycznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono aktualny stan znormalizowanych wymagań dotyczących prób napięciowych transformatorów energetycznych. Przeanalizowano tendencje zmierzające do zapewnienia lepszej oceny, niż to wynika z norm, stanu układu izolacyjnego nowego transformatora. Podano przykłady zastosowań tych nowych tendencji w praktyce.

**Abstract. (Tests voltage of transformers).** The article presents the current state of standards' requirements relating voltage tests of energetic transformers. New trends towards assurance of better assessment, then stem from the standards, of insulating systems' condition of new transformers were analyzed. There are given application examples of these new trends in practice.

**Słowa kluczowe:** transformator, próba napięciowa, układ izolacyjny, wyładowania niezupełne.

**Keywords:** transformer, voltage test, insulation system, partial discharge.

### Wprowadzenie

Transformator jako element sieci energetycznej, sprzęgający różne napięcia, często znacznie się różniące, zawsze poddawany był wyjątkowo ostrym próbom napięciowym. Początkowo były to bardzo proste próby polegające na przyłożeniu napięcia i obserwacji czy transformator uległ uszkodzeniu (przebiecie izolacji), czy też nie. W czasie próby używano woltomierza do pomiaru napięcia i zegarka do pomiaru czasu. Uszkodzony transformator naprawiano i powtarzano próby, aż do skutku.

Teraz, kiedy przebiecia izolacji w czasie prób napięciowych praktycznie nie występują, próby te są coraz bardziej wyrafinowane. Dlatego stosowana jest skomplikowana aparatura służąca do wykrywania nawet drobnych usterek niemożliwych do oceny ludzkimi zmysłami. Wszystkie zmiany, doskonalące sposób wykonania prób, prowadzą do jednego celu, musi być pewność, że:

- układ izolacyjny został prawidłowo zaprojektowany,
- użyto właściwych materiałów,
- układ izolacyjny zbudowano zgodnie z projektem,
- wykonano właściwą obróbkę mediów izolacyjnych.

Spełnienie powyższych wymagań, potwierdzone wynikami pomiarów wykonanych w czasie prób napięciowych, pozwalała na wieloletnią bezawaryjną pracę transformatora. Klient musi mieć pewność, że transformator jest najwyższej jakości.

### Wymagania norm

Podstawową normą regulującą zagadnienie prób napięciowych transformatorów, praktycznie obowiązującą w całej Europie, jest [1]. W Polsce norma ta występuje jako [2].

Generalnie wszystkie występujące w praktyce napięcia znamionowe są ograniczone do szeregu napięć zwanym „najwyższym napięciem urządzenia  $U_m$ ”. Układ izolacyjny transformatora jest zaprojektowany na najwyższe napięcie robocze  $U_m$ . Do napięcia  $U_m$  przypisane są napięcia probiercze, czyli poziomy izolacji. Określają one dielektryczne właściwości transformatora i są weryfikowane przez szereg prób wytrzymałości elektrycznej.

W poziomie izolacji podaje się SI/LI/AC (SI - Switching Impulse, LI - Lighting Impulse, AC - Alternate Current) co oznacza kolejno:

- napięcie probiercze udarowe łączeniowe,
- napięcie probiercze udarowe piorunowe,

- krótkotrwałe indukowane i doprowadzone z obcego źródła napięcia probiercze przemienne.

Próbę udarem łączeniowym wykonuje się jako próbę wyrobu, dla transformatorów na napięcie wyższe niż 170 kV, chyba, że wykonywana jest próba krótkotrwałym napięciem przemiennym (ACSD - Short Duration AC). Przy napięciu od 300 kV próbę tą wykonuje się zawsze.

Próbę udarem piorunowym przy napięciach niższych od 72,5 kV wykonuje się jako próbę typu, a dla wyższych jako próbę wyrobu. Udary ucięte na grzbiecie (próba specjalna) powinno stosować się w przypadku dołączenia transformatora do rozdzielnic z izolacją gazową.

Dla najczęściej spotykanych w Polsce napięć  $U_m$ , relacje  $U_m/LI/AC$  są następujące: 7,2/60/20, 12/75/28, 17,5/95/38, 24/125/50, 36/170/70, 123/450 lub 550/185 lub 230.

W wyższych napięciach  $U_m$ , relacje komplikują się, ze względu na liczne wymagania dotyczące koordynacji izolacji, lokalizacji transformatora, rodzaju zabezpieczeń, itp. Dla  $U_m=420$  kV SI może być 850, 950 i 1050 kV i LI 1050, 1175, 1300 i 1425 kV oraz AC 460, 510 i 570 kV.

Próbę napięciem przemiennym doprowadzonym wykonuje się jako próbę wyrobu. Próbę ACSD wykonuje się jako próbę wyrobu przy napięciach do 300 kV. Próbę długotrwałą napięciem przemiennym (ACLD - Long Duration AC) wykonuje się jako specjalną do 170 kV i jako wyrobu dla napięć wyższych.



Rys.1. Układu do pomiaru wyładowań niezupełnych podczas próby napięciem indukowanym

### Metodyka prób napięciami udarowymi

Udary łączeniowe najczęściej wytwarza się indukcyjnie przez doprowadzenie napięcia do uzwojenia o niskim

napięciu. Do badanych zacisków przykładane są trzy udary probiercze o kształcie: czoło 100  $\mu$ s, powyżej 90% 200  $\mu$ s i przejścia napięcia przez zero 500  $\mu$ s.

Udary piorunowe wytwarza się w generatorach udarowych zbudowanych z kondensatorów i rezystorów. Naładowane równolegle kondensatory rozładują się szeregowo przez iskierniki. Do badanych zacisków przykładane są trzy udary o kształcie: czoło 1,2  $\mu$ s i czasie do półszczytu 50  $\mu$ s. Gdy stosuje się udary ucięte na grzbiecie, to ich wartość jest wyższa o 10% od udaru pełnego i ucięcie udaru następuje po 2 do 6  $\mu$ s. Udary te doprowadza się po pierwszym udarze pełnym. W czasie wszystkich udarów rejestrowane są, obecnie najczęściej cyfrowo, przebiegi napięć i prądów. Umożliwia to wykonanie dokładnych analiz zgodności przebiegów [3] i ocenę wyniku próby.

#### Metodyka prób napięciami przemiennymi

Próba napięciem przemiennym doprowadzonym ma istotne znaczenie dla transformatorów rozdzielczych, w których nie stosuje się stopniowania izolacji. Próba ta daje pewność, że układ izolacyjny między uzwojeniami, uniemożliwi przedostanie się wysokiego napięcia sieci do niskonapięciowych użytkowników energii elektrycznej. Z tego powodu stosunek napięć probierczych do  $U_m$  wynosi 3 przy 3,6 kV (10 kV) i 2 przy 36 kV (70 kV). Próba trwa jedną minutę i jest wystarczająca, aby wykryć usterki w układzie izolacyjnym. Próby wykonywane są w sposób zaprogramowany. Rejestracja napięcia i prądu umożliwia wykrycie nawet drobnych zmian w układzie izolacyjnym, mimo że norma wymaga tylko braku załamania napięcia.

Próba ACSD jest dla napięć do 170 kV próbą podstawową. Dla napięć od 72,5 kV zaleca się stosowanie pomiaru wyładowań niezupełnych (WNZ). Zasady pomiaru WNZ określa [4].

Bez pomiaru WNZ indukuje się dwukrotną wartość napięcia znamionowego przez 6000 okresów. Wynik próby ocenia się na podstawie zmian napięcia i prądu w czasie próby.

Z pomiarem WNZ właściwą próbę poprzedza się i kończy pięciominutowymi okresami napięcia 1,1 i 1,3 $U_m$  (izolacja niestopniowana) lub 1,5 $U_m$  (izolacja stopniowana), w czasie, których mierzy się poziom WNZ, który nie powinien przekroczyć 100 i 300 lub 500 pC.

Z tych rozważań wynika, że transformatory rozdzielcze nie wymagają prób napięciami przemiennymi z pomiarem WNZ.

Transformatorom na napięcie od 170 kV wykonuje się próbę ACLD. Po próbie dwukrotnym napięciem znamionowym utrzymuje się przez 30 minut (do 300 kV) lub 60 minut (powyżej 300 kV) półtora krotne napięcie  $U_m$ . Poziom WNZ przy napięciu 1.1 $U_m$  i 1.5 $U_m$ , nie powinien przekraczać odpowiednio 100 i 500 pC.

#### Wymagania klientów

W zasadzie ustalenia norm dotyczące prób napięciowych, dotychczas były dla klientów wystarczające. Ostatnio, coraz częściej, klienci stawiają dodatkowe warunki wybiegające poza normy. Wynika to z faktu, że chcą mieć absolutną pewność, że układ izolacyjny transformatora jest odporny na wszystkie zakłócenia napięciowe w sieci.

W odniesieniu do transformatorów rozdzielczych dodatkowe wymagania to:

- zwiększone napięcie probiercze przemienne,
- próba napięciem piorunowym jako próba wyrobu.

Ostatni wymóg, trudny do realizacji, stawiają klienci z Włoch. Próba napięciem piorunowym jest pracochłonna i wymaga specjalnych urządzeń. Fabryka transformatorów rozdzielczych ABB w Łodzi poradziła sobie z tym

problemem. Kilkaset transformatorów rozdzielczych miało wykonaną próbę napięciem piorunowym. Wszystkie próby były zakończone wynikiem pozytywnym.

W odniesieniu do transformatorów mocy wymagania są jeszcze inne, najczęściej dotyczą one zaokrąglonych kryteriów poziomu WNZ lub stosowania innej, bardziej ostrej metodyki próby. Te zaokrąglone kryteria, dotyczące WNZ to obniżenie poziomu WNZ z 500 pC do 300 pC a nawet do 100 pC.

Często klient żąda, aby po próbach napięciowych:

- wykonać chromatografię gazową oleju pobranego z badanego transformatora (na podstawie ilości gazów zawartych w oleju można określić rodzaj czynników działających na olej np: temperatura, wyładowania elektryczne),
- pomierzyć RVM (Recovery Voltage Measurements), (na podstawie stanu polaryzacji izolacji, można określić stan zatarzenia się układu izolacyjnego).

#### Układy izolacyjne

Układy izolacyjne w transformatorze olejowym są najczęściej układami:

- olejowymi,
- preszpanowo – olejowymi,
- papierowo -olejowymi.

W transformatorach rozdzielczych, z punktu widzenia geometrii układu, charakterystyczne są następujące układy:

- szczelina główna między uzwojeniami GN i DN stanowi układ dwóch walców współśrodkowych, gdzie izolację tworzy tuleja wykonana z preszpanu falistego lub tuleja z kilku zwojów preszpanu i, oklinowana jedno lub dwustronnie (wszystko zanurzone w oleju transformatorowym mineralnym lub syntetycznym, bardzo często biodegradalnym przyjaznym dla środowiska),
- układ izolacyjny między czołem uzwojenia GN i jarzmem rdzenia tworzy przegroda preszpanowa lub pierścień kątowy z preszpanu lub papieru (typowy układ skłonny do wyładowań ślizgowych),
- układ izolacyjny między fazami, dwa walce równoległe z jedną lub kilkoma barierami preszpanowymi,
- układ izolacyjny między izolowanym odpływem GN i kadzią, walec – płyta z barierami preszpanowymi,
- układ izolacyjny między izolowanymi odpływami sąsiednich faz, dwa walce równoległe lub skrzyżowane,
- układ izolacyjny między czołami uzwojeń GN i DN,
- układ izolacyjny styków przełącznika zaczerpów do pokrywy, stalowej belki lub kadzi (układ ostrze-płyta),
- układ izolacyjny między stykami przełącznika zaczerpów, styków do metalowych elementów mocujących, typowy układ ślizgowy po powierzchni listwy bakelitowej,
- układ izolacyjny między warstwami uzwojenia GN (dla napięć DN nie występują zagrożenia) musi być odporny na zagrożenia związane z próbą napięciem przemiennym oraz z próbą napięciem piorunowym.

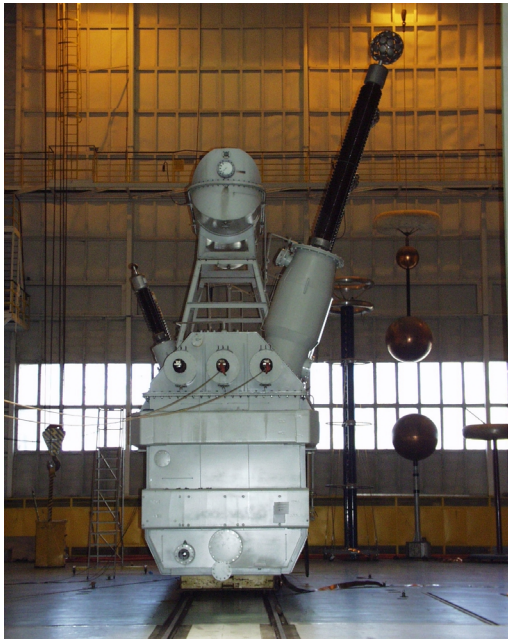
Izolacja może być wykonywana jako pełna (taka sama grubość izolacji we wszystkich warstwach) i stopniowana (różna między poszczególnymi warstwami w zależności od występujących naprężeń). Różnicować można również grubość izolacji wzdłuż wysokości uzwojenia, stosując taśmę papierową lub preszpanową. Izolacja tworzy wówczas klin (trójkąt), który najgrubszy jest w miejscu największej różnicy potencjałów między zwojami sąsiednich warstw, a najcieńszy w miejscu gdzie różnica potencjałów równa się zero.

Pomimo niewątpliwych zalet układów izolacyjnych olejowo – celulozowych, coraz częściej spotyka się wykonania transformatorów rozdzielczych z układem

izolacyjnym zbudowanym z żywicy. Występują dwa wykonania: Resibloc - żywica w stanie mokrym i utwardzana po nawinięciu uzwojeń i Resiform - żywica wlewana do formy z uzwojeniem i utwardzana pod próżnią.

W transformatorach mocy stosuje się również papier, preszpan i olej. Układ izolacyjny jest klasyczny: izolacja przewodów z papieru (w przewodach o ciągłej transpozycji żył izolacja drutów jest wykonana z emalii, a całość izolowana papierem), izolacja kanałowa – preszpanowe kliny i olej, izolacja główna – preszpanowe przegrody i olej, izolacja doziemna – specjalnie uformowane kształtki z preszpanu i olej.

ABB jako firma wiodąca w dziedzinie transformatorów, opracowała i uruchomiła produkcję transformatorów mocy w wykonaniu suchym, pod firmową nazwą Dryformer.



Rys.2. Transformator 670MVA/420kV

### Transformatory rozdzielcze

Zapotrzebowanie na transformatory rozdzielcze w Europie przekracza 100000 sztuk rocznie. Cena transformatora jest tak niska, że producenci zmuszeni są do ciągłego ograniczania kosztów. Osiąga się to przez zmianę i optymalizację konstrukcji, komputerowe wspomaganie projektowania oraz wykorzystanie metod statystycznych dla ograniczenia ryzyka. Można tak zaprojektować transformator, aby uzyskać wyrównany rozkład pola elektrycznego z natężeniami zbliżonymi do krytycznych. Masa transformatora maleje średnio o 10% na 10 lat. Wówczas musi być zapewniona wysoka powtarzalność produkcji i kontrola produkcji na najwyższym poziomie. Można to uzyskać stosując zautomatyzowane wykonywanie rdzeni i uzwojeń oraz automatyczny proces suszenia i impregnacji elementów układu izolacyjnego. Wszystkie w/w rozwiązania zostały wdrożone w fabryce transformatorów rozdzielczych ABB w Łodzi. Jest to jeden z najnowocześniejszych na świecie zakładów produkujących transformatory rozdzielcze.

Zdecydowana większość produkcji tej fabryki jest dostarczana do prawie wszystkich krajów europejskich. W związku z tym, istnieje konieczność produkowania bardzo

różnorodnych typów transformatorów. Wspólna jest tylko technologia: uzwojenie nawijane na kolumnie, izolacja międzywarstwowa wykonana z paska papieru.

Wszystkie transformatory przechodzą próby zgodnie z wymaganiami norm. Ale np. zdarzył się ciekawy przypadek uszkodzenia transformatora, po rocznej eksploatacji. Skrupulatne badania doprowadziły do wniosku, że ten transformator, pracował z wyładowaniami niezupełnymi. Występujące WNZ powodowały pojawianie się gazów, które po tak długim okresie czasu wytworzyły wewnątrz kadzi nadciśnienie. Ponieważ prawie wszystkie transformatory rozdzielcze wykonywane są jako hermetyczne, wzrost ciśnienia powodował rozdęcie kadzi i obniżanie się poziomu oleju, aż do odkrycia się styków przełącznika zaczepów.

To zdarzenie było podstawą do innego traktowania prób napięciowych. Rozpoczęto wykonywanie pomiarów WNZ na wszystkich wyprodukowanych transformatorach rozdzielczych. Opracowano specjalną metodykę, z powtórzeniem próby napięciem indukowanym w trakcie pomiarów WNZ. Określono wymagania pozytywnych wyników prób, poziom WNZ przy  $1,1U_m$  mniejszy od 100 pC, przy  $1,5U_m$  mniejszy od 500 pC, napięcie zapłonu i gaśnięcia (poziom odniesienia 10 pC), wyższe od  $U_m$ . Obecnie złagodzone liczbę badań tak, że pomiary wykonuje się na co 10-tym transformatorze przy czym z reguły, wybiera się transformatory na napięcia od 20 kV.

Zastosowanie tych rozwiązań, znacznie wybiegających poza wymagania normy, zapewniło dostarczanie klientom ABB transformatorów rozdzielczych bez WNZ, groźnych dla układu izolacyjnego.

### Pomiary dodatkowe

Dodatkowymi pomiarami wspomagającymi próby napięciowe transformatorów są:

- pomiar rezystancji izolacji napięciami 2,5 lub 5 kV, po czasie 15 i 60 sekund, oraz współczynnik absorpcji tj. stosunek  $R_{60}$  i  $R_{15}$ , jego wartość daje informację o stanie zanieczyszczenia układu izolacyjnego (pomiar wykonuje się dla wszystkich transformatorów, mimo, że norma traktuje ten pomiar jako specjalny),
- pomiar  $\text{tg}\delta$  układu izolacyjnego, wykonywany tylko dla transformatorów mocy.

*Serdecznie dziękujemy Panu mgr inż. Grzegorzowi Sołtysiakowi Dyrektorowi Zakładu Transformatorów Rozdzielczych ABB Sp. z o.o. Oddział w Łodzi za pomoc umożliwiającą napisanie tego artykułu.*

### LITERATURA

- [1] IEC 60076-3 Power transformers Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- [2] PN-EN 60073-3 Transformatory. Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępy izolacyjne w powietrzu
- [3] HIAS High Resolution Impulse Analasing System HIAS 743 HAEFELY TRENCH Katalog firmowy E178.71
- [4] PN-EN 60270 Wysokonapięciowa technika probiercza – Pomiary wyładowań niezupełnych

**Autorzy:** mgr inż. Wojciech Zieliński, ABB Sp. z o.o. Oddział w Łodzi ul.Aleksandrowska 67 91-205 Łódź, E-mail [wojciech.zielinski@pl.abb.com](mailto:wojciech.zielinski@pl.abb.com); mgr inż. Sławomir Kłyż, ABB Sp. z o.o. Oddział w Łodzi ul.Aleksandrowska 67 91-205 Łódź, E-mail: [slawomir.klyz@pl.abb.com](mailto:slawomir.klyz@pl.abb.com); mgr inż. Józef Wrocławski ul.Wapienna 45 m56 91-087 Łódź