

Wybrane zagadnienia laboratoryjnych pomiarów wysokiego napięcia

Streszczenie. Celem badań laboratoryjnych jest weryfikacja wytrzymałości układów i materiałów izolacyjnych na narażenia napięciowe spotykane podczas eksploatacji. Do najgroźniejszych z nich należą stromo narastające impulsy napięciowe. Podstawą prawidłowej oceny w tego typu badaniach są wyniki pomiarów wykonanych z zachowaniem wymagań obowiązujących norm.

Abstract. The aim of laboratory tests is verification of the insulation systems electric strength for the different voltage stress occurred during operation. For the most dangerous of them belong steeply rising voltage pulses. The basis of proper assessment in this type of studies are the results of measurements made with the requirements in the standards. (**Selected issues of laboratory measurement of high-voltage**).

Słowa kluczowe: wysokie napięcie, pomiary, niepewność pomiaru, strome impulsy napięciowe.

Keywords: high voltage, measurement, measurement uncertainty, steep voltage pulses.

doi:10.12915/pe.2014.10.25

Wstęp

Technika pomiaru wysokich napięć stałych, przemiennych i udarowych stanowi podstawę badań wytrzymałości elektrycznej materiałów i układów izolacyjnych. Jako ważna dziedzina techniki wysokich napięć towarzyszy rozwojowi elektroenergetyki zapoczątkowanemu pod koniec XIX wieku. Wprowadzanie nowych rozwiązań technicznych i materiałowych oraz rozbudowa systemów elektroenergetycznych wymusiły podwyższanie standardów również w dziedzinie pomiarów wysokonapięciowych, których specyfika klasyfikuje je jako odrębny dział miernictwa elektrycznego. Badania laboratoryjne, które mają stanowić weryfikację nowych rozwiązań technicznych opracowanych na podstawie obliczeń teoretycznych wymagają często zastosowania wysokich napięć stałych, przemiennych 50 Hz i udarowych odwzorowujących narażenia napięciowe jakie towarzyszą wyładowaniom piorunowym lub różnego rodzaju przepięciom. Podstawą prawidłowej oceny w tego typu badaniach są wyniki pomiarów wykonanych z zachowaniem wymagań obowiązujących norm. Wysokie wymagania jakościowe w tym względzie dotyczą nie tylko problemu zachowania odpowiednich procedur pomiarowych, wyeliminowanie potencjalnych błędów, które mogłyby zafałszować wynik pomiaru ale również zastosowanie sprawdzonej, opatrzonej ważnymi świadectwami aparatury pomiarowej.

Wzorcowanie układów pomiarowych wysokiego napięcia

Pomiary wysokich napięć stałych, przemiennych i udarowych można wykonywać metodami bezpośrednimi, w których badane napięcie jest bezpośrednio przykładane do urządzenia pomiarowego lub pośrednimi poprzez urządzenia pośredniczące, które obniżają o określoną wartość mierzone napięcie. Zagadnienia pomiarowe związane z pomiarem bezpośrednim przy pomocy iskiernika opisuje norma PN-EN 60052:2003 [1]. Całkowita niepewność pomiaru wykonanego zgodnie z wytycznymi tej normy nie powinna przekraczać 3%.

W przypadku pośrednich metod pomiaru norma PN-EN 60060-2 [2] zaleca aby układ pomiarowy wysokiego napięcia były wzorcowane metodą odniesienia. Wzorcowanie polega na wyznaczeniu współczynnika skali tj. wielkości liczbowej, przez którą należy pomnożyć wskazania przyrządu pomiarowego w celu uzyskania wartości wielkości mierzonej. W metodzie odniesienia porównuje się wskazania układu pomiarowego wzorcowego (referencyjnego) ze wskazaniami układu kalibrowanego.

Granice całkowitej niepewności pomiarów wysokich napięć przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Granice całkowitej niepewności pomiarów wysokiego napięcia [2]

Rodzaj napięcia	Granica całkowitej niepewności pomiarowej	
	układ pomiarowy odniesienia	uznany układ pomiarowy
napięcie stałe	+/- 1%	+/- 3%
napięcie przemiennie 50 Hz	+/- 1%	+/- 3%
napięcie udarowe piorunowe i łączeniowe, pełne i ucięte na grzbiecie:		
- pomiary wartości szczytowej	+/- 1%	+/- 3%
- pomiary parametrów czasowych	+/- 5%	+/- 10%
napięcie udarowe piorunowe ucięte na czole ($0,5 \mu\text{s} \leq T_u < 2 \mu\text{s}$):		
- pomiary wartości szczytowej	+/- 3%	+/- 5%
- pomiary parametrów czasowych	+/- 5%	+/- 10%

Norma [2] podkreśla również konieczność poddawania wysokonapięciowych układów pomiarowych kompleksowym badaniom odbiorczym, a następnie okresowym badaniom kontrolnym. Wyniki takich badań powinny być archiwizowane w postaci rejestru zawierającego także opis schematu oraz wyniki badań odbiorczych elementów składowych.

Ważność certyfikatów potwierdzających zgodność z wzorcem układów pomiarowych należy odnawiać co pięć lat, przy czym zaleca się aby wzorcowanie takie – zwłaszcza układów referencyjnych – odbywało się nie rzadziej niż raz na dwa lata.

W przypadku układów pomiarowych wysokiego napięcia stałego i przemiennego 50 Hz wyznacza się współczynnik skali oraz jego liniowość w pełnym zakresie pomiarowym. Wyniki wzorcowania układów pomiarowych wysokiego napięcia udarowego powinny być uzupełnione badaniami ich właściwości dynamicznych.

Zakres pomiarowy układu odniesienia powinien odpowiadać zakresowi pomiarowemu układu badanego. Norma [2] dopuszcza jednak, aby w przypadkach szczególnych gdy brak jest możliwości zapewnienia w procesie kalibracji układu wzorcowego o wystarczającym zakresie pomiarowy zastosowanie takiego układu, którego zakres pomiarowy odpowiada przynajmniej 20% zakresu pomiarowego badanego układu.

Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej wyposażone jest w nowoczesny układ do pomiaru wysokich napięć stałych, przemiennych 50 Hz oraz

udarowych piorunowych i łączeniowych, który spełnia wymagania układów wzorcujących. Najważniejszym elementem tego układu jest uniwersalny dzielnik RCZ 500 produkcji firmy Haefely (rys.1). Dzielnik ten umożliwia wykonywanie pomiarów napięć stałych i przemiennych 50 Hz o wartościach do 180 kV oraz udarowych piorunowych i łączeniowych o wartościach do 500 kV. Zgodnie z normą [2] układ wyposażony w ten dzielnik pozwala więc na wzorcowanie układów pomiarowych napięć stałych i przemiennych 50Hz do 900 kV oraz udarowych do 2500 kV. W przypadku pomiarów napięć stałych i przemiennych dzielnik współpracuje z woltomierzem cyfrowym Hewlett Packard typ 34401 A, przy pomiarach napięć udarowych z woltomierzem wartości szczytowej Haefely SV-642 i oscyloskopem cyfrowym Tektronix TDS 744A. Dzielnik posiada ważne certyfikaty potwierdzające jego dużą dokładność pomiarową, wydane pod koniec 2013 roku przez akredytowane laboratorium wzorcujące firmy Haefely w Szwajcarii. Wyznaczone współczynniki skali charakteryzują się bardzo małą niepewnością pomiarową, która nie przekracza:

- dla zakresu napięcia stałego 0,3%,
- dla zakresu napięcia przemiennego 0,8%,
- dla napięć udarowych piorunowych 1,4%,
- dla napięć udarowych łączeniowych 1,2%.

Na podstawie danych w tabeli 1. zgodnych z normą PN-EN 60060-2 [2] dzielnik ten spełnia wymagania stawiane układom pomiarowym odniesienia w zakresie napięcia stałego i przemiennego 50 Hz.

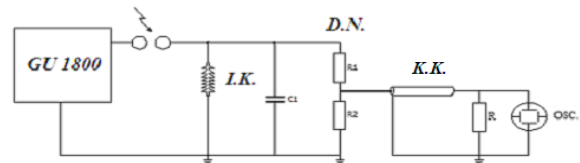


Rys.1. Dzielnik Haefely RCZ500 w hali wysokich napięć Politechniki Wrocławskiej.

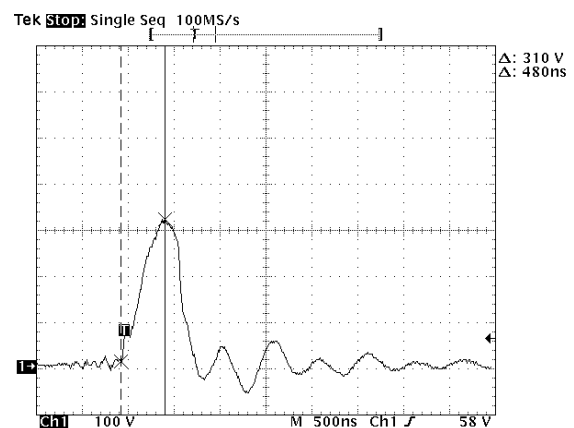
Generacja i pomiary stromo narastających udarów napięciowych

Ważnym zagadnieniem badawczym związanym z pomiarami wysokonapięciowymi jest generacja stromo narastających udarów napięciowych, które wykorzystywane są w badaniu powierzchni granicznych osłona-rdzeń izolatorów kompozytowych. Pozwala to na wykrycie wad produkcyjnych nowych izolatorów – adhezji kompozytowej osłony do szklano-epoksydowego rdzenia nośnego. Detekcja osłabionych lokalnie miejsc następuje wskutek ich przebicia pod działaniem narażenia napięciowego. Wysokie wartości napięcia przeskoku są tym wyższe im udary napięciowe są bardziej stromo narastające. W warunkach eksploatacyjnych przykładem takich groźnych oddziaływań są przepięcia jakie mogą pojawić się linii przesyłowej. Procedura badania powierzchni granicznych izolatorów kompozytowych została opisana w normie IEC 62217 [3].

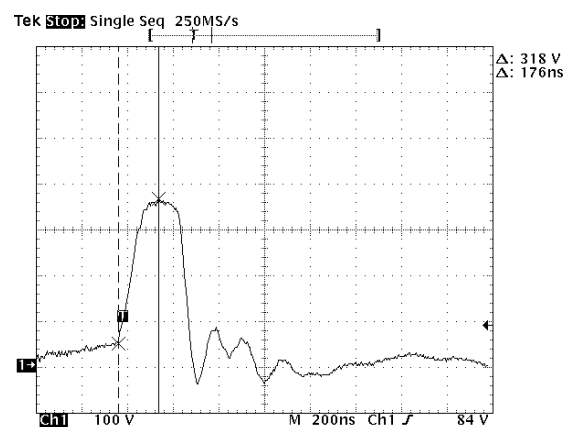
Ze względu na kumulacyjny charakter zjawiska przebicia wymagane jest wykonanie 25 prób napięciem udarowym obu biegunowości i stromości nie mniejszej niż 1 kV/ns. Stromość ta może okazać się jednak zbyt łagodna ponieważ na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że udary o stromości 4 kV/ns lepiej wykrywają wady technologiczne rdzeni i powierzchni granicznych rdzeń-osłona izolatorów kompozytowych [4,5]. Tak szybkie narosty wysokiego napięcia można mierzyć przy pomocy układów pomiarowych wyposażonych w dzielniki napięcia o odpowiednich parametrach dynamicznych oraz impedancję dopasowującą. Na rysunku 2 przedstawiono taki układ pomiarowy znajdujący się w hali wysokich napięć PWr, wyposażony w dzielnik napięcia DTR700 ($U_n=700$ kV) oraz oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS 744A. Całkowita niepewność pomiarowa tego układu nie przekracza 3%.



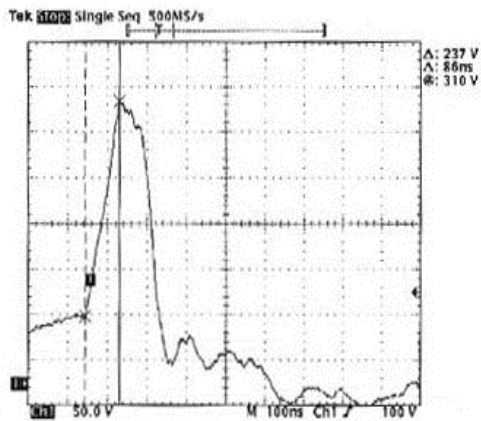
Rys.2. Układ probierczy do badania izolatorów kompozytowych stromo narastającymi udarami napięciowymi; I.K. – izolator kompozytowy, D.N. – dzielnik napięcia, K.K. – kabel koncentryczny



Rys.3. Oscylogramy napięcia o stromości 1 kV/ns, napięcie próby 480 kV, przeskok powierzchniowy na izolatorze kompozytowym, brak uszkodzenia izolatora.



Rys.4. Oscylogramy napięcia o stromości 2,8 kV/ns, napięcie próby 493 kV, przeskok powierzchniowy na izolatorze kompozytowym, brak uszkodzenia izolatora.



Rys.5. Oscylogramy napięcia o stromości 4,2 kV/ns, napięcie próby 470 kV, przeskok powierzchniowy na izolatorze kompozytowym, brak uszkodzenia izolatora.

Przykładowe wyniki pomiarów stromo narastających napięć podczas badania izolatorów kompozytowych pokazano na rysunkach 3, 4 i 5.

W przypadku pozytywnego wyniku próby tzn. braku wystąpienia uszkodzeń izolatory umieszcza się w zbiorniku z wrzącą wodą na 42 godziny. Po tym czasie powtarza się testy stromo narastającymi impulsami napięciowymi, których wyniki są już rozstrzygające.

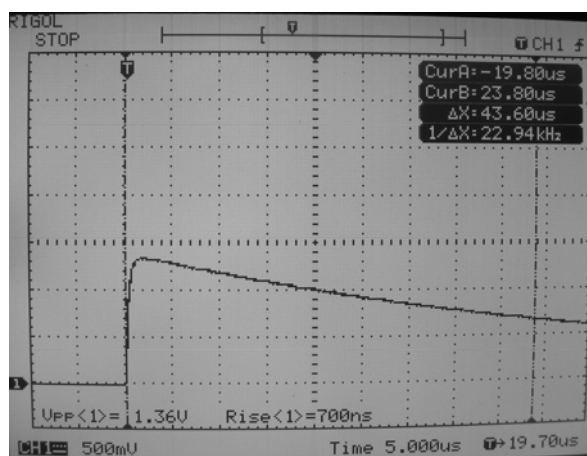
Norma [3] zaleca zbadanie nowych konstrukcji izolatorów kompozytowych stromo narastającymi udarami napięciowymi. Badania takie można również zaproponować w diagnostyce izolatorów z eksploatacji. Długotrwałe oddziaływanie narażeń środowiskowych oraz eksploatacyjnych może, bowiem prowadzić do lokalnego osłabienia kompozytowych osłon i w konsekwencji do ich rozszczelnienia. Nawet niewielka penetracja wody w głąb szklano-epoksydowego rdzenia stanowi wówczas poważne zagrożenie, które łatwo zdiagnozować stromo narastającymi udarami napięciowymi. Wykonanie takich badań ma ułatwić budowany obecnie w laboratorium wysokich napięć PWr rezystancyjny dzielnik napięcia udarowego (rys.6), który wykorzystywany będzie w badaniach diagnostycznych izolatorów z eksploatacji.



Rys.6. Rezystor wysokonapięciowy dzielnika o oporności 2,5 kΩ, nawinięcie krzyżowe drutu oporowego.

Niewielka jego wysokość ma poprawić rozkład napięcia poprzez zmniejszenie pojemności wzdłużnych i doziemnych, a krzyżowe nawinięcie drutu oporowego skutecznie eliminuje indukcyjność. Ograniczenie pojemności własnej dzielnika ma istotny wpływ na całkowitą pojemność układu pomiarowego co z kolei ma ważny wpływ na stromość generowanych impulsów napięciowych. Oporność górnego członu dzielnika wynosi około 2,5 kilooma. Dolny człon wykonany jest jako rezystor nawinięty bifilarnie. Obliczeniowe znamionowe napięcie udarowe wynosi 215 kV.

Na rysunku 7 przedstawiono oscylogram odpowiedzi dzielnika na wymuszenie znormalizowanym udarem piorunowym. Współczynnik skali układu przy uwzględnieniu impedancji dopasowania wynosił 735. Znormalizowany czas czoła udaru wynosi $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ (+/- 30 %), a czas półszczytu $T_2 = 50 \mu\text{s}$ (+/- 20 %) [2].



Rys.7. Oscylogramy napięcia piorunowego, dzielnik napięcia $F_m = 735$, zmierzone wartości $T_1 = 1,17 \mu\text{s}$, $T_2 = 43,6 \mu\text{s}$.



Rys.8. Dzielnik podczas prób napięciowych.

Pełna wytrzymałość dzielnika zostanie osiągnięta po umieszczeniu członu wysokonapięciowego w obudowie wypełnionej olejem izolacyjnym. Konieczne będzie również sprawdzenie odpowiedzi dzielnika na wymuszenie impulsem jednostkowym.

Zgodność odpowiedzi dzielnika z wymuszeniem decyduje o dokładności odpowiedzi całego układu pomiarowego [6].

Podsumowanie

Celem laboratoryjnych badań wysokonapięciowych jest sprawdzenie wytrzymałości układów izolacyjnych i materiałów w symulowanych warunkach narażeń napięciowych jakie mogą wystąpić podczas ich eksploatacji. Do najgroźniejszych narażeń w tym względzie należą stromo narastające impulsy napięciowe, których amplituda – często wielokrotnie – przekracza poziom napięcia znamionowego. Proponowana przez normę [3] stromość narostu napięcia nie mniejsza niż 1 kV/ns może okazać się nie wystarczająca, dlatego zaleca się stosowania udarów o stromości 4 kV/ns, które lepiej wykrywają wady technologiczne rdzeni i powierzchni granicznych rdzeń-osłona izolatorów kompozytowych [4,5]. Prawidłowa weryfikacja odporności materiałów i układów izolacyjnych wymaga przeprowadzenia wiarygodnych pomiarów wykonanych sprawdzonymi układami pomiarowymi.

Zagadnienia związane z pomiarami wysokonapięciowymi dotyczą nie tylko badań z dziedziny techniki wysokich napięć ale również kompatybilności elektromagnetycznej, fizyki jądrowej, a także niektórych procesów technologicznych w przemyśle. Wysokie wymagania jakościowe we wszystkich tych dziedzinach

wskazują na zasadnicze znaczenie zgodności wykonywanych pomiarów z obowiązującymi normami.

LITERATURA

- [1] PN-EN 60052:2003, *Pomiar napięcia metodą iskierników znormalizowanych*
- [2] PN-EN 60060-2:2011, *Wysokonapięciowa technika probiercza – Część 2: Układy pomiarowe*
- [3] IEC 62217:2013, *Wnętrzowe i napowietrzne izolatory polimerowe na znamionowe napięcie powyżej 1 000V. Ogólne definicje, metody badań i kryteria oceny wyników*
- [4] Bielecki J., Fleszyński J., Tymań A., *Badanie izolatorów kompozytowych stromo narastającymi udarami napięciowymi, Przegląd elektrotechniczny*, Vol. 5, R.86 (2010), 258-261
- [5] Fleszyński J., Sojda E., Tymań A., Koruba K., *Steep-front impulse voltage tests of composite insulators, International Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2003, Delft, 2003*
- [6] Wodziński J., *Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997*

Autor: dr inż. Krzysztof Wieczorek, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Krzysztof.Wieczorek@pwr.edu.pl.