



Jerzy BIELECKI¹, Janusz FLESZYŃSKI², Jacek WAŃKOWICZ¹

Instytut Energetyki, Warszawa (1), Politechnika Wroclawska (2)

Wpływ obciążeń cyklicznych na integralność konstrukcji kompozytowych izolatorów liniowych – wstępne prace doświadczalne

Streszczenie. Na podstawie dotychczas wykonanych badań stwierdzono, że obciążenia cykliczne mają istotny wpływ na długotrwałą wytrzymałość mechaniczną izolatorów kompozytowych. W celu pełniejszej oceny wpływu takich obciążeń na wytrzymałość izolatora, jako elektromechanicznego układu izolacyjnego, za uzasadnione uznano sprawdzenie ich wytrzymałości elektrycznej po długotrwałej próbie obciążeniem cyklicznym. W przypadku dodatniego wyniku próby mechanicznej, izolatory dodatkowo poddawano próbie udarem napięciowym o stromym czole.

Abstract. (Construction integrity of composite insulators subjected to cyclic loads – preliminary tests). Results of investigations of composite insulators show that their long-lasting mechanical strength can be significantly influenced by application of cyclic loads to testing the insulators. In order to more detailed evaluation of influence of the cyclic loads on construction integrity of the insulators it is justified to subject them under surge voltage tests follow the mechanical ones. To this purpose the insulators being positively tested with cyclic loads are subjected to steep-front impulse voltages of positive polarity.

Słowa kluczowe: izolatory elektroenergetyczne, izolatory kompozytowe, wytrzymałość zmęczeniowa, wytrzymałość elektryczna
Key words: power insulators, composite insulators, mechanical tests, fatigue strength, electrical strength

Wstęp

Kompozytowe izolatory liniowe stosowane w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokiego napięcia są, oprócz obciążeń statycznych, narażone na różnego rodzaju obciążenia zmienne (głównie cykliczne), pochodzące od zmieniających się warunków atmosferycznych. Problem odporności izolatorów na tego typu obciążenia zaczyna być coraz bardziej poważny, zważywszy pojawiające się coraz częściej gwałtowne burze, huragany czy sztormy o niespotykanej dotychczas sile. Zjawiska te powodują znaczne uszkodzenia linii przesyłowych, w tym również izolatorów. Jako przykłady można wymienić burzę i gołoledź w Kanadzie (styczeń 1998), huragan we Francji (grudzień 1999) burzę i sztorm w Szwecji (styczeń 2005) [1]. W budowie linii zaczyna pojawiać się konieczność wprowadzania konstrukcji znacznie odporniejszych. Również od izolatorów oczekuje się znacznie większej niż dotychczas trwałości i niezawodności. Ich dobór do konkretnych przewidywanych warunków eksploatacji powinien się odbywać, na przykład, na podstawie znajomości dotychczas jeszcze nieznormalizowanych właściwości m.in. wytrzymałości przy obciążeniu cyklicznym.

Od kilku lat w Instytucie Energetyki prowadzi się prace badawcze nad wytrzymałością długopniowych izolatorów liniowych przy obciążeniu cyklicznym. W pierwszej fazie badań próbom poddawano izolatory ceramiczne (jako układ konstrukcyjny) [2] i porcelanę elektrotechniczną (jako materiał konstrukcyjny) [3]. W 2003 r. rozpoczęto badania nad wytrzymałością kompozytowych izolatorów liniowych przy cyklicznie zmieniającym się obciążeniu. Uzyskane wyniki tych badań wskazują na istotny wpływ obciążenia cyklicznego na wytrzymałość izolatorów kompozytowych, przy jednoczesnych znacznych różnicach w ich wytrzymałości w zależności od technologii wytwarzania (czyli w zależności od producenta) [4].

Rezultatem przeprowadzonych badań było opracowanie koncepcji modelu wytrzymałości izolatorów kompozytowych przy obciążeniu cyklicznym w postaci funkcji potęgowej. Model ten, a w zasadzie charakterystykę zmęczeniową, zweryfikowano w zakresie (co najmniej) od 100 % do 33 % SML, który to zakres jest praktycznie przy doborze izolatorów najbardziej przydatny [5].

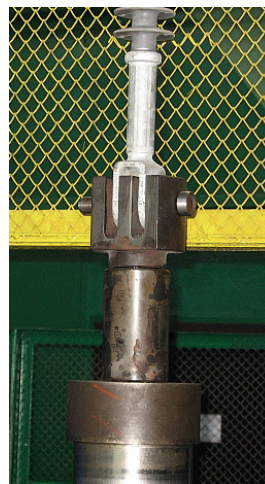
W celu pełniejszej, a zarazem wiarygodnej, oceny wpływu obciążeń cyklicznych na wytrzymałość układu

elektroizolacyjnego, jakim jest izolator, za uzasadnioną uznano potrzebę sprawdzenia elektrycznej wytrzymałości kompozytowych izolatorów liniowych, poddanych uprzednio długotrwałemu (co najmniej 1 mln cykli) obciążeniu cyklicznemu.

Przedmiot badań

Do prób przeznaczono kompozytowe wiszące izolatory liniowe lub modele takich izolatorów w postaci okutego rdzenia z osłoną technologiczną. Istnienie osłony było warunkiem koniecznym, gdyż w przeciwnym wypadku nie byłoby możliwości przeprowadzenia próby wytrzymałości elektrycznej.

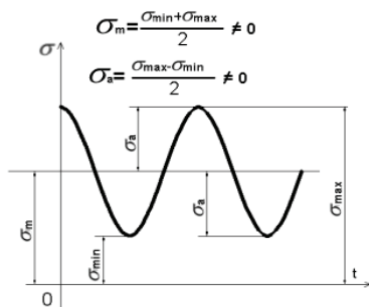
Na rysunku 1 pokazano widok dolnej części modelu izolatora kompozytowego do linii 400 kV zamontowanego na stanowisku badawczym do prób zmęczeniowych.



Rys. 1. Dolna część modelu izolatora kompozytowego do linii 400 kV zamontowanego do prób mechanicznych

Próby wytrzymałości mechanicznej

W zmęczeniowych badaniach izolatorów (czyli w próbach wytrzymałości przy obciążeniu cyklicznym), jako odwzorowanie zmiennego obciążenia mechanicznego, na jakie może być narażony izolator podczas eksploatacji, przyjęto złożenie obciążeń rozciągających: stałego i zmiennego harmonicznego. Przebieg występujących wówczas w izolatorze naprężeń zmiennych pochodzących od takiego obciążenia pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg zastosowanego zmiennego naprężenia probierczego o charakterze jednostronnym, niesymetrycznym i dodatnim (Przyjęte na rysunku 2 oznaczenia: σ_m – naprężenie średnie (składowa stała); σ_{max} – naprężenie maksymalne; σ_{min} – naprężenie minimalne; σ_a – amplituda zmian naprężenia)

Już wyniki pierwszych prób wytrzymałości izolatorów przy obciążeniu cyklicznym uwidoczniły duży wpływ tego rodzaju obciążeń na ich wytrzymałość mechaniczną. Poziom obciążenia odnoszono zazwyczaj do znamionowego obciążenia mechanicznego (*SML*) badanego typu izolatorów. Dla maksymalnych obciążeń rzędu 80 % ÷ 100 % *SML*, zniszczenie izolatora następowało dość szybko (tzn. po niewielkiej liczbie cykli), niezależnie od wartości amplitudy, którą najczęściej przyjmowano na poziomie 1/4 lub 1/8 obciążenia średniego. W miarę uzyskiwania wyników kolejnych prób przeprowadzanych na różnych typach izolatorów zauważono, że zawsze wraz ze zmniejszaniem obciążenia maksymalnego, liczba cykli, przy której występowało zniszczenie izolatora, była coraz większa [7].

Dla każdego badanego typu izolatora wyznaczano funkcję potęgową aproksymującą uzyskane punkty (odcięta – liczba cykli, rzędna – obciążenie maksymalne), która była jednocześnie jego charakterystyką zmęczeniową – przykład takiej charakterystyki pokazano na rysunku 3. Jest rzeczą oczywistą, że nachylenie charakterystyki do osi 0-x odgrywa tu kluczową rolę – im mniejszy umowny kąt nachylenia charakterystyki, tym większa odporność izolatora na obciążenia cykliczne.

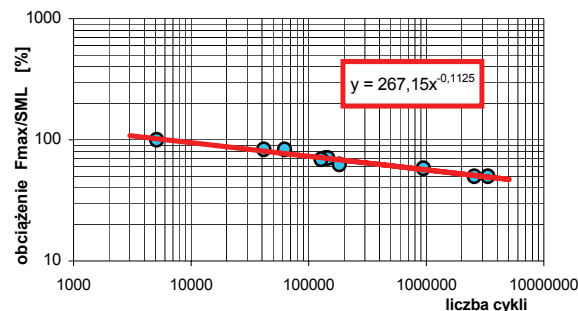
Dla izolatorów dobrej jakości umowny kąt nachylenia charakterystyki zmęczeniowej do osi odciętych był niewielki – rzędu kilku stopni. Zniszczenie takich izolatorów nawet po kilku milionach cykli występowało na stosunkowo wysokim poziomie, nawet około dwa razy większym niż poziom obliczeniowy (poziom obliczeniowy wynosi 1/3 *SML*). Zdarzały się jednak izolatory, dla których ten umowny kąt nachylenia charakterystyki był o rząd większy. Takich izolatorów nie zaleca się stosować na terenach o przewidywanym dużym narażeniu obciążeniami zmiennymi.

Ze względów praktycznych największe znaczenie ma ta część charakterystyki zmęczeniowej izolatorów kompozytowych, dla której liczba cykli jest rzędu milionów. To wtedy dopiero można mówić o wytrzymałości długotrwałej i wnioskować o trwałości, czy też niezawodności izolatorów. Jednocześnie ważne jest, na jakim poziomie obciążenia dochodzi do zniszczenia izolatora przy takiej liczbie cykli.

W projekcie nowelizacji normy IEC 61109 [6] przyjęto, że czas występowania w eksploatacji nadzwyczajnych obciążeń (założono, że są one rzędu 60 % *SML*) może wynosić łącznie około 1 tygodnia w okresie 50 lat (odpowiada to 168 godzinom). Odnosząc ten czas do obciążeń cyklicznych o częstotliwości 7 Hz (taką częstotliwość przyjmowano w badaniach) odpowiada to około 4 mln cykli.

Dla niezawodności przesyłu ważne jest jednak, aby – niezależnie od rodzaju i czasu trwania narażeń – mechaniczna wytrzymałość izolatora nie obniżyła się

poniżej wartości obliczeniowej tj. 1/3 *SML*, a właściwości elektryczne zapewniały przyjęty poziom izolacji.



Rys. 3. Charakterystyka zmęczeniowa w skali podwójnie logarytmicznej jednego z badanych typów izolatorów kompozytowych do linii 110 kV, wyznaczona przy amplitudzie równej 1/4 obciążenia średniego na podstawie wyników prób 10 izolatorów

Koncepcja sprawdzania wytrzymałości elektrycznej

Próby wytrzymałości elektrycznej izolatorów kompozytowych udarem napięciowym o stromym czole przewidziano w normie PN-IEC 61109:1999 [8] w ramach badań konstruktorskich. Zgodnie z p. 5.1.4.2 tej normy, przeznaczone do badań izolatory „należy wyposażyć w elektrody z ostrymi krawędziami (w postaci zacisków, wykonanych np. z taśmy miedzianej o szerokości 20 mm i grubości poniżej 1 mm). Te elektrody należy ściśle dopasować wokół osłony, pomiędzy kłoszami, w takim ułożeniu, aby utworzyć odcinki około 500 mm albo mniejsze. W przypadku izolatorów o odstępie izolacyjnym mniejszym lub równym 500 mm należy przykładac napięcie do oryginalnych okuc metalowych. Napięcie udarowe o prędkości narastania co najmniej 1 kV/ns należy przykładac odpowiednio między dwie sąsiednie elektrody albo pomiędzy okucie metalowe a sąsiednią elektrodę. (...) Jakikolwiek przebicie jest niedopuszczalne.” Zachowując podaną w powyższej normie ogólną zasadę wykonywania tych prób, uznano za celowe zastosowanie dwóch przebiegów napięcia udarowego: o prędkości narastania 1 kV/ns (podana w normie wartość minimalna) i 4 kV/ns (ostrzejsze warunki, również zgodne z normą).

Na poszczególne odcinki izolatorów podawano:

- 10 udarów ukośnych o prędkości narastania napięcia 1 kV/ns, biegunowości dodatniej
- 10 udarów ukośnych o prędkości narastania napięcia 1 kV/ns, biegunowości ujemnej
- 10 udarów ukośnych o prędkości narastania napięcia 4 kV/ns, biegunowości dodatniej
- 10 udarów ukośnych o prędkości narastania napięcia 4 kV/ns, biegunowości ujemnej.

Takim próbom poddano kilka izolatorów, które przeszły z wynikiem dodatnim próby zmęczeniowe przez co najmniej 2 mln cykli:

- 1) izolator do linii 110 kV, *SML* = 120 kN, po próbie zmęczeniowej $F = (48 \pm 12)$ kN, 2,00 mln cykli – wynik próby napięciowej dodatni;
- 2) izolator do linii 110 kV, *SML* = 120 kN, po próbie zmęczeniowej $F = (40 \pm 10)$ kN, 2,03 mln cykli – wynik próby napięciowej ujemny (patrz rysunek 4);
- 3) izolator do linii 110 kV, *SML* = 120 kN, po próbie zmęczeniowej $F = (62,5 \pm 7,5)$ kN, 2,00 mln cykli – wynik próby napięciowej dodatni (po próbie napięciowej izolator wytrzymał dodatkowo na tym samym poziomie obciążenia jeszcze 0,45 mln cykli i uległ uszkodzeniu);
- 4) izolator do linii 220 kV, *SML* = 120 kN, po próbie zmęczeniowej $F = (32 \pm 8)$ kN, 2,00 mln cykli – wynik próby napięciowej dodatni;

- 5) izolator do linii 220 kV, $SML = 225$ kN, po próbie zmęczeniowej $F = (86 \pm 19)$ kN, 2,68 mln cykli – wynik próby napięciowej dodatni (po próbie napięciowej izolator wytrzymał dodatkowo na tym samym poziomie obciążenia jeszcze 2,28 mln cykli bez uszkodzenia);
- 6) izolator do linii 220 kV, $SML = 225$ kN, po próbie zmęczeniowej $F = (125 \pm 21)$ kN, 2,94 mln cykli – wynik próby napięciowej dodatni (po próbie napięciowej izolator wytrzymał dodatkowo na tym samym poziomie obciążenia jeszcze 1,08 mln cykli i uległ uszkodzeniu);
- 7) model izolatora do linii 400 kV, $SML = 210$ kN, po próbie zmęczeniowej $F = (160 \pm 20)$ kN, 2,00 mln cykli – wynik próby napięciowej dodatni.

Z siedmiu badanych izolatorów tylko jeden został przebit w próbie napięciem udarowym o stromym zole. Izolator ten był podzielony na 5 odcinków, spośród których 3 uległy przebiciu – 2 w próbach udarami o prędkości narastania 1 kV/ns, a 1 w próbach udarami o prędkości narastania 4 kV/ns. Przekrój tego izolatora w pobliżu miejsca przebicia pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Izolator z pozycji 2), przebit podczas prób stromym udarem napięciowym

Interesujący jest także wynik izolatora z poz. 3). Poziom maksymalnego obciążenia, na którym izolator ten wytrzymał bez uszkodzenia 2 mln cykli wynosił 58,3 % SML . Następnie izolator przeszedł z wynikiem dodatnim próby stromym udarem napięciowym. Można powiedzieć, że do tego momentu zachowywał pełną integralność elektryczną i mechaniczną. Dopiero dodatkowe 0,45 mln cykli spowodowało jego uszkodzenie. Nie jest to duża liczba cykli, jak na badania zmęczeniowe na tym poziomie. Zważywszy jednak wynik izolatora z poz. 2) i z poz. 6), trudno jeszcze sformułować tu jednoznaczną tezę. Są konieczne dalsze badania.

Podsumowanie

Opracowane dotychczas dokumenty normalizacyjne dotyczące badań izolatorów przewidują sprawdzanie ich wytrzymałości mechanicznej jedynie przy obciążeniach statycznych. Wpływ narażeń zmiennych na wytrzymałość izolatorów jest zagadnieniem stosunkowo nowym, jednak coraz częściej pojawiają się postulaty i zalecenia, aby sprawdzać odporność izolatorów także przy tego typu narażeniach. W najnowszej normie dotyczącej budowy linii napowietrznych (PN-EN 50341-1:2005) zalecono poddawanie izolatorów próbom zmęczeniowym, jeżeli przewidywane warunki eksploatacji linii mogą wywoływać tego typu obciążenia. Nie wskazano jednak metody prób, pozostawiając ją do uzgodnienia. Uważamy, że zaproponowany przez Instytut Energetyki model mechanicznej wytrzymałości wiszących kompozytowych izolatorów liniowych przy obciążeniach cyklicznych może znaleźć tu praktyczne zastosowanie.

Analizując i oceniając wpływ obciążeń cyklicznych na trwałość (długotrwałą wytrzymałość) izolatorów kompozytowych należy pamiętać, że ich konstrukcja i związane z tym właściwości różnią się zasadniczo od klasycznych izolatorów ceramicznych. Oprócz zasadniczo odmiennej części izolacyjnej, w izolatorach kompozytowych występuje inne rozwiązanie węzła montażowego (połączenie części izolacyjnej z okuciem), które w znacznym stopniu (nie wykluczone, że przede wszystkim) decyduje o wytrzymałości izolatora kompozytowego. W przypadku izolatorów kompozytowych chodzi przede wszystkim o to, aby w wyniku długotrwałych obciążeń cyklicznych izolator nie stracił szczelności, a cała konstrukcja izolatora zachowała integralność elektryczną i mechaniczną.

Wyniki wstępnych prac doświadczalnych nie dają jeszcze jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy utrata integralności elektryczno-mechanicznej izolatora kompozytowego następuje w momencie zniszczenia, czy też obniżenie wytrzymałości elektrycznej (spowodowane głównie utratą szczelności) może wystąpić wcześniej, niż uszkodzenie mechaniczne.

W programie dalszych badań przewidziano co najmniej dwustopniowe (naprzemienne) poddawanie izolatorów obciążeniom cyklicznym i stromym udarem napięciowym. Mamy nadzieję, że uzyskane wyniki pozwolą na sformułowanie hipotezy wytrzymałości (zarówno elektrycznej jak i mechanicznej) izolatorów przy obciążeniu cyklicznym oraz umożliwią podanie praktycznych zasad doboru izolatorów do tego typu warunków pod kątem ich oczekiwanej trwałości i niezawodności przesyłu.

LITERATURA

- [1] Pigni A., Bad Things Happen to Transmission Lines & Insulators. *INMR Quarterly Review*, Quarter Four - 2006, Vol. 14 – No. 4, 20
- [2] Bielecki J., Ocena wytrzymałości izolatorów ceramicznych przy obciążeniach cyklicznych. *Elektroenergetyka – technika, ekonomia, organizacja*, nr 2'03. Wyd. PSE S.A. 2003, 41-48
- [3] Bielecki J., Wańkowicz J., Modele długotrwałej wytrzymałości izolatorów ceramicznych i kompozytowych przy obciążeniach cyklicznych, *VIII Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe IW-2006*, Poznań – Będlewo, maj 2006, *Przegląd Elektrotechniczny*, Zeszyt specjalny nr 1/2006, str. 25-27
- [4] Wańkowicz J., Bielecki J., Strużewska E., Damage limit of composite long rod insulators subjected to cyclic loads, *Sesja CIGRE, Paryż – wrzesień 2006 r.*, Materiały Konferencyjne – referat nr B2-308
- [5] PN-EN 50341-1:2005, Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV Część 1. Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne
- [6] Bielecki J., Strużewska E., Wańkowicz J., Weryfikacja modelu wytrzymałości długotrwałej kompozytowych izolatorów liniowych. *VIII Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna – NIWE'2007*, Szklarska Poręba – Miechowice, *Energetyka*, Zeszyt specjalny nr 1/2007.
- [7] 35B/258/CDV, Composite suspension and tension insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria, *dok. IEC z 2006-06-09*
- [8] PN-IEC 61109:1999, Izolatory kompozytowe do linii napowietrznych prądu przemiennego o znamionowym napięciu powyżej 1000 V – Definicje, metody badań i kryteria odbioru

Autorzy: mgr inż. Jerzy Bielecki, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: jerzy.bielecki@ien.com.pl,
 prof. dr hab. inż. Janusz Fleszyński, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, janusz.fleszynski@pwr.wroc.pl,
 dr hab. inż. Jacek Wańkowicz, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: jacek.wankowicz@ien.com.pl