

Aktualna procedura badań układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV

Streszczenie. W artykule przedstawiono pełną procedurę postępowania w badaniach układów izolacyjnych konkretnej linii napowietrznej 400 kV wraz z analizą i oceną uzyskanych wyników tych badań.

Abstract. The article contains the full procedure to be followed when testing the insulation system of a particular 400 kV overhead line along with the analysis and evaluation of the obtained test results. (**Actual procedure tests insulation systems overhead line 400 kV**).

Słowa kluczowe: Badania wysokonapięciowe i odporności łukowej, pomiary zakłóceń radioelektrycznych, układy izolacyjne
Keywords: Tests high voltage and power arc, measurements RIV, insulator strings

Wstęp

Prowadzona w ostatnich latach intensywna rozbudowa połączeń sieci energetycznych za pomocą linii napowietrznych 400 kV skłoniła, w oparciu o wieloletnie doświadczenie Instytutu Energetyki, o wypracowanie szczegółowej procedury postępowania w zakresie badań ich układów izolacyjnych. Celem tej procedury jest, oprócz spełnienia aktualnie właściwych wymagań dla tych układów izolacyjnych, ich optymalny dobór dla konkretnej linii napowietrznej.

Zaproponowana procedura postępowania dotyczy:

- doboru optymalnego programu badań tzn. takiego, aby przy badaniach minimalnej liczby łańcuchów izolatorów i ograniczonym zakresie tych badań, uzyskać dane o właściwościach wszystkich występujących w danej linii napowietrznej łańcuchów izolatorów;
- właściwego przygotowania układów izolacyjnych do badań i ich zakresu;
- analizy i oceny uzyskanych wyników badań dla zapewnienia optymalnych wyników eksploatacji badanych układów izolacyjnych w wybranej linii napowietrznej 400 kV.

Wszystkie ww. zagadnienia zostaną szczegółowo przedstawione w dalszej części artykułu z ich pełnym uzasadnieniem merytorycznym.

Omówione w niniejszym artykule badania układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV dotyczą zgodnie z wymaganiami Standardowych Specyfikacji Technicznych PSE S.A. [1]:

- badań napięciowych, w tym pomiarów zakłóceń radioelektrycznych;
- badań odporności łukowej.

Zastosowane w badanych łańcuchach izolatory ceramiczne długopniowe lub kołpakowe szklane spełniają wymagania standardu PN-EN 60383-1:2005 [2]. Natomiast zainstalowany osprzęt ochronny odpowiada wymaganiom standardu PN-EN 61284:2002 [3].

Optymalny program badań łańcuchów

Prawidłowość spełnienia wymagań elektrycznych dotyczy wszystkich przewidywanych do zastosowania w danej linii napowietrznej 400 kV łańcuchów izolatorów. Jednak z wieloletnich doświadczeń Instytutu Energetyki wynika, że jeśli w linii będą zainstalowane łańcuchy ŁP i ŁP2 złożone z tych samych izolatorów i ich liczby oraz przy takich samych odstępach tego samego osprzętu ochronnego to pełne badania napięciowe powinny dotyczyć łańcucha ŁP2, który z reguły charakteryzuje się niższymi wartościami wytrzymałości elektrycznej. Natomiast łańcuch ŁP powinien podlegać tylko pomiarom zakłóceń radioelektrycznych.

W przypadku łańcuchów ŁPV czy ŁPV2/1 badania napięciowe przy takim samym rozwiązaniu tych łańcuchów powinny obejmować łańcuchy o większym kącie rozwarcia, który z reguły prowadzi do mniejszych odstępów izolacyjnych między elementami osprzętu założonego na wiązce przewodów roboczych a konstrukcją poprzecznika słupa.

Natomiast w przypadku podstawowego wg [1] w linii napowietrznej 400 kV łańcucha ŁO2 badania napięciowe powinny dotyczyć tego łańcucha w układzie słupa mocnego z największym kątem załomu. Wówczas bowiem mostek łączący obustronne łańcuchy ŁO2 najbardziej zbliża się do konstrukcji trzonu słupa co wpływa zarówno na wytrzymałość łańcucha, a przede wszystkim na poziom zakłóceń radioelektrycznych. Ostatnio jednak, aby zoptymalizować trasę linii napowietrznych 400 kV wprowadza się mocowanie mostka za pomocą izolatora wsporczego lub łańcucha ŁPAm wieszanych na końcu poprzecznika z łańcuchami ŁO2. Wówczas badaniom napięciowym podlegają dowolnie wybrane łańcuchy ŁO2, ale dodatkowo należy poddać badaniom zastosowany izolator wsporczy lub łańcuch ŁPAm.

Program badań zwarciowych wykonywanych wg standardu PN-EN 61467:2012 [4] powinien dotyczyć najprostszego w rozwiązaniu łańcucha, zazwyczaj typu ŁP, gdyż wówczas należy spodziewać się największego oddziaływania łuku zwarciowego na zainstalowane w nim izolatory oraz wykorzystywany w tym łańcuchu osprzęt ochronny.

Optymalny program badań łańcuchów konkretnej linii napowietrznej 400 kV jest zatem ustalony po szczegółowej analizie wszystkich przewidywanych do zastosowania w tej linii łańcuchów izolatorów i ich usytuowań w głowicach wykorzystywanych słupów z uwzględnieniem ww. zaleceń. Nawet jeśli Zleceniodawca badań przedstawi swój program badań może być on weryfikowany, aby dokonać jego optymalizacji.

W przypadku linii napowietrznej 400 kV, gdy zachodzi w niej konieczność stosowania izolatorów w łańcuchach właściwych dla różnych stref narażeń zabrudzeniowych ze względu na jej trasę też wybór optymalnego programu badań dokonuje się po szczegółowej analizie wszystkich przewidywanych do zastosowania łańcuchów z uwzględnieniem ww. zaleceń.

Właściwe przygotowanie układów izolacyjnych do badań i ich zakres

Prowadząc badania napięciowe łańcuchów izolatorowych linii napowietrznych 400 kV konieczne jest pełne odwzorowanie elektryczne ich układów izolacyjnych w

głowicach zastosowanych słupów tych linii. Uzyskiwane wyniki badań tych łańcuchów w istotnym stopniu zależą bowiem od wzajemnego usytuowania badanych łańcuchów izolatorowych i uziemionych konstrukcji słupów. Na rys. 1, 2 i 3 przedstawiono przykładowe rozwiązania układów izolacyjnych słupów linii napowietrznych 400 kV z łańcuchami ŁP2, ŁPV i ŁO2.



Rys. 1. Łańcuch ŁP2 – 400 kV wraz z imitacją głowicy słupa oraz wiązki przewodowej w polu probierczym



Rys. 2. Łańcuch ŁPV – 400 kV wraz z imitacją głowicy słupa oraz wiązki przewodowej w polu probierczym



Rys. 3. Łańcuch ŁO2 – 400 kV wraz z imitacją głowicy słupa oraz wiązki mostka w polu probierczym

W przypadku badań zwarciovych odporności na łuk elektryczny wykonywanych zgodnie z [4] konieczne jest tylko pełne odwzorowanie badanego łańcucha (Rys. 4). Badania napięciowe układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV wg wiedzy i doświadczenia Instytutu Energetyki [5] oraz aktualnych wymagań PSE S.A. [1] uwzględniających aktualne wymagania dokumentów normalizacyjnych powinny obejmować:

- próby napięciem udarowym piorunowym 1,2/50 μ s na sucho;
- próby napięciem udarowym łączeniowym 250/2500 μ s w deszczu;
- pomiary poziomów zakłóceń radioelektrycznych.



Rys. 4. Łańcuch ŁP na stanowisku probierczym

Powyższy zakres badań napięciowych dotyczy układów izolacyjnych złożonych z izolatorów ceramicznych długopniowych. Natomiast w przypadku dosyć częstego obecnie stosowania w układach izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV izolatorów kołpakowych szklanych jest konieczne ponadto badanie rozkładu napięcia wzdłuż łańcuchów tych izolatorów. Jest zasadne, aby na żadnym izolatorze tych łańcuchów nie były przekroczone dopuszczalne wartości napięcia roboczego 50 Hz.

Badania napięciowe wytrzymałości elektrycznej wybranych układów izolacyjnych prowadzi się zgodnie z wymaganiami standardu PN-EN 60060-1:2011 [6]. Przy tym Specyfikacja Techniczna PSE S.A [1] wymaga, aby minimalne napięcia wytrzymywane, sprawdzone 15-toma udarami dla obu biegunowości udarów probierczych wynosiły co najmniej:

- 1.425 kV przy udarach 1,2/50 μ s na sucho;
- 1.050 kV przy udarach 250/2500 μ s w deszczu.

Instytut Energetyki uważa jednak, że dla pełnej oceny właściwego doboru układów izolacyjnych dla konkretnej linii napowietrznej 400 kV jest konieczne wyznaczenie metodą góra-dół wg [6] wytrzymałości przewidywanych do zastosowania układów izolacyjnych. Tak rozszerzone badania pozwalają ponadto ocenić prawidłowość rozwiązań zastosowanego osprzętu ochronnego w tych układach tak, aby wszelkie wyładowania związane z przepięciami rozwijały się między elementami osprzętu, a nie do konstrukcji słupa. Miejsca występowania przeskoków udarowych są bowiem rejestrowane przy wyznaczeniu wytrzymałości udarowej tych układów. Na przykładowych rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono prawidłowe miejsca występowania wyładowań w układach izolacyjnych z łańcuchami ŁP2, ŁPV i ŁO2.

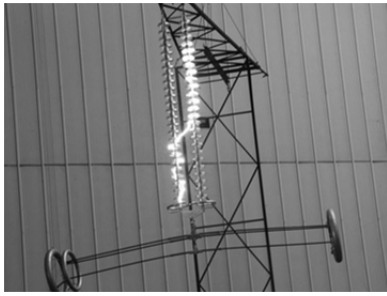
Pomiary poziomów zakłóceń radioelektrycznych wybranych układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV są prowadzone zgodnie z wymaganiami standardów: PN-EN 60437:2007 [7] i CISPR TR-18-2:2010 [8]. Przy tym Specyfikacja PSE S.A [1] wymaga, aby poziom tych

zakłóceń przy wartości napięcia roboczego $1,1 \frac{Um}{\sqrt{3}}$ kV tj.

267 kV nie przekraczał wartości 58 dB (794,3 μ V).

W badaniach prowadzonych w Instytucie Energetyki dla pełnej oceny wytwarzanych przez zastosowane w liniach napowietrznych 400 kV układy izolacyjne zakłóceń radioelektrycznych wyznacza się charakterystykę tych zakłóceń

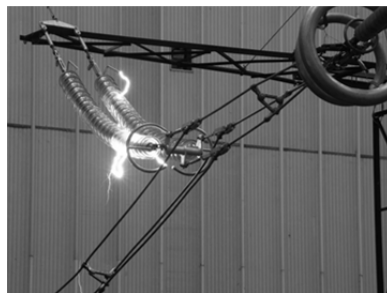
w zakresie $0,3 \div 1,1 \frac{Um}{\sqrt{3}}$ tj. w zakresie 73...267 kV.



Rys. 5. Łańcuch ŁP2 podczas badań wytrzymałości przy napięciu udarowym piorunowym



Rys. 6. Łańcuch ŁPV podczas badań wytrzymałości przy napięciu udarowym piorunowym



Rys. 7. Łańcuch ŁO2 podczas badań wytrzymałości przy napięciu udarowym piorunowym

Przy wyznaczeniu rozkładu napięcia wzdłuż łańcuchów układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV złożonych z izolatorów kołpakowych szklanych stosujemy w Instytucie Energetyki metodą pomiarową z zastosowaniem iskiernika umieszczonego kolejno na każdym izolatorze tych łańcuchów. Wartość napięcia roboczego 50 Hz na poszczególnych izolatorach wyznacza się jako:

$$(1) \quad U_n = U_i \times U_f / U_p$$

gdzie: U_n – wyznaczone napięcie na badanym izolatorze, U_i – napięcie przeskoku na wyskalowanym iskierniku określone podczas jego skalowania, U_f – najwyższe

napięcie fazowe linii napowietrznej 400 kV równe $\frac{U_m}{\sqrt{3}}$, tj.

242,5 kV; U_p – średnia wartość napięcia na całym łańcuchu przy którym nastąpił przeskok na iskierniku z 5-ciu powtarzanych prób.

Wg wymagań Specyfikacji PSE S.A. [1] największa wartość napięcia na pojedynczym izolatorze w układzie izolacyjnym linii napowietrznej 400 kV nie powinna przekraczać 21,0 kV. Dotyczy to z reguły jednego z 3 pierwszych izolatorów kołpakowych od strony przewodów roboczych.

Badania zwarciove odporności łukowej wybranego ze stosowanych w danej linii napowietrznej 400 kV łańcucha izolatorów prowadzi się w celu określenia zmian występująca w badanym łańcuchu co do jego stanu oraz

zakresu ewentualnych uszkodzeń zainstalowanych w tym łańcuchu izolatorów i osprzętu ochronnego. Badania te wykonuje się wg standardu [4] dla 3 serii:

- I seria: $I = 0,2 I_{sys}$ i $t = 0,2 \dots 1$ s;
- II seria: $I = 0,5 I_{sys}$ i $t = 0,2 \dots 1$ s;
- III seria: $I = I_{sys}$, $t = 0,2 \dots 0,5$ s.

Przy czym aktualnie wartość maksymalna prądu zwarcia to $I_{sys} = 40$ kA.

Kryteria oceny badań zwarciove odporności na łuk elektryczny są generalnie sprecyzowane w standardzie [4]. W przypadku łańcucha z izolatorami ceramicznymi długopniowymi:

- niedopuszczalne jest uszkodzenie łańcucha powodujące jego zerwanie;
- dopuszczalne jest nadpalanie kloszy łącznie z ich odłamaniem, zniszczenia szkliwa i nadtopienie powierzchni galwanizowanych oraz nadtopienia elementów osprzętu ochronnego;
- a obciążenie niszczące izolatorów badanego łańcucha powinno być co najmniej równe 70% ich znamionowej wytrzymałości mechanicznej.

Natomiast w przypadku łańcucha złożonego z izolatorów kołpakowych szklanych kryteria te są nieco inne tzn.:

- dopuszczalne są znaczne większe uszkodzenia kloszy poszczególnych izolatorów oczywiście też bez zerwania łańcucha;
- konieczne jest sprawdzenie z wynikiem pozytywnym, że nie nastąpiło przebicie każdego z 3 pierwszych, 3 środkowych i 3 od strony uziemionej konstrukcji oraz pozostałych uszkodzonych izolatorów badanego łańcucha;
- obciążenie niszczące wszystkich już wcześniej wybranych do sprawdzeń izolatorów z badanego łańcucha powinno być co najmniej równe 70% ich znamionowej wytrzymałości mechanicznej.

Analiza i ocena uzyskanych wyników badań

Przeprowadzona po badaniach wybranych dla danej linii napowietrznej 400 kV układów izolacyjnych analiza uzyskanych wyników ma na celu stwierdzenie, że:

- przewidywane do zastosowania w nich łańcuchy izolatorowe spełniają stawiane im uzasadnione wymagania wynikające z aktualnych standardów;
- rzeczywiście uzyskane parametry wytrzymałości elektrycznej tych łańcuchów i ich powiązania z układami izolacyjnymi głowic stosowanych słupów danej linii napowietrznej 400 kV gwarantuje właściwą pewność pracy tej linii w warunkach występowania zakłóceń związanych z zakłóceniami atmosferycznymi i przepięciowymi w sieciach z tymi liniami.

Oczywiste jest, że tylko układy izolacyjne spełniające wymagania Specyfikacji PSE S.A [1] mogą być stosowane w nowobudowanych lub modernizowanych liniach napowietrznych 400 kV. Przy tym wg zaleceń standardu [8] zwraca się uwagę, aby poziom emitowanych przez zastosowane układy izolacyjne zakłóceń radioelektrycznych był możliwie niższy niż dopuszczalne 58 dB. Wówczas linie napowietrzne 400 kV z układami izolacyjnymi o takich poziomach zakłóceń radioelektrycznych będą w znacznie mniejszym stopniu wpływać szkodliwie na środowisko.

Przyjęta w Instytucie Energetyki jako zalecana procedura badań układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV rozszerzająca badania napięciowe udarami piorunowymi 1,2/50 μ s na sucho i udarami łączeniowymi 250/2500 μ s w deszczu o:

- wyznaczenie wytrzymałości badanych układów przy tych udarach;
- określenie miejsc występowania przeskoczków w tych badaniach;

pozwała na określenie pewności pracy tych linii w warunkach zakłóceń piorunowych i łączeniowych.

W przypadku oddziaływań piorunowych uważamy, że wartości wytrzymałości stosowanych układów izolacyjnych w liniach napowietrznych 400 kV powinny być istotnie wyższe od wymaganej wartości 1425 kV [1]. Prowadzone przez kilka lat w Instytucie Energetyki badania występującymi w rzeczywistych warunkach narażeń piorunowych udarami o czasach czoła wydłużonych nawet do kilku μs wykazały zmniejszenie wytrzymałości układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV nawet do 20% w stosunku do wartości tej wytrzymałości przy udarach znormalizowanych 1,2/50 μs , przy czym zmiana wartości czasów do półszczytu stosowanych udarów, nawet istotna, nie wpływało na tę wytrzymałość [9,10,11].

A zatem dobierane do zastosowania w liniach napowietrznych 400 kV układy izolacyjne dla zapewnienia właściwej pewności ich pracy powinny charakteryzować się nie tylko wartością wymaganą ich wytrzymałości przy udarach piorunowych, ale posiadać wartość tej wytrzymałości istotnie, co najmniej o 20%, wyższą. Wówczas w warunkach eksploatacji wystąpi właściwa ich pewność pracy przy narażeniach piorunowych, tzn. liczba zakłóceń piorunowych nie będzie przewyższać ich liczby standardowej dla linii napowietrznych 400 kV.

W przypadku wytrzymałości badanych układów izolacyjnych linii napowietrznej 400 kV przy przebiegach łączeniowych wg uznanych prac Instytutu Energetyki np. [12] wytrzymałość U_{wp} pojedynczego układu wystarczająca, aby przy zastosowanej ochronie przeciwprzebiegowej i liczbie n takich układów w linii nie występowały niepożądane przeskokki przy tych przebiegach powinna spełniać zależność:

$$(2) \quad U_{wp} \geq k_{bt} U_{0T} M_z$$

gdzie: k_{bt} – margines bezpieczeństwa izolacji dla przebiegów łączeniowych, zwykle przyjmowany jako $k_{bt} \geq 1,15$; M_z – współczynnik charakteryzujący niezbędny zapas wytrzymałości izolacji pojedynczego układu izolacyjnego; U_{0T} – poziom ochrony zainstalowanych ograniczników przy przebiegach łączeniowych.

Przy liczbie n równoległych układów izolacyjnych rzędu 250, co odpowiada długości linii napowietrznej 400 kV około 100 km, aby uzyskać wymaganą jej wytrzymałość wartości wytrzymałości jej pojedynczego układu izolacyjnego powinny być większe 1,20...1,25 tej wytrzymałości. Przyjmując zatem wartości poziomu ochrony od przebiegów łączeniowych instalowanych obecnie w polach liniowych stacji 400 kV ograniczników o klasie rozładowania 3 [13] nie przekraczające zazwyczaj 760 kV oraz uwzględniając zalecane wartości $k_{bt} = 1,15$ i tylko $M_z = 1,20$ wytrzymałość pojedynczych układów izolacyjnych takiej długości linii może wynosić tylko 1050 kV zgodnie z wymaganiami [1]. Natomiast dla dłuższych linii napowietrznych np.: rzędu 150 km, gdzie należy spodziewać się liczby przerw izolacyjnych rzędu 350, czemu odpowiada wartość współczynnika $M_z = 1,35$, wartości wytrzymałości jej pojedynczych układów izolacyjnych powinny wynosić co najmniej $U_{wp} \geq 1150$ kV.

Prowadzona w zalecanej przez Instytut Energetyki procedurze badań układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV rejestracja miejsc rozwoju wyładowań ma na celu potwierdzenie właściwości doboru odstępów między elementami osprzętu ochronnego oraz rozwiązań usytuowania badanych łańcuchów w głowicach słupów. Pożądane jest bowiem, aby wszelkie wyładowania zarówno od przebiegów atmosferycznych jak od zakłóceń łączeniowych występowały między elementami zastosowanego osprzętu nie zaś do konstrukcji głowicy

słupa. Bowiem w przypadku rozwoju wyładowań do tych konstrukcji z bardzo prawdopodobnym przejściem wyładowania w zwarcia z pewnością ulegnie uszkodzeniu ta konstrukcja.

Podsumowanie

Przyjęta jako zalecona przez Instytut Energetyki procedura badań układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV pozwala już na wstępie opracować optymalny program badań tych układów. Przeprowadzony wg tej procedury zakres badań właściwości elektrycznych przewidywanych do zastosowania w tych liniach układów izolacyjnych pozwala na pełną ocenę ich własności zgodnie z wymaganiami aktualnych standardów. Jednocześnie poprzez rozszerzenie zakresu badań napięciowych tych układów w zakresie ich wytrzymałości przy przebiegach udarowych 1,2/50 μs i 250/2500 μs oraz rejestracji miejsc rozwoju wyładowań w układach izolacyjnych głowic słupów pozwala oceniać pewność pracy linii napowietrznych 400 kV z tymi układami w eksploatacji. Jest to bardzo istotne w rzeczywistych warunkach eksploatacji, gdyż decyduje o niezawodności zasilania odbiorców.

Autor: prof. nadzw. dr hab. inż. January Lech Mikulski, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: lech.mikulski@ien.com

LITERATURA

- [1] PSE S.A.: Standardowe Specyfikacje Techniczne. Linia napowietrzna 400 kV. Konstancin – Jeziorna, 2014
- [2] PN-EN 60383-1:2005: „Izolatory do linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1 kV. Część1: Ceramiczne i szklane izolatory do sieci prądu przemiennego. Definicje, metody badań i kryteria oceny wyników”
- [3] PN-EN 61284:2002: „Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Wymagania i badania dotyczące osprzętu”
- [4] PN-EN 61467:2012: „Izolatory do linii napowietrznych i łańcuchy izolatorów z osprzętem i bez osprzętu do linii prądu przemiennego o znamionowym napięciu powyżej 1000 V. Badanie łukiem elektrycznym prądu przemiennego”
- [5] Mikulski J.L.: Badania napięciowe układów izolacyjnych nowoprojektowanych linii napowietrznych 110-400 kV. Przegląd Elektrotechniczny nr 5, 2010
- [6] PN-EN 60060-1:2011: „Wysokonapięciowa technika probiercza – Część1: Ogólne definicje i wymagania probiercze”
- [7] PN-EN 60437:2007: „Badania zakłóceń radioelektrycznych izolatorów wysokonapięciowych”
- [8] CISPR TR 18-2:2010 „Radio interference characteristic of overhead lines and high voltage equipment. Part 2. Methods of measurement and procedure for determining limits”
- [9] Mikulski J.L., Mackiewicz M.M.: Wpływ niestandardowych udarów napięciowych piorunowych na wytrzymałość izolacji linii i stacji wysokich napięć. Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, nr 4, 2006
- [10] Mackiewicz M.M., Mikulski J.L.: Wytrzymałość izolacji urządzeń sieci 110-400 kV w warunkach rzeczywistych narażeń piorunowych. Energetyka. Zeszyt tematyczny nr XII, 2007
- [11] Mackiewicz M.M.: Wpływ czasu narastania czoła udaru na wytrzymałość elektryczną rzeczywistych układów linii i stacji wysokiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny nr 10, 2008
- [12] Mikulski J.L.: Współczesne zastosowanie techniki wysokich napięć. Zagadnienia wybrane. Instytut Energetyki, Ośrodek Informacji Naukowej i Technicznej. Warszawa, 2004
- [13] PSE S.A.: Specyfikacje Techniczne: Ograniczniki przebiegów 110 – 400 kV. Konstancin Jeziorna, marzec 2014