

doi:10.15199/48.2022.10.44

Przeskoki iskrowe w przewodach o izolacji wysokonapięciowej stosowanych w ochronie odgromowej

Streszczenie. Przewody o izolacji wysokonapięciowej coraz częściej stosowane są w ochronie odgromowej celem zmniejszenia wymaganego odstępu separacyjnego. W artykule przedstawiono wyniki badań przewodów o izolacji wysokonapięciowej stosowanych do odprowadzania prądu piorunowego dostępnych w Polsce w zakresie deklarowanych odstępów separacyjnych stosownie do wymagań IEC TS 62561-8:2018.

Abstract. Cables with high voltage insulation are increasingly used in lightning protection in order to reduce the required separation distance. The article presents the results of tests on high-voltage cables used to discharge lightning current available in Poland in the scope of the declared separation distances in accordance with the requirements of IEC TS 62561-8: 2018. (*Spark-over in high voltage cables used for lightning protection*).

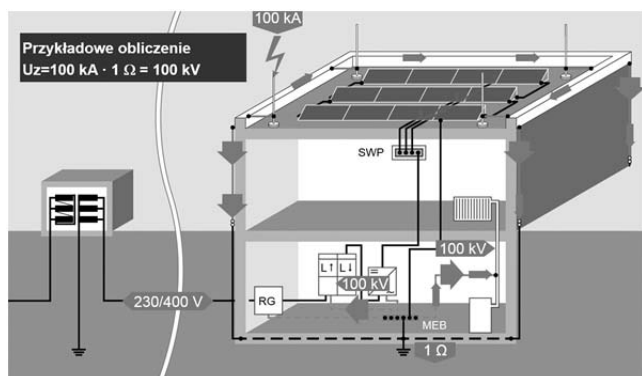
Słowa kluczowe: Wyładowania piorunowe, przewody wysokonapięciowe, odstęp separacyjny, ochrona odgromowa.

Keywords: lightning strikes, high-voltage cables, separation distance, lightning protection.

Wstęp

Głównym zadaniem instalacji odgromowej jest przechwycenie doziemnego wyładowania piorunowego i wysłanie go drogą obraną przez projektanta do systemu uziomowego. Prąd piorunowy płynący przewodami odprowadzającymi do systemu uziomowego powoduje powstanie na nim spadku napięcia. W dużym uproszczeniu jest on proporcjonalny do wartości szczytowej prądu piorunowego i rezystancji uziomu. Zmienność tych parametrów w czasie determinuje wartości napięć panujących na systemie uziomowym podczas odprowadzania prądu piorunowego.

Głównym problemem, z którym mierzymy się chcąc skutecznie zabezpieczyć obiekt przed wyładowaniami piorunowymi jest wysokie napięcie bezpośrednio związane z wyżej opisanym zjawiskiem pojawiającego się wysokiego napięcia na wszystkich elementach będących w sposób bezpośredni jak i pośredni połączonych z systemem uziomowym – rys. 1.



Rys. 1. Wyładowanie piorunowe źródłem wysokiego napięcia panującego na zwodach, przewodach odprowadzających i systemie uziomowym [1]

Chcąc zapewnić skuteczną ochronę odgromową i przeciwprzebieciową należy uwzględnić wyżej opisane zjawisko, które może powodować powstawanie niekontrolowanych przeskoków iskrowych podczas wyładowania piorunowego. Niekontrolowane przeskoky iskrowe zmieniają drogę rozprzysku prądu piorunowego, zwiększając zagrożenie pożarowe i przebieciowe obiektu. W najbardziej niekorzystnym przypadku może się zdarzyć, iż system odgromowy nie spełni przypisanych mu zadań i

spowoduje niekontrolowany rozprzysk prądu piorunowego powodując zniszczenia. W takiej sytuacji system ochrony odgromowej zwiększa zagrożenie zamiast je zmniejszać. Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie obiektu uszkodzonego w wyniku niekontrolowanych przeskoków iskrowych od instalacji odgromowej.

W zależności od rodzaju chronionego obiektu niekontrolowane przeskoky iskrowe mogą być przyczyną pożaru, przebicia poszycia dachowego, niewłaściwej koordynacji energetycznej ograniczników przepięć. W przypadku obiektów z wydzielonymi strefami zagrożonymi wybuchem (tzw. strefy EX) iskrzenie może być przyczyną eksplozji, co powoduje konieczność szczególnego zwrócenia na nie uwagi.



Rys. 2. Obiekt uszkodzony w wyniku nie zachowania wymaganych odstępów separacyjnych i niekontrolowanych przeskoków iskrowych od instalacji odgromowej [1]

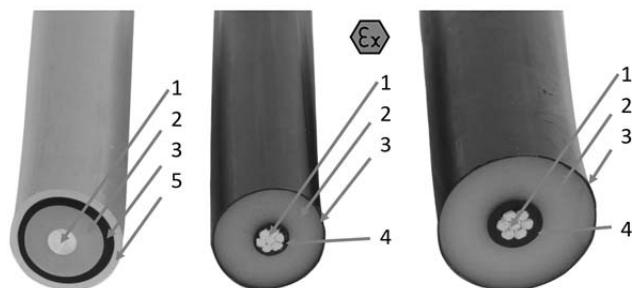
Norma PN-EN 62305-3 [2] zaleca zachowanie odstępu separacyjnego (s) celem eliminacji wyżej opisanych problemów z odprowadzeniem prądu piorunowego do systemu uziomowego. Niezachowany odstęp separacyjny (szczególnie na dachu chronionego obiektu) może spowodować niekontrolowany i trudny do przewidzenia podział prądu piorunowego, co bezpośrednio może skutkować uszkodzeniami nowoczesnych urządzeń technicznych instalowanych na dachu np.: wentylatorów, agregatów od systemów klimatyzacji, różnego rodzaju

anten, połączeń kablowych i innych. Bardzo często odstęp separacyjny nie jest liczony w projektach lub też zapewniany tylko wycinkowo.

Przewody o izolacji wysokonapięciowej

Mając na uwadze możliwość pojawienia się wysokiego napięcia na poprawnie zaprojektowanym i zbudowanym systemie ochrony odgromowej w wielu przypadkach celem zapewnienia wymaganego odstępu separacyjnego stosuje się przewody o izolacji wysokonapięciowej. Bezsporną zaletą przewodów wysokonapięciowych jest możliwość łatwego zmniejszenia wymaganego odstępu separacyjnego poprzez zwykłą wymianę nieizolowanego przewodu odprowadzającego na przewód HVI (ang. high voltage insulation). Izolacja daje również możliwość stosowania tego rozwiązania w strefach zagrożonych wybuchem. Należy zauważyć, iż przekroje poprzeczne przewodów o izolacji wysokonapięciowej stosowanych w ochronie odgromowej są zbieżne z wymaganiami norm z serii PN-EN 62305.

Budowa przewodów HVI odbiega od budowy zwykłych kabli stosowanych w energetyce zawodowej. Pierwszą cechą jest różniącą jest brak żyły powrotnej. Cechą wspólną jest warstwa półprzewodząca – patrz rys. 3.



Rys. 3. Budowa różnych rodzajów przewodów w izolacji wysokonapięciowej stosowanych w ochronie odgromowej (1 – miedziany przewód odprowadzający prąd piorunowy, 2 – izolacja wysokonapięciowa wewnętrznego przewodu miedzianego, 3 – zewnętrzna warstwa półprzewodząca zapobiegająca wylądowaniu ślizgowym wzdłuż powierzchni, 4 – wewnętrzna warstwa półprzewodząca, 5- zewnętrzna powłoka izolacyjna [1])

Najważniejszym elementem przewodów HVI oraz kabli WN są nieliniowe materiały sterujące rozkładem pola elektrycznego wzdłuż oraz w okolicach głowicy kablowej. Odpowiednia grubość i rozmieszczenie w osi wzdłużnej i poprzecznej umożliwia uzyskanie wymaganych parametrów, które pośrednio określają ich zastosowanie. Warstwy sterujące (najczęściej oznaczane jako półprzewodzące) charakteryzują się nieliniową impedancją i wykonywane są z materiałów o podobnych właściwościach co warystor [4].

Przewody HVI i kable elektroenergetyczne różnią się również w zakresie deklarowanych parametrów znamionowych, które wynikają z odmiennego zakresu przywołanych przedmiotowych norm, a co za tym idzie zakresu prowadzonych badań.

Badania przewodów HVI

Głównym parametrem, który trzeba brać pod uwagę przy doborze przewodu o izolacji wysokonapięciowej stosowanego w ochronie odgromowej jest zapewniany równoważny odstęp separacyjny w powietrzu lub w materiale stałym. Wszystkie przewody powinny spełniać wymagania opisane w IEC TS 62561-8:2018 [5].

Postępując zgodnie z IEC TS 62561-8:2018 przeprowadzono badania ośmiu dostępnych w Polsce

przewodów o izolacji wysokonapięciowej, które można zastosować w ochronie odgromowej – patrz rys. 4. Badania przeprowadzono z zachowaniem anonimizacji producenta.



Rys. 4. Przewody w izolacji wysokonapięciowej poddane badaniom

W pierwszej kolejności przewody odprowadzające prąd piorunowy przebadano pod kątem wytrzymałości na prąd piorunowy I_{imp} o wartości 100 kA zgodnie z zapisami przywołanej normy PN-EN 62561-1 [9] – rys. 5. W zakresie wymaganych badań wchodzi również test odporności na korozję (pkt. 5.5.5.1 IEC TS 62561-8) i na promieniowanie ultrafioletowe (pkt. 5.5.5.2 IEC TS 62561-8) oraz testy wytrzymałości mechanicznej (pkt. 5.5.6 IEC TS 62561-8) [5] – te próby pominięto ze względu na brak możliwości laboratoryjnych.



Rys. 5. Przewody w izolacji wysokonapięciowej podczas prób na zgodność z PN-EN 62561-1

W wyniku przeprowadzonych prób nie stwierdzono żadnych odchyień od wymagań normy PN-EN 62561-1 w zakresie odporności na prąd I_{imp} . Zauważono iskrzenie na złączach krzyżowych łączących próbki z zaciskami wyjściowymi generatora prądu piorunowego.

W drugim etapie prac przeprowadzono badania równoważnych odstępów separacyjnych s_e (pkt. 5.5.7.2 IEC TS 62561-8). Typowe wartości odstępów separacyjnych zapewnianych przez przewody HVI powinny wynosić 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm lub więcej – stosownie do potrzeby dla danego obiektu poddawanego ochronie zgodnie z PN-EN 62305-3.

Do testowania równoważnego odstępu separacyjnego zastosowano wysokonapięciowy generator napięć udarowych pracujący w układzie Marx'a oraz dedykowany układ porównawczy – rys. 6, 7. Układ porównawczy wykorzystuje dedykowany iskiernik utworzony przez dwa skrzyżowane pręty nad przewodzącą płaszczyznę uziemienia o wymiarach 2x2 m. Średnica prętów tworzących iskiernik wynosiła $(8 \pm 0,5)$ mm i miała długość 2 m stosownie do zapisów IEC TS 62561-8:2018. Odstęp porównawczy s_c powinien odpowiadać badanemu równoważnemu odstępowi separacyjnemu z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego C_{dc_st} zależnego od szybkości narastania udaru na wyjściu generatora i czasu do przeskoku (typowo $C_{dc_st}=1,2$ dla udaru 1,2/50 μs lub szybszego) [5].

$$(1) \quad s_c = \frac{s_e}{c_{dc,st}} \quad [5]$$

gdzie: s_c – odstęp porównawczy; s_e – równoważny odstęp separacyjny; $c_{dc,st}$ – współczynnik korekcyjny.

Najważniejszym parametrem podczas badań przewodów HVI jest wartość szczytowa napięcia (U_t), od której zaczyna się przeprowadzać próby. Wyznacza się ją z następującej zależności:

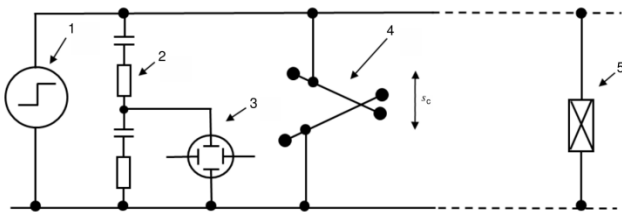
$$(2) \quad U_t = s_e \times 10 \text{ kV/cm} \quad [5]$$

gdzie: s_e – równoważny odstęp separacyjny; U_t – wartość szczytowa napięcia, od którego zaczyna się przeprowadzać próby.

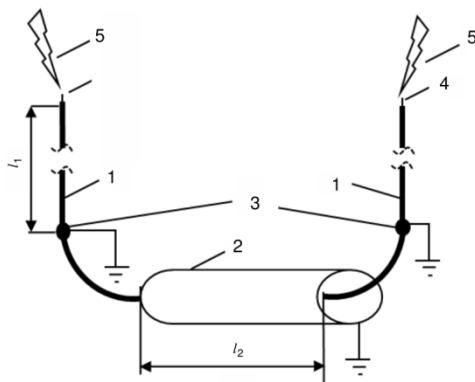
Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Minimalne napięcie testów wg IEC TS 62561-8 przewodu o izolacji wysokonapięciowej wykorzystywanego w ochronie odgromowej

Równoważny odstęp separacyjny przewodu o izolacji wysokonapięciowej wykorzystywanego w ochronie odgromowej s_e	Minimalne napięcie testów wg IEC TS 62561-8
[cm]	[kV]
25	250
50	500
75	750
100	1000



Rys. 6. Schemat układu do badania wytrzymałości przewodów o izolacji wysokonapięciowej wykorzystywanych w ochronie odgromowej, gdzie: 1 – wysokonapięciowy generator udarów, 2 – wysokonapięciowy dzielnik napięcia, 3 – oscyloskop, 4 – układ porównawczy, 5- przewód poddawany testom [5]

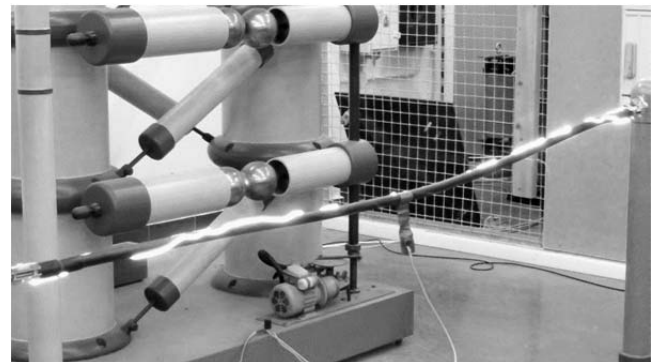


Rys. 7. Sposób podłączenia badanego przewodu do układu pobierczego, gdzie: 1 – badany przewód HVI, 2 – metalowa rura o średnicy dwa razy większej niż średnica badanego przewodu i długości 2 m, 3 – wyprowadzenia uziemiające stosownie do instrukcji producenta, 4 – wewnętrzna żyła badanego przewodu HVI, 5 – podłączenia do generatora wysokiego napięcia, l_1 – dodatkowy odcinek przewodu HVI stosownie do instrukcji producenta, l_2 – długość metalowej rury oznaczonej cyfrą 2 na rysunku 9 [5]

Wyznaczone napięcie próby należy zwiększać, aż do momentu gdy czas do przeskoku T_c osiągnie wartość $1,0 \mu s$

< $T_c < 1,4 \mu s$ [5]. Jeśli nie uda się uzyskać wymaganego czasu T_c należy zwiększyć szybkość narastania napięcia poprzez wymianę rezystorów w generatorze Marx'a. Po ustawieniu wymaganego napięcia próby podłącza się badany przewód do układu porównawczego i przeprowadza trzy próby rejestrując za każdym razem kształt napięcia na oscyloskopie [5].

Aby móc uznać, iż przewód HVI spełnia wymagania IEC TS 62561-8 podczas testów widoczne przeskoki iskrowe mogą występować tylko na iskierniku porównawczym dla $1,0 \mu s < T_c < 1,4 \mu s$. Jeśli podczas prób czas T_c nie mieści się w założonych granicach należy wartość napięcia próby zwiększać o 5 %, aż do uzyskania wymaganego czasu do przeskoku T_c . Miejsce występowania przeskoku należy zidentyfikować za pomocą kamery nagrywającej testy i zarejestrowanego kształtu napięcia na oscyloskopie – patrz rys. 8 [5].



Rys. 8. Zdjęcie poklatkowe wykonane podczas badań przewodów o izolacji wysokonapięciowej

W wyniku przeprowadzonych prób stwierdzono, iż tylko dwa z ośmiu przebadanych przewodów charakteryzowało się równoznacznym odstępem separacyjnym większym niż 25 cm. W sześciu przypadkach obserwowano zjawiska wyładowań ślizgowych po powierzchni przewodów dla napięć od 100 do 145 kV, co umożliwiało deklarację równoważnego odstępu separacyjnego wynoszącego od 10 do 14,5 cm – czyli dwukrotnie mniej niż minimalna opisana w IEC TS 62561-8 wartość wynosząca 25 cm.

Analiza zapisów norm

Kable energetyczne wysokich napięć są produkowane w oparciu o wymagania norm IEC 60502-1:2014, IEC 60840:2011, IEC 62067:2011 [10,11,12]. W zakresie badań wytrzymałości na udary napięciowe powodowane wyładowaniami piorunowymi kable bada się napięciami od 250 kV do 1550 kV. Warto odnotowania jest, iż w normach IEC 60502-1:2014 [10], IEC 60840:2011 [11] i IEC 62067:2011 [12] nie wspomina się o równoważnym odstępem separacyjnym. Stąd też, bezpośrednio dopuszczanie kabli elektroenergetycznych do stosowania w ochronie odgromowej jest nie zgodne z IEC 60502-1:2014, IEC 60840:2011 i IEC 62067:2011.

Największą wadą przewodów HVI jest ich wyższa cena w porównaniu do zwykłego drutu odgromowego. Wyższa cena w sposób naturalny doprowadziła wśród inwestorów do poszukiwania tańszych zamienników. Często spotykamy się z „magiczną” zamianą kabli elektroenergetycznych średniego napięcia w przewody o izolacji wysokonapięciowej przeznaczone do ochrony odgromowej. Jest to spowodowane błędną interpretacją zapisów normy PN-EN 62305-3:2011 [2]. Norma PN-EN 62305-3 w punkcie 8.1 wymienia środki ochrony przed napięciami dotykowymi i wskazuje, iż można zastosować izolowanie dostępnego przewodu odprowadzającego usieciowanym polietylenem o

grubości przynajmniej 3 mm zapewniającym udarowe napięcie wytrzymałowe 100 kV [2]. Ten zapis nie uprawnia do stosowania takiego rozwiązania celem zapewnienia wymaganego odstępu separacyjnego. Przewody HVI zamieniane na kable elektroenergetyczne, które pojawiają się w sprzedaży zbudowane są w oparciu o wymiary w normie usieciowy polietylen o grubości większej niż 3 mm i badane są napięciem udarowym 1,2/50 μ s 100 kV. Należy zauważyć, iż taki poziom prób odpowiada kablowi średniego napięcia o $U \approx 20$ kV wg. IEC 60502-1:2014 [10]. Warto przypomnieć, iż napięcia panujące na instalacji odgromowej podczas doziemnego wyładowania piorunowego są wielokrotnie większe, co przekłada się na pojawianie niekontrolowanych przeskoków iskrowych. Ani norma PN-EN 62305-3 pkt. 8.1, ani norma IEC 60502-1:2014 nie wspomina o równoważnym odstępie separacyjnym dla kabla charakteryzującego się w/w parametrami. Aby móc uznać kabel za właściwy należałoby go przebadać napięciem, co najmniej 250 kV wg. IEC TS 62561-8 [5].

Brak deklaracji równoważnego odstępu separacyjnego s_e (rozumianego wg. IEC TS 62561-8) w parametrach przewodu o izolacji wysokonapięciowej wykorzystywanego w ochronie odgromowej jednoznacznie dyskwalifikuje taki produkt, a jego stosowanie grozi powstaniem niekontrolowanych przeskoków iskrowych – szczególnie niebezpiecznych w strefach EX. W przypadku stref zagrożonych wybuchem należy dołożyć należytej staranności podczas doboru i wyboru przewodu HVI poprzez wymaganie od dostawcy wyników badań na zgodność z IEC TS 62561-8.

Podsumowanie

Podczas wyładowań piorunowych system zwodów i przewodów odprowadzających jest źródłem wysokiego napięcia i stanowi istotne zagrożenie dla samego obiektu jak i pracujących w nim urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Przewody o izolacji wysokonapięciowej coraz częściej stosowane są w ochronie odgromowej celem zapewnienia wymaganego odstępu separacyjnego. Niestety bardzo często błędnie interpretowane, wyznaczone i badane parametry przewodów o izolacji wysokonapięciowej zamiast ograniczać zwiększają zagrożenie piorunowe

chronionych obiektów. W przyszłości mogą powodować znaczne straty finansowe. Zaleca się zwracać uwagę na deklarowane parametry stosowanych przewodów HVI oraz bezwzględnie żądać protokołów z badań na zgodność z IEC TS 62561-8 w przypadku stosowania ich w strefach zagrożonych wybuchem.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Wincencik, DEHN Polska sp. z o.o., ul. Wołoska 16, 02-675 Warszawa, E-mail: krzysztof.wincencik@dehn.pl; dr inż. Jarosław Wiater, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: jaroslaw.wiater@pb.edu.pl;

LITERATURA

- [1] LIGHTNING PROTECTION GUIDE from DEHN.
- [2] PN-EN 62305-3:2011. Ochrona odgromowa - Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia
- [3] https://www.obo.com.tr/fileadmin/DMS/Broschueren/02_TBS/Blitzschutz-Leitfaden_en.pdf
- [4] https://www.tfkable.com/download/files/upload/files/KATALOG_HV_PL_2021_08_13.pdf
- [5] IEC TS 62561-8:2018 : Lightning protection system components (LPSC) - Part 8: Requirements for components for isolated LPS
- [6] Jan Meppelink, Martin Bischoff. IEC 62561-8 Isolated lightning protection systems. 12. VDE ABB-Blitzschutztagung, 12. – 13. Oktober 2017 in Aschaffenburg
- [7] <https://pl.megger.com/firma/artykuly/badania-odbiorcze-linii-kablowych-110kv-w-swietle-wymagan-zakladow-energetycznych-oraz-miedzynarodow>
- [8] Wiater JM. Zagrożenia piorunowe i przepięciowe w strefach zagrożonych wybuchem. In: Czapp S, editor. Innowacje, pomiary i bezpieczeństwo w elektroenergetyce. INFOTECH; 2017. p. 76–85.
- [9] PN-EN 62561-1:2017. Elementy urządzenia piorunochronnego (LPSC) - Część 1: Wymagania dotyczące elementów połączeniowych.
- [10] IEC 60502-1:2014 – Kable energetyczne z izolacją wytłaczaną i ich akcesoria dla napięć od 1 kV do 30 kV. Metody badań i wymagania
- [11] IEC 60840:2011 – Kable energetyczne z izolacją wytłaczaną i ich akcesoria dla napięć powyżej 30 kV do 150 kV. Metody badań i wymagania
- [12] IEC 62067:2011 – Kable energetyczne z izolacją wytłaczaną i ich akcesoria dla napięć powyżej 150 kV do 500 kV. Metody badań i wymagania