

Praktyki ochrony odgromowej napowietrznych linii średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi

Streszczenie. Artykuł zawiera krótką charakterystykę urządzeń ochrony odgromowej napowietrznych linii średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi oraz zasady ich doboru i instalowania. Zwrócono uwagę na techniczną, ekonomiczną i normalizacyjną stronę ich doboru i instalowania oraz dokonano oceny kryteriów wariantowego instalowania jednego z rozpatrywanych urządzeń.

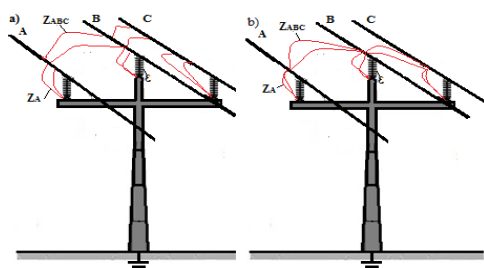
Abstract. The present paper aims to illustrate brief technical description of the selected problems of protection of medium-voltage overhead lines with covered conductors. Typical protection measures to be applied are describe and discussed with aim to determine critical points of lightning protection. Moreover special attention is paid for the economic and standardization issues introduction to the topic considered. (**Practices of lightning protection of medium-voltage overhead lines with covered conductors.**)

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, linie napowietrzne, przewody niepełnoizolowane

Keywords: lightning protection, overhead lines, covered conductors

Wstęp

Jedną z przyczyn powstawania awarii w sieciach o napięciu znamionowym z przedziału od 6 do 30 kV są przebiegi atmosferyczne [1]. Przebiegi te mogą być albo bezpośrednie, powstające przy uderzeniu pioruna w linię, albo indukowane, spowodowane uderzeniem pioruna w ziemię lub w obiekt naziemny znajdujący się blisko linii [2]. Ze względu na stosunkowo małą wytrzymałość izolacji w liniach średniego napięcia, praktycznie wszystkie przypadki przepięć bezpośrednich i znacząca część przepięć indukowanych prowadzi do przeskoków, które z dużym prawdopodobieństwem przekształcają się w zwarcia jedno lub wielofazowe. W tradycyjnej linii napowietrznej wykonanej przewodami nieizolowanymi stopa łuku, poddana oddziaływaniu siły elektrodynamicznej, swobodnie przemieszcza się wzdłuż przewodu (rys. 1 a), co zapobiega jego termicznemu uszkodzeniu, a więc nie ma decydującego znaczenia z punktu widzenia ochrony odgromowej.



Rys.1. Efekt oddziaływania sił elektrodynamicznych na łuk zwarciowy po przeskoku iskrowym w linii z przewodami: a) gołymi, b) niepełnoizolowanymi; Z_A – zwarcie jednej fazy, Z_{ABC} – zwarcie trzech faz.

Problemem ochrony odgromowej linii napowietrznych z przewodami niepełnoizolowanymi jest to, że przy zaistnieniu przeskoku na izolatorze najczęściej następuje przebicie osłony izolacyjnej przewodu, która uniemożliwia przemieszczanie się łuku wzdłuż przewodu. Powoduje to, że łuk pali się w jednym miejscu (rys. 1 b) do chwili wyłączenia linii [3]. W czasie trwania zwarcia z udziałem łuku może dojść do przepalenia przewodu, zanim nastąpi wyłączenie linii przez automatykę zabezpieczeniową. Dlatego w przypadku linii napowietrznych z takimi przewodami, głównym zadaniem skutecznej ochrony jest niedopuszczenie do uszkodzenia osłony izolacyjnej i punktowego oddziaływania łuku na przewód.

Urządzenia ochronne

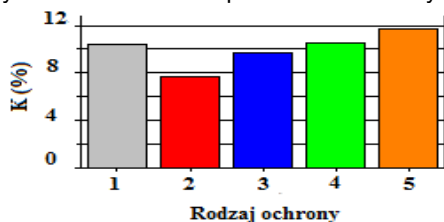
W typowych rozwiązaniach rozki łukoochronne dla linii pracującej w układzie pierścieniowym są instalowane na wszystkich trzech przewodach, po obu stronach izolatorów, natomiast dla linii pracującej w układzie promieniowym rozki są instalowane także na wszystkich trzech przewodach, ale od strony obciążenia. Takie rozwiązania zapewnia odprowadzenie łuku w kierunku do rozków, w chwili wystąpienia przebicia osłony izolacyjnej i przeskoku na izolatorze skutkujące zwarcie wielofazowym [4]. Jeśli wartość prądu zwarcia powodująca zapalenie się łuku jest dostatecznie duża (I_z powyżej 2 kA) [4], to towarzysząca temu zjawisku siła elektrodynamiczna przesuwając kanał łukowy wzdłuż wiązki chroniącej przewód do rozka łukoochronnego, a także powoduje powstanie przewodzącej przestrzeni zjonizowanej sprzyjającej rozwojowi zwarcia wielofazowego. W praktyce mała impedancja, która wpływa na poziom prądów zwarciowych, przekłada się na duże moce zwarciowe w rozpatrywanych liniach w pobliżu stacji elektroenergetycznych. Przy większych odległościach od stacji transformatorowej wartość prądu zwarcia maleje. Maleje również poziom energii łuku, co sprzyja ograniczeniu negatywnego wpływu przepięcia przemieszczającego się w przewodach linii. W rozważaniach dotyczących ochrony przed przepięciami linii napowietrznych z przewodami niepełnoizolowanymi i skutków powstania zwarcia łukowego istotną rolę odgrywa także wartość rezystancji uziemienia, zastosowana na konstrukcjach wsporczych [12].

Iskierniki wieloelektrodowe są instalowane wzdłuż i wokół izolatorów [5]. Już przy niewielkich wartościach przepięcia następuje zapłon jednego z elementów iskiernika i rozpoczyna się w nim łańcuchowy rozwój wyładowania. Zaletą tych urządzeń jest duża odporność na prąd piorunowy i wyładowania łukowe.

Ograniczniki liniowe z zewnętrzną przerwą iskiernikową, nazywane też liniowymi ogranicznikami przepięć [7], obejmują szeregowy układ zewnętrznego iskiernika i warystora z tlenków metali (ZnO). Przepięcie wywołuje zapłon iskiernika, powodując w ten sposób włączenie członu nieliniowego, gwałtowne zmniejszenie jego rezystancji własnej, tym samym skuteczne ograniczenie przepięcia i eliminację przeskoku na izolatorze, a w efekcie jego uszkodzenia i wytopienia przewodu. Wraz z zanikiem przepięcia rezystancja członu nieliniowego powraca do wartości początkowej.

Analiza wartości kosztów obsługi ochrony

W związku z możliwością stosowania różnych środków ochrony podjęto próbę analizy nakładów inwestycyjnych, które oszacowano w przeliczeniu na 1 km linii napowietrznych z przewodami niepełnoizolowanymi o napięciu znamionowym zawierającym się w przedziale od 6 kV do 30 kV. Analizę przeprowadzono na podstawie danych projektowych [6]. Nakłady inwestycyjne są związane z budową linii i w prowadzonej analizie są stałe dla wszystkich rodzajów urządzeń ochrony oraz z kosztów eksploatacji, które określono wprowadzając do obliczeń współczynnik odzwierciedlający potencjalną liczbę urządzeń ulegających uszkodzeniu i wymagających wymiany eksploatacyjnej. W ten sposób sumaryczna wartość kosztów obsługi 1 km linii ulega zmianom uzależnionym od stopnia awaryjności poszczególnych środków ochrony odgromowej. W obliczeniach uwzględniono pięcioletni okres eksploatacji linii. Obliczenia wykonano, stosując program służący do sporządzania dokumentacji kosztorysowej według jednopozomowego utworzenia cen, zgodny ze zmieniającymi się przepisami prawnymi i technologiami budowlanymi typu ABK 2.8.5. Uzyskany rezultat obliczeń zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Prezentacja w ujęciu procentowym kosztów K przypadających na 1 km linii napowietrznej średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi o przekroju 70 mm^2 w ciągu 5 letniego okresu eksploatacji, w zależności od rodzaju urządzenia ochrony: 1 - wieloelektrodowe iskierniki (WI), 2 - liniowe ograniczniki przepięć, 3 - rozki łukochronne (RI), 4 - układ RI z liniowymi ogranicznikami przepięć, 5 - układ RI z WI.

Ogranicznik beziskiernikowy w istniejącej normalizacji

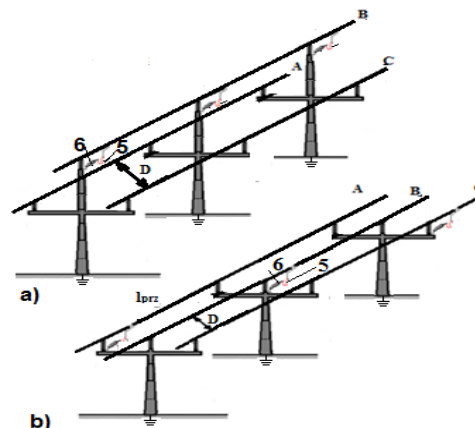
Z chwilą wprowadzenia do eksploatacji sieciowej ograniczników warystorowych z tlenków metali zapanowało powszechne przekonanie, że te prostsze, a więc i tańsze urządzenia wyeliminują z eksploatacji odgromniki zaworowe. W normie PN-EN 60099-5:1996/1999 [8] sygnalizowano, że ogranicznik beziskiernikowy ma wadę, polegającą na ciągłym przepływie przez niego prądów wymuszonych przez napięcia robocze linii. W związku z powyższym są czynione starania, w celu wyeliminowania strat powstających wskutek przepływu prądu przez ogranicznik. Uznano, więc za niezbędne uzupełnienie ogranicznika warystorowego o zewnętrzną przerwę iskrową, włączoną szeregowo. Rozwiązanie to zostało uwzględnione w standardzie IEC 60099-8:2011 [7], gdzie sam przedmiot opracowania opatrzone symbolem EGLA (Externally Gapped Line Arrester).

Kryteria wariantowego instalowania środków ochrony linii średnich napięć

Instalowanie urządzeń do ograniczania przepięcia przy każdym izolatorze linii może być uznane za efektywne zarówno przy przepięciach bezpośrednich, jak i indukowanych. Jeżeli dodatkowo środowisko otaczające linię pozwala wykluczyć możliwość powstawania przepięć bezpośrednich, to za źródło zagrożenia można uznać wyłącznie przepięcia indukowane. Tak postąpiono w dalszych rozważaniach, koncentrując uwagę na warunkach stosowania ograniczników przepięć z zewnętrzną przerwą

iskrową do ochrony przed tymi przepięciami i na dwu wariantach ich rozmieszczania (prezentacja na rys. 3).

W wariantie 1 przyjęto trójkątny układ przewodów linii z ogranicznikami przepięć instalowanymi przy każdym izolatorze wierzchołkowej fazy B (rys. 3 a). Zmierzeniem tego wariantu jest określenie kryterium, jakie musi być speł-



Rys. 3. Rozmieszczenie ograniczników przepięć: a) w wariantie 1, b) w wariantie 2.

nione przez odstęp D między przewodami fazowymi, by nie następowały przeskoki na izolatorach faz sąsiednich (A i C).

W wariantie 2 przyjęto płaski układ przewodów linii z ogranicznikami przepięć instalowanymi przy izolatorach kolejno zmieniających faz A, B i C (rys. 3 b). Zmierzeniem tego wariantu jest określenia kryterium, jakie musi być spełnione przez długość l_p przęśla linii, by nie następowały przeskoki na niechronionych izolatorach faz sąsiednich.

W obu wariantach do obliczeń przyjęto: wysokość najniższej usytuowanego przewodu linii nad ziemią $h = 8 \text{ m}$; długość przęśla linii $l_p = 60 \text{ m}$; promień przewodu linii $r = 8 \text{ mm}$; przeciętna wartość szczytowa prądu pioruna $I = 30 \text{ kA}$; minimalna odległość kanału pioruna od linii $a_{\min} = 50 \text{ m}$ [13]; zewnętrzna przerwa iskrowa (między ogranicznikiem przepięć a zaciskiem) $a_{\text{iog}} = 6 \text{ cm}$. W obliczeniach pominięta została rezystancja kanału wyładowania i impedancja konstrukcji słupa.

Maksymalne napięcie indukowane (U_{ind}) wyznaczono z zależności [11]

$$(1) \quad U_{\text{ind}} = \frac{30Ih}{a_{\min}}$$

Aby stworzyć dla izolatorów i dla iskierników ochronnych możliwie ekstremalne warunki napięciowe, przyjęto z obostreniem, że fala przepięciowa powstaje w pobliżu słupa i przemieszcza się ze stromością czoła równą $s = 300 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Przyjęto, że wytrzymałość udarowa napięciowa występujących w rozpatrywanym układzie izolatorów wsporczych została skoordynowana z ich charakterystyką udarową.

Obliczenia zostały przeprowadzone z uwzględnieniem napięciowo-czasowej charakterystyki ogranicznika przepięć i izolatora oraz wpływu długości przerwy iskrowej i rezystancji ogranicznika przepięć. Kryterium ochrony izolatorów przez te ograniczniki wynika z różnicy w przebiegu ich charakterystyk udarowych aproksymowanych według [10].

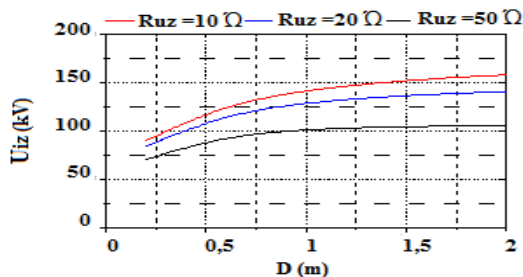
W przypadku wariantu 1 zasadniczą wielkością obliczeniową jest napięcie U_{iz} na izolatorze fazy dolnej (nie wyposażonej w ogranicznik przepięć). Napięcie to zależy od współczynnika sprzężenia k , którego wartość jest zdefiniowana przez odległość D między przewodami linii i przez rezystancję R_{uz} uziemienia słupa, a także przez

zredukowaną rezystancję R_{OP} warystora EGLA, impedancją falową Z_F przewodu i jego promienia r . Obliczenia U_{iz} w funkcji D i R_{UZ} (jako parametry) wykonano zgodnie z zależnością [9]:

$$(2) \quad U_{iz} = U_{ind} k$$

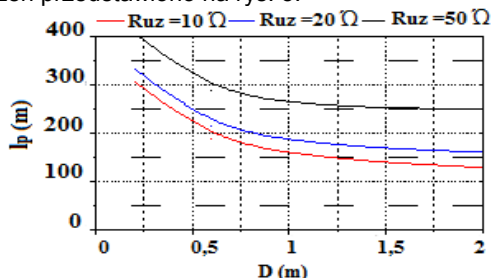
$$(3) \quad U_{iz} = U_{ind} \left[1 - \frac{(R_{UZ} + R_{OP})}{(0,5Z_F + R_{UZ} + R_{OP})} \right] \cdot \left[1 - \frac{\ln(2h/D)}{\ln(2h/r)} \right]$$

przyjmując następujące wartości $U_{ind} = 300$ kV; $R_{OP} = 8 \Omega$; $R_{UZ} = 10, 20$ i 50Ω ; $Z_F = 262,9 \Omega, 197 \Omega$ i $166,4 \Omega, 142 \Omega$ i $124,8$ odpowiednio przy $D = 0,2$ m, $0,6$ m i $1,0$ m, $1,5$ m, $2,0$ m. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależność napięcia na izolatorze fazy nie wyposażonej w ogranicznik przepięć od odległości D między przewodami, przy różnej wartości rezystancji uziemienia słupa (R_{uz}).

W przypadku wariantu 2 kryterialną wielkością jest długość przęsła (l_p), przy której nie dochodzi do przeskoku na izolatorach niechronionych. Wartość krytyczna l_p zależy od współczynnika k , występującego w (3) i jest determinowana przez współczynniki γ_{opn} , δ_{opn} - aproksymacji charakterystyki ogranicznika przepięć i γ_{iz} , δ_{iz} - aproksymacji charakterystyki izolatora [9]. Istotną jest również stramość s fali przepięciowej i prędkość c jej propagacji. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność krytycznej długości przęsła (l_p) od odległości między fazami (D), linii napowietrznej z przewodami niepełnoizolowanymi o napięciu znamionowym z przedziału od 6 kV do 30 kV w przypadku różnych wartości rezystancji uziemienia słupa (R_{uz}).

Obliczenia l_p w funkcji D i R_{UZ} (jako parametry) wykonano zgodnie z zależnością:

$$(4) \quad l_p = \left[\left(k \cdot \frac{s}{\gamma_{iz}} \right)^{\frac{1}{\delta_{iz}-1}} - \left(\frac{s}{\gamma_{op}} \right)^{\frac{1}{\delta_{op}-1}} \right] \cdot c$$

przyjmując wartości wprowadzone do (3), $s = 300$ kV/ μ s, $c = 300$ m/ μ s; $\gamma_{opn} = 160$; $\delta_{opn} = -0,65$; $\gamma_{iz} = 190$; $\delta_{iz} = -0,352$.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, że:

- istnieje duże prawdopodobieństwo, że najbardziej właściwymi urządzeniami ochrony linii z przewodami niepełnoizolowanymi są ograniczniki przepięć z zewnętrzną

przerwą iskiernikową. Dodatkowym atutem zastosowania tego rozwiązania są względy ekonomiczne zauważalne podczas eksploatacji;

- wyposażanie izolatorów w omawiane elementy staje się najbardziej optymalne dla układu płaskiego przewodów oraz gdy odległości między przewodami linii wynosi $D > 0,6$ m;

- w przypadku, gdy wzajemne odstępstwa przewodów linii są mniejsze niż 2 m stosowanie w sieci rozdzielczej standardowych izolatorów na napięcie znamionowe wyższe niż 10 kV skutecznie zapobiega powstawaniu przeskoków, powodowanych przepięciami indukowanymi.

LITERATURA

- [1] Zdobysław Flisowski „Technika Wysokich napięć” Wydawnictwo WNT, 2009 r.
- [2] Weiming Chen “Analysis and Prevention Inquiry on Break 10 kV Aerial Insulated Wire Caused by Lightning Stroke”, 18-th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Turin (Italy), 6-9 June 2005, Session 1.
- [3] Shianqiang Gu, Shuiming Chen, Rong Zeng, Weijiang Chen, “Discussion on Measures Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines”, IEEE Transactions on power delivery, vol. 23, no. 2, april 2008.
- [4] Markku Kokkonen “Development of Lightning Protection for Covered Conductor”, ICCO, 2000.
- [5] Podporkin H.V., Pilshchikov W.E., Sivaev A.D., «O stosowaniu OPN dla ochrony odgromowej linii napowietrznych 6 - 10 kV, OAO «NPO Strimer», Sankt-Petersburg, 16 July 2009.
- [6] Zhovnr J. M., Zhovnr O. P., Projektowanie linii napowietrznych z przewodami niepełnoizolowanymi 6-35 kV”, PP „Stadnyk S.O.” 2010.- 208 S. - Lviv.
- [7] PN-EN 60099-8:2011 Ograniczniki przepięć. Część 8: Ograniczniki przepięć z tlenków metali z zewnętrznymi iskiernikami szeregowymi (EGLA) do napowietrznych przesyłowych i rozdzielczych linii napięcia przemiennego w sieciach powyżej 1 kV.
- [8] PN-EN 60099-5:1999 Ograniczniki przepięć. Zalecenia wyboru i stosowania.
- [9] Khalilov F.H., Evdokunin G.A. - Ochrona sieci 6-35 kV od przepięć. – Sankt-Petersburg, 2002, 260 s.
- [10] Urządzenie dla ochrony od przepięć „Przemysłowy Kazachstan”, nr. 4(64), kwiecień 2011 r.
- [11] S. Rusck, “Protection of distribution systems”, [in R.H. Golde, “Lightning”, New York: Academic Press, vol. 2, Chapter 23, 1977].
- [12] Oleksa J., „Ochrona linii PAS przed skutkami wyładowań atmosferycznych” III Konferencja n-t. Elektroenergetyczne Linie Napowietrzne Niskiego i Średniego Napięcia PTPIREE Jaworze Górne 25-26 maja 2006 r.
- [13] Waldemar Skomudek „Pomiary i analiza przepięć oraz ocena ich skutków w sieciach średniego i wysokiego napięcia” SEP Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, 2011 r.
- [14] Grzybowski A., Rakowska A., Torbus M.. „Ochrona przed skutkami przepięć w napowietrznych liniach SN z przewodami pełno- i niepełnoizolowanymi” Sympozjum nt. Nowe rozwiązania dla elektroenergetycznych linii przesyłowo-rozdzielczych oraz stacji transformatorowych, Zielona Góra, 2007. - S. 31-42

Autorzy: mgr. inż. Michał Borecki, Warsaw University of Technology, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, mnborecki@gmail.com; dr inż. Bolesław Kuca, Warsaw University of Technology, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, e-mail: kucab@ee.pw.edu.pl; dr inż. Tomasz Kisielewicz, Warsaw University of Technology, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, t.kisielewicz@ee.pw.edu.pl; assoc. prof. İlhan Tarimer, Muğla Sıtkı Koçman University, Kötekli Kampüsü, 48000, Muğla, Türkiye, e-mail: itarimer@mu.edu.tr; dr inż. Heorgiy Lysiak, Lviv Polytechnic National University, ul. Bandery 12, 79-013 Lviv, Ukraine, e-mail: gmlysiak@lp.edu.ua.