

Czynniki eksploatacyjne powodujące degradację polietylenu w kablach elektroenergetycznych średniego napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z eksploatacją linii kablowych średniego napięcia o izolacji wytłaczanej z polietylenu. Opisano czynniki elektryczne występujące w trakcie eksploatacji linii kablowych w zależności od typu sieci (kablowa, kablowo-napowietrzna) oraz jakie one mają wpływ na procesy degradacyjne izolacji polietylenowej.

Słowa kluczowe: kable o izolacji polietylenowej, starzenie, degradacja

Wprowadzenie

Aktualnie można zaobserwować systematyczny rozwój linii kablowych średniego napięcia w sieci przesyłowo-rozdzielczej, eksploatowanej przez poszczególne spółki dystrybucyjne w naszym kraju (tabela 1). Ostatnie lata to całkowite zaniechanie budowy nowych linii kablowych, kablami o izolacji papierowo-olejowych na rzecz kablów o izolacji z polietylenu sieciowanego. Dlatego wydaje się być rzeczą oczywistą, aby dysponować wiedzą na temat podstawowych zjawisk fizyczno-chemicznych, które powodują destrukcję układu izolacyjnego kabli, a przede wszystkim, czynników inicjujących te procesy, głównie elektryczne występujące w czasie eksploatacji sieci.

Tabela 1. Procentowy udział kabli średniego napięcia o izolacji papierowej (PAP), z polietylenu niesieciowanego (PE) oraz sieciowanego (XLPE), na przykładzie wybranego Oddziału Dystrybucyjnego w latach 2004–2011[18].

Rodzaj izolacji	Rok							
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	%							
PAP	42,1	41,5	41,1	40,8	39,8	39,0	38,4	37,9
PE	21,0	19,9	19,7	19,0	18,2	18,1	17,8	17,1
XLPE	37,0	38,7	39,2	40,2	42,0	42,9	43,8	45,0

Degradacja polietylenu

Efektom działania procesów degradacyjnych w izolacji polietylenowej może być między innymi zmniejszenie się masy molowej materiału, deformacja budowy łańcuchów polimeru (polietylenu), zmiany niektórych właściwości i parametrów użytkowych [12].

Mechaniczny proces degradacji polietylenu związany jest ze zmianami w skali mikroskopowej i polega na:

- rozciąganiu i powstawaniu pęknięć łańcuchów;
- wypęczaniu makrocząsteczek;
- powstawaniu pęknięć i naprężeń [12, 19].

Wśród parametrów elektrycznych układów izolacyjnych najważniejsza jest wytrzymałość elektryczna, ograniczona przebiciem elektrycznym. Z kolei przebicie jest to wyładowanie zupełne, powodujące trwałe zniszczenie materiału stałego. W izolacji powstaje kanał przebicia, którego wytrzymałość elektryczna nie regeneruje się (kanał o ściankach zwęglonych w materiałach organicznych, pęknięcie izolacji, spalanie itp). Wytrzymałość określana jest za pomocą napięcia lub natężenia przebicia. Rozróżnia się trzy podstawowe mechanizmy przebicia:

- mechanizm elektryczny;
- mechanizm cieplny, związany z degradacją termiczną materiału;
- mechanizm starzeniowy (mechanizm jonizacyjno-starzeniowy) [18].

Jak pokazały doświadczenia eksploatacyjne najbardziej destrukcyjne oddziaływanie na stan kablowej izolacji wytłaczanej mają dwa zjawiska: drzewienie elektryczne i drzewienie wodne.

Zjawisko drzewienia elektrycznego polega na tworzeniu się kanałków przypominających kształtem drzewo lub krzak, a rozwija się w izolacji polimerowej w przypadku wystąpienia dużego, lokalnego pola elektrycznego. Miejscowe wzmocnienie pola w izolacji kablowej może być spowodowane wystąpieniem mikroostrzy na ekranie, obecnością wtrącin przewodzących w izolacji lub miejscową nieregularnością strukturalną materiału izolacyjnego. Udoskonalenie technologii produkcji kabli elektroenergetycznych o izolacji wytłaczanej wpłynęło znacząco na ograniczenie nieprawidłowości mogących prowadzić do wzmocnienia lokalnego natężenia pola elektrycznego, a zatem zminimalizowano możliwości zapoczątkowania rozwoju drzewek elektrycznych. Stałym czynnikiem odpowiedzialnym za zmiany fizyko-chemiczne w izolacji polietylenowej kabla, jest działanie pola elektrycznego i to zarówno w środowisku wilgotnym, jak i suchym [13].

Drzewka elektryczne rozwijają się w miejscach, gdzie występuje lokalne zwiększenie wartości natężenia pola elektrycznego powyżej 10^7 - 10^8 kV/m, a więc w pobliżu wszelakiego rodzaju mikroostrzy na ekranie, przewodzących wtrącin w izolacji lub w obszarach, gdzie występuje nieregularna struktura materiału izolacyjnego, np. pęcherzyki powietrzne. Drzewka rozwijają się także pod wpływem działania wyładowań niezupełnych. Obecność drzewek elektrycznych przyczynia się do zmian fizyko-chemicznych materiału oraz do zmian w rozkładzie pola elektrycznego w izolacji. Proces inicjowania drzewka elektrycznego ulega przyspieszeniu pod wpływem wzrostu napięcia i częstotliwości, występujących na przykład w trakcie przebiegów [3, 11, 14].

Wpływ połączenia punktu neutralnego sieci średniego napięcia z ziemią na warunki eksploatacyjne linii kablowych

Największe zagrożenie dla izolacji kabla stwarzają przebiegi wewnętrzne (tabela 2), powstające na przykład w trakcie wyłączania różnego rodzaju zwarć, w szczególności tych o charakterze łukowym [5, 6, 8].

Tabela 2. Wartości współczynników przebiegów dla różnych sposobów połączenia z ziemią punktów neutralnych sieci średniego napięcia [14].

Przebiegi ziemnozwarciowe	Sieć z punktem neutralnym		
	izolowanym	uziemiającym przez	
		dławik	rezystor
w chwili wystąpienia zwarcia doziemnego	2,5		2,1
podczas zwarcia doziemnego z łukiem przerywanym	3,5÷4,0	2,9	2,2
przy wyłączaniu zwarcia	2,0	-	-

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Współczynniki przepięć przy tego typu zwarciach mogą być większe od dopuszczalnych umownych wartości współczynników przepięć dla kabli elektroenergetycznych (tabela 3) [2, 14]. Jeżeli w wyniku procesów łączeniowych, zwarc łukowych, wygenerowane przepięcia (wolnozmiennie) będą bliskie wytrzymałości izolacji kabla, to zachodzi duże prawdopodobieństwo awarii linii kablowej.

Tabela 3. Umowne dopuszczalne wartości współczynników przepięć dla kabli o izolacji polietylenowej średniego napięcia 15÷20 kV [14].

Rodzaj kabla	Rodzaj przepięcia	Współczynnik
nowe o izolacji polietylenowej	pojedyncze	2,50
		1,87
eksploatowane o izolacji polietylenowej	wielokrotne ziemnozwarciowe	1,59

Zastosowanie w sieci zestawu do automatycznej kompensacji prądu ziemnozwarciowego, która w sposób nadążny zmienia jego wartość, w zależności od wartości prądu pojemnościowego w sieci [9, 14]. Przyczynia się do ograniczenia liczby zwarc doziemnych – generowanych przepięć. Widać to doskonale na przykładzie obserwacji przeprowadzanych przez autora książki [14], z której wynika, że liczba zarejestrowanych zwarc doziemnych zmniejszyła się (tabela 4) po zainstalowaniu w analizowanej sieci kompensacji nadążnej.

Tabela 4. Liczba zwarc doziemnych powodujących wyłączenie linii, w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez cewkę Petersena [14].

Lp.	GPZ nr.	Numer sekcji w GPZ	Średnia liczba doziemień na miesiąc w sieci	
			z kompensacją stałą	z kompensacją nadążną
1	1	1	58	26
2		2	23	9
3	2	1	59	10

Zwarcia podwójne doziemne oraz wielofazowe w sieciach z nieziemionym bezpośrednio punktem neutralnym

Zwarcie podwójne z udziałem ziemi powstaje w wyniku doziemienia dwóch różnych faz zasilanych z tej samej sekcji GPZ-tu lub jednej linii w dwóch różnych miejscach, ale różnych faz [20].

Przy tego typu zakłóceniach w sieci, istotne znaczenie ma wartość impedancji zerowej obwodu ziemnopowrotnego. W skrajnych przypadkach, kiedy zwarcia doziemne występują blisko siebie, a zwarcie ma charakter bezpośredni, to prąd zwarciový będzie prawie równy prądowi zwarcia dwufazowego. Jednak wraz ze wzrostem odległości między miejscami wystąpienia zwarcia, wartość prądu zwarciový będzie malała [20].

Zwarcia wielofazowe (tj. trójfazowe i dwufazowe) nie występują w sieciach energetycznych tak często jak doziemne, ale charakteryzują się większymi wartościami prądów zwarciový, a więc silniejszym oddziaływaniem na urządzenia elektroenergetyczne [4, 7, 16]. Na zwarcia będą narażone linie napowietrzne z przewodami gołymi, w osłonie izolacyjnej oraz linie kablowe, choć przyczyny ich występowania są różne, w zależności od rodzaju sieci.

W przypadku linii napowietrznych z przewodami gołymi zwarcia powstają z reguły:

- podczas silnych wiatrów, kiedy drzewa łamią się i opadają na linie napowietrzne;
- podczas prac polowych na terenach rolnych, na przykład w czasie pracy kombajnów buraczanych;

- w trakcie prac budowlanych na przykład związanych z rozbudową infrastruktury drogowej lub w przypadku kolizji drogowych;
- z powodu dużych zwisów przewodów w linii wynikających np. z powodu pochylenia się słupów.

Natomiast w liniach napowietrznych z przewodami w osłonie izolacyjnej (system PAS), zwarcia wielofazowe będą powstawały głównie w:

- czasie przebieg w sieci, jeżeli jest zastosowana w linii ochrona przeciwłukowa w formie roszków lub iskierników [10],
- błędów montażowych, popełnianych w szczególności na słupach funkcyjnych linii, gdy odległość między iskiernikami różnych faz, jest mniejsza niż odległość między iskiernikiem znajdującym się pod napięciem a uziemionym iskiernikiem, zamontowanymi na tej samej fazie [17].

W liniach kablowych do zwarc wielofazowych może dochodzić w czasie prowadzenia prac ziemnych (zerwanie kabli przez koparkę) lub w wyniku kolizji drogowych, a także w trakcie prac rolnych polegających na głęboszowaniu.

Wpływ sposobu ułożenia oraz uziemienia żył powrotnych kabli na warunki eksploatacyjne

Ułożenie kabli w układzie płaskim jest niekorzystne, ponieważ w skrajnych żyłach powrotnych kabla indukują się największe napięcia (większe niż w układzie trójkątnym), a obustronne uziemienie żył powrotnych kabli wywołuje przepływ prądu (tabela 5) i wydzielanie się ciepła zgodnie z prawem Joule'a. Wskutek czego izolacja kabla jest nagrzewana obustronnie, w zależności od wartości prądów i rezystancji żyły roboczej, jak i powrotnej kabla. Warunki oddawania ciepła przez kabel do otoczenia w takich sytuacjach ulegają pogorszeniu [1, 15].

Tabela 5. Wartość prądu indukowanego w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia.

Linia nr	Długość linii [km]	Wartość prądu [A]			
		w żyłce głównej	w żyłach powrotnych		
L-1	0,55	65,5	17,0	16,3	15,5
L-2	0,61	83,0	17,0	17,3	16,2
L-3	1,21	6,00	2,30	2,30	2,25
L-4	1,32	52,0	1,60	1,62	1,45
L-5	0,45	86,2	20,0	20,5	19,0

Obiekt oraz wyniki badań

Obiektem badań były kable elektroenergetyczne o izolacji wyłączonej z polietylenu niesieciowanego typu YHAKX na napięcie $U_0/U-12/20$ kV, eksploatowane przez energetykę zawodową.

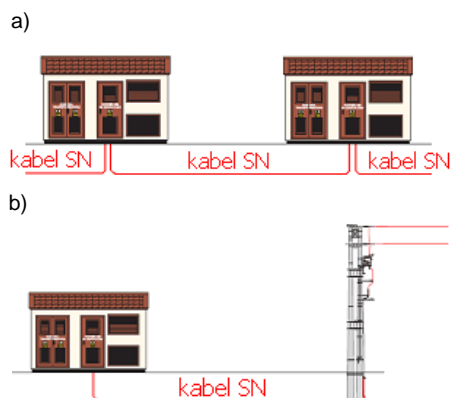
Przebadano izolację z kilkudziesięciu odcinków linii kablowych stanowiących połączenie między stacjami transformatorowymi SN/nn w sieciach miejskich (oznaczenie próbki Pkk), rysunek 1a oraz współpracujących z linią napowietrzną (oznaczenie próbki Pkn), rysunek 1b, jak i kabel który w początkowej fazie pracował w sieci miejskiej, łącząc ze sobą dwie stacje, a następnie w wyniku przebudowy sieci został zainstalowany na stanowisku słupowym (oznaczenie próbki Pkk/kn).

Przebadano izolację kabli ze względu na: zmianę stanu lepkości materiału (tabela 6), masy cząsteczkowej polimeru (tabela 7).

Z przeprowadzonych badań związanych ze zmianą stanu lepkości materiału wynika, że zmiany w izolacji kabli wystąpiły w warstwach znajdujących się przy ekranach

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

półprzewodzących, przy czym w wyniku przeprowadzenia kilkudziesięciu badań w tym zakresie, zauważono pewną powtarzalność, która polega na tym, że w przypadku kabli pracujących w tak zwanych ciągach kablowych, osłabieniu ulega warstwa izolacji przy żyłce powrotnej kabla, natomiast w przypadku kabli współpracujących z linią napowietrzną, osłabieniu ulega warstwa znajdująca się przy żyłce roboczej kabla [18].



Rys. 1. Widok odcinków kabli pobieranych do badań

- a) kabel łączący ze sobą stacje transformatorowe Sn/nn – oznaczenie próbek Pkk,
 b) kable współpracujący z linią napowietrzną – oznaczenie próbek Pkn.

Tabela 6. Przykładowe wyniki pomiarów temperatury zmiany lepkości polietylenu kablowego dla poszczególnych warstw próbek.

Oznaczenie próbki	Warstwa nr			
	1. (przy żyłce głównej)	2.	3.	4. (przy żyłce powrotnej)
	Temperatura [°C]			
Pkk-12	(195,5 ± 0,7)	(185,0 ± 0,7)	(184,8 ± 0,8)	(183,8 ± 0,6)
Pkn-8	(206,0 ± 0,3)	(209,2 ± 0,5)	(210,0 ± 0,5)	(210,4 ± 0,3)
Pkk/kn-1	(181,2 ± 0,3)	(184,2 ± 0,3)	(184,3 ± 0,4)	(183,2 ± 0,7)

Badania związane ze zmianą stanu lepkości materiału pozwoliły stwierdzić pośrednio, że warstwy izolacji przy żyłkach kabla, w zależności od warunków pracy, wykazują się osłabionymi wiązaniami międzycząsteczkowymi w porównaniu z pozostałymi, czego dowodem jest niższa wartość oznaczonej temperatury. Skoro wiązania te są słabsze, to w tych warstwach należy się spodziewać łańcuchów polimerów o niższej masie cząsteczkowej niż w pozostałych warstwach. Dlatego przeprowadzono pomiary masy cząsteczkowej polimeru za pomocą chromatografii żelowej. Pomiary wykonane chromatografem żelowym potwierdziły przypuszczenia, zarejestrowano mniejszą masę molową w warstwie izolacji przy ekranach w zależności od sposobu pracy kabla: przy żyłce powrotnej kabla – kable pracujące w ciągach kablowych, przy żyłce głównej kabla – kable współpracujące z linią napowietrzną [18].

Można wyciągnąć ogólny wniosek mówiący o tym, że nadmierny przyrost temperatury izolacji kabla wywołuje w materiale izolacyjnym, bezpośrednio przy źródle ciepła, zmiany fizyko-chemiczne w izolacji, które istotnie wpływają na późniejsze właściwości w zakresie przewodnictwa cieplnego w czasie normalnych warunków pracy (przy dopuszczalnej temperaturze użytkowania). Elektroenergetyk ten sam wniosek przedstawiłby następująco – przepływający prąd zwarciový przez kabel o określonej wartości i liczbie w danym przedziale czasowym, wywołuje w polietylenie negatywne skutki polegające na osłabieniu się przewodnictwa cieplnego warstwy izolacji polietylenowej przy ekranie, podczas normalnych warunków pracy kabla – obciążenia znamionowego kabla.

Tabela 7. Przykładowe wyniki pomiarów dla warstw znajdujących się przy ekranach półprzewodzących dla próbek Pkn-8, Pkk/kn-1.

Oznaczenie próbki	Warstwy izolacji przy	\bar{M}_n	\bar{M}_w	\bar{M}_v	MWD
Pkn-8	żyłe roboczej kabla	41 056	586 260	348 133	14,28
		41 048	586 176	352 558	14,28
		41 076	586 399	362 379	14,28
		41 072	586 458	345 528	14,28
	żyłe powrotnej kabla	50 301	605 937	368 340	12,05
		50 371	605 928	375 604	12,03
		50 332	605 945	372 082	12,04
		50 111	605 934	380 020	12,09
Pkk/kn-1	żyłe roboczej kabla	34 026	375 616	242 440	11,04
		33 982	375 636	249 839	11,05
		34 035	375 641	244 577	11,04
		33 969	375 611	253 516	11,06
	żyłe powrotnej kabla	33 213	388 790	255 533	11,71
		33 217	388 191	256 965	11,70
		33 208	388 778	257 121	11,71
		33 219	388 759	257 058	11,70
gdzie: \bar{M}_n – liczbowo średnia masa molowa, \bar{M}_w – średnia masa molowa, \bar{M}_v – lepkościowo średnia masa molowa, MWD – polidispersja \bar{M}_w/\bar{M}_n .					

Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że proces degradacji izolacji polietylenowej w kablach średniego napięcia nie przebiega jednakowo w całym przekroju poprzecznym izolacji. Najbardziej osłabione warstwy izolacji występują przy warstwach tzw. granicznych izolacji, czyli przy ekranach półprzewodzących kabla. W przypadku kabli współpracujących z linią napowietrzną osłabieniu ulega warstwa izolacji znajdująca się przy żyłach roboczych kabla. Fakt ten potwierdzają badania związane ze zmianą stanu lepkości, masą molową polietylenu.

Zmiany fizyko-chemiczne zachodzące w obszarach izolacji polietylenowej kabli średniego napięcia, są prawdopodobnie związane z liczbą zanotowanych zwań oraz rozplywem prądów zwarciových w sieci, które w czasie eksploatacji kabla najbardziej oddziałują termicznie na izolację.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

W przypadku systemu PAS norma nakazuje stosować ochronę przeciwłukową w sieci w określonych miejscach. W większości przypadków są to iskierniki, powodujące zwarcia doziemne – jeżeli poprzecznik słupa zostanie uziemiony, lub międzyfazowe – w przypadku braku uziemienia poprzecznika. Dodatkowo w celu zgaszenia palącego się łuku elektrycznego pomiędzy elektrodami iskiernika konieczne jest zadziałanie automatyki zabezpieczeniowej SPZ-tu. Lepiej zastosować w tego typu liniach ograniczniki przepięć, choć to podnosi koszty inwestycji.

Innymi problemami, bardzo ważnymi w najbliższym czasie z powodu systematycznego wzrostu mocy przesyłanej w liniach kablowych oraz wzrostu długości linii kablowych, mogą okazać się wartości prądów płynących w żyłach powrotnych kabli oraz rozkład potencjału wzdłuż żyły powrotnej kabli względem ziemi przy obustronnym uziemieniu linii.

Literatura

1. Anders G. J., Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment, IEEE Press 2005 r.
2. Batura R., Królikowski Cz., Opydo W., Naprężenia izolacji elektroenergetycznych spowodowane przepięciami łączeniowymi w sieciach z łącznikami próżniowymi, V Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć, Poznań-Kierz, 2000, s. 25–34
3. Dissado L.A., Fothergill J.C., Electrical degradation and breakdown in polymers, IEE Materials and Devices Series 9, London, 1992
4. Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa w przykładach i zadaniach, tom I, pod red. Winklera W., Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006 r.
5. Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, tom II, pod red. Kujszczyk Sz., Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004 r.
6. Jakubowski J., Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1968 r.
7. Kacejko P., Machowski J., Zwarcia w systemie elektroenergetycznych, wyd. 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009 r.
8. Lorenc J., Hoppel W., Techniczne środki wspomagające działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieci SN, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9/2009, s. 241–248
9. Lorenc J., Torbus M., Stacjonarny układ do pomiaru i sterowania kompensacją prądów zwarciovych , VII Sympozjum Nowoczesne rozwiązania w budownictwie sieciowym, Ostrów Wielkopolski 12–14. 01. 2011. s. 33–40
10. Norma N SEP-E-003 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami pełnoizolowanymi oraz z przewodami niepełnoizolowanymi, 2003 r.
11. Nowak W., Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych, Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2005 r.
12. Rabek J., Współczesna wiedza o polimerach, wyd. 1, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008 r.
13. Rakowska A., Właściwości eksploatacyjne usieciowanego polietylenu izolacyjnego stosowanego wysokonapięciowych kablach elektroenergetycznych, Rozprawy, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998 r.
14. Skomudek W., Pomiary i analiza przepięć oraz ocena ich skutków w sieciach średniego i wysokiego napięcia, wyd. 1, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictwo, Warszawa, 2011 r.

15. Spyra F., Ograniczanie strat w liniach kablowych, VII Konferencja Naukowo-Techniczna Elektroenergetyczne linie kablowe – stan obecny, nowe techniki, Toruń 13-14 październik 2009, s. 49-52
16. Winkler W., Wiszniewski A, Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, wyd. 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009 r.
17. Zawodniak J., Przydatność albumów typizacyjnych w budownictwie sieciowym na przykładzie linii napowietrznych średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi w układzie płaskim, VIII Sympozjum Nowoczesne rozwiązania w budownictwie sieciowym, Ostrów Wielkopolski 11-13. 01. 2012, s. 17-27
18. Zawodniak J.J., Wpływ warunków pracy linii kablowych w sieci na zmiany wybranych właściwości izolacji wyłaczanej, Poznań 2014 r., promotor prof. A. Rakowska,
19. Źuchowska D., Polimery konstrukcyjne, wyd. 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000 r.
20. Źydanowicz J., Elektroenergetyczne zabezpieczenia przekaźnikowe, wyd. 3, Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1976 r.

Autor: dr inż. Józef Jacek ZAWODNIAK, ENEA Operator Sp. z o.o., ul Strzeszyńska 58, 60-479 Poznań, e-mail: jozef.zawodniak@enea.pl