



Jan C. Stępień*

NIEZAWODNOŚĆ LINII KABLOWYCH 15 kV WYKONANYCH W IZOLACJI POLIETYLENOWEJ

Streszczenie: Celem przeprowadzonych badań niezawodnościowych kabli 15 kV, wykonanych w izolacji polietylenowej, jest określenie ich podstawowych wielkości niezawodnościowych. W referacie przedstawiono analizę przyczyn powstawania awarii linii kablowych, sezonową zmienność uszkodzeń, modele niezawodnościowe czasów trwania awarii, przerw w zasilaniu energią elektryczną oraz mocy nie dostarczonej odbiorcom. Oszacowano również średnią intensywność awarii, średnią wartość nie dostarczonej energii elektrycznej oraz współczynnik zawodności linii kablowych.

Słowa kluczowe: modele niezawodnościowe, linie kablowe 15 kV

1. Wstęp

Linie kablowe 15 kV, wykonane w izolacji polietylenowej, są szeroko stosowane w budowie linii kablowych, szczególnie na obszarach miejskich. Izolacja polietylenowa ma bardzo dobre właściwości elektryczne, mało zależne od temperatury i częstotliwości płynącego prądu [2, 6, 9]. Przy produkcji kabli elektroenergetycznych stosuje się polietylen sieciowany nadtlenkami organicznymi lub silinami [2, 6]. Proces sieciowania polega na wytworzeniu dodatkowego wiązania pomiędzy atomami węgla lub na wbudowaniu grupy silinowej pomiędzy dwa łańcuchy polietylenu. Polepsza się w ten sposób wytrzymałość elektryczną izolacji kabla. Proces sieciowania nie wpływa jednak na długotrwałą wytrzymałość elektryczną kabli w takim stopniu jak początkowo sądzono [2, 6]. Podczas eksploatacji kabli w izolacji polietylenowych występują procesy drzewienia elektrycznego, wywołane wyładowaniami niezupełnymi, jak również drzewienia wodnego, powstającego pod wpływem wilgoci. Powstające

* Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki, al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce

kanaliki powodują, w końcowym rezultacie, utworzenie kanału przewodzącego, co jest równoznaczne z przebicciem izolacji i uszkodzeniem kabla.

W referacie przedstawiono wyniki badań niezawodnościowych linii kablowych, wykonanych w izolacji polietylenowej. Średnia długość badanych kabli, w okresie czteroletnich badań, w których zaobserwowano 382 awarie, wynosiła 365 km.

2. Analiza przyczyn powstawania awarii

Przyczyny powstawania awarii linii kablowych podzielono na następujące grupy:

- A) osłabienie izolacji,
- B) procesy starzeniowe,
- C) uszkodzenia mechaniczne,
- D) przepięcia łączeniowe i wyładowania atmosferyczne,
- E) wpływ wody, wilgoci,
- F) pozostałe i niewyjaśnione.

W tabeli 1 przedstawiono analizę przyczyn powstawania awarii linii kablowych 15 kV, wykonanych w izolacji polietylenowej. Uwzględniono tam podstawowe elementy linii tj. kable, mufy oraz głowice kablowe. Podano dla nich procentowe udziały przyczyn powstawania awarii wg oznaczeń przedstawionych wyżej.

Tabela 1. Procentowe udziały przyczyn powstawania awarii linii kablowych i ich elementów

Uszkodzony element	Przyczyny powstawania awarii						Razem
	A	B	C	D	E	F	
Kabel	30,1	24,6	18,6	4,7	1,1	1,3	80,4
Mufa	5,2	0,8	0	2,6	3,4	1,0	13,0
Głowica	2,1	0,8	0,2	2,1	0,6	0,8	6,6
Razem	37,4	26,2	18,8	9,4	5,1	3,1	100

Elementem linii kablowych najczęściej zawodnym jest kabel elektroenergetyczny (80,4%). Na pozostałe elementy przypada 13% na mufy kablowe i 6,6% na głowice.

Podstawowymi przyczynami powstawania awarii kabli jest osłabienie izolacji, procesy starzeniowe oraz uszkodzenia mechaniczne, powstające podczas wykonywania prac ziemnych, których udział procentowy wynosi aż 18,8%.

Dla pełniejszego przedstawienia wyników powyższej analizy, w tabeli 2 podano procentowe udziały awarii elementów linii kablowych w poszczególnych przyczynach awarii. Otrzymane wyniki badań uwzględniają zarówno udział poszczególnych przyczyn awarii w całkowitej ich liczności jak również udziały uszkodzonych elementów linii.

Z tabeli 2 wynika, że osłabienie izolacji, procesy starzeniowe oraz uszkodzenia mechaniczne są przyczynami występowania uszkodzeń, przede wszystkim, w kablach, natomiast wpływ wody i wilgoci ma duży wpływ na awarie muf kablowych.

Tabela 2. Procentowe udziały awarii elementów linii kablowych w poszczególnych przyczynach awarii

Uszkodzony element	Przyczyna awarii					
	A	B	C	D	E	F
Kabel	80,4	94,0	98,6	50,0	21,0	41,7
Mufa	14,0	3,0	0	27,8	68,4	33,3
Głowica	5,6	3,0	1,4	22,2	10,6	25,0

3. Sezonowa zmienność uszkodzeń

Częstość uszkodzeń linii kablowych w poszczególnych miesiącach przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Częstość awarii linii kablowych w poszczególnych miesiącach [%]

Miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
f_i	6,6	3,4	4,7	6,8	11,5	14,9	13,9	13,9	9,4	7,3	3,9	3,7

WzmóŜoną zawodność kabli obserwuje się w okresie od maja do września. Główną przyczyną uszkodzeń, w tym okresie, to osłabienie izolacji, przepięcia oraz uszkodzenie mechaniczne. Osłabienie izolacji wywołane jest zasysaniem wilgoci przez izolację kabla, po gwałtownym jej schłodzeniu. Występuje to głównie po ulewnych deszczach poprzedzonych upalnymi dniami [6]. Przepięcia są spowodowane głównie wyładowaniami atmosferycznymi a uszkodzenia mechaniczne pracami ziemnymi. Wszystkie te przyczyny kumulują się w okresie miesięcy letnich, wywołując wzmóŜoną zawodność kabli.

4. Czas trwania awarii

Częstość empiryczną $f_i(t_a)$ czasu trwania awarii t_a badanych linii kablowych przedstawiono w tabeli 4. W wyniku przeprowadzonej estymacji parametrycznej otrzymano wartość średnią z próby $m = E(t_a) = 25,4$ h oraz odchylenie standardowe $\sigma = 8,7$ h. ZałóŜono, że rozkład czasu trwania awarii jest rozkładem normalnym uciętym w punkcie $t_a = 0$. Weryfikację hipotezy o rozkładzie przeprowadzono za pomocą testów χ^2 Pearsona i λ Kołmogorowa. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ otrzymano następujące wyniki obliczeń: $\chi^2 = 18,648$; $\chi_\alpha^2 = 19,675$ oraz $\lambda = 0,762$; $\lambda = 1,358$. Na podstawie wykonanych obliczeń brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkład czasu trwania awarii linii kablowych 15 kV jest rozkładem normalnym uciętym w punkcie $t_a = 0$, o parametrach $m = 25,4$ h i $\sigma = 8,7$ h, którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa $f(t_a)$ opisana jest za pomocą następującego wzoru:

$$f(t_a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_a - m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

gdzie: m – wartość oczekiwana zmiennej losowej t_a , σ – odchylenie standardowej.

Wartość średnia czasu trwania awarii $\bar{t}_a = E(t_a) = m = 25,4$ h.

Tabela 4. Wartości empiryczne $f_i(t_a)$ funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu trwania awarii t_a linii kablowych 15 kV

t_a [h]	0÷3	3÷6	6÷9	9÷12	12÷15	15÷18	18÷21	21÷24	24÷27	27÷30
$f_i(t_a)$	0,010	0,005	0,024	0,031	0,063	0,092	0,079	0,099	0,131	0,139
t_a [h]	30÷33	33÷36	36÷39	39÷42	42÷45	45÷48	48÷51	51÷54	54÷57	57÷60
$f_i(t_a)$	0,128	0,097	0,078	0,008	0,005	0,005	0	0,003	0	0,003

5. Czas przerwy w zasilaniu

Czas przerwy w zasilaniu odbiorców t_p jest dużo mniejszy od czasu trwania awarii, ze względu na zastosowanie zamkniętych sieci kablowych [1, 3, 4, 7, 8, 9]. W tabeli 5 przedstawiono częstość empiryczną $f_i(t_p)$ czasu przerwy w zasilaniu.

Tabela 5. Wartości empiryczne $f_i(t_p)$ funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu przerwy w zasilaniu z linii kablowych 15 kV

t_p [h]	0,5÷1	1÷1,5	1,5÷2	2÷2,5	2,5÷3	3÷3,5	3,5÷4	4÷4,5	4,5÷5	5÷5,5	5,5÷6
$f_i(t_p)$	0,403	0,309	0,146	0,063	0,039	0,016	0,013	0,005	0,003	0	0,003

Postawiono hipotezę, że rozkład czasu przerwy w zasilaniu energią elektryczną jest rozkładem wykładniczym o parametrze $\lambda = 1/E(t_p) = 1,18$ 1/h.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu może być przedstawiona za pomocą zależności:

$$f(t_p) = \lambda \exp(-\lambda t_p) \quad (2)$$

gdzie: λ – parametr rozkładu wykładniczego.

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji hipotezy o rozkładzie, za pomocą testów χ^2 Pearsona i λ Kołmogorowa, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, otrzymano $\chi^2 = 10,005$; $\chi^2_\alpha = 11,070$ oraz $\lambda = 0,840$; $\lambda = 1,358$. Na podstawie otrzymanych wyników testów brak jest podstaw do odrzucenia postawionej hipotezy. Wartość średnia czasu przerwy w zasilaniu $E(t_p) = 0,85$ h.

6. Analiza mocy nie dostarczonej

Wartości częstości empirycznej mocy P_{nd} , nie dostarczonej podczas przerwy w zasilaniu, przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wartości empiryczne $f_i(P_{nd})$ funkcji gęstości prawdopodobieństwa mocy nie dostarczonej podczas przerwy w zasilaniu z linii kablowych 15 kV

P_{nd} [MW]	0÷0,2	0,2÷0,4	0,4÷0,6	0,6÷0,8	0,8÷1,0	1,0÷1,2	1,2÷1,4	1,4÷1,6
$f_i(P_{nd})$	0,228	0,178	0,150	0,078	0,083	0,036	0,058	0,050
P_{nd} [MW]	1,6÷1,8	1,8÷2,0	2,0÷2,2	2,2÷2,4	2,4÷2,6	2,6÷2,8	2,8÷3,0	
$f_i(P_{nd})$	0,019	0,042	0,006	0,014	0,019	0,017	0,022	

Przyjęto hipotezę, że moc nie dostarczoną P_{nd} opisać można za pomocą rozkładu wykładniczego o parametrze $\lambda = 1/E(P_{nd}) = 1,274$ 1/MW, określonego za pomocą zależności:

$$f(P_{nd}) = \lambda \exp(-\lambda P_{nd}) \quad (3)$$

Postawioną hipotezę sprawdzono za pomocą nieparametrycznych testów χ^2 Pearsona i λ Kołmogorowa. Otrzymano, dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$: $\chi^2 = 16,235$; $\chi^2_\alpha = 19,675$ oraz $\lambda = 0,895$; $\lambda_\alpha = 1,358$, co świadczy, że brak jest podstaw do odrzucenia postawionej hipotezy, o wykładniczym rozkładzie mocy nie dostarczonej, której wartość średnia $E(P_{nd}) = 0,785$ MW.

7. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań niezawodnościowych elektroenergetycznych linii kablowych 15 kV, wykonanych w izolacji polietylenowej, wykazują, że największy wpływ na zawodność kabli ma osłabienie izolacji wywołane procesami drzewienia elektrycznego i wodnego. W czasie miesięcy wiosennych i letnich, w których następuje intensywne wnikanie wilgoci do ziemi połączone ze zmianami temperatury izolacji kabli, występuje największa częstość uszkodzeń. Widać stąd wyraźny wpływ sezonowości na niezawodność linii kablowych 15 kV.

Średni czas przerwy w zasilaniu jest około trzydzieści razy mniejszy od czasu trwania awarii, którego wartość zbliżona jest do wartości czasu trwania linii kablowych innymi technologiami [1, 3, 5, 7, 8, 9].

Wyznaczona średnia intensywność awarii, $N_{sr} = 26,2$ 1/100 km·a, jest porównywalna ze średnimi intensywnościami innych linii kablowych [1, 3, 5, 7, 8, 9].

Wyznaczono także wartość średnią nie dostarczonej energii elektrycznej, która wynosi $E(\Delta A_{nd}) = 0,659$ MW·h/1 uszk. Wartość ta, wspólnie z określoną wartością średniej intensywności N_{sr} pozwala na określenie strat niezawodnościowych i optymalizację poziomu niezawodności zasilania odbiorcy [9].

Wartość spodziewana współczynnika zawodności linii, wyznaczona przy założeniu, że roczny czas pracy $T_r = 8760$ h, wynosi na 100 km linii: $E(q) = 20,81 \cdot 10^{-3}$.

Literatura

- [1] **Horak J., Popczyk J.:** *Eksploracja elektroenergetycznych linii rozdzielczych.* Warszawa, WNT 1985
- [2] **Kolbiński K., Słowikowski J.:** *Materiałoznawstwo elektrotechniczne.* Warszawa, WNT 1988
- [3] **Kowalski Z.:** *Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej.* Łódź, Wyd. P.Ł. 1992
- [4] **Kujaszczyk S. i in.:** *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze.* Warszawa, PWN 1994
- [5] **Popczyk J.:** *Modele probabilistyczne w sieciach elektroenergetycznych.* Warszawa, WNT 1991
- [6] **Słowikowski J.:** *Własności izolacji poliuretanowej i elementów przewodzących na izolacji w kablach energetycznych na średnie napięcie.* Wiad. Elektrot. 1986. R. 54, nr 19/20, s. 374–376
- [7] **Sozański J.:** *Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego.* Warszawa, WNT 1990
- [8] **Stępień J. C., Tytko J.:** *Modele niezawodności i odnowy linii elektroenergetycznych średniego napięcia.* VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce”, Gdańsk – Jurata 1995, tom III, s. 223–230
- [9] **Stępień J. C.:** *Analiza niezawodności eksploatacyjnej linii kablowych 15 kV.* VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce”, Gdańsk – Jurata 1997, tom II, s. 243–250

POLYETHYLENE INSULATION 15 kV UNDERGROUND LINES RELIABILITY

Polyethylene insulation underground lines reliability tests were presented in this paper. Because of its high deceptiveness (what is result of ageing processes) these days underground lines producing serious operating problems. These underground lines elementary reliability values qualifying was the purpose of reliability tests presented in this paper.