



Eugeniusz WASILENKO

em. prof. Politechniki Gdańskiej

Tradycja czy postęp w budowie kabli o izolacji (XLPE) na bardzo wysokie napięcia przemiennie

Streszczenie. Stwierdzono nieprzydatność modyfikowanego modelu potęgowego do wyznaczania grubości izolacji w kablach najwyższych napięć, na rzecz modelu wykładniczego, z uwzględnieniem napięcia progowego i konwencji naprężenia maksymalnego.

Abstract. (Tradition or progress in construction of AC extra high voltage cables with XLPE insulation). The modified inverse power life model has been proved to be useless in course of design of the XLPE insulation thickness for EHV cables, in contrary to the exponential model with its appropriate threshold voltage, and the maximum field notation accepted.

Słowa kluczowe: kable EWN, grubość izolacji XLPE, napięcie progowe, model degradacji.

Keywords: EHV cables, the XLPE insulation thickness, threshold voltage, model of degradation.

Wstęp

Kable najwyższych napięć (EWN) o izolacji z polietylenu sieciowanego (XLPE) przejmują obecnie zadania linii zasilających duże aglomeracje miejsko-przemysłowe, wypierając znacznie tańsze linie napowietrzne poza granice aglomeracji.

Liderem okazała się energetyka tokijska (Tokyo Electric Power Company Ltd, TEPCo), która od kilkunastu lat prowadzi szerokie badania w zakresie konstrukcji kabli i osprzętu na napięcia 275 kV i 550 kV. Metropolię Tokijską, o powierzchni 2180 km², zamieszkuje około 12,2 miliona stałych mieszkańców, a z sąsiednimi prefekturami, około 20 milionów (stan na 2001 rok). Dane te wskazują na skalę problemu, już chyba światowego.

Na ostatniej sesji Jicable'03 zgłoszono szereg referatów na temat realizacji lub bliskiego uruchomienia linii kablowych 400 kV o izolacji XLPE, na obszarze Los Angeles, Sydney, Madrytu, w Korei Płd. wspólnie z Holandią, na Jutlandii w Danii, we Francji, w Szwajcarii i w Niemczech (tylko osprzęt), w Japonii linie na 550 kV napięcia przemiennego i stałego!

Hasło "kable 400 kV" stało się bardzo nośne w tematyce Jicable'03. Wszyscy starają się zdążyć na krojenie tortu. Można oczekiwać, że ten światowy trend pobudzi do nowych badań również środowisko krajowe.

Przemysł kablowy okazał się dynamiczną i elastyczną branżą, która potrafi dostosować swoje wyroby do wymogów użytkowników, nawet nie dysponując aktualną wiedzą i doświadczeniem niezbędnym do realizacji takich zadań.

Bo chociaż znane są skutki różnych narażeń działających na izolację polimerową kabla i znane są charakterystyki tej izolacji, poznawane coraz dokładniej, to jednak wciąż nie ma analitycznego przełożenia zbioru tych cech i narażeń na czas pracy izolacji. Wciąż podstawą do projektowania kabla, w szczególności określania grubości izolacji, jest specyfikacja wewnętrzna, oparta na własnym, długotętnym, doświadczeniu. Tak jest dotychczas [1, 2].

Nowy trend rozwoju linii kablowych najwyższych napięć stawia nowe cele konstruktorom tych kabli, których odcinek fabrykacyjny, już dzisiaj, ma długość około 2500 m, a każde jego przedłużenie oznacza obniżenie liczby muf zainstalowanych w linii, a więc wzrost niezawodności. W tym aspekcie obniżenie grubości izolacji ma istotne znaczenie, ze wszystkimi tego konsekwencjami.

Elektrostatyczny model kabla

Kable wysokich napięć, zwykle jednofazowe, są modelowane elektrostatycznie układem dwóch walców współosiowych, z których wewnętrzny, o promieniu r , reprezentuje żyłę kabla, a zewnętrzny, o promieniu R , jego ekran lub żyłę powrotną. Grubość izolacji wynosi $G=R-r$.

W realizacji praktycznej, na żyłę znajduje się cienki (1-3 mm) polimerowy ekran przewodzący i drugi, zwykle cieńszy, na powierzchni izolacji; ich zadaniem jest eliminacja szczelin powietrznych na styku żyła-izolacja-ekran zewnętrzny, a tym samym wytłumienie wyładowań niezupełnych. Ekran o grubości g na żyłę, podnosi obliczeniowy promień żyły o tę grubość, ale tylko w obliczeniach elektrostatycznych. Po doprowadzeniu napięcia U naprężenie na żyłę E_r (teraz $r+g$) i na powierzchni zewnętrznej E_R wyrazi się odpowiednio:

$$(1) \quad E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r}}$$

$$(2) \quad E_R = \frac{U}{R \cdot \ln \frac{R}{r}}$$

Równania (1) i (2) wiążą ze sobą trzy główne parametry kabla: promień żyły r , czyli moc przenoszoną przy napięciu roboczym U , grubość izolacji $G=R-r$, i naprężenie na żyłę E_r . Najmniejsza (optymalna) wartość E_r wypada dla $\ln(R/r)=1$ i wówczas $E_r = U/r$, a $E_R = U/R$, przy optymalnej grubości:

$$(3) \quad G_{opt} = 1,718 \cdot r$$

Jeżeli $r \neq r_{opt}$ i $R=(G+r)$, to wówczas otrzymuje się grubość $G \neq G_{opt}$, zależną od dowolnej wartości E_r .

$$(4) \quad G(E_r) = r \left(\exp\left(\frac{U}{rE_r}\right) - 1 \right)$$

Jest to pożyteczna zależność przy projektowaniu izolacji.

Obok konwencji naprężenia maksymalnego stosuje się również inną, mianowicie naprężenia średniego E :

$$(5) \quad E = U / G$$

Napężenie średnie jest wielkością abstrakcyjną, charakteryzującą umowne pole jednostajne, zamiast rzeczywistego, zależną od grubości materiału, o czym należy pamiętać. Ta cecha E może prowokować (i prowokuje) do popełniania błędów, polegających na przenoszeniu wartości naprężeń przebicia uzyskanych na cienkich modelach (o zawyżonych E), na pełnowymiarowe obiekty, które w rzeczywistości charakteryzują się mniejszym ilorazem U/G . Konwencja E jest prosta w stosowaniu i ma swoich zwolenników.

Napięcie progowe

W procesie degradacji izolacji polimerowej czas t procesu jest funkcją temperatury T i napięcia U (lub E) i wydłuża się przy obniżaniu wartości każdego z tych czynników, na przykład, po osiągnięciu temperatury zeszklenia polimeru - czas $t \rightarrow \infty$. Podobnie można również uzasadnić i wyznaczyć taką wartość napięcia, przy której zanika jego wpływ na proces starzenia [3].

W poszukiwaniu wiarygodnego modelu starzenia autor opracował wzór empiryczny pozwalający obliczyć napięcie progowe U_{prg} układu izolacyjnego, w funkcji grubości G izolacji [4].

Napięcie progowe występuje również w modelu wykładniczym degradacji polimerów, proponowanym przez autora [3].

Wzór, pierwotnie dwuczłonowy, został zweryfikowany i doprowadzony do praktycznej postaci:

$$(6) \quad U_{prg} = 6,62 \cdot G^{0,82}$$

Wzór obowiązuje dla XLPE w temperaturze otoczenia i w przedziale $40 > G > 0$ [mm]. Wzór zostanie wykorzystany w dalszej części niniejszej pracy.

Postulaty izolacji głównej

Z pozycji niezawodności kabla grubość izolacji jest ważnym parametrem, zależnym również od jakości polimeru i jest kompromisem w długim łańcuchu przyczyn i skutków występujących w technologii, produkcji i długoletniej eksploatacji kabla. Ważnym czynnikiem jest bilans kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Cieńsza izolacja na żyłę zmniejsza również ilość niezbędnych materiałów osłonowych, zmniejsza zewnętrzną średnicę kabla i jego masę, co może ułatwić produkcję i transport dłuższych odcinków, ale podnosi napężenie na żyłę, a to przyspiesza proces degradacji polimeru, więc może wymagać zastosowania specjalnego, droższego polietylenu.

Stosowane polietyleny są kompozycją mieszaniny łańcuchów molekularnych o różnej długości i różnych dodatków, niezbędnych do sieciowania, dodatków uszlachetniających, oraz nieuniknionych zanieczyszczeń. Procesy wytłaczania i sieciowania zmieniają morfologię i stan fizyczny polimeru, w tym również jego własności elektryczne. Otrzymanie wiarygodnych, powtarzalnych i porównywalnych wyników badań jest możliwe tylko na homogenizowanym materiale doświadczalnym, uzyskiwanym drogą odpowiedniego wygrzewania próbek przed badaniem [3,5]. Taki zabieg pociąga za sobą dodatkowe koszty, ale daje pewność, że wyniki badań nie będą zaprzepaszczone, jak w przypadku znanym z literatury [6].

Tradycyjna metoda obliczeń grubości izolacji w kablach średnich napięć polega na wyborze jednej z dwóch konwencji natężenia pola (czasem obu) i stosując własne lub ogólnodostępne, zalecane wartości naprężeń

roboczych otrzymuje się grubość izolacji G . Zwykle są to przypadki $G \neq G_{opt}$, co nie stanowi zagrożenia, bo wybrane napężenia nie są zbyt wysokie.

Wyniki takich obliczeń dają tylko pośrednio pogląd na czas życia wykonanych kabli, zgodnie z regułą: grubsza izolacja - dłuższe życie. Weryfikacja trafności obliczeń może nastąpić po próbach przyspieszonego starzenia odcinków kabli, zwykle nowej serii. Mimo częstych publikacji, wyniki są zwykle adresowane do określonego zleceniodawcy badań.

Eksperyment z napięciem progowym

Eksperyment polega na obliczeniu ze wzoru (6) napięcia progowego na podstawie katalogowej grubości G kabli produkcji BFK SA [2] i porównanie otrzymanego wyniku z napięciem pracy U_0 danego kabla. Napięcie progowe U_{prg} jest napięciem wirtualnym, o wartości niezbędnej do powstania w izolacji kabla kanału gazowego, typu wyładowania niezupełnego, o średnicy około 0,005 mm, który jest prekursorem wyładowania zupełnego. Jeżeli napięcie progowe jest większe od napięcia pracy U_0 , to prawdopodobieństwo powstania kanału jest prawie zerowe, natomiast przy $U_0 > U_{prg}$ kanał może doprowadzić do przebicia izolacji. Wyniki obliczeń są zestawione w Tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki eksperymentu z napięciem progowym dla kabli z katalogu BFK SA, [2]

U_{max} kV	U_0 kV	G mm	U_{prg} kV	Ocena
47	27	9	47	+
69	40	12	54	+
115	66	17	67	+
138	80	18,5	72	-+
161	93	24,5	91	+-
230	133	26	96	-
400	231	30,5	109	-

Analiza otrzymanych wyników wskazuje na długi okres pracy izolacji z oceną (+), krótszy dla oceny (-), natomiast dwa ostatnie kable na 231 kV i 400 kV z ocenami (-) należy wyłączyć z tej klasyfikacji, ponieważ podlegają innej metodzie obliczeniowej. Tabela 1 ujawniła ten podział. Zastosowanie metody napięcia progowego do kabla na napięcie 400/231 kV wymagałoby bezsensownego pogrubienia izolacji do 85 mm, ażeby uzyskać napięcie progowe $U_{prg} = 253 \text{ kV} > 231 \text{ kV}$. Należy zwrócić uwagę, że ocena na podstawie napięcia progowego odbywa się bez przywoływania wielkości naprężeń stosowanych przy projektowaniu badanych kabli.

Kabel programowany

Jeżeli izolacja kabla ma pracować przy napięciu roboczym U_0 , w temperaturze T_r , przy obecności narażeń zewnętrznych N_i , przez określony czas t , to taki kabel powinno się nazywać programowanym (albo celowym), a można go zaprojektować w oparciu o tak zwany model życia izolacji, albo model degradacji izolacji:

$$(7) \quad t = f(U_0, T_r, N_i)$$

W literaturze spotyka się mnóstwo propozycji analitycznego opisu typu (7), ale w praktyce utrzymują się dwa, w uproszczonej formie, bez narażeń zewnętrznych N_i .

Model zwany potęgowym, często pisany w skróconej postaci: $tU^n = \text{const}$, zamiast pełnej:

$$(8) \quad t = N \cdot U^n$$

gdzie: N jest określoną wartością związaną z n $N(n)$, i zastępuje nieokreślony $const$. Obydwa parametry zależą od temperatury.

Model potęgowy został wprowadzony do badań izolacji papierowo - olejowej kabli w 1926 roku, jako adaptacja z obszaru badań zmęzeniowych układów mechanicznych.

Drugi model, zwany wykładniczym, ma postać:

$$(9) \quad t = B \cdot \exp(-b \cdot U)$$

Parametry B i b wykazują podobne relacje jak i w poprzednim modelu. Model pochodzi z 1942 roku i był początkowo zastosowany do opisu starzenia izolacji maszyn elektrycznych. W porównaniu do potęgowego, model wykładniczy ma wiele zalet, szczególnie w rozbudowanej postaci pozwala wyznaczyć, między innymi, napięcie progowe badanego układu izolacyjnego, oraz niektóre parametry fizyczne polietylenu [3,4].

Zakładając, że istnieje kabel fizyczny EWN, spełniający warunki programowania, to weryfikacja jego parametrów, szczególnie grubości izolacji G , w pełnej próbie starzeniowej byłaby praktycznie bardzo trudna, kosztowna i nudna. Wydaje się, że rozwiązaniem mogą tu być metody symulacyjne, uzupełnione wycinkowymi badaniami syntetycznymi prototypu.

Metoda obliczeń G w kablach EWN

Wydaje się, że metoda obliczania grubości izolacji w kablach na najwyższe napięcia, stosowana w Japonii od kilkunastu lat, jest podobna do metod stosowanych w paleontologii, która na podstawie kilku fragmentów może odtworzyć oryginał. Analogicznie, jeżeli izolacja elektryczna uległa degradacji (przebiću) w określonych warunkach U_r , T_r , w czasie t_r , to jakie były warunki początkowe tej izolacji U_x przy znanych T_o i t_o . Oczywiście grubość G izolacji nie uległa zmianie, a zadanie jest z dziedziny krzywej życia izolacji, o odwróconym kierunku. Interesujący parametr G można określić z zależności (5), tym bardziej, że użytkownicy tej metody są zwolennikami naprężenia średniego [7, 8, 9,10]. Dla G otrzymuje się zależność:

$$(10) \quad G = U_{p1} / E_L$$

gdzie: U_{p1} - napięcie probiercze 1-godzinne (U_x), E_L - średnia wartość naprężenia "projektowego", $E_L = 40$ kV/mm (lub 30 kV/mm)

Napięcie U_{p1} oblicza się z wzoru:

$$(11) \quad U_{p1} = (U_m / \sqrt{3}) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

gdzie: U_m - maksymalne napięcie liniowe kabla, K_1 , K_2 , K_3 - współczynniki korygujące,

K_1 - nazywa się współczynnikiem degradacji izolacji i wyprowadza się go z równania stanów, w modelu potęgowym krzywej życia (8), otrzymując:

$$(12) \quad U_1 = K_1 \cdot U_r$$

gdzie: $K_1 = \sqrt[n]{t_2/t_1}$, $t_1=1$ godz., $t_2=30$ lat (262800 godz.) standardowy czas pracy izolacji, n - wybrany(?) wykładnik potęgowy krzywej życia, U_r - napięcie robocze

Ponieważ równanie stanów jest ważne dla $T=const$, a temperatury T_r i T_1 różnią się znacznie, należy

wprowadzić współczynnik K_2 korygujący wpływ temperatury na wytrzymałość długotrwałą izolacji. Ten wpływ określa się doświadczalnie jako stosunek doraźnych napięć przebięcia modeli kabli w różnych temperaturach, a wartość K_2 wynosi 1,05 do 1,25. Współczynnik K_3 ma wartość 1,1 i stanowi niewielki margines bezpieczeństwa.

Współczynnik K_1 ma największą wartość, silnie zależną od wykładnika n , wybieranego przez Autorów według nieujawnionych reguł, decydującego o wyniku. Na przykład, kabel na 275 kV był liczony przy $n=9$ [8], natomiast kabel na 550 kV, przy $n=15$ [9], co pozostaje bez komentarza.

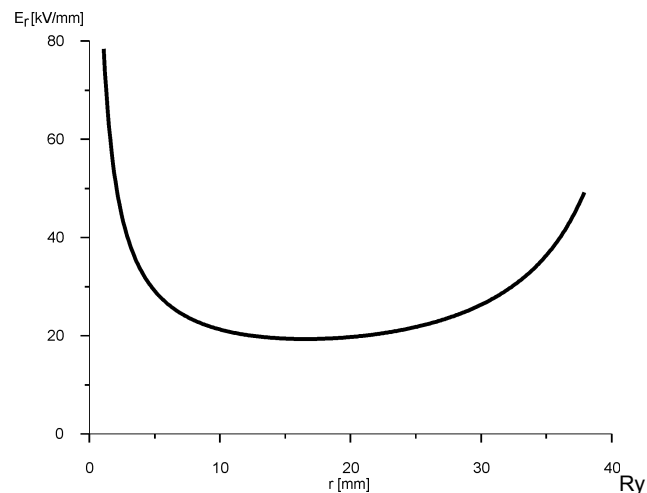
Tabela 2 opracowana przez autora (EW) ilustruje wpływ wykładnika potęgowego n na wielkość niektórych parametrów projektowanego kabla na 550 kV. Wnioski płynące z tabeli są raczej bulwersujące. Mimo skrupulatnej konstrukcji wzorów, obliczona grubość izolacji G musi budzić wątpliwości, właśnie ze względu na wpływ wykładnika n . A jednak kabel został zbudowany ($G=25$ mm) i poddany próbom.

Tabela 2. Parametry kabla 550 kV przy $K_2 = 1,13$, $K_3 = 1,1$ i 20°C (według autora EW)

n	K ₁	U _{p1}	G	E=U ₀ /G
		kV		mm
6	8,00	3182	80	4
9	4,00	1591	40	8
15	2,30	915	23	14
20	1,87	744	19	17

Granice manewru dla G

Rysunek 1 przedstawia przebieg funkcji $E_r = f(R/r)$ (1) zaprogramowanej dla kabla 550 kV, przy $r=20$ mm, $G=25$ mm, $U_0 = 320$ kV. Jak widać punkt ekstremalny E_r leży w dość płaskim obszarze, w którym kilkunastoprocentowy wzrost E może odbywać się w szerokim przedziale zmiany r , przy $G=const$, na przykład 1...3, co dla przekroju żyły oznacza przedział 1...9.



Rys. 1. Zakres zmian promienia żyły r w zależności od E_r

Podobnie, zachowując stały promień żyły r , można obniżyć grubość G poniżej wartości optymalnej, w granicach dopuszczalnej tolerancji E_r . To wyjaśnia fakt, dlaczego kable o różnej geometrii przekroju, zachowują podobną żywotność.

Badania udarowe izolacji kabli

Omawiane powyżej metody obliczania grubości G izolacji odnosiły się do napięć roboczych, przemiennych, na których skoncentrował się autor, całkiem świadomie.

Wytrzymałość udarowa jest również ważnym składnikiem metody obliczania G . Procedura obliczania jest

identyczna jak przy napięciu przemiennym. Stosuje się te same postaci wzorów (10) (11), podobnie obliczone współczynniki K ; w K_3 nie występuje wykładnik n . Zamiast U_0 wstawia się znormalizowaną wartość BIL (Basic Impulse Level). Wytrzymałość projektowa E_L dla uderzeń ma dwukrotnie większą wartość. Metoda uderowa jest podstawą w projektowaniu kabli o izolacji papierowo-olejowej.

Wnioski

1. Z satysfakcją należy odnotować światowy wzrost zainteresowania kablami najwyższych napięć, a szczególnie budową długich linii kablowych, co powinno wpłynąć korzystnie również na kondycję kabli średnich napięć.
2. Nawet skromny zakres niniejszego przeglądu sugeruje, że nowoczesne metody obliczeniowe parametrów kabli powinny korzystać z metod symulacyjnych, opartych na krzywej życia izolacji polimerowej.
3. Na podstawie dotychczasowych badań można stwierdzić małą przydatność modelu potęgowego do oceny izolacji, zwłaszcza przy wykorzystaniu tylko wykładnika potęgowego n .
4. Przedstawiony eksperyment z napięciem progowym, potwierdza wcześniejszy wniosek autora, że model wykładniczy jest dobrym kandydatem do opisu krzywej życia izolacji.

Autor dziękuje Panu dr inż. M. Oleszowi za pomoc w edycji tekstu.

LITERATURA

- [1] Midoz J., Working Gradient of HV and EHV Cables with Extruded Insulation and Its Effect, *ELECTRA* 1991 n.139, 63-84
- [2] Masztak R., Staworko H., Konstrukcje, parametry techniczno-eksploatacyjne kabli i osprzętu produkcji BFK SA

- do linii kablowych wysokich napięć, *Mat. VI Sympozjum EUI'97*. Zakopane 1997, 215-23, AGH Kraków
- [3] Wasilenko E., O krzywej życia polimerowej izolacji elektrycznej. *Mat. VIII Sympozjum EUI'01*, Zakopane, 2001, 445-450, AGH Kraków
 - [4] Wasilenko E., Ocena wartości napięcia progowego polimerowej izolacji kablowej na podstawie badań symulowanego kanału przebicia. *Mat. VI Sympozjum EUI'97*, Zakopane, 1997, 427-432, AGH Kraków
 - [5] Dima A., Katz C., Eager G. S., Characterization of the degree of cable ageing by a dual polarity breakdown test method, *Jicable 87*, A 9.5 451-456, Paris-Versailles, France
 - [6] Walton M. D., Bernstein B. S., Smith J. T., Thue W. A., Groeger J. H., Accelerated Cable Life Testing of EPR-Insulated Medium Voltage Distribution Cables, *IEEE Trans. PD* 9 (1994), n.3, 1195-1208
 - [7] Tanaka T., Sekii Y., Satoh H., Yamaguchi M., Development of Prefabricated Type Straight Through Joint for 275 kV, *Trans. & Distr. Conf. Dallas Tx. Sept. 1991 Conf. Rec.* 995-1001
 - [8] Kaneko T., Ohno H., Toya A., Goto T., Takehana H., Nishinoma M., Ishikawa I., Investigation on Characteristics of 275 kV Cable Removed from Actual Service Line, *Conf. Rec. IEEE Pittsburg*, June 1994, 178 - 181.
 - [9] Kubota T., Takahashi Y., Sakuma S., Watanabe M., Kanuoka M., Yamanouchi H., Development of 500 kV Cables and Accessories, *IEEE Trans. on PD* 9(1994) n.4, 141-149
 - [10] Ishibashi A., Kawai T., Nakagawa S., Muto M., Katakai S., Hirotsu K., Nakatsuka T., A Study of Treeing Phenomena in the Development of Insulation for 500 kV XLPE Cables, *IEEE Trans. on DEI* 5(1998), n.5, 695-706

Autor: prof. dr hab. inż. Eugeniusz Wasilenko, em. prof. Politechniki Gdańskiej, ul. Dunikowskiego 50/8, 80-526 Gdańsk