



Eugeniusz Wasilenko*

OCENA WARTOŚCI NAPIĘCIA PROGOWEGO POLIMEROWEJ IZOLACJI KABLOWEJ NA PODSTAWIE BADAŃ SYMULOWANEGO KANAŁU PRZEBICIA

Streszczenie: Wyjaśniono znaczenie wartości napięcia progowego U_0 dla wyboru właściwej strategii napięć (naprężeń) roboczych U_r w polimerowej izolacji kabli i wskazano na trudności w ocenie tej wartości dla kabli najwyższych napięć. Na podstawie wyników badań modelu kanału przebicia w izolacji polimerowej, opracowano zależność analityczną, która, przy pewnych założeniach, pozwala obliczyć wartość napięcia progowego dla izolacji polietylenowej, o grubości od 0,02 mm do 35 mm. Obliczone wartości U_0 częściowo zweryfikowano wynikami badań starzeniowych. Przewiduje się, że po zakończeniu pracy, można będzie obliczać żywotność kabli najwyższych napięć o izolacji polietylenowej, bez konieczności przeprowadzania kosztownych prób starzeniowych.

Słowa kluczowe: kable wysokiego napięcia, izolacja polimerowa, napięcie progowe, degradacja, strategia wyboru napięć roboczych, czas życia izolacji

1. Wstęp

Największa wartość napięcia roboczego U_r , przy której czas do przebicia układu izolacyjnego dąży do nieskończoności, nazywa się napięciem progowym U_0 tego układu, znajdującego się w określonym środowisku. Znajomość U_0 , może być pożyteczna ze względów poznawczych jak też niezbędna przy wyborze strategii długotrwałych napięć roboczych U_r (lub naprężeń E_r , na przykład, dla polimerowej izolacji kablowej lub kondensatorowej.

* Adres Autora: ul. K. Dunikowskiego 5D m8, 80-526 Gdańsk

Jeżeli przyjąć najprostszą, zachowawczą, strategię określoną warunkiem:

$$U_r \leq U_0 \quad \text{lub} \quad E_r < E_0, \quad (1)$$

to skutki takiego wyboru będą dwojakie: „nieskończenie” długi czas pracy (z definicji), ale przy raczej umiarkowanych wartościach naprężeń roboczych, rzędu 2...6 MV/m, stosowanych dla izolacji polimerowej kabli średnich napięć i nie przystających do wymogów nowoczesnych kabli na najwyższe napięcia [3]. Drugi wybór, który można nazwać strategią progresywną, wynika z nierówności:

$$U_r > U_0 \quad \text{lub} \quad E_r > E_0, \quad (2)$$

Stosowanie naprężeń roboczych większych od progowych daje wymierne korzyści techniczne i ekonomiczne, ale jednocześnie skraca czas pracy układu izolacyjnego do wartości t_0 , zależnej od wybranego naprężenia. Czas ten można obliczyć za pomocą analitycznego modelu krzywej życia na przykład, wg [7], przedstawionego poniżej:

$$t = \frac{\left(\frac{h}{kT}\right) \exp[(2W - kT - \alpha U)]/kT}{\exp[(W - kT)/kT] - \exp[(W - \alpha U)/kT]} \quad (3)$$

gdzie: h – stała Plancka, k – stała Boltzmanna, T – temperatura, W – energia aktywacji (eV), α – współczynnik entropii [As], U – napięcie starzenia [kV]. Z parametrów modelu można wyznaczyć napięcie progowe U_0 badanego układu. Dla $\alpha U = kT$ mianownik w (3) zeruje się, a czas dąży do nieskończoności przy napięciu progowym $U_0 = kT/\alpha$, natomiast dla $\alpha U \gg kT$ równanie (3) upraszcza się do postaci:

$$t = \left(\frac{h}{kT}\right) \exp[(W - \alpha U)/kT] \quad (4)$$

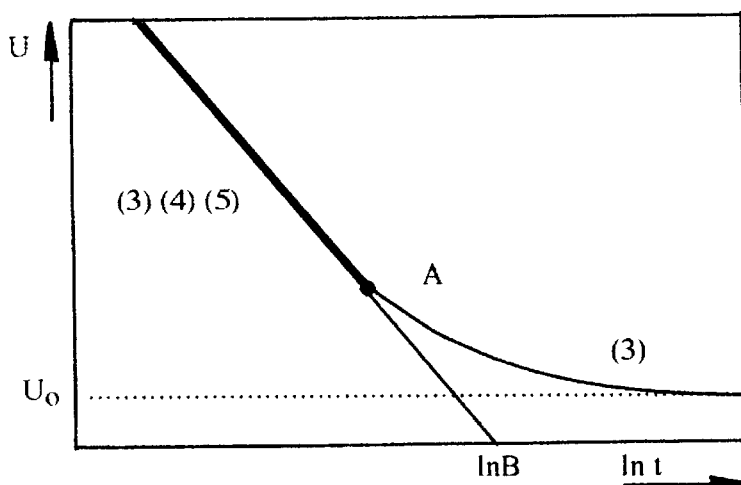
którą można doprowadzić do znanego, wykładniczego, modelu starzenia:

$$t = B \exp(-bU) \quad (5)$$

Wartości parametrów W i α wyznacza się na podstawie wyników prób długotrwałych układów izolacyjnych i korzystając z (5), otrzymuje się wielkości podstawowe dla (3) i (4):

$$W = \left[\ln B - \ln \left(\frac{h}{kT}\right) \right] kT, \quad \alpha = bkT, \quad U_0 = 1/b \quad (6)$$

Czas badań będzie tym dłuższy, im większa jest grubość izolacji układu i im większe będzie przybliżenie napięcia probierczego do spodziewanej wartości U_0 . Próby starzeniowe izolacji kabli na najwyższe napięcia, o grubości izolacji 20...30 mm, nawet przy ograniczeniu przedziału napięciowego do prostoliniowej części charakterystyki, mogłyby trwać kilkanaście lat, co przekreśla realność takich badań, nie wspominając o ich kosztach. Rysunek 1 przedstawia przebieg równania (3) w skali półlogarytmicznej,



Rys. 1. Przebieg charakterystyk $U(t)$ według równań (3) (4) (5). A - początek wspólnej części prostoliniowej

z zaznaczeniem części prostoliniowej, opisywanej równaniem (4) lub (5), ważnej ze względu na określenie parametrów W i α .

Alternatywnym rozwiązaniem może być wyznaczenie parametrów W i α (czyli W i U_0) dla modeli izolacji o niewielkiej grubości i zastosowanie ekstrapolacji uzyskanych wyników do wartości odpowiadających rzeczywistemu układowi izolacyjnemu. Jednak taka ekstrapolacja U_0 , daje prawidłowe wyniki tylko w ograniczonym przedziale. W niniejszej pracy zaproponowano empiryczną metodę obliczania wartości U_0 na podstawie wyników badań wytrzymałości doraźnej prostego modelu, symulującego kanał przebicia w izolacji polietylenowej. Jest to nowe podejście, z szansą na wyjaśnienie niektórych szczegółów mechanizmu długotrwałego przebicia polimerów.

2. Symulacja kanału przebicia

Z obszernych badań starzeniowych, prowadzonych przez autora, na foliach polimerowych, w różnych układach elektrod wynika, że przy ograniczeniu energii zwarciowej zespołu probierczego, kanał przebicia wykazuje pewną wytrzymałość elektryczną, zwykle większą od wytrzymałości czystego odstępu powietrznego, równego grubości G przebitego polimeru. Oznacza to, że ścianka kanału może pułapkować ładunek przestrzenny, który podnosi napięcie przeskoiku kanału, tym więcej, im mniejsza jest średnica kanału.

Na tej postawie można wysunąć tezę, że napięcie U_{pk} przeskoiku kanału identyfikuje się z napięciem progowym U_0 . Kluczową do rozwiązania problemu zależność: $U_{pk} = U_0 = f(G, d)$ otrzymano z wyników badań próbek XLPE o różnych grubościach G , od 1,5 mm do 7 mm, z cylindrycznymi kanałami o średnicy d od 0,2 mm do 1,3 mm. Pomiary wykonano przy napięciu przemiennym, podnoszonym z prędko-

ścią 1 kV/s, w powietrzu atmosferycznym o wilgotności względnej 25% i temperaturze (20...22)°C. Każdą próbkę badano jednorazowo. Stosowano elektrody stalowe, o średnicy 3 mm, zaokrąglone. Średnie wartości U_{pk} , uzyskane z 15...20 pomiarów, leżały w przedziale malejącym ze wzrostem G do około 3% i rosnącym do około 10%, przy malejącej średnicy kanału d . Otrzymana zależność:

$$U_0 = 2,146d^{-m}G^{0,66} \quad (7)$$

$$\text{gdzie: } m = 0,213 + 0,03 \ln G \quad (8)$$

obowiązuje, orientacyjnie, dla przedziału: $0,02 \text{ mm} \leq G \leq 35 \text{ mm}$. O ile grubość we wzorze (7) manifestuje się w sposób zrozumiały, to wybór średnicy d kanału symulującego wytrzymałość długotrwałą układu musi budzić wątpliwości, wobec braku ewidentnych kryteriów, tym bardziej, że czynnik d^{-m} wpływa silnie na wartość U_0 , szczególnie przy większych grubościach izolacji. przykład, dla $G = 25 \text{ mm}$ i „ d ” w przedziale $0,0001 \text{ mm} < d < 0,1 \text{ mm}$ otrzymuje się: $312 \text{ kV} < U_0 < 37 \text{ kV}$. O wyborze U_0 muszą więc decydować własności fizyczne kanałów charakterystyczne dla ich średnicy.

W pracy [4] stwierdzono, że rozwijające się w polietylenie boczne kanały drzewienia elektrycznego, o średnicy około 0,001 mm, nie prowadzą do zwarcia, mimo widocznego połączenia obu elektrod. Niezbędny do wystąpienia zwarcia wzrost przewodności kanału następuje, gdy jego średnica wzrośnie do około 0,01 mm.

Podobne wnioski otrzymano w pracy [6], w której badano wytrzymałość elektryczną wzdłuż powietrznej warstwy granicznej między dwoma polimerami, ścisłymi prostopadle do kierunku pola elektrycznego. Przy grubości warstwy powietrznej powyżej 0,01 mm wytrzymałość doraźna układu gwałtownie maleje. Ponadto wykryto istotne zjawisko, że przy rosnących dociskach cieńsze warstwy graniczne wykazują charakterystykę napięciowo-czasową, porównywalną z charakterystyką pełnego polimeru. Rozwijający się w cienkiej warstwie gazowej kanał, niekiedy „nurkuje” do wnętrza polietylenu, znajdując tam łatwiejsze warunki dalszego rozwoju.

Wytrzymałość długotrwałą warstwy granicznej można opisać wzorem (4), w którym wielkość docisku występuje jako dodatkowy parametr [7].

Z powyższych rozważań wynika, że w polietylenowej izolacji kablowej mogą powstawać i utrzymywać się cienkie kanały gazowe, o wytrzymałości długotrwałej znacznie przekraczającej naprężenie robocze kabla. W tym stanie kanały stanowią jedynie potencjalne zagrożenie dla izolacji, aż do momentu, kiedy wskutek długotrwałej degradacji, średnica kanału osiągnie wartość krytyczną, zbliżoną do 0,01 mm.

Mechanizm powstawania kanałów wydłużonych, a tym bardziej skrośnych, przy napięciu roboczym nie jest w pełni zrozumiały. Prawdopodobnie ważnym czynnikiem pobudzającym są przepięcia, obecność niejednorodności w izolacji, lub specyficzne warunki starzenia ciepłego.

Pojedyńcze skrośne kanały, wytrzymujące długotrwałe napięcie wyższe od roboczego, wykryto niedawno w izolacji kabli, po 15 latach eksploatacji przy napięciu 15 kV [2].

3. Weryfikacja modelu kanału

Tabela 1 przedstawia porównanie wartości napięć progowych U_0 określonych na podstawie modelu życia izolacji (4) lub (5) i wg bieżącej propozycji (7), przy założeniu $d = 0,01$ mm. Z cytowanych materiałów źródłowych wykorzystano jedynie wyniki badań starzeniowych kabli o izolacji XLPE, stosując własny model degradacji (4). W pozycji (3), podano w nawiasie napięcie progowe, wg modelu Autora pracy [5]. Pozycja (5) jest przykładem wykorzystania modelu starzeniowego (4) do oceny żywotności projektowanego kabla na napięcie 550/318 kV [3].

Tabela 1. Porównanie wartości napięć progowych, określonych dwiema, niezależnymi metodami

Lp.	Materiał	grubość mm	$U_0 = 1/b$ kV	$U_0 = f(G)$ kV	źródło
1.	PE	0,04	0,43 0,47 0,57	0,44	własne
2.	PE	0,18	1,39 1,30 1,36	1,46	własne
3.	XLPE	1,50	7,19 (11,4)	7,90	[5]
4.	XLPE	4,50	17,00 22,00	19,00	[1]
5.	XLPE	25,00	70,00	75,00	[3]

4. Wnioski

1. Opracowany wzór (7) pozwala obliczyć napięcie progowe izolacji polimerowej, w szerokim przedziale grubości, a w połączeniu z modelem degradacji izolacji (4) wyznaczyć czas życia bez konieczności prowadzenia długotrwałych i kosztownych prób starzeniowych.
2. Porównanie wartości napięć progowych obliczonych wzorem (7) i wyznaczonych z parametrów modelu degradacji (4), przedstawione w tabeli 1. zachęca do kontynuacji tematu.
3. Dalsze badania powinny wyjaśnić istniejące wątpliwości, tak aby można było podane tu propozycje wykorzystać do projektowania grubości i trwałości izolacji nowoczesnych kabli na najwyższe napięcia.

Literatura

- [1] Bernstein B. S., Thue W. A., Walton M. D., Smith III J. T.: *Accelerated Aging of Extruded Dielectric Power Cables*. Part II - IEEE Tr. on P. Del, 1992, vol. 7 #2 pp. 603-608
- [2] Mc Bride J. E., Harper V. S., Coffcen L. T., Stanley F. T., Ng H. W.: *Examination and Location of Partial Discharges Sites in Severely Aged Underground Distrib. Cables*. IEEE Tr. on P. Del. 1994, Vol. 9 # 2. pp. 629-38
- [3] Kubota T., Takahashi Y., Sakuma N., Watanabe M., Kanaoka M., Yamamuchi H.: *Development of 500 kV XLPE Cables and Accessories for Long Distance Transmission Lines*. IEEE Tr on P. Del. 1994, Vol. 9 # 4, pp. 1741-49

- [4] **Laurent C., Mayoux C.:** *Analysis of the Propagation of Electrical Treeing Using Optical and Electrical Methods.* IEEE Tr. EI-15, 1980, pp. 33-42
- [5] **Montanari G. C.:** *Electrical Life Treshold Models for Solid Insulating Materials Subjected to Electrical and Multiple Stresses-Investigation and Comparison of Life Models.* IEEE Tr. on EI-27, 1992. #5 pp. 974-86
- [6] **Wasilenko E., Boryń H.:** *Electric Discharges Along the Interface of two Compressed Cable Polimer* — V Int Symp. on High Volt. Eng., 1987. Braunschweig, Paper 41-111
- [7] **Wasilenko E.:** *Model degradacji izolacji polimerowej w układach wysokiego napięcia,* Zeszyty Nauk. Polit. Gdańskiej. ELEKTRYKA Nr LXVIII, Gdańsk 1991 pp. 3-121

ESTIMATION OF THE TRESHOLD VOLTAGE OF POLYMER INSULATED CABLES BY TEST
RESULTS OF SIMULATED BREAKDOWN CHANNEL

The degradation of XLPE cable insulation is assumed to begin with forming of a very fine channel, which would break down only; when its diameter has reached some critical value of about 0,01 mm. The formula (7) has been obtained experimentally to calculate the treshold voltage, as a function of insulation thickness and channel diameter. Value of the treshold voltage may be successfully combined with the life model (4).