Doc.dr inż.Eugeniusz Wasilenko
mgr inż.Adam Rynkowski
Instytut Wysokich Napięć
i Aparatów Elektrycznych
Politechnika Gdańska

BADANIA DŁUGOTRWAŁE KABLI NA NAPIĘCIE ZNAMIONOWE 15 kV W IZOLACJI POLIETYLENOWEJ

1. Wstęp

Badania długotrwałe napięciowo-prądowe są ważnym elementem weryfikacji założeń konstrukcyjnych oraz technologii kabli wysokiego napięcia i stanowią podstawę prognozy umownego czasu życia kabla w eksploatacji. Czas życia izolacji jest ograniczony przez zjawisko przebicia elektrycznego.

Główną przyczyną przebicia izolacji polietylenowej kabli wysokiego napięcia przemiennego jest destrukcyjne działanie wyładowań niezupełnych, powstających bądź w wtrąceniach gazowych wewnątrz polietylenu, bądź w szczelinach powietrznych na granicy układu polietylen-półprzewodnik /przewodnik/. Wtrąciny wewnętrzne powstają w procesie technologicznym nakładania polietylenu, natomiast szczeliny w obszarach granicznych mogą powstawać również w eksploatacji, wskutek narażeń mechanicznych, cieplnych, elektrodynamicznych lub niestarannego montażu głowic i muf kablowych.

Odtworzenie w laboratorium zespołu narażeń eksploatacyjnych jest dość kłopotliwe i dlatego poprzestaje się naogół na długotrwałym badaniu wpływu napięcia /kilkakrotnie większego od napięcia roboczego/ na czas życia kabla, nagrzewanego cyklicznie prądem roboczym.

Otrzymana w ten sposób zależność napięcia /naprężenia/ przebicia izolacji kabla od czasu do przebicia, zwykle w obszarze 10.... 1000 godz., jest ekstrapolowana do wartości napięcia /naprężenia/

roboczego, dla której odczytuje się umowną wartość czasu życia izolacji.

W Instytucie Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej są również prowadzone badania długotrwałe prototypowych odcinków kabli 15 kV w izolacji z polietylenu. W niniejszej pracy są przedstawione niektóre wyniki, uzyskane z serii wstępnej badań.

2. Metoda badań

Badano kable trójfazowe z izolacją promieniową i żyłami z drutów aluminiowych o łącznym przekroju 120 mm^2. Na żyle kabla znajduje się warstwa polietylenu półprzewodzącego, natomiast na zewnętrznej powietrzni izolacji polietylenowej o grubości 4,5 mm są nawinięte 2 warstwy papieru półprzewodzącego i ekran z drutów lub taśmy aluminiowej. Badano dwa modele kabla różniące się tym, że model A posiada ekrany z drutów i powłokę z polwinitu na każdej żyle, natomiast model B posiada ekrany z taśmy i powłokę polwinitową wspólną dla trzech skręconych żył.

Odcinki kabli o długości 10 m ułożono pierścieniowo w laboratorium na wysokości około 25 cm od betonowej podłogi. Końce tych samych faz połączono ze sobą w specjalnych mufach zalewanych półpłynnym syciwem. Znajdujące się wewnątrz mufy ekrany półprzewodzące zostały zakończone kielichami mosiężnymi poprawiającymi nierównomierny rozkład naprężenia przy krawędzi ekranu. Zwarte fazy kabla tworzyły obwód wtórny transformatora wielkoprądowego. Każda faza kabla była zasilana różnym napięciem z transformatora probierczego z trzema zaczepami dającymi podział wysokiego napięcia w stosunku około 1:1,5:2.

Napięcie transformatora można regulować do 60 kV na najwyższym zaczepie. Moc grzejna transformatora wynosi 10 kVA i jest wystarczająca do jednoczesnego zasilania 3 faz odcinka kabla o pojemności około 3000 pF/fazę.

Program badań obejmował długotrwałą próbę napięciową odcinka kabla przy jednoczesnym cyklicznym nagrzewaniu każdej fazy prądem znamionowym w ciągu 12 godzin i następnie 12 godzinnym chłodzeniu bezprądowym. Napięcie probiercze poszczególnych faz ustalono na około 18 kV, 27 kV i 35 kV. Dobowe wahania napięcia probierczego mierzone wysokonapięciowym woltomierzem elektrostatycznym nie przekraczały ± 5 %. Naprężenia maksymalne na żyłach poszczególnych faz wynosiły odpowiednio: 5,2 kV/mm, 7,8 kV/mm, 10 kV/mm.

Temperatura ustalona żył kabla była w granicach 70 ÷ 75° C, zaś temperatura otoczenia wahała się od 14°C do 18°C.

W odstępach 12 godzinnych dokonywano pomiarów parametrów wyładowań niezupełnych stosując układ E.R.A. w wykonaniu firmy Hivelt typ AC 102, z pojemnością sprzęgającą 570 pF. Układ wyposażono dodatkowo w rejestrator x-y, licznik impulsów i przystawkę fotograficzną. Pomiary przeprowadzano w układzie "prostym", układ przed każdym pomiarem skalowano metodą pośrednią. Dla każdej fazy kabla sporządzano między innymi charakterystykę prądu średniego wyładowań w funkcji napięcia, w zakresie do 18 kV /niekiedy do 30 kV/ podnoszonego z prędkością 1 kV/s przez autotransformator z automatycznym napędem. Wartości maksymalne ładunków odczytywano z oscylogramów.

3. Wyniki pomiarów.

Warunki oraz wyniki badań wielkości związanych z pomiarem wytrzymałości długotrwałej podano w tablicy 1, a wielkości charakteryzujących wyładowania niezupełne w tablicy 2.

Wszystkie przebicia, niezależnie od miejsca, nastąpiły podczas cyklu chłodzenia w czasie mniej więcej 10 godzin od chwili wyłączenia obciążenia.

Tablica 1. Wyniki badań wytrzymałości elektrycznej.

Nr próby	Model	Faza	U_p	$\frac{U_p}{U_o}$	E	$\sum t$	t_p	Miejsce przebicia
-	-	-	kV	-	kV/mm	godz.	godz.	-
1	B	R	36,8	4,2	8,3		0,75	głowica
2	"	S	28	3,2	6,25		120,2	głowica
3	"	T	19	2,18	4,23	215	-	-
4	"	T	30,5	3,5	6,8		48,75	głowica
5	"	R	34,8	3,96	7,7	450		próby w toku
6		S	27	3,1	6	450		próby w toku
7		T	18	2,05	4	450		próby w toku
8	A	R	36,8	4,2	8,3		0,58	kabel
9	"	S	28	3,2	6,25		196,3	głowica
10	"	T	19	2,18	4,23	215	-	-
11	"	T	31	3,55	6,9		27,17	kabel
12	"	R	34,8	3,96	7,7		2,9	głowica
13	"	S	27	3,1	6		57,5	kabel
14	"	T	18	2,05	4	85,4	-	-
15	"	T	35,6	4,1	7,9		3,5	głowica
16	"	R	33,5	3,85	7,5	16,5	-	-
17	"	R	35,6	4,1	7,9		4	kabel
18	"	S	33,5	3,85	7,5	17	-	-
19	"	S	35,6	4,1	7,9	12	-	-
20	"	S	37,6	4,3	8,35		11,5	kabel
21	"	T	33,5	3,85	7,5	5	-	-
22	"	T	35,6	4,1	7,9	5	-	-
23	"	T	37,6	4,3	8,35		4	kabel

Tablica 2. Wyniki badań wyładowań niezupełnych.

Lp.	nr próby	Po cyklu chłodzenia							Po cyklu grzania						
		Czułość	U_z	U_g	q_{max}	$I_{śr}$	$\frac{U_g}{U_o}$	Ilość pomiar.	Czułość	U_z	U_g	q_{max}	$I_{śr}$	$\frac{U_g}{U_o}$	Ilość pomiarów
		pC	kV	kV	pC	µA	-	-	pC	kV	kV	pC	µA	-	
1	1	227	12	11,7	1024	0,43	1,34	1							
2	2	229	14	13,5	1031	0,1	1,55	12	229	15	14,1	477	0,05	1,61	12
3	3	227	14,2	13,5	1020	0,15	1,54	18	227	16,4	15,7	520	0,014	1,8	18
4	4	227	14,5	13,1	1024	0,09	1,54	1	-	-	-	-	-	-	-
5	5	30-80	14,4	13,1	265	0,13	1,5	32	13	16,5	15,5	30	0,04	1,78	32
6	6	30-80	14,7	13,5	267	0,1	1,55	32	13	14,8	13,3	41	0,02	1.53	32
7	7	196	13,2	12	1060	0,29	1,37	32	188	12,6	11,1	588	0,24	1,27	32
8	12	65	13,5	12	303	0,043	1,37	1	-	-	-	-	-	-	-
9	13	65	8,5	7,8	280	0,1	0,8	1	-	-	-	-	-	-	-
10	16	30	15,2	13,8	132	0,017	1,58	1	-	-	-	-	-	-	-
11	17	30	15,1	13,8	140	0.018	1,58	1	-	-	-	-	-	-	-
12	18	183	12,4	11,4	573	0,28	1,2	1	-	-	-	-	-	-	-
13	19	191	10,1	9,4	613	0,05	1,1	1	-	-	-	-	-	-	-
14	20	191	11	10,1	590	0,09	1,15	1	-	-	-	-	-	-	-
15	21	64	13,8	12	305	0,007	1,58	1	-	-	-	-	-	-	-
16	22	30	10,6	10,3	135	0,08	1,17	1	-	-	-	-	-	-	-
17	23	82	17,5	14,5	275	0.003	1,66	1	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 1.

Wytrzymałość długotrwała kabli polietylenowych 15 kV

U_p - napięcie probiercze U_o - napięcie fazowe

E - średnie natężenie pola w izolacji

$\sum t$ - czas pozostawania kabla pod napięciem

t_p - czas do przebicia

Próby 1, 2, 3, 4 - kabel przed podłączeniem poddano działaniu różnych obciążeń i natężeń pola

Próby 5 - 17 - kabel poddano próbom bezpośrednio z bębna

Próby 18 - 20 - kabel przed podłączeniem przeginany 2o-krotnie do łuku o r = 25 cm

Próby 21 - 23 - kabel przed podłączeniem zgięty w łuk o r = 25 cm.

Tablica 2.

Wytrzymałość długotrwała kabli polietylenowych 15 kV.

Wyniki pomiarów charakteryzujących wyładowania niezupełne.

U_z - średnie napięcie progu wyładowań

U_g - średnie napięcie gaszenia wyładowań

q_{max} - wielkość ładunku maksymalnego przy 17,5 kV

$I_{śr}$ - prąd średni wyładowań przy 17,5 kV

Kable w próbach od 1 do 15 znajdowały się cały czas w cyklu zmiennego obciążenia, natomiast dalsze próbki /16 - 23/, po ułożeniu na stanowisku probierczym poddano 12 godzinnemu grzaniu prądem znamionowym i po ochłodzeniu wykonano próbę wytrzymałości długotrwałej napięciowej.

Napięcia progu i gaszenia wyładowań niezupełnych odczytywano z charakterystyki prądu średniego wyładowań w funkcji napięcia. Wyniki podane w tablicy 2 odnoszą się do wartości średniej tych napięć, ponieważ nie stwierdzono regularnych zmian zachodzących w badanym obszarze czasu.

Pomiary ładunków maksymalnych i prądu średniego wyładowań wykonano przy napięciu 17,5 kV/maksymalne napięcie robocze/. Dodatkowo wykonano kilka pomiarów ładunków, po cyklu grzania, przy napięciu równym probierczemu dla badanej fazy /próby 5 i 6/ i otrzymano wyniki do 3000 pC przy czułości 575 pC.

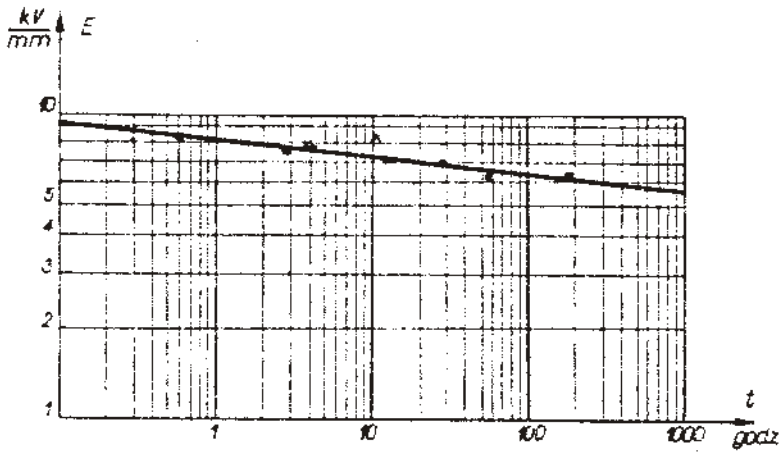
Częstotliwość powtarzania impulsów przy napięciu 17,5 kV nie przekraczała 700 na sekundę.

4. Omówienie wyników.

Uzyskane dotychczas wyniki pozwalają na ostrożne wykreślenie zależności czasu życia od wartości przyłożonego napięcia /natężenia pola/ dla zespołu izolacyjnego kabel-głowica. Zależność tę przedstawiono w postaci prostej w układzie współrzędnych logarytmicznych.

Fakt, że wyniki przebicia zarówno w kablu jak i w głowicach znalazły się na tej samej prostej wskazuje na podobne działanie wyładowań niezupełnych, niezależnie od tego, czy odbywają się one na granicy przewodnik-polietylen /w kablu/, czy też przewodnik-sycivo-polietylen /w głowicy/.

Przebieg prostej może świadczyć o jakości układu izolacyjnego i może być porównywany z charakterystyką uzyskaną dla innych kabli.



Rys.1. Krzywa życia układu E = f/t/

E – średnie natężenie pola w kablu

. – model A

x – model B

Ujęcie matematyczne prowadzi do znanej postaci

$$t \cdot E^{\gamma} = \text{const}$$

gdzie: t – czas do przebicia

E – natężenie pola w izolacji, a

γ – jest współczynnikiem zależnym od rodzaju izolacji i warunków próby.

Wartość γ określona z przebiegu równa się 18,25. Dla porównania współczynnik ten uzyskany w pracy [1] wynosi 14,7 z tym, że dotyczy on badań kabli o różnych grubościach izolacji.

Wprowadzenie do badań długotrwałych cyklu nagrzewania i chłodzenia daje pełniejszy obraz zachowania się izolacji w eksploatacji.

Otrzymane wyniki napięć progu wyładowań niezupełnych, napięć

gaszenia, prądu średniego i wielkości pojedynczych ładunków wskazują na różne ich wartości w zależności od temperatury kabla. Wartości te są zwykle bardziej niekorzystne w stanie zimnym. Pociąga to prawdopodobnie za sobą występowanie przebić w cyklu chłodzenia /pomimo, że wytrzymałość polietylenu [2] zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury/. Można przypuszczać, że istniejące w układzie wtrąciny gazowe i szczeliny powietrzne ulegają ściśnięciu podczas nagrzewania co poprawia charakterystyki wyładowań niezupełnych. Stosunek średnich napięć progu i gaszenia wyładowań niezupełnych jest w przybliżeniu taki sam w stanie nagrzanym i zimnym i dla badanych kabli wynosi średnio 1,08.

Porównanie wyników pomiarów ładunków maksymalnych wyładowań zmierzonych przy 17,5 kV z wytrzymałością długotrwałą układu kablowego wskazuje na prawdopodobną korelację. Np. kabel wykazujący przy 17,5 kV ładunek około 1000 pC w każdej fazie /próby 1, 2, 3/ poddany napięciu probierczemu 36,8 kV został przebity po czasie 0,75 godz., przy napięciu probierczym 28 kV po czasie 120 godzin, natomiast przy napięciu 19 kV nie uległ przebiciu w czasie 215 godzin, po czym próbę przerwano. W innej serii badań kabel w podobnych warunkach /próba nr. 7/ wytrzymał dotychczas 450 godzin.

W prowadzonych badaniach modelu A fazy kabla wykazujące ładunek rzędu 300 pC przy 17,5 kV /próby nr.5, 6 - tablica 2/ poddane działaniu napięcia 34,8 kV i 28 kV pracują ponad 450 godzin bez przebicia.

Średni prąd wyładowań zmierzony przy napięciu 17,5 kV dla tej samej fazy kabla maleje z temperaturą. Stosunek średnich prądów w stanie zimnym i stanie nagrzania waha się w granicach 1,2 do 10,7 zależnie od próbki.

5. Wnioski.

1. Wyniki uzyskane w pierwszej serii prób starzeniowych wskazują

na trafny wybór metody badawczej, która w dalszej serii ulegnie tylko niewielkim uzupełnieniom. W szczególności celowym jest utrzymanie cyklicznego nagrzewania i chłodzenia kabli.

2. Pomiary wyładowań niezupełnych należy wykonywać również przy napięciach probierczych poszczególnych faz kabla. Pozwoli to na lepszą korelację parametrów wyładowań niezupełnych z krzywą życia izolacji.
3. Otrzymaną krzywą życia kabli 15 kV należy traktować jako wstępną. Dotychczasowe wyniki drugiej serii badań przygotowanej z uwzględnieniem uzyskanych doświadczeń wskazują, że krzywa życia przesunie się w kierunku znacznie dłuższych czasów.
4. W badanym obszarze czasowym, do 215 godzin, nie zaobserwowano wyraźnych zmian parametrów charakteryzujących wyładowania niezupełne w kablu, które pozwoliłyby przewidzieć przebicie kabla. Zmiany przedprzebiciowe występują prawdopodobnie w okresie czasu krótszym od 12 godzin.

Literatura

1. E.Occhini - A statistical approach to the discussion of the dielectric strength in electric cables. IEE Transaction on Power 1/67
2. W.G.Lawson - Effects of temperature and techniques of measurement on the intrinsic electric strength of polyethylene. Proc. IEE vol.113 1/66.