

Kasylda Łabus-Nawrat

WPLYW WYLADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH NA IZOLACJĘ FOLIOWO-GAZOWĄ

1. Wstęp

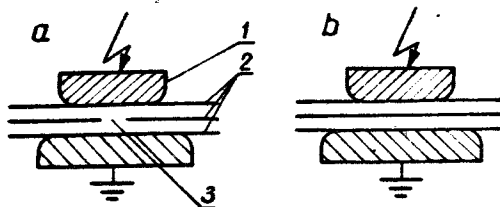
Izolacja foliowo-gazowa w praktyce została zastosowana już jako izolacja przekładników napięciowych [1, 2], prototypów głowic kablowych oraz w kondensatorach laboratoryjnych [3]. Badania przedstawione w referacie dotyczą czynników decydujących o trwałości izolacji foliowo-gazowej i obejmują badania różnych rodzajów folii oraz modeli izolacji międzywarstwowej przekładników, a są związane z pracami nad optymalizacją układu izolacyjnego przekładnika napięciowego przeznaczonego do stacji z izolacją z SF₆ na 110 kV oraz z możliwością zastosowania takiej izolacji na wyższe napięcia znamionowe. O aktualności tej problematyki izolacji foliowo-gazowej może świadczyć chociażby liczba pięciu zgłoszonych na ten temat referatów na III Międzynarodowe Sympozjum z Techniki Wysokich Napięć organizowane w Mediolanie w 1979r.

2. Badanie folii

2.1. Układ i rodzaje badanych folii

Badania folii prowadzono w układzie z rysunku 1, w powietrzu i SF₆ dla PTFE "Estrofol" grubości 36 μm i PE niskiej gęstości produkcji francuskiej o grubości 50 μm oraz tylko w powietrzu dla PTFE produkcji francuskiej o grubości 50 μm. W powietrzu badania były prowadzone dla temperatur 20 - 25 °C i wilgotności 10 - 40 %.

Mgr inż. Kasylda Łabus-Nawrat, Instytut Elektrotechniki - Warszawa



Rys.1. Układy modelowe do badania folii:
 1 - elektrody /stal nierdzewna
 ϕ 60, $r = 3$ mm lub mosiądz ϕ 60,
 $r = 10$ mm/; 2 - badane folie;
 3 - wtrącina ϕ 3 bądź ϕ 5 mm

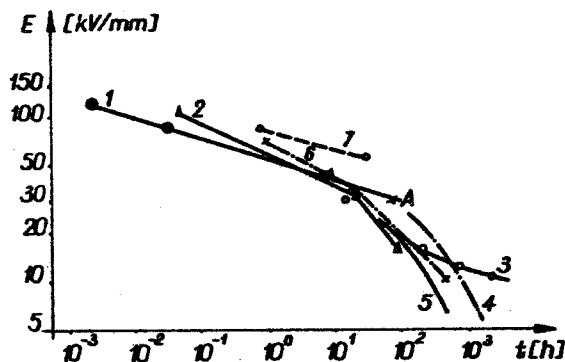
W SF_6 prowadzono badania dla dwóch ciśnień, tj. 1 i 3,5 bara w temperaturze 20°C . Zamkniętą próbkę w zbiorniku do prób wygrzewano w temperaturze 50°C przez dobę, następnie odgazowywano aż do osiągnięcia próżni 0,5 tora, napełniano SF_6 do ciśnienia 4,3 bara, utrzymując je przez dobę, a następnie obniżono ciśnienie do wartości 3,5 bądź 1 bara.

2.2. Wytrzymałość elektryczna

Wytrzymałość elektryczną długotrwałą badano napięciem przemiennym o $f = 50$ Hz w obecności wnz, określając czasy do przebicia dla naprężeń 15 do 120 kV/mm. Wszystkie naprężenia dla układu z wtrąciną /również dla przytoczonych wyników z literatury/ zostały przeliczone z uwzględnieniem spadku napięcia na wtrącinie, wynikającego z krzywej Paschena.

Wyniki badań dla PTFE przedstawione są na rysunku 2, przy czym w celach porównawczych naniesiono również wyniki badań japońskich [4] i amerykańskich [5] oraz PTFE "Estrofol" badanego w oleju [6], tj. w układzie bez wyładowań niezupełnych. Z porównania wynika, że w warunkach próby najlepiej zachowuje się PTFE francuski, którego wykładnik potęgowy krzywej życia dla $E \leq 30$ kV/mm zbliża się do krzywej 7, tj.

starzenie PTFE w oleju bez wzn. PTFE "Estrofol" zachowuje się gorzej, a wykładniki potęgowe krzywych życia zarówno w powietrzu, jak i SF_6 , są zbliżone do naniesionych porównawczo rezultatów przedstawionych w [4] i [5].

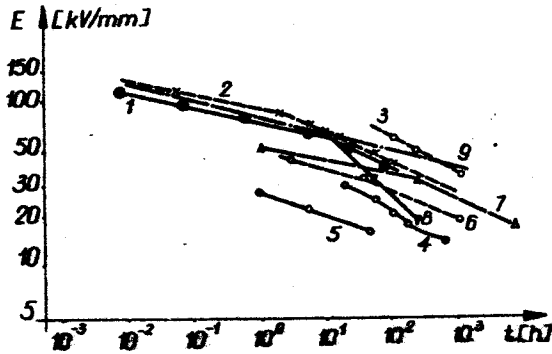


Rys.2. Krzywe życia dla PTFE: 1 - PTFE francuski $3 \times 50 \mu m$ z wtrąciną, w powietrzu, $n = 8,3$, A - $3 \times 50 \mu m$ bez wtrąciny; 2 - PTFE "Estrofol" $4 \times 35 \mu m$ bez wtrąciny, w powietrzu, $n_1 = 4,8$, $n_2 = 2,2$; 3 - PTFE japoński [4] $3 \times 125 \mu m$ z wtrąciną, w powietrzu $n_{min} = 3,8$; 4 - PTFE "Mylar" [5] 2 lub $3 \times 50 \mu m$ z wtrąciną przy elektrodzie w mące $25 \mu m$, w powietrzu; 5 - jak 4, lecz bez wtrąciny, 6 - PTFE "Estrofol" $6 \times 35 \mu m$ bez wtrąciny w SF_6 , 1 bar, $n_1 = 4,4$, $n_2 = 2,5$; 7 - PTFE "Estrofol" $1 \times 80 \mu m$ bez wtrąciny w oleju [6], $n = 10,4$.

Słuszność obliczania naprężeń z uwzględnieniem spadku na wtrącinie potwierdziła się dla PTFE francuskiego, dla którego punkt A, naniesiony z badań w układzie z rysunku 1b, leży praktycznie idealnie na krzywej badań w układzie z rysunku 1a. Warto podkreślić, że przebiecie przy badaniach w układzie z rysunku 1a występowało każdorazowo na krawędzi wtrąciny.

Rezultaty badań PE francuskiego z naniesionymi rezultatami japońskimi [4, 7] i niemieckimi [8] dla powietrza i SF_6 przedstawiono na rysunku 3. Porównując te krzywe, należy uwzględnić fakt, że wyniki japońskie są otrzymane dla PE o grubości dwukrotnie [7] i dwu- i półkrotnie [4] większej i odpowiednio wtrąciny były głębsze, tym

niemniej dla powietrza krzywa życia PE francuskiego leży dużo wyżej.



Rys.3. Krzywe życia dla PE: 1 - PE francuski $3 \times 50 \mu\text{m}$ z wtrąciną w powietrzu, $n = 13,8$ i $5,2$; 2 - PE francuski $3 \times 50 \mu\text{m}$ z wtrąciną w SF_6 1 bar, $n = 12,3$ i $5,6$; 3 - PE francuski $3 \times 50 \mu\text{m}$ z wtrąciną w SF_6 3,5 bara, $n = 5$; 4 - PE japoński [4] $3 \times 125 \mu\text{m}$ z wtrąciną w powietrzu /badania z 12 laboratoriów/, 5 - PE japoński [7] $3 \times 100 \mu\text{m}$ z wtrąciną w powietrzu; 6 - PE japoński [7] $3 \times 100 \mu\text{m}$ z wtrąciną w SF_6 1 bar, $n = 10,9$ i $5,2$; 7 - PE japoński [7] $3 \times 100 \mu\text{m}$ z wtrąciną w SF_6 4 bary, $n = 13,9$ i $5,0$; 8 - PE niemiecki [8] $2 \times 50 \mu\text{m}$ bez wtrąciny w powietrzu, $n = 9$ i $2,4$; 9 - PE niemiecki [8] $2 \times 50 \mu\text{m}$ bez wtrąciny w SF_6 , 1 bar, $n = 9$.

Wykładniki potęgowe krzywych życia w SF_6 dla PE francuskiego i japońskiego są praktycznie identyczne. Wyniki badań prowadzonych w TU Dresden różnią się zdecydowanie, bowiem w przypadku badań w SF_6 wykładnik potęgowy krzywej życia nie ulega zmianie aż do czasu 1000 h.

2.3. Destrukcja izolacji

Przy obserwacji destrukcji próbek starzonych posługiwano się głównie mikroskopem optycznym i tylko dla pojedynczych próbek wykonano zdjęcia mikroskopem skaningowym.

Obserwując PIFE można stwierdzić, że erozja zlokalizowana głęboka postępuje systematycznie w czasie, a dla czasów rzędu 100 godz. obserwuje się wiele miejsc wyerodowanych przez całą grubość folii, zwłaszcza

licznie występują one na krawędzi elektrody. W przypadku badania 3 warstw folii z wtrąciną erozja powierzchniowa występuje na wszystkich 3 warstwach folii PTFE nie tylko we wtrącinach i na krawędzi elektrod, ale również pod całą powierzchnią /oczywiście słabsza/ elektrody. Na obwodzie krawędzi wtrąciny widać wyraźnie wyerodowane ślady wyładowań powierzchniowych. Na powierzchni folii występują kryształy, które najliczniej obserwuje się w miejscach oddziaływania największych wnz oraz większego dostępu powietrza, przypominają one kryształy kwasu szczawowego obserwowane w [9] dla PE, mają charakter sześciątów, prostopadłościątów i kanciastych pałeczek dochodzących do wymiarów $10 \times 800 \mu\text{m}$. Obserwowano też analogicznie jak w [10] dwa pierścienie erozji na krawędzi elektrody, przy czym zewnętrzny pierścień był głębszy, jako że występował w obszarze wnz o największej energii; dotyczyło to zarówno PTFE jak i PE. W przypadku PE było to zresztą miejsce najgłębszej zaobserwowanej erozji w ogóle /dochodziło w powietrzu do 90% grubości 1F dla czasów większych od 100 godzin/, krawędź i dno wtrąciny były dużo słabiej wyerodowane. Ogólnie erozja dla PE w powietrzu jest dużo mniejsza niż dla PTFE, na 2 i 3 folii jest już b. słaba.

Niezbyt liczne kryształy kwasu szczawowego o kształcie prostopadłościątów i najczęściej wymiarach $3 \times 40 \mu\text{m}$ obserwowano w przypadku badań PE w powietrzu, a w SF_6 kryształy kwasu szczawowego obserwuje się tylko sporadycznie. Erozja PE w SF_6 jest jeszcze dużo słabsza niż PE w powietrzu, a dla czasów większych od 50 godzin występują kryształki o ciemnozielonym zabarwieniu. Przebicia w PE występowały w powietrzu najliczniej na krawędzi elektrody i w środku wtrąciny bądź w jej sąsiedztwie, a dla SF_6 przy 1 barze w 80% na krawędzi wtrąciny.

2.4. Mechanizm destrukcji izolacji

Z literatury [9, 11, 12] wiadomo, że decydującym czynnikiem w destrukcji izolacji, obok występowania wnz, jest tlen. Według [13] maksymalna szybkość strat wagowych w PE badanym w azocie występuje przy 1% zawartości tlenu. Brak różnic między wykładnikami potęgowymi

krzywych życia badanego PE i PTFE w powietrzu i SF_6 sugeruje, że tlen również w SF_6 nawet jako zaadsorbowany na powierzchni folii decyduje o szybkości destrukcji, tj. erozji. W takim przypadku należałoby przyjąć, że badania Ruffera [8] wykonane są na praktycznie pozbawionym tlenu PE.

Za destrukcję izolacji z polimerów w SF_6 nie może być jednak odpowiedzialny tylko tlen, lecz może on pełnić rolę środka katalizującego, sam bądź w połączeniu z wilgocią przyczynia się przy oddziaływaniu wnz do powstawania quasistabilnych jonowych produktów rozkładu SF_6 przejmujących rolę jonów tlenu w mechanizmie destrukcji /erozji/. Mechanizm taki potwierdzałyby wyniki [10], gdzie wykazano liniowość strat wagowych PE w SF_6 w czasie próby /75 godz./ oraz że straty wagowe PTFE w SF_6 są prawie dwukrotnie większe niż PE w SF_6 . Analogicznie zresztą w powietrzu PTFE wykazuje większą erozyjność.

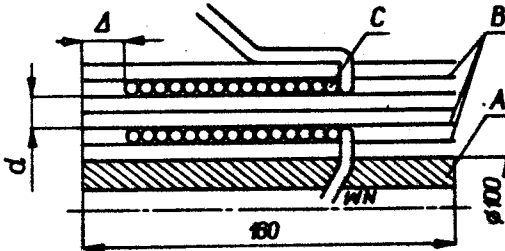
3. Badanie modeli izolacji międzywarstwowej

3.1. Analiza zagrożeń izolacji foliowo-gazowej

Rozważania przedstawione w p. 2.4. oraz dotychczasowe badania mechanizmu destrukcji układu izolacyjnego folia-gaz [14] wskazują jednoznacznie na niedopuszczalność występowania w takiej izolacji wnz w zakresie napięć roboczych. Uwzględnić należy również, że w zakresie przewidywanych naprężeń roboczych tego rodzaju izolacji nie należy się spodziewać starzenia w wyniku działania samego pola elektrycznego mogącego zachodzić dla $E > 20$ kV/mm. Inne czynniki degradujące izolację, takie jak: działanie ultrafioletu, wysoka temperatura $> 130^\circ C$, tlen oraz wilgoć, również nie zagrażają izolacji przekładnika. Można więc przyjąć, że dla zapewnienia wytrzymałości długotrwałej izolacji foliowo-gazowej należy dobierać naprężenia robocze poniżej występowania wnz. W związku z tym dla modeli izolacji międzywarstwowej zamiast prób wytrzymałości długotrwałej przeprowadzono odpowiednie badania napięć prog i gaśnięcia wnz.

3.2. Charakterystyka modeli

Do badań wytypowano model izolacji międzywarstwowej, przedstawiony na rysunku 4. Modele były przygotowane w następującym cyklu technologicznym:



Rys.4. Model izolacji międzywarstwowej:

A - tuleja izolacyjna, B - folia PE, PP lub PTPE, C - drut nawojowy 0,25; 0,20; 0,15, d - grubość izolacji 0,8 lub 0,2 mm, Δ - margines wzdłuż izolacji 40 lub 20 mm.

Suszenie próżniowe w 80°C przez 5 h z próżnią końcową 1 Tr, napełnianie SF₆ do 1 bara z czasem impregnacji 16 h oraz czasem impregnacji przy 3,1 bara ok. 1,5 h. Ogółem zbadano 50 modeli, w tym 24 z PE, 8 z PP oraz 18 z PTPE.

3.3. Badanie wnz

Wnz badano pięciokrotnie na każdym modelu przy ciśnieniu 1 i 3,1 /3,1 b - przewidywane minimalne ciśnienie robocze/ bara, określając napięcie progu /U₀/ oraz gaśnięcia /U_g/ wnz. Uzyskana w ten sposób liczba pomiarów pozwoliła na obróbkę statystyczną^{sty} wyników. Napięcie przemienne podnoszono do U₀, następnie na 10 sek na 6 kV przy 1 barze i odpowiednio 12 kV przy 3,1 bara, po czym napięcie obniżano na U_g, a następnie wyłączano przed kolejnym pomiarem. Najwyższe średnie wartości E₀ i E_g przy 3,1 bara uzyskano dla PE i wynosiły one E_{0gr} = 10 - 12 kV/mm i E_{ggr} = 9 - 11,5 kV/mm w zależności od średnicy drutu,

dla PTFE te wartości były o ok. 20 % niższe, dla PP obie wartości kształtowały się w granicach 10 kV/mm.

Na podstawie porównania wyników $E_{0\text{ór}}$ i $E_{g\text{ór}}$ przy 1 i 3,1 bara stwierdzono, że niezależnie od średnicy zastosowanego drutu obowiązuje poniższy wzór

$$E_2 = E_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^n \quad (1)$$

przy czym: $p_1 < p_2$, a n w zależności od rodzaju folii (jej ϵ) wynosi dla PTFE 0,55, a dla PE i PP 0,65.

Wpływ średnicy drutów został porównany z wartościami obliczonymi pola wg Ollendorffa

$$\frac{E_{r1}}{E_{r2}} = \frac{r_1 \sqrt{\frac{d_1 + 2r_1}{d_1 - 2r_1}} \ln \frac{\sqrt{d_2^2 - 4r_2^2} + d_2 - 2r_2}{\sqrt{d_2^2 - 4r_2^2} - d_2 + 2r_2}}{r_2 \sqrt{\frac{d_2 + 2r_2}{d_2 - 2r_2}} \ln \frac{\sqrt{d_1^2 - 4r_1^2} + d_1 - 2r_1}{\sqrt{d_1^2 - 4r_1^2} - d_1 + 2r_1}} \quad (2)$$

gdzie: r_1, r_2 - promienie drutów nawojowych, d_1 i d_2 /odległości między osiami drutów/ liczone jako $2r + \frac{h}{\epsilon}$; h - grubość warstwy izolacji, ϵ - przenikalność dielektryczna zastosowanej folii.

Obliczone według (2) wartości były do 15 % wyższe od odpowiedniego stosunku wyznaczonego doświadczalnie, co wydaje się w pełni uzasadnione, jeśli uwzględni się, że podany wzór dotyczy stosunków między E_{max} , natomiast rzeczywiste wartości E_0 i E_g zależą od naprężeń w pewnej odległości od powierzchni drutów, niezbędnej do rozwoju wzn o mierzalnej intensywności.

Porównanie wyników \bar{E}_0 i \bar{E}_g modeli wykonanych zgodnie z podanym wyżej cyklem technologicznym z rezultatami badań na pojedynczych modelach pozwala na stwierdzenie, że brak suszenia folii, mimo zastosowania próżni /o niezmienionym czasie/, powoduje obniżenie \bar{E}_0 i \bar{E}_g o około 20 %.

4. Wnioski

1/ W destrukcji izolacji w wyniku działania wnz w SF₆ decydującą rolę odgrywają przypuszczalnie domieszki nawet zaadsorbowanego O₂ i H₂O tylko na powierzchni folii, wpływają one również na obniżenie napięcia progu wnz.

2/ Porównując rezultaty własne i japońskie [7] badań PE można przypuszczać, że różne gatunki PE charakteryzują się różnymi własnościami impregnacyjnymi w SF₆.

3/ Napięcia progu i gaśnięcia wnz w SF₆ w polu niejednorodnym izolacji międzywarstwowej zależą od ciśnienia w potędze ok. 0,6.

4/ Zarówno z punktu widzenia wytrzymałości długo- i krótkotrwałej, jak i własności technologicznych, najkorzystniejsza do zastosowania, jako izolacja międzywarstwowa przekładnika z SF₆, okazała się folia PE.

LITERATURA

1. Łabus-Nawrat K.: Przekładnik napięciowy do rozdzielnicy osłoniętej z SF₆ na napięcie 110 kV. Prace IEL, zeszyt 9.
2. Raupach: Messwandler für SF₆ - isolierte gekapselte Schaltanlagen. ETZ-A, 94, 1973, H.7.
3. Brand U., Kind D.: Gas Impregnated Plastic Foils for High Voltage Insulation. CIGRE 1972, Ref. 15-02.
4. Okamoto H., Kazanashi M., Tanaka T.: Deterioration of Insulating Materials by Internal Discharge. IEEE Trans.PAS, 96, Jan/Febr., 1977.
5. Hewitt G.W., Dakin T.W.: Voltage Endurance Tests of Insulating Materials under Corona Conditions. IEEE Trans.PAS, 82, 1963.
6. Buliński A., Dubicki J., Sachajko R.: Badanie wpływu wyładowań niezupełnych we wtrącinach gazowych na szybkość starzenia izolacji warstwowej w polu elektrycznym. Raport Inst. Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Polit. Wrocławskiej nr I-7/R-144/76.

7. Kojima T. i inni: Characteristics of Polyethylene Impregnated with Various Gases. PAS-93, Nr 2, 1974.
8. Ruffer K.: Zum Einfluss des Imprägniermittels auf die Lebensdauer von Polyäthylen-folien-Schichtungen. XIX LWK Ilmenau 1974, H. 1, s. 25.
9. Fujioka N., Tsunoda Y.: Effect of Humidity on the Degradation of Insulating Materials. JHS Zurich 1975, p. 638.
10. Koikow S.N., Cikin A.N.: Elektrieszeskoje starenije twjerdych dielektrikow i nadiażnost dielektriceskich dietalej. 1968 /wyd.książkowe/
11. Takuma Tadasu: Corona Deterioration of Organic Insulating Materials in SF₆. J.I.E.E. of Japan, October 68, s. 19.
12. Bagirow M.A., Malin W.P., Abasar S.A.: Wozdajstwiye elektrieszeskich razriadow na polimernyje dielektriki. Wyd. książkowe 1975.
13. Tsukui T., Kako Y.: Deterioration of Insulating Materials Due to Partial Discharges in Nitrogen Gas. El.Eng. in Japan, Vol. 92, nr 4, 1972.
14. Łabus-Nawrat K., Goliński: Etude de la rigidité diélectrique de l'isolement feuille-gaz. Int.Symp.Hochspan.Tech. Zurych 75.

Summary

PARTIAL DISCHARGE EFFECT ON FILM-GAS INSULATION

Research presented in the paper is linked with works on the film-gas insulation optimization of 110 kV - insulated voltage transformer. Researches concern different polymer films as PE, PTFE and PP as well the interlayer insulation models. The author's results from different film life-current measurements are compared with the published data. Deterioration mechanism of film-gas insulation proves clearly the inadmissibility of the appearance of PD in film-gas insulation under service conditions.

Results of the PD inception and extinction voltages indicate that the most convenient interlayer insulation of SF₆ insulated voltage transformers in the PE film.