

Jan Zalewski

CHARAKTERYSTYKI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH ORAZ ODPORNOSC
NA PRZEPIĘCIA /TOV/ KONDENSATORÓW Z KRAJOWYM SYCIWEM
BIODEGRADALNYM, SZABOPOLARNYM

1. Wstęp

Zastosowanie w kondensatorach nowych syntetycznych cieczy elektroizolacyjnych, biodegradalnych, które zastępują dobrze wypróbowane, ale szkodliwe dla środowiska naturalnego dwufenyle chlorowane /PCB/, wiąże się z koniecznością rozwiązania wielu problemów.

Jednym z nich jest prawidłowe dobranie roboczego natężenia pola elektrycznego. Natężenie to jest ograniczone od góry wymaganiem dostatecznie długiego czasu życia kondensatora, a od dołu względami ekonomicznymi. Stosunek napiężeń początkowych i gaśnięcia wyładowań niezpełnych do napiężeń znamionowych powinien być "dostatecznie duży" w pełnym zakresie temperatury pracy dielektryka, to jest od dolnej granicy kategorii temperatury kondensatora do górnej temperatury pracy dielektryka.

W przypadku kondensatorów energetycznych, napowietrznych za dolną granicę temperatury należy przyjąć -40°C , a jako górną ok. 80°C . Konieczność określenia charakterystyki napiężeń początkowych i gaśnięcia wyładowań niezpełnych także w ujemnych temperaturach wynika stąd, że w tych warunkach rośnie lepkość syciwa i maleje jego zdolność absorbowania generowanych gazów w czasie przepięć.

Na pytanie, czy stosunek napiężeń początkowych i gaśnięcia wyładowań niezpełnych do napiężeń znamionowych jest "dostatecznie duży", można dać odpowiedź po wykonaniu przyspieszonych prób trwałości wytworzonego

Doc.dr inż. Jan Zalewski, ZWAR Z-1, Warszawa.

układu izolacyjnego, przy użyciu określonych materiałów izolacyjnych w danym procesie technologicznym. Same charakterystyki wyładowań niezupełnych nie są dostatecznym kryterium oceny układu izolacyjnego. Pomiar wyładowań niezupełnych nawet został wycofany z wymagań normy IEC publ.70.

W wyniku kilkuletnich dyskusji w grupie roboczej 05 SC15 CIGRE oraz TC33 IEC do wymagań w normie na kondensatory energetyczne wysokiego napięcia do poprawy $\cos \varphi$ proponuje się wprowadzić dodatkową próbę trwałości kondensatorów w warunkach przepięciowych i ujemnej temperatury [1]. Zgodnie z tym projektem dodatkową próbę trwałości należy wykonać na odpowiednio przygotowanych modelach, odzwierciedlających konstrukcję i warunki produkcyjne.

2. Wybór syciwa i modeli do badań

Nowe syciwo, które zamierzamy wprowadzić na miejsce PCB i ew. oleju mineralnego, musi spełniać wiele wymagań chemicznych, fizycznych, elektrycznych, toksykologicznych i ekologicznych. Wśród nich trzy własności należą do podstawowych :

- zdolność do szybkiego rozpuszczania generowanych gazów,
- przenikalność dielektryczna,
- straty dielektryczne.

Zdolność syciwa do szybkiego rozpuszczenia generowanych gazów, powstałych wskutek oddziaływania wyładowań niezupełnych i naprężeń termicznych, należy do ważnych własności zwłaszcza w temperaturze ujemnej, gdyż - jak już wspomniano - ciecz wtedy staje się mniej mobilna i traci na zdolności pochłaniania gazu, który jest generowany lokalnie, a co może prowadzić do przebicia dielektryka.

Mandelcorn i Dakin stwierdzili, że współczynnik absorpcji gazu cieczy ma ścisły związek z odpornością kondensatora na przepięcia, które generują wyładowania niezupełne [2]. Nishimatsu badając syntetyczne węglowodory aromatyczne stwierdził, że istnieje związek między stopniem gazowania, naprężeniem generującym gaz a charakterystyką napięciowo-czasową dielektryków kondensatorowych impregnowanych ww. cieczami [3].

Opierając się na dobrych wynikach eksploatacyjnych kondensatorów z PCB i badając ciecz metodą IEC628, można by przyjąć wartość współczynnika absorpcji gazu taką samą jak dla PCB, która wynosi $\sim 30 \mu\text{l}/\text{min}$.

Trzeba jednak zaznaczyć, że współczynnik gazowania przedstawia wynik netto reakcji wydzielania i absorpcji gazu. Molekularna struktura chlorowanych dwufenyli jest taka, że utrudnia oderwanie atomu wodoru od molekuly i występuje głównie, chociaż w małym stopniu, absorpcja wodoru.

Sytuacja jest zupełnie odmienna w przypadku innych struktur molekularnych takich cieczy, jak węglowodory, estry i silikony. W tych cieczach występuje zarówno wydzielanie, jak i absorpcja gazu. Stąd też, jako minimalny współczynnik absorpcji gazu dla innych cieczy syntetycznych niż PCB, powinno się przyjąć co najmniej - 100 $\mu\text{l}/\text{min}$.

Jeżeli chodzi o przenikalność dielektryczną, to sądząc na podstawie doświadczenia uzyskanego przy wieloletnim stosowaniu PCB nowe syciwo powinno mieć możliwie wysoką przenikalność dielektryczną, gdyż wtedy otrzymuje się dużą gęstość energii w kondensatorze. Jak wykazują jednak ostatnie badania syciwa niskopolarne, o względnie niskiej przenikalności dielektrycznej, ale o dobrych własnościach gazowych, wykazują dużą stabilność w warunkach silnego pola elektrycznego, co pozwala na zastosowanie wysokiego natężenia pola elektrycznego i uzyskanie jeszcze większej gęstości energii w kondensatorze przy nowym syciwie niż w kondensatorze przy użyciu PCB.

W przemyśle japońskim od roku 1977 w kondensatorach i w kablach są szeroko stosowane syntetyczne węglowodory aromatyczne pod nazwą Condenser Oil S /PXE/ oraz DIPN/PXE - fenylotlenotan, DIPN-dwuwizopropylotlenotan/. Ciecze te mają przenikalność dielektryczną rzędu 2,6 do 2,7 i bardzo niski współczynnik stratności dielektrycznej $\text{tg } \delta_{90^\circ, 50 \text{ Hz}} \ll 0,001$ oraz duży współczynnik absorpcji gazu $\gg - 100 \mu\text{l}/\text{min}$. Stosowane są w kondensatorach o dielektryku papierowo-polipropylenowym i polipropylenowym przy napięciach roboczych 40 do 60 V/ μm .

Coraz szersze stosowanie syntetycznych węglowodorów aromatycznych spowodowało podjęcie prac normalizacyjnych w IEC. Zgodnie z ostatnim projektem IEC10A [4] syntetyczne węglowodory aromatyczne dzielą się na trzy typy :

1/ Alkilobenzen kondensatorowy i kablowy o trzech klasach lepkości w temp. 40°C / $\ll 5, 5-10$ i $10-50$ / i o dopuszczalnym $\text{tg } \delta_{90^\circ\text{C}, 50\text{Hz}} \ll 0,001$ oraz o dopuszczalnym współczynniku absorpcji gazu $\gg - 30 \mu\text{l}/\text{min}$.

2/ Alkilodwufenyloetan kondensatorowy o lepkości w temp. $40^\circ\text{C} \ll 7$, o współczynniku stratności j.w., lecz o współczynniku absorpcji gazu $\gg - 100 \mu\text{l}/\text{min}$.

3/ Alkilonaftalen kondensatorowy o własnościach jak typ w poz. 2. Stosowane zagranicą także kondensatorowe ciecze ostrowe, jak Dielektrol II, ENC, Bayelektrol 4200, mają wprawdzie przenikalność dielektryczną wyższą niż węglowodory aromatyczne /4,7 do 5,7 /, ale charakteryzują się one większym współczynnikiem stratności dielektrycznej oraz znaczną wrażliwością na hydrolizę i korozję. Wrażliwość na hydrolizę syciw wymaga dużej ostrożności w procesie ich stosowania. Dielektryk stały kondensatora musi być dokładnie wysuszony, absorbenty jonów przy regeneracji syciw ziemią okrzemkową nie mogą zawierać wilgoci, która może prowadzić do zakwaszenia syciwa i spowodować wzrost współczynnika stratności dielektrycznej.

Mając powyższe na uwadze postanowiono w pierwszej kolejności przyjąć do badań syntetyczne węglowodory aromatyczne. Za tym wyborem przemawia również fakt, że są one całkowicie biodegradowalne 5.

Wzięto również pod uwagę potrzeby nie tylko ZWAR, ale także innych Zakładów /Miflexu, Telpodu i Fabryki Kabli/. Przy większym zapotrzebowaniu może dojść łatwiej do uruchomienia produkcji nowej cieczy w jednej z polskich rafinerii.

Instytut Technologii Nafty w Krakowie na zlecenie ZWAR i przy współpracy z AGH w latach 1981 - 1982 przeprowadził badania nad krajowym syntetycznym węglowodorem aromatycznym i dostarczył do ZWAR próbne syciwo doświadczalne, które spełnia wymagania projektu normy IEC10A, typ 1, klasa lepkości II/5-10/ [6].

Podstawowe własności nowo opracowanej cieczy w ITN, zastosowanej do impregnacji modeli kondensatorowych, są następujące :

- Gęstość, 20°C, Kg/m ³	0,87,
- Lepkość kinemat., cSt, 40°C	7,26,
- Temperatura zapłonu, °C	154,
- Temperatura krzepnięcia, °C	-60,
- Współczynnik stratności, 50 Hz, 90°C	0,001,
- Przenikalność dielektryczna, 90°C	2,23,
- Rezystywność, 90°C, Ω cm	1 · 10 ¹⁵ ,
- % C _A metodą IR	64,7.

W celu dokonania oceny otrzymanego syciwa i układu izolacyjnego kondensatorów zaimpregnowanych tym syciwem wykonano 3 grupy modeli konden-

satorów, po 5 sztuk w każdej grupie :

- w grupie I zastosowano układ mieszany papierowo-polipropylenowy 1x12 papier+2x12 polipropylen / μm /,
- w grupie II zastosowano sam papier 3x12 / μm /
- w grupie III również sam papier 3x12 / μm /.

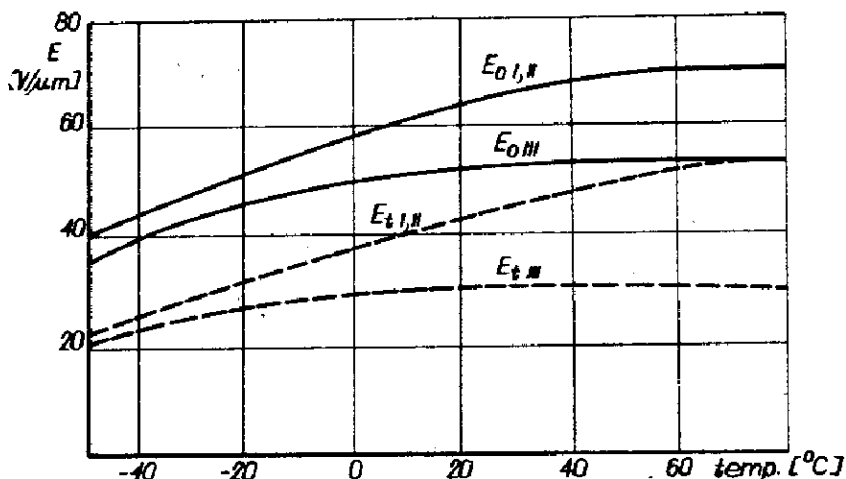
Wszystkie modele, złożone każdy z dwóch zwińek, wmontowane w hermetyczną stalową obudowę, przeszły typowy próżniowy proces suszenia i impregnacji. Do impregnacji grupy I i II użyto nowej cieczy. Grupę III dla porównania zaimpregnowano tradycyjnym mineralnym olejem kondensatorowym.

3. Charakterystyki naprężeń początkowych i gaśnięcia wyładowań niezupełnych /wnz/ w funkcji temperatury

Stosując znany układ do detekcji wnz, ERA model 3, określono naprężenie początkowe wnz / E_0 / oraz naprężenie gaśnięcia wnz / E_t / dla wszystkich trzech grup modeli w zakresie temperatur -50°C do $+80^{\circ}\text{C}$. Wyniki przedstawiono na rys. 1. Jak widać z rys. 1, grupy modeli I i II impregnowane nowym syciwem, przy temperaturze dielektryka -20°C do 80°C mają znacznie wyższy poziom naprężeń początkowych i gaśnięcia wnz niż grupa III, zaimpregnowana olejem mineralnym.

Wynik pomiaru potwierdza hipotezę, że w układzie izolacyjnym dominującą rolę w przebiegu charakterystyki jonizacyjnej odgrywa zastosowany rodzaj syciwa. Charakterystyki grupy I i II mimo różnego rodzaju dielektryka stałego nałożyły się i w zakresie temperatury -20°C do 80°C przebiegają znacznie wyżej niż grupy III, zaimpregnowanej olejem mineralnym.

Pod względem wyładowań niezupełnych w zakresie ujemnej temperatury nowe syciwo jest dużo lepsze niż PCB. Lepkość PCB w ujemnej temperaturze gwałtownie wzrasta i między innymi dlatego silnie maleje naprężenie początkowe wnz kondensatorów z PCB w tych warunkach.



Rys.1. Napężenie początkowe E_0 i gańnięcie E_t wyładowań niezupełnych w funkcji temperatury modeli kondensatorów.

- I - układ izolacyjny mieszany papierowo-polipropylenowy impregnowany nowym syciwem z ITN,
 II - układ izolacyjny sam papier, impregnowany jak I
 III - układ izolacyjny sam papier, impregnowany olejem mineralnym.

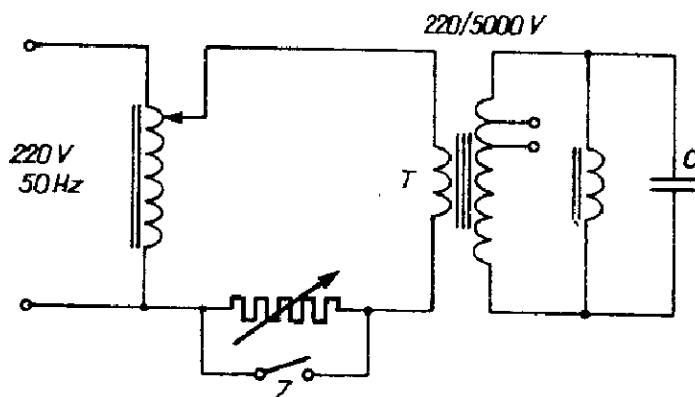
4. Odporność na przepięcia /TOV/

Łączenie baterii kondensatorowych za pomocą wyłączników bez powrotnych zapłonów zwykle wywołuje przepięcia łączeniowe w czasie pół okresu, których pierwsza wartość szczytowa nie przekracza $2 \times \sqrt{2}$ przyłożonego napięcia znamionowego /wartości skutecznej/.

Liczba łączeń baterii w ciągu roku nie przekracza na ogół 1000, z tym, że część tych łączeń może odbywać się w ujemnej temperaturze. Nawet gdy bateria pracuje, to część członów baterii może być załączana ze stanu "zimnego". Ujemna temperatura w przypadku napowietrznych baterii dochodzi do -40°C .

Mając powyższe na uwadze oraz wspomnianą na wstępie konieczność sprawdzenia marginesu między przyjętym napężeniem roboczym pola elektrycznego, a poziomem wyładowań niezupełnych postanowiono wykonać próbę dodatkową odporności na przepięcia /TOV/, zgodnie z wymaganiem ostatnie-

go projektu IEC [1] . Próbę wykonano w układzie pokazanym na rysunku 2.

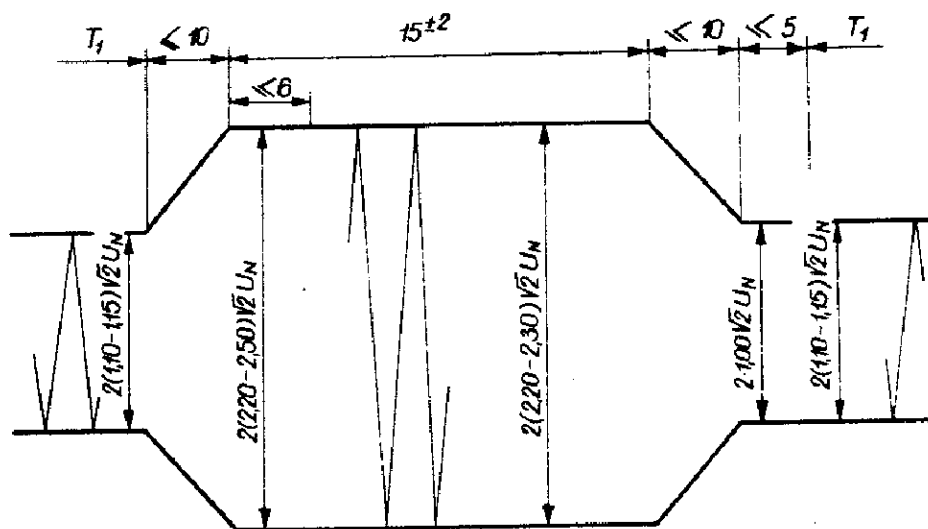


Rys.2. Schemat układu do badań odporności na przepięcia /TOV/,
Z - sterownik czasu, T - transformator probierczy, C - obiekt
badany

W obwód pierwotny transformatora probierczego w szereg z transformatorem regulacyjnym włączono rezystor ze sterownikiem czasu wyłączenia i załączania rezystora. Przy zwarciu rezystora rośnie napięcie na badanym kondensatorze do wymaganej normą wartości $2,25 U_n$. Amplitudy tego napięcia stanowią jeden cykl przepięciowy. Po włączeniu rezystora napięcie na kondensatorze wraca do wartości bazowej $1,1 U_n$. Po czasie 1,5 do 2 minut następuje znów zwarcie rezystora, występuje kolejny cykl przepięciowy itd.

Czasy i amplitudy napięcia jednego cyklu przepięciowego wraz z dopuszczalnymi odchyłkami wg IEC [1] pokazano na rys. 3. Każdy cykl przepięciowy o wartości $2,25 U_n$ składa się z 15 okresów /50 Hz/ napięcia przykładanego w odstępach czasu 1,5 do 2 min. na napięcie bazowe ciągle o wartości $1,1 U_n$.

Próbie odporności przepięciowej poddano 5 sztuk modeli kondensatorów grupy I /z dielektrykiem papierowo-polipropylenowym impregnowane nowym syciwem/. Napięcie znamionowe tych modeli na podstawie pomiarów opisanych w punkcie 3 określono na 1140 V. Z uwagi na moc źródła zasilającego próbę prowadzono kolejno na poszczególnych jednostkach. Każdy model najpierw schładzano do -25°C , a następnie przykładano dzienną serię przepięć 130 - 170 cykli przepięciowych w czasie około 7 godzin. Następnie badany model wkładano do komory niskich temperatur i tam przetrzymywano



Rys.3. Czasy i amplitudy napięcia podczas jednego cyklu przebiegowego. Czasy za wyjątkiem T_1 podano w Hz napięcia probierczego. U_n - napięcie znamionowe badanego kondensatora

przez całą noc. Rano badany model znów poddawano impulsowaniu itd, aż do uzyskania łącznie 1700 cykli przebiegowych /tj. 25500 amplitud 50 Hz/ na każdym modelu kondensatora.

Wynik próby :

Żaden z badanych modeli w czasie próby przebiegowej nie uległ przebiciu. Charakterystyki wyładowań niezupełnych i straty dielektryczne określone przed i po próbie uległy tylko nieznacznemu pogorszeniu.

5. Wnioski

1. W układzie izolacyjnym rodzaj syciwa wywiera dominujący wpływ na wyładowania niezupełne. Dowodem tego są wyniki pomiaru wzn w pkt. 3, przedstawione na rysunku 1.

2. Nowe syciwo z ITN - syntetyczny węglowodór aromatyczny, spełniający wymagania projektu normy IEC10A, typ 1 - nadaje się do impregnacji układu izolacyjnego papierowo-polipropylencowego w kondensatorach energetycznych wysokiego napięcia do poprawy $\cos \varphi$.

3. Wyniki próby odporności przepięciowej, opisaną w punkcie 4 potwierdziły, że przyjęte natężenie robocze pola elektrycznego dla tego typu kondensatorów /30 do 35 V/ μ m / nie jest zawyżone.

Celowe jest przebadanie tą metodą innych układów izolacyjnych impregnowanych nową cieczą, na przykład układu izolacyjnego z dostępną w kraju folią poliestrową. Celowość takiej pracy potwierdzają wykonane dotychczas pomiary stratności dielektrycznej na modelach odtwarzających układ cieplny kondensatora.

Kończąc niniejsze opracowanie chciałbym wyrazić podziękowanie Doc. R. Włodkowi z AGH za inspiratorską inicjatywę podjęcia tych badań, głównym twórcą nowej cieczy w ITN - mgr inż. A. Bednarskiemu i mgr inż. W. Kadeli-Woźniczko, twórcą układu do próby odporności przepięciowej w ZWAR - inż. T. Żmudzkiemu i mgr inż. S. Kani, a także zespołowi badającemu ciecz izolacyjną w ZWAR pod kierunkiem mgr inż. W. Janiaka.

Literatura

1. Draft to IEC - Raport : Requirement for endurance testing of shunt capacitors for. a. c. power systems having a nominal voltage above 660 V.
2. Mandelcorn L., Dakin T., Miller R. : High - Voltage power capacitor dielectrics recent developments. Electrical Electronics Insulation Conference, Boston 1979.
3. Nishimatsu M., Inonu Y., Suganuma K. : Gas generation and partial discharge properties of oil impregnated dielectrics. CIGRE 15-05/82-26.
4. Draft : Specifications for synthetic aromatic hydrocarbons. Doc. IEC10A/Secr./73, April 1982.
5. Watkinson R.I. : Developments in Biodegradation of Hydrocarbons-1, London 1978.
6. Instytut Technologii Nafty w Krakowie, Dokumentacja Techniczna 1398/81 i 1502/82.