

Stefan Wolny*, Józef Kędzia*

ANALIZA CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA ELEKTRYZACJĘ IZOLACYJNYCH OLEJÓW TRANSFORMATOROWYCH

Streszczenie: W referacie poddano analizie czynniki wpływające na elektryzację statyczną izolacyjnych olejów transformatorowych. Wydzielono trzy obszary takich oddziaływań. W pierwszym pokazano, jak prędkość przepływu i temperatura oleju, oddziałując na warunki hydrodynamiczne, zmienia poziom generacji ładunków elektrostatycznych. Drugi zakres oddziaływań związany jest ze składem chemicznym oleju, procesami starzeniowymi, które w nim zachodzą oraz wpływem inhibitorów i zanieczyszczeń. Pokazano również oddziaływanie pola elektrycznego, które występuje w pracującym transformatorze.

Słowa kluczowe: elektryzacja statyczna, oleje izolacyjne, transformatory

1. Wstęp

Historia badań nad zagrożeniem izolacji transformatorów energetycznych elektryzacją statyczną liczy sobie ponad dwadzieścia lat. Problematykę zasygnalizowali Japończycy w roku 1978 [6]. Przedstawione wyniki badań wskazywały na to, że w układzie izolacyjnym transformatorów z wymuszonym przepływem oleju typu OD, mogą być generowane ładunki elektrostatyczne. Podstawy fizyczne obserwowanych zjawisk były już stosunkowo dobrze poznane i podsumowane w pracach Klinkenberga [3]. Dotyczyły jednak zupełnie innej dziedziny urządzeń przemysłowych, mianowicie rurociągów petrochemicznych. Przepływające produkty ropopochodne, ulegając elektryzacji, wprowadziły zagrożenia pożarowe i wybuchowe. W układach izolacyjnych transformatorów, gdzie duża rezystywność sprzyja kumulacji ładunków elektrostatycznych, może dochodzić do generacji pól elektrostatycznych o tak dużym natężeniu, że wywoła to zapłon wyładowań niezupełnych, a nawet przebicie izolacji. Skutki

* Politechnika Opolska, ul. Sosnkowskiego 31, 45-233 Opole

ekonomiczne takich awarii są w tym przypadku bardzo wysokie, biorąc pod uwagę duże moce transformatorów, w których stosuje się chłodzenia typu OD.

Rozwój badań obejmujących problematykę zagrożeń izolacji transformatorów elektryzacją statyczną był bardzo intensywny i jednocześnie prowadzony w wielu ośrodkach badawczych. Oprócz ośrodków japońskich, szeroko zakrojone badania prowadzono w Stanach Zjednoczonych, gdzie uruchomiono program badawczy prowadzony przez Electric Power Research Institute (EPRI) z udziałem Massachusetts Institute of Technology (MIT).

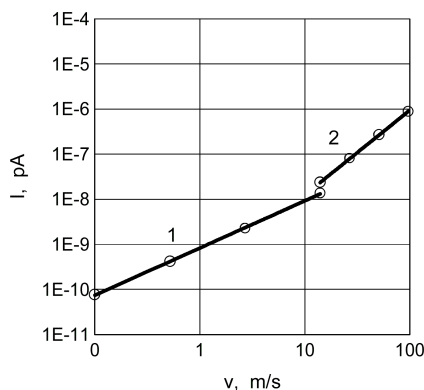
Badania takie prowadzone były również w wielu innych krajach. Wymienić tu można Francję, Szwajcarię, Austrię, Anglię, Polskę, Indie, Australię, Egipt. W roku 1989 CIGRE podjęło koordynację tych badań w ramach Grupy Roboczej 12/15. W chwili obecnej problematyka ta jest już stosunkowo dobrze rozpoznana. Odnosi się to zarówno do badań prowadzonych na dużych jednostkach transformatorowych, które pozwoliły na ujęcie korelacji między narastającą gęstością ładunków elektrostatycznych a intensywnością wyładowań niezupełnych, a także na szerokim zakresie badań prowadzonych w warunkach laboratoryjnych. W tym ostatnim przypadku rozeznano wpływ wielu czynników, które mogą oddziaływać na tendencję olejów transformatorowych do ich elektryzacji ECT (Electrostatic Charge Tendency).

W referacie przedstawiono analizę tych czynników, które mogą wpływać na elektryzację olejów izolacyjnych, a tym samym wywołać określone zmiany w zagrożeniu izolacji transformatorów energetycznych.

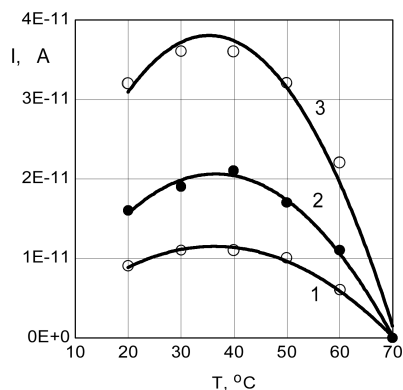
2. Wpływ czynników zmieniających warunki hydrodynamiczne przepływu

Warunki hydrodynamiczne wpływają decydująco na proces generacji ładunków elektrostatycznych przy przepływie oleju izolacyjnego. Obserwowane zależności związane są z rodzajem przepływu. Zależność prądu elektryzacji od prędkości przepływu ma charakter potęgowej i może być aproksymowana krzywą regresyjną typu $I = a \cdot V^n$. Współczynnik n dla przepływu laminarnego jest zbliżony do jednośc, natomiast przy przepływie turbulentnym jest równy 1,9 (rys. 1). Taki gwałtowny wzrost elektryzacji wywołany turbulentnym charakterem przepływu może zachodzić w układzie chłodzenia transformatora. Wymienić tu można przede wszystkim pompę olejową, ale także zmiany profilów kanałów olejowych.

Temperatura jest parametrem, który pośrednio wpływa na hydrodynamiczne warunki przepływu. Lepkość oleju izolacyjnego zmienia się bowiem wykładniczo z temperaturą, wywołując zmiany w naprężeniach ścinających, grubości podwarstwy laminarnej i liczbie Reynoldsa. Ponieważ zmiany temperatury są nierozłącznie związane z obciążeniem pracującego transformatora, to zjawiska generacji ładunków elektrostatycznych w tych warunkach były szczegółowo przebadane, zarówno na transformatorach, jak również w układach modelowych. Typową zależność prądu elektryzacji pokazano na rysunku 2. Charakterystyczne maksimum generacji ładunków elektrostatycznych obserwuje się dla temperatury około 55°C. Dalszy wzrost temperatury powoduje obniżenie efektywności tego procesu. Należy zaznaczyć, że opracowane modele tego zjawiska nie przewidują takiego przebiegu charakterystyk prądu elektryzacji



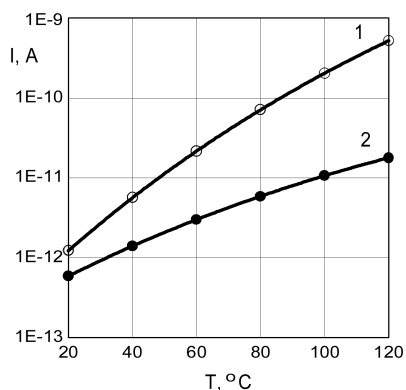
Rys. 1. Zależność prądu elektryzacji od prędkości przepływu oleju: 1) przepływ laminarny, 2) przepływ turbulentny



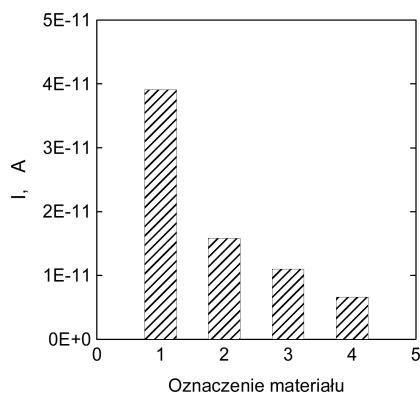
Rys. 2. Zależność prądu elektryzacji od temperatury oleju: 1) $v = 0,5$ m/s, 2) $v = 1$ m/s, 3) $v = 2$ m/s [2]

od temperatury. Dotyczy to zarówno przepływu o charakterze laminarnym jak i turbulentnym (rys. 3). Przy zmianach charakteru przepływu laminarnego na turbulentny, w obliczonych zależnościach $I = f(T)$ można obserwować widoczne różnice w przebiegach charakterystyk, a także w wartościach prądu elektryzacji.

Istotnym czynnikiem modyfikującym warunki hydrodynamiczne na granicy fazy stałej i ciekłej, a tym samym zmieniającym warunki generacji ładunków elektrostatycznych są właściwości fizykochemiczne fazy stałej.



Rys. 3. Zależność prądu elektryzacji od temperatury oleju obliczona przy użyciu modelu Abediana-Sonina: 1) przepływ laminarny, 2) przepływ turbulentny



Rys. 4. Wpływ fazy stałej na wartości prądów generowanych przy przepływie oleju izolacyjnego: 1) preszpan, 2) brąz, 3) szkło, 4) poliwęglan

Wyniki badań z tego zakresu można dość często spotkać w literaturze przedmiotu. Są one jednak często sprzeczne ze sobą i nie uwzględniają wpływu tak istotnego czynnika jakim jest chropowatość powierzchni ciała stałego. Stosunkowo zbieżne wyniki otrzymywane są w przypadku badań przeszpanu, gdzie obserwowane wartości generowanego prądu elektryzacji są największe (rys. 4).

3. Wpływ składu chemicznego oleju oraz procesów starzeniowych na tendencję oleju do elektryzacji

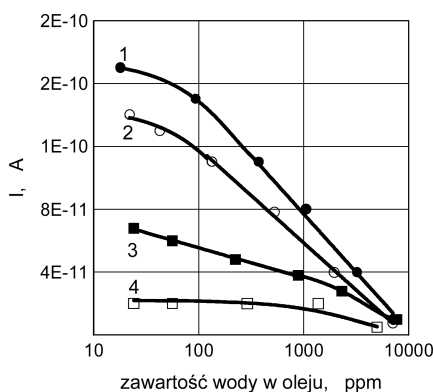
Mineralne oleje izolacyjne stosowane w układzie izolacyjnym transformatorów energetycznych są cieczami o złożonej budowie chemicznej. W ich skład wchodzi trzy grupy węglowodorów: naftenowe, aromatyczne i parafinowe. Przyjmuje się, że w oleju izolacyjnym znajduje się około 40 000 rodzajów węglowodorów. Skład olejów izolacyjnych jest modyfikowany w procesie produkcji tak, aby spełniały one ostre wymagania stawiane im w okresie eksploatacji układu izolacyjnego transformatora.

Z danych literaturowych wynika [5], że największą tendencję do elektryzowania się (ECT) mają oleje produkowane z ropy naftowej o dużej zawartości parafin. Najlepsze właściwości (tzn. małe ECT) w tym zakresie posiadają oleje produkowane z ropy zawierającej dużo węglowodorów naftenowych. Zmieniając skład chemiczny oleju można zmieniać w bardzo szerokim zakresie jego tendencję do elektryzacji. Prowadzone badania wykazały również, że oleje mogą różnić się znakiem generowanych ładunków elektrostatycznych. W ich mieszaninie tendencja do elektryzacji może zanikać.

Procesy starzeniowe, które zachodzą w olejach pod wpływem temperatury, pola elektrycznego, tlenu oraz katalitycznego oddziaływania miedzi, wywołują w nich bardzo duże zmiany chemiczne. Ich wpływ na ECT olejów izolacyjnych jest nie tylko ilościowy, ale również jakościowy. Wykazano, że już niewielkie zmiany starzeniowe wywołują duże zmiany ECT [2]. Zmiany klasycznych współczynników starzeniowych, takich jak współczynnik stratności, rezystywność, liczba kwasowa, są w tym przypadku niemierzalne. Już po czterech godzinach prąd elektryzacji zmienia znak na ujemny, a jego bezwzględne wartości szybko rosną. W pewnych gatunkach olejów obserwowano nawet wielokrotną zmianę znaku prądu elektryzacji przy starzeniu cieplnym. Z prowadzonych badań wynika, że oddziaływanie wyładowań niezupełnych nie powoduje tak radykalnych zmian w ECT olejów izolacyjnych.

Wpływ domieszek i zanieczyszczeń na ECT transformatorowych olejów izolacyjnych jest stosunkowo dobrze poznany. Woda, jako zanieczyszczenie decydujące o wytrzymałości elektrycznej olejów izolacyjnych odgrywa również istotną rolę w zmianach ich tendencji do elektryzacji. Przy bardzo małych zawartościach wody (poniżej 4 ppm) oleje nie wykazują tendencji do elektryzacji. Rośnie ona gwałtownie po przekroczeniu 6 ppm zawartości wody, jednak po przekroczeniu 10 ppm ECT zaczyna znów maleć. Przebieg zmian ECT w funkcji zawartości wody jest również zależny od rodzaju oleju. Przebieg charakterystyk pokazano na rysunku 5.

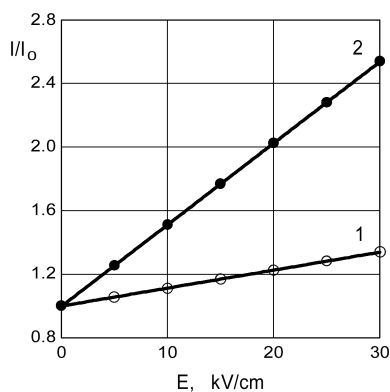
Domieszką, która wprowadzana jest do olejów izolacyjnych jako inhibitor procesów starzeniowych jest 1,2,3-benzotriazol (BTA). Stosowany jest on w małych ilościach i nie wywołuje zmian w ich tendencji do elektryzacji. Tendencja ta utrzymuje się również na niższym poziomie w czasie starzenia cieplnego.



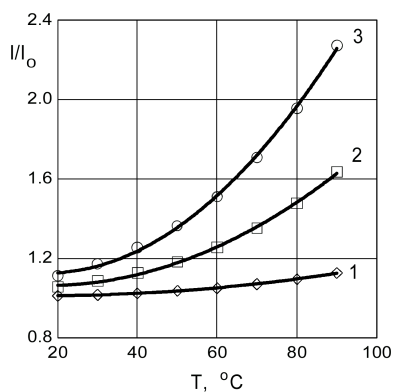
Rys. 5. Zależność prądu elektryzacji od zawartości wody w oleju izolacyjnym: 1, 2, 3, 4 – oznaczenia próbek o różnej wyjściowej tendencji do elektryzacji

4. Wpływ pól elektrycznych na elektryzację olejów izolacyjnych

Pole elektryczne jest czynnikiem, którego oddziaływania na proces generacji ładunków elektrostatycznych w układzie izolacyjnym transformatora nie można pominać. Jego wpływ był badany w szerokim zakresie, zarówno w dużych układach modelowych jak i małych układach laboratoryjnych [4]. Uzyskane wyniki badań wykazały, że intensywność procesu elektryzacji wzrasta wraz ze wzrostem natężenia pola (rys. 6). Proces ten ulega dalszej intensyfikacji przy wzroście temperatury (rys. 7).

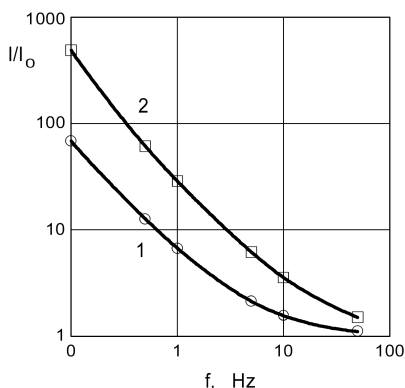


Rys. 6. Względny przyrost prądu elektryzacji oleju w zależności od przyłożonego pola elektrycznego: 1) $T = 20^{\circ}\text{C}$, 2) $T = 60^{\circ}\text{C}$



Rys. 7. Względny przyrost prądu elektryzacji w zależności od temperatury oleju: 1) $E = 1 \text{ kV/cm}$, 2) $E = 5 \text{ kV/cm}$, 3) $E = 10 \text{ kV/cm}$

Bardzo ważną rolę odgrywa również częstotliwość oddziałującego pola elektrycznego. Proces generacji ładunków elektrostatycznych ulega zwiększaniu przy obniżaniu częstotliwości (rys. 8).



Rys. 8. Względne zmiany prądu elektryzacji w funkcji częstotliwości pola elektrycznego: 1) $T = 20^{\circ}C$, 2) $T = 60^{\circ}C$

Niektóre wyniki badań wskazują na to, że występuje synergiczne oddziaływanie pola przemiennego i pola stałego. Prąd elektryzacji rośnie wówczas gwałtownie.

5. Podsumowanie

Szeroki zakres badań prowadzonych nad zagadnieniem zagrożenia izolacji transformatorów energetycznych elektrycznością statyczną umożliwił zgromadzenie informacji przydatnych nie tylko w eksploatacji tych urządzeń, ale także w procesie ich projektowania. Obniżanie poziomu generacji ładunków elektrostatycznych w układzie izolacyjnym transformatora można uzyskać poprzez zmniejszenie prędkości przepływu oleju, co wiąże się niestety ze zmniejszeniem obciążenia pracującego transformatora. Informacje o wpływie prędkości przepływu można jednak wykorzystać na etapie projektowania, dobierając odpowiednie pompy, rozmiary chłodnic, ich kształt, itd.

Najbardziej efektywną metodą obniżania zagrożenia izolacji transformatorów jest zmniejszenie tendencji do elektryzacji oleju izolacyjnego. Niezbędna jest wówczas znajomość wpływu składu chemicznego oleju na te procesy. W praktyce eksploatacyjnej stosuje się już mieszanie olejów o różnej tendencji do elektryzacji. Potencjalne możliwości tkwią w opracowywaniu inhibitorów takich procesów, lub wykorzystaniu istniejących, np. BTA.

Wobec złożoności procesów elektryzacji, jak również wpływu wielu czynników na jego przebieg, w chwili obecnej nie można stwierdzić, że wynikające stąd zagrożenie izolacji transformatorów energetycznych zostało już opanowane.

Zagadnieniem, które wymaga szybkiego rozwiązania jest normalizacja metod pomiaru ECT i wprowadzenie ich do badań profilaktycznych.

Literatura

- [1] **Abedian B., Sonin A. A.:** *Theory for electric charging in turbulent pipe flow.* J. Fluid Mech. Vol. 120, 1981, 199
- [2] **Kędzia J.:** *Badania elektryzacji statycznej mineralnych olejów izolacyjnych.* ZN WSI Opole, 1988 (monografia)
- [3] **Klinkenberg A., Van Der Minne I. L.:** *Electrostatics in the Petroleum Industry.* Elsevier, 1958
- [4] **Metwally I. A.:** *Flow Electrification of Transformer Oil.* IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 5. No 4, 1998, 518–526
- [5] **Sierota A., Rungis J.:** *Electrostatic Charging in Transformers Oils. Testing and Assessment.* IEEE Transactions on Dielectrics and EI. Vol. 1, No. 5, 1994
- [6] **Tagaki T., Murata H.** et al.: *Reliability improvement of 500 kV large capacity power transformer.* CIGRE Paper, 1978, 12–02

ANALYSIS OF THE FACTORS INFLUENCING THE STATIC ELECTRIFICATION OF THE TRANSFORMERS INSULATION OILS

The paper presents an analysis of factors influencing the static electrification of transformer insulation oils. Three areas of the influence are analysed. In the first one, the influence of flow speed and oil temperature on the electrostatic charge generation level was demonstrated. The second one is connected with the chemical composition of oil, aging processes, inhibitors and dirties influence. At least, the influence of electric field is shown.