



Józef Kędzia*, Janusz Fleszyński**

DIAGNOSTYKA ZAGROŻEŃ IZOLACJI TRANSFORMATORÓW ELEKTRYZACJĄ STATYCZNĄ

Streszczenie: W referacie przedstawiono zagrożenia izolacji transformatorów energetycznych spowodowane elektrycznością statyczną generowaną przepływem oleju izolacyjnego. Omówiono metodykę badań tych zjawisk. Scharakteryzowano kierunki badań koordynowane przez Grupę Roboczą 12/15 CIGRE.

Słowa kluczowe: elektryzacja statyczna, oleje izolacyjne, transformatory

1. Wstęp

Zagrożenie izolacji transformatorów energetycznych z wymuszonym przepływem oleju (typu OD) zostało zasygnalizowane w roku 1978 przez badaczy japońskich [1]. Postulowali oni, że wyładowania niezupełne, które obserwowano w czasie prób transformatorów, a nieco później również w eksploatacji, wywoływane są ładunkami elektrostycznymi. Ładunki te generowane są w układzie izolacyjnym transformatorów przepływem oleju. Ich akumulacji sprzyja duża rezystywność, zarówno oleju izolacyjnego jak również izolacji stałej. Ładunki te wytwarzają statyczne pola elektryczne nakładające się na pola przemienne pracującego transformatora i po przekroczeniu ich wartości krytycznej, powodują generacje wyładowań niezupełnych. Późniejsze doniesienia o awariach transformatorów w energetyce amerykańskiej potwierdziły takie zagrożenie [2]. W trakcie prac remontowych stwierdzano ślady wyładowań o długości dochodzącej nawet do jednego metra. Wyładowań takich nie można było oczekiwać przy działaniu tylko pola przemiennego. Obserwowane również przebicia izolacji, ostatecznie potwierdziły postulowane zagrożenie.

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

** Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

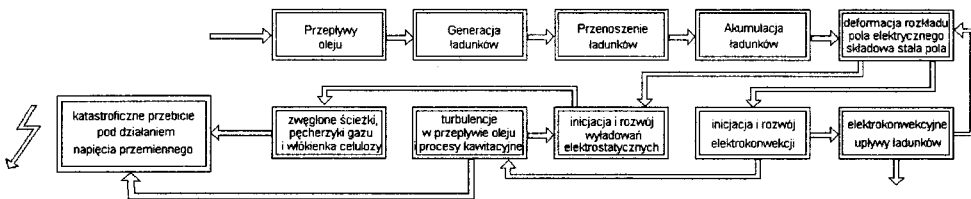
Bardzo duże straty ekonomiczne związane z awariami transformatorów blokowych, wynikające nie tylko z kosztów ich remontów, ale także kosztów niedostarczonej energii, a także innych strat produkcyjnych, wymusiły intensywny rozwój prac badawczych w tej dziedzinie. Prace te prowadzone są w wielu krajach, między innymi w Japonii, USA, Francji, Australii, Austrii, Egipcie, Indiach itd.

Prace badawcze z tego zakresu zostały podjęte również w Polsce i to z niewielkim opóźnieniem. Pierwsze wyniki badań referowano na konferencji ICDL w roku 1981 w Berlinie [3].

Złożoność obserwowanych zjawisk, jak również konieczność ponoszenia dużych nakładów finansowych, doprowadziła do koordynacji prac na poziomie międzynarodowym. W ramach CIGRE realizowany jest program badań realizowany przez Grupę Roboczą 12/15 [4, 5]. Kompleksowe ujęcie zachodzących procesów wymagało podjęcia studiów nad rolą zjawisk fizycznych występujących na granicy kontaktu stałej izolacji celulozowej z olejem izolacyjnym, wpływem parametrów hydrodynamicznych charakteryzujących przepływ oleju, oddziaływania pola elektrycznego, rolą parametrów charakteryzujących stan fizyko-chemiczny układu (temperatura, zawilgocenie, zesterzenie, stan powierzchni, zanieczyszczenia, skład chemiczny oleju itd.). Złożoność zachodzących zjawisk powoduje, że do chwili obecnej nie są one dostatecznie wyjaśnione. Wynikająca stąd konieczność badań diagnostycznych transformatorów nowych i będących w eksploatacji wymaga rozwoju metod badawczych, jak również opracowania odpowiednich kryteriów powstających zagrożeń.

2. Metody badań

Generacja ładunków elektrostatycznych w układzie izolacyjnym pracującego transformatora zachodzi w każdym punkcie obiegu oleju. Intensywność ich generacji nie jest jednak równomierna. W kanałach izolacyjnych zachodzi dodatkowa stymulacja polem elektrycznym. Jak wynika to z prowadzonych badań, objętościowa gęstość generowanych ładunków rośnie wówczas gwałtownie. Rozwój zjawisk elektrokonwekcyjnych komplikuje dodatkowo zachodzące procesy.

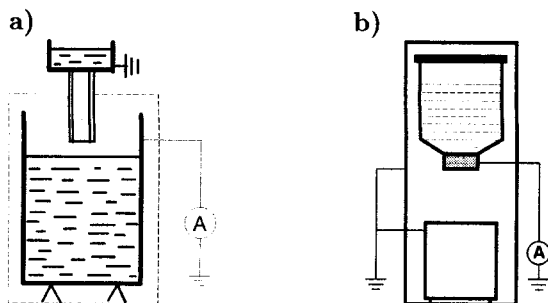


Rys. 1. Rozwój zjawisk elektrostatycznych w układzie izolacyjnym pracującego transformatora

W chwili obecnej metody badań zjawisk elektryzacji statycznej wykorzystują zarówno duże przemysłowe układy badawcze, jak również małe układy laboratoryjne [6]. Pierwszy kierunek badań realizowany jest na odpowiednio oprzyrządowanych transformatorach energetycznych, w których prowadzi się pomiary parametrów hydro-

dynamicznych przepływu, pomiary wyładowań niezupełnych, gęstości generowanych ładunków elektrostatycznych, temperatury, itd. Ich wzajemna korelacja pozwala na ocenę stopnia zagrożenia izolacji transformatora. Układy te są często uzupełniane przez duże modele o wymiarach rzędu kilku metrów, gdzie ze względu na prostotę konstrukcji łatwiej jest uchwycić wpływ poszczególnych parametrów wpływających na poziom generowanych ładunków elektrostatycznych. Wyniki badań uzyskane na tych obiektach pozwoliły jednocześnie wykazać decydującą rolę jaką odgrywa w zagrożeniu podatność oleju na elektryzację ECT (electrostatic charging tendency). Wykorzystanie tej zależności ma kapitalne znaczenie dla rozwoju diagnostyki i prowadzenia badań profilaktycznych. Są one konieczne ze względu na stwierdzony bardzo silny wpływ procesów starzeniowych na podatność oleju na elektryzację. Wpływ ten może być nie tylko ilościowy, ale i jakościowy.

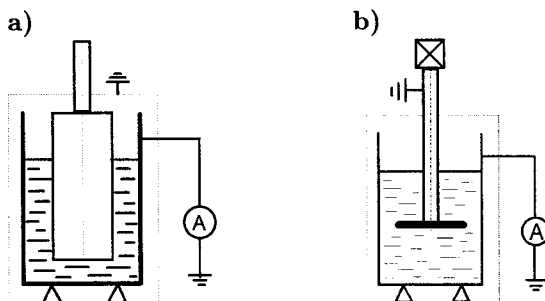
Badania ECT można prowadzić w małych układach laboratoryjnych. Nakłady ekonomiczne są tu niewspółmiernie niższe w stosunku do dużych układów przemysłowych. Małe układy laboratoryjne można podzielić na trzy grupy, biorąc pod uwagę charakter przepływu oleju oraz sposób elektryzacji, jaki w nich zachodzi. Pierwszą grupę stanowią układy przepływowe (rys. 2).



Rys. 2. Układ przepływowy z rurką (a) oraz filtrem (b)

W układzie przepływowym z rurką proces elektryzacji zachodzi wskutek rozrywania warstwy ładunku na ściankach rurki. Strumień oleju porzywa część ładunków przenosząc je do zbiornika, który stanowi klatkę Faraday'a. Prąd ładunków jest mierzony elektrometrem. Do układów przepływowych należy zaliczyć także tzw. minitester Oommana [7]. W minitesterze olej izolacyjny przeciskany jest przez filtr do naczynia stanowiącego również klatkę Faraday'a. Zastosowanie filtru podwyższa znacznie gęstość generowanych ładunków elektrostatycznych, co ułatwia pomiar. Jednocześnie jednak znaczny wpływ materiału filtru i jego stanu (np. zawartości wody w preszpanie), powoduje trudności w interpretacji wyników. Tworzenie się piany oleju w trakcie przeciskania ułatwia penetrację wilgoci i gazów, co wpływa na niepowtarzalność wyników. Z tego też względu nawet szerokie wykorzystanie układu w badaniach laboratoryjnych i profilaktycznych nie dało mu pozytywnego potwierdzenia w podsumowaniu na Third EPRI Workshop Static Electrification i Power Transformers. Odmianą układu, w którym starano rozwiązać ten problem jest układ Palmera i Nelsona [8].

Drugą grupę małych układów laboratoryjnych stanowią układy wirujące (rys. 3). W odróżnieniu od układów przepływowych, faza stała jest przemieszczana tutaj względem fazy ciekłej. Pierwszym układem wirującym wprowadzonym przez Zahna, był układ walców wirujących Couette'a [9]. W układzie tym warstwa podwójna ładunku jest rozrywana na powierzchni walca wewnętrznego siłami odśrodkowymi. Wprowadzany w objętość oleju ładunek może być mierzony w klatce Faraday'a, lub jako prąd płynący od walca wewnętrznego do walca zewnętrznego. Zaletą układu jest możliwość pomiaru ciągłego małej próbki oleju. Wadą układu są problemy z wyważeniem dynamicznym. Niedogodności te zostały usunięte w układzie z tarczą wirującą wprowadzonym przez Kędziałę [10] (rys. 3b).



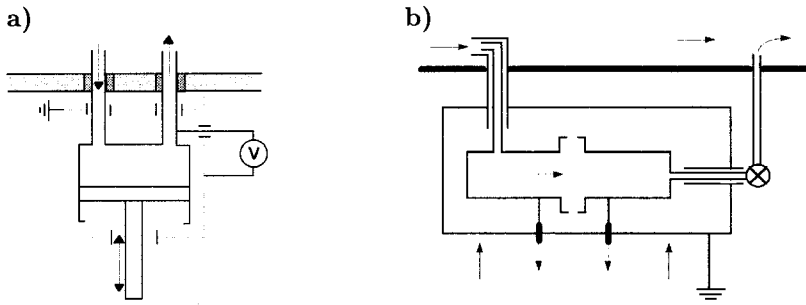
Rys. 3. Układ wirujących walców (a) oraz układ z wirującą tarczą (b)

Potrzeba standaryzacji metod pomiarowych spowodowała, że grupa robocza 12/15 wytypowała ten układ do badań porównawczych. Jednoczesne zalecenie stosowania tarczy preszpanowej, legło u podstaw niejednoznaczności otrzymywanych wyników, co doprowadziło do wycofania rekomendacji. Badania prowadzone w Politechnice Opolskiej i Politechnice Wrocławskiej wskazują, że niedogodności tych można uniknąć stosując odpowiednią tarczę metalową [13].

Trzecią grupę układów laboratoryjnych stanowi czujnik gęstości objętościowej ładunku, skonstruowany w MIT tzw. ACS (absolute charge sensor) oraz układ z podwójną komorą Nelsona (rys. 4) [12].

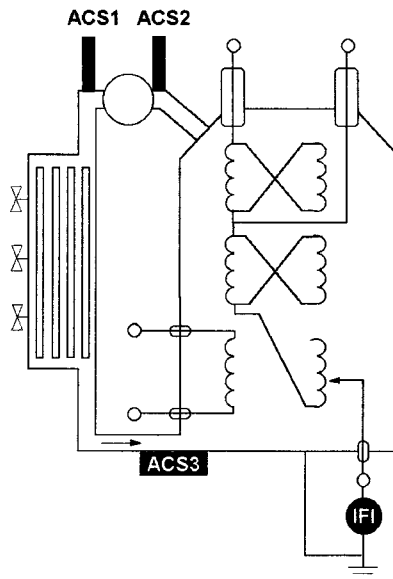
W odróżnieniu od uprzednio wymienionych małych układów laboratoryjnych, w których zachodzi proces generacji ładunków elektrostatycznych oraz ich pomiar, układy grupy trzeciej przeznaczone są tylko do pomiaru uprzednio naelektryzowanego oleju izolacyjnego. Można je więc wykorzystać do diagnostyki typu on-line. Układ ACS jest wykonany w postaci klatki Faraday'a, do której zasysana jest cyklicznie próbka oleju z transformatora [11]. Jest on montowany na tzw. płycie Nilssona razem z czujnikami temperatury i wilgotności oleju. Pomiar ciągły gęstości ładunku objętościowego można wykonywać korzystając z układu z podwójną komorą pomiarową. Przepływający przez komory naładowany olej wywołuje przepływ prądów mierzonych elektrometrami. Z przytoczonych w pracy rozważań wynika, że gęstość objętościowa ładunku oleju jest związana z ich wartościami odpowiednią relacją.

Jak wspomniano na początku rozważań, elektryzacja oleju izolacyjnego jest silnie zależna od natężenia pola elektrycznego panującego w miejscu generacji ładunków



Rys. 4. Czujnik gęstości przestrzennej ładunku w oleju izolacyjnym (a) oraz schemat układu z podwójną komorą (b)

elektrostatycznych. Metodami diagnostycznymi uwzględniającymi ten czynnik są metody ACS oraz metoda dwóch komór pomiarowych. Dużą rolę przy badaniach elektryzacji oleju w pracujących transformatorach może odegrać metoda pomiaru prądu upływu. Badania w tym zakresie były początkowo prowadzone w transformatorach z wyłączonym zasilaniem. Stan taki warunkowały bardzo duże prądy pojemnościowe, które maskowały prądy upływu generowane elektrycznością statyczną. Obecnie wprowadza się układy z szerokopasmowymi aktywnymi filtrami, które umożliwiają taki pomiar. Przykładem jest przyrząd IFJ wprowadzony przez Krausa (rys. 5) [14].



Rys. 5. Schemat układu uzwojeń oraz układu chłodzenia transformatora z przyłączonymi czujnikami ACS oraz IFJ [14]

Szeroki wybór metod pomiaru generacji ładunków elektrostatycznych w układach izolacyjnych transformatorów umożliwia ich wykorzystanie nie tylko do badań profilaktycznych. Możliwe jest obecnie prowadzenie tych pomiarów metodą on-line w ciągłym monitoringu transformatora, z wykorzystaniem systemów ekspertowych.

3. Ocena wyników badań

Z analizy publikacji dotyczących badań w zakresie zagrożenia układów izolacyjnych transformatorów elektrycznością statyczną wynika, że diagnostyczną wartość posiada podatność olejów na elektryzację ECT. Można przyjąć, że dla olejów świeżych powinna być ona mniejsza od $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$, natomiast dla olejów eksploatowanych winna być mniejsza od $400 \mu\text{C}/\text{m}^3$ [6]. Badania tej wielkości mogą być prowadzone w systemie off- jak i on-line. Wprowadzane obecnie, również w Polsce, systemy monitoringu oraz systemy ekspertowe powinny być uzupełniane pomiarami wielkości określających wielkość generowanych ładunków elektrostatycznych, a więc i zagrożenie izolacji. Należy do nich pomiar ECT, temperatury, wilgotności oleju, pomiar prędkości przepływu oleju oraz prądu upływu. Początkowe dane o tych parametrach stanowiłyby bazę wyjściową do wnioskowania, czy zagrożenie elektryzacją narasta. Pojawienie się wyładowań niezupełnych przy jednoczesnym wzroście ECT może uzasadniać postawienie diagnozy o zagrożeniu transformatora elektrycznością statyczną. Dalszą konsekwencją będzie ewentualne podjęcie decyzji o zmniejszeniu prędkości przepływu oleju, poprzez wyłączenie części pomp (zmniejszenie mocy transformatora), lub uzdatnienie oleju poprzez filtrowanie lub też jego wymianę.

Literatura

- [1] Takagi T., Ishi T., Okada T., Kurita K., Tamura R. and Murata H.: *Reliability Improvement of 500 kV Large Capacity Power Transformers*. CIGRE WG12-02 Paper, Paris 1978
- [2] Crofts D. W.: *The Static Electrification Phenomena in Power Transformer*. Annual Report on IEEE CEIDP#86CH2315-0 pp. 222-236, 1986
- [3] Szuta J., Kędzia J., Brzostek E.: *Testing static electrification phenomenon in pressboard transformer oil insulating system*. Seventh International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. Berlin-West, 1981, 470-474
- [4] CIGRE Joint Working Group 12/15-13: *Static Electrification in Power Transformers*. CIGRE 1992 General Session, Paper 15/12-03, Paris 1992
- [5] Tanguy A.: *Electrostatic Phenomena in Transformers*. CIGRE 1992 Discussion Meeting Summary. Joint Session 15/12, Paris, Electra, Vol. 144, October 1992
- [6] Sierota A., Rungis J.: *Electrostatic Charging in Transformers Oils. Testing and Assessment*. IEEE Transactions on Dielectrics and EI. Vol. 1, No. 5, 1994
- [7] Oommen T. V. and Petrie E. M.: *Electrostatic Charging Tendency of Transformer Oils*. IEEE Trans. PAS, Vol. 103, No. 7, pp. 1923-1931. July 1984
- [8] Palmer J. A., Nelson J. K.: *Method for Repetitive Measurement of the Electrostatic Charging Tendency of Liquid Dielectrics*. IEEE Transaction on Dielectrics and EI. Vol. 3, No. 1, 1996, 70-74

- [9] **Melcher J., Lyon D., Zahn M.:** *Flow electrification in transformer oil cellulosic systems.* Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Claymont, Delaware, 1986, 257–262
- [10] **Kędzia J.:** *Investigation of Transformer Oil Electrification in a Spinning Disc System.* IEEE Trans. on Electr. Ins. Vol. 24, pp. 59–65, 1989
- [11] **Morin A. J., Melcher J. R. and Zahn M.:** *An Absolute Charge Sensor for Fluid Electrification Measurements.* Conference Record of the 1988 IEEE Symposium on Electrical Insulation, 1988, pp. 18–22
- [12] **Nelson J. K., Lee M. J.:** *Tandem-chamber Charge Density Monitor.* IEEE Transaction on EI. Vol. 25, No. 2, 1990, 399–404
- [13] **Fleszyński J., Rouabeh J.:** *Badania niekonwencjonalnych właściwości olejów izolacyjnych.* Postępy w Elektrotechnologii, Szklarska Poręba, 1996, 95–98
- [14] **Krause Ch., Knoll E., Alf J. J., Stonitsch R.:** *Impact of AC-Fields on Electrostatic Charging in a Full-Scale Power Transformer.* Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. Graz 1995, 1080/1-1080/4

DIAGNOSTIC OF STATIC ELECTRIFICATION HAZARDS IN INSULATION SYSTEMS
OF TRANSFORMERS

This paper presents the problems in diagnostics of hazards in insulation systems of power transformers, resulted from static electrification generated by insulation oil flow. The methodology for testing the electrification phenomena is described. Directions of the related studies coordinated by the Working Group 12/15 CIGRE are also characterized.