

doi:10.15199/48.2016.10.21

Pomiary prądów elektryzacji estrów naturalnych w układzie z wirującą tarczą

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę związaną z tworzeniem się podwójnej warstwy ładunku i elektryzacją statyczną transformatorów mocy. Przedstawiono wyniki pomiarów prądów elektryzacji w transformatorowym oleju biodegradowalnym uzyskane metodą wirującej tarczy.

Abstract. The article presents the problems connected with the formation of double layer of charge and static electrification of power transformers. The results of electrification currents measurements in transformer biodegradable oil, obtained by rotating disc method, are presented. (*Electrification currents measurements of natural ester obtained by rotating disc method*).

Słowa kluczowe: podwójna warstwa ładunku, elektryzacja statyczna, olej transformatorowy, ester naturalny.

Keywords: double charged layer, static electrification, transformer oil, natural ester.

Wstęp

Niezawodność dostaw energii elektrycznej jest kluczowym aspektem strategii spółek operatorskich, w które wpisuje się m.in. rozbudowa połączeń pomiędzy systemami elektroenergetycznymi [1], czy - w mniejszej skali - odpowiednia konfiguracja sieci zasilających obiekty przemysłowe [2]. Przesłanką do intensyfikacji tych działań są niewątpliwie aspekty ekonomiczne narzucone przez uregulowania taryfowe, w których koszt strat przypadający na jednostkę niedostarczonej energii jest pięć do dziesięciu razy wyższy od jej ceny [3].

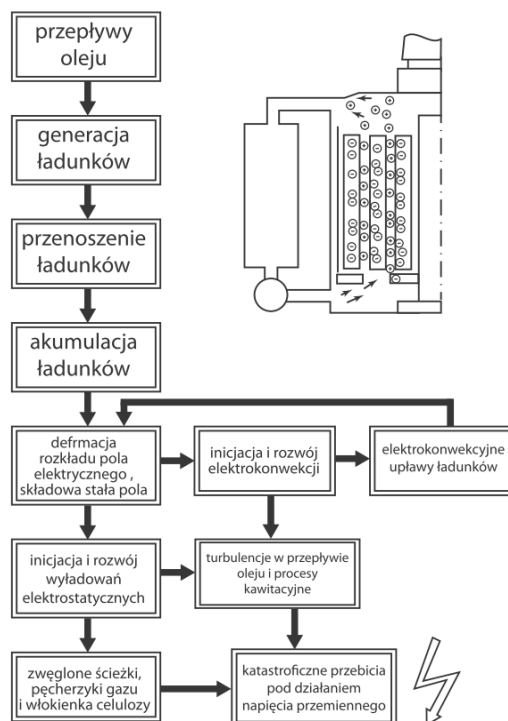
Niezawodność dostaw energii elektrycznej jest funkcją niezawodności elementów składowych systemu przesyłowego. Transformatory elektroenergetyczne stanowią najliczniejszą i zarazem nervalgiczną grupę urządzeń systemu przesyłowego. Jakkolwiek charakteryzują się one dużą niezawodnością, to jednak ich awarie mają bardzo poważne konsekwencje techniczne jak i ekonomiczne. Spośród głównych przyczyn uszkodzeń transformatorów w polskim systemie elektroenergetycznym wymienia się miejscowe osłabienie izolacji (37%) [4]. Taka statystyka pokazuje jednak jedynie ilość awarii. Jeżeli weźmie się pod uwagę także koszty spowodowane awarią, to, jak pokazują dane firmy ubezpieczeniowej HSB, największym ryzykiem obarczone są awarie klasyfikowane jako wywołane przez zakłócenia elektryczne [5]. Do tego rodzaju przyczyn zakwalifikowano tam wyładowania niezupełne oraz elektryzację statyczną.

W latach 70-tych wytwórcy transformatorów oraz ich użytkownicy zaczęli podejrzewać, że przyczyną niewyjaśnionych awarii transformatorów mocy może być elektryzacja statyczna. W uszkodzonych transformatorach, badania ujawniły obecność wyładowań elektrycznych (ścieżki drzewienia elektrycznego, wypalone otwory, obecność węgla ...) na wewnętrznych elementach izolacji stałej. Proces elektryzacji przepływowej występujący na granicy faz olej-izolacja stała wydaje się być odpowiedzialny za te zdarzenia [6-10]. Te doświadczenia pozwoliły na stworzenie hipotetycznego scenariusza awarii transformatora [11]. Ujęto w nim, jak pokazano na rysunku 1, procesy elektryzacji wywołane przepływem oleju, prowadzące w konsekwencji do inicjacji wyładowań niezupełnych i przebiecia izolacji transformatora pod działaniem napięcia przemiennego.

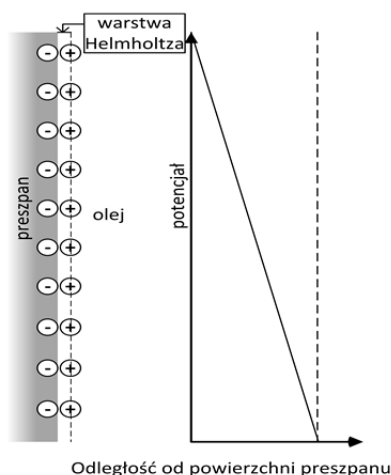
Elektryzacja statyczna

Powstawanie podwójnej warstwy ładunku jest naturalnym procesem dla każdej interfezy ciała stałe-ciecz.

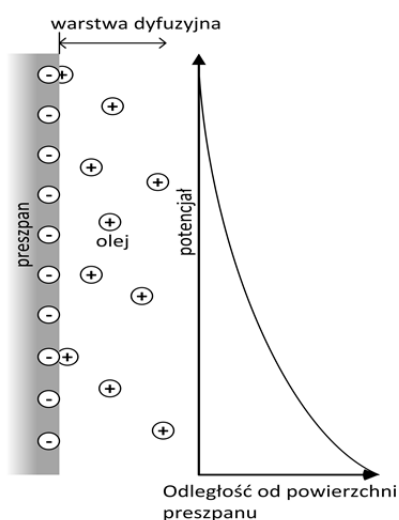
W momencie kontaktu cieczy z ciałem stałym, w wyniku reakcji fizykochemicznych na interfezie, pierwotnie neutralny elektrycznie układ zostaje spolaryzowany. Zjawisko tworzenia ładunku przestrzennego na powierzchni ciała stałego i w przypowierzchniowej warstwie cieczy opisane zostało początkowo przez Helmholtza. Model ten został następnie rozwinięty przez Gouy'a i Chapmana, którzy wzięli pod uwagę, że ruch jonów w cieczy tworzy warstwę dyfuzyjną o skończonej grubości. Na obydwu wymienionych wyżej modelach bazuje model Sterna, który uwzględnia istnienie zarówno warstwy Helmholtza jak i Gouy-Chapmana. Strukturę warstwy podwójnej według powyższych modeli przedstawiono schematycznie na rysunkach 2-4.



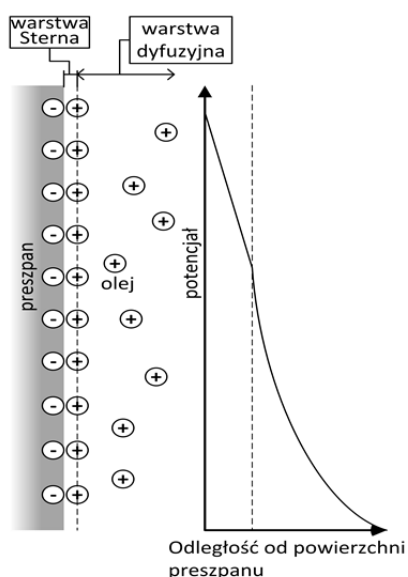
Rys.1. Hipotetyczny scenariusz awarii transformatora [11]



Rys.2. Schematyczne przedstawienie struktury warstwy podwójnej według modelu Helmholtza

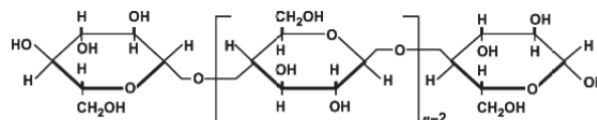


Rys.3. Schematyczne przedstawienie struktury warstwy podwójnej według modelu Gouy-Chapmana



Rys.4. Schematyczne przedstawienie struktury warstwy podwójnej według modelu Sterna

W przypadku elektryzacji zachodzącej w układzie izolacyjnym transformatorów, warstwa oleju ładuje się dodatnio. Zjawisko to może być związane z mikrostrukturą preszpanu, zbudowanego z celulozy $C_6H_{10}O_5$ (rysunek 5), który składa się z ujemnie naładowanych grup hydroksylowych (-OH). Dodatkowo naładowane atomy wodoru mają wysokie powinowactwo do jonów ujemnych znajdujących się w objętości oleju, co skutkuje adsorpcją ujemnych jonów na powierzchni preszpanu.



Rys.5. Struktura chemiczna celulozy

Gdy zachodzi ruch oleju względem preszpanu, wywołany przez układ chłodzenia transformatora, dodatnie jony warstwy dyfuzyjnej przemieszczają się ze strumieniem oleju, powodując powstanie zjawiska elektryzacji strumieniowej. Na rozwój i intensywność tego zjawiska wpływa wiele, także zmiennych w czasie eksploatacji transformatora, czynników:

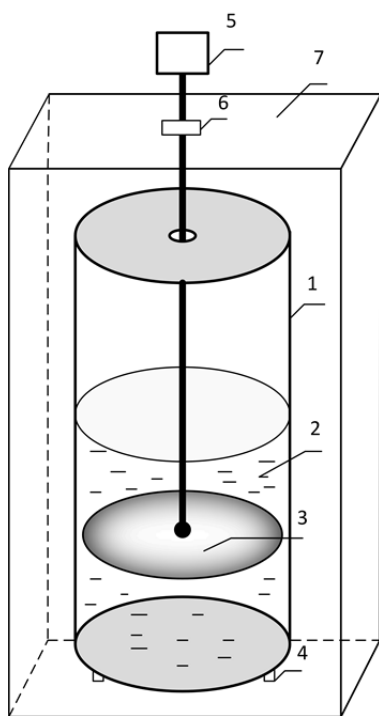
- procesy starzeniowe oleju,
- zawartość wody w oleju i w preszpanie,
- geometria izolacji stałej,
- porowatość izolacji stałej,
- stopień gładkości powierzchni izolacji stałej.

Problematyka elektryzacji statycznej mineralnych olejów transformatorowych jest dość dobrze rozpoznana i udokumentowana w literaturze światowej. Pomimo to, w uznanych międzynarodowych czasopismach wciąż jeszcze możemy spotkać bieżące artykuły dotyczące tego zjawiska. Świadczy to o tym, że nie wszystkie problemy związane z elektryzacją olejów mineralnych zostały całkowicie rozwiązane [12,13,14].

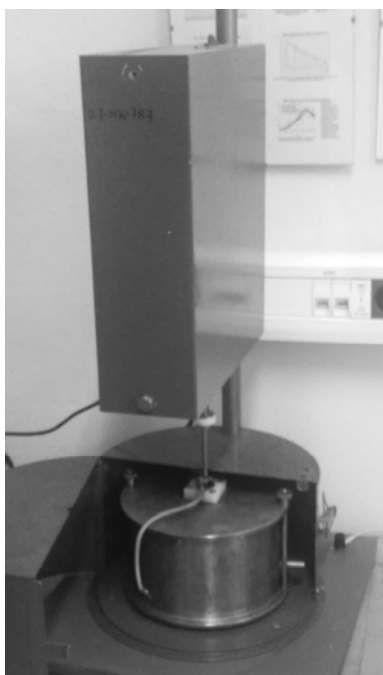
Badania przeprowadzone na olejach mineralnych pokazują, że wartość prądu elektryzacji, mierzona w układzie z wirującą tarczą, rośnie ze wzrostem prędkości obrotowej tarczy [15]. Wartość prądu elektryzacji jest także zależna od stopnia porowatości tarczy. Zwiększenie wartości prądu ze wzrostem stopnia porowatości jest silniejsze dla wyższych prędkości obrotowych [15]. Zjawiska fizyczne na interfejsie ciało stałe – ciecz są w oczywisty sposób zależne od właściwości fizyko-chemicznych cieczy. Stąd też notuje się różne intensywności elektryzacji statycznej dla mieszanin cieczy izolacyjnych [16] jak i dla różnych typów olejów izolacyjnych [12]. Wciąż jednak bardzo nieliczne są artykuły przedstawiające w tym zakresie właściwości nowych transformatorowych olejów biodegradowalnych.

Układ pomiarowy

Badania elektryzacji biodegradowalnego oleju transformatorowego wykonano z wykorzystaniem metody z wirującą tarczą. Schemat ideowy układu przedstawiono na rysunku 6, a zdjęcie układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 7. Regulację prędkości obrotowej tarczy realizowano przez zmianę napięcia zasilającego silnik. Prędkość obrotową mierzono za pomocą tachometru DMT 21 firmy POLMATIK o dokładności $\pm 0,2\%$, z zastosowaniem przetwornika optycznego. Pomiar wartości prądu generowanego przez wirującą tarczę odbywał się za pomocą pikoamperomierza typu 485 firmy KEITHLEY o dokładności $\pm 0,2\%$.

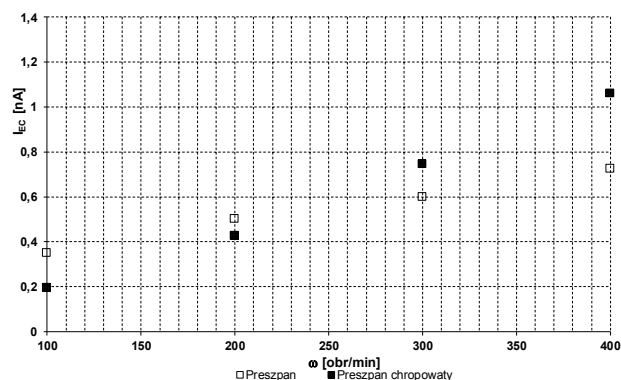


Rys.6. Schemat układu do pomiaru elektryzacji olejów metodą z wirującą tarczą. 1- naczynie pomiarowe, 2- olej, 3- tarcza, 4- wsporniki z teflonu, 5- silnik, 6- sprzęgło/separatory elektryczny z teflonu, 7- puszka Faraday'a



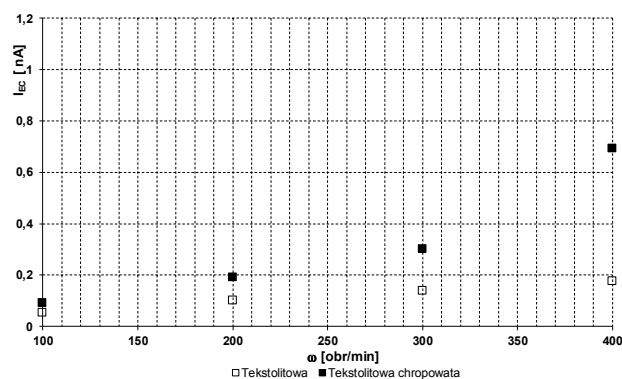
Rys.7. Zdjęcie układu pomiarowego

Pomiary wykonano dla dwóch materiałów tarcz: preszpanu i tekstolitu. Użyto tarcz z gładką i chropowatą powierzchnią. Przed wykonaniem badań, każdą tarczę poddano czyszczeniu w celu usunięcia z powierzchni wszelkich zanieczyszczeń. Wykonano po pięć charakterystyk prądu elektryzacji I_{EC} w funkcji prędkości obrotowej ω w odstępach minimum 20 minutowych. Z tak otrzymanych danych obliczono wartości średnie i wykreślono charakterystyki przedstawione na rysunkach 8 i 9.

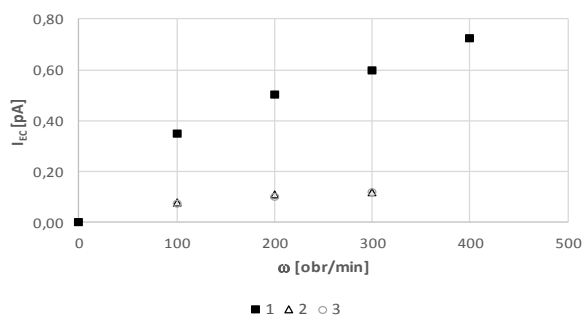


Rys.8. Prąd elektryzacji oleju biodegradowalnego dla tarczy wykonanej z preszpanu

Podobnie jak dla olejów mineralnych, prąd elektryzacji rośnie ze wzrostem prędkości obrotowej tarczy. Jednak, jak pokazano na rysunku 10, otrzymywane wartości prądów są wyższe niż w przypadku olejów mineralnych [17,18]. Również zwiększenie chropowatości tarczy skutkuje zwiększeniem wartości prądu. Jedyne dla tarczy preszpanowej obserwujemy zmniejszenie wartości prądu dla tarczy chropowatej przy bardzo małych prędkościach obrotowych, poniżej 200 obr/min.



Rys.9. Prąd elektryzacji oleju biodegradowalnego dla tarczy wykonanej z tekstolitu



Rys.10. Porównanie wartości prądu elektryzacji oleju mineralnego i estru organicznego: 1 – ester organiczny, 2 – olej mineralny (zaczepnięte z [17]), 3- olej mineralny (zaczepnięte z [18])

Podsumowanie

Zjawisko elektryzacji statycznej występuje na powierzchni granicznej oddzielającej fazę stałą i ciekłą. Ze względu na wzajemne przemieszczanie tych faz, w sąsiedztwie warstwy oddzielającej generowany jest ładunek elektrostatyczny. Zjawisko to może prowadzić do wzrostu natężenia pola elektrycznego, a w konsekwencji do inicjacji wyładowań niezupełnych oraz możliwego trwałego

uszkodzenia transformatora. Jest to szczególnie istotne dla transformatorów wypełnionych olejem biodegradowalnym, ze względu na rejestrowane większe wartości prądów elektryzacji.

Podczas badań wpływu stopnia chropowatości powierzchni tarczy na elektryzację biodegradowalnego oleju transformatorowego, zaobserwowano podobne zależności, jak w przypadku olejów mineralnych. Zwiększenie chropowatości powierzchni tarcz powodowało wyższe wartości prądu w porównaniu z tarczami o bardziej gładkiej powierzchni.

Autorzy: dr inż. Maciej Jaroszewski, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: maciej.jaroszewski@pwr.edu.pl; mgr Przemysław Kurnyta, absolwent, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: 177261@student.pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] „Polska. Z energią działa lepiej” Raport Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. (http://www.ptpiree.pl/documents/sprawozdanie/ptpiree_raport.pdf)
- [2] Dołęga W., Układy zasilania zakładów przemysłowych w aspekcie niezawodności i pewności dostawy energii elektrycznej, *Mechanizacja i automatyzacja górnictwa*, 2011, nr 8, (2011), 23-26
- [3] Paska J., Wybrane aspekty optymalizacji niezawodności systemu elektroenergetycznego, *Eksploatacja i niezawodność*, Vol. 15, No. 2, (2013), 202-208
- [4] Skomudek W., Szrot M., Ocena stanu technicznego wysokonapięciowych izolatorów przepustowych transformatorów mocy, *Energetyka*, nr 10, (2011), 615-618
- [5] Bartley W.H., Transformer Asset Management, *The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company*, www.hsb.com/TheLocomotive,
- [6] Paillat T., Cabaleiro J. M., El-Adawy M., Moreau O., Touchard G.; High Power Transformers Failures due to Flow Electrification: Tools for Understanding the Electrostatic Hazard, *ESA/IEEE-IAS/IEJ/SFE Joint Conference on Electrostatic*, Jun 2009, Boston, United States, (2009)
- [7] Shimizu S., Murata H., Honda H., Electrostatics in Power Transformers, *IEEE Trans. on P.A.S.*, Vol. 98, No.4, (1980), 1244-1250
- [8] Crofts D.W., The Static Electrification Phenomena in Power Transformers, *IEEE Trans. on Electr. Insulation*, vol 123, No. 23 (1988), 137-146
- [9] EPRI (Electric Power Research Institute) Workshops on Static Electrification in Power Transformers; 1990, 1993, 1995
- [10] Peyraque L., Beroual A., Buret F.; Static Electrification Induced by Oil Flow in Power Transformers; *IEEE International Symposium on Electrical Insulation 1996*, vol. 2., (1996), 745-749
- [11] Kędzia J., Zagrożenie izolacji transformatorów energetycznych wywołane elektryzacją statyczną, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, (1999)
- [12] Beroual A., Sadaoui F., Coulibaly M-L., Perrier C., Investigation on Static Electrification Phenomenon of Ester Liquids and Mineral oil, *2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (2015), 391-394
- [13] Talhi M., Flazi S., Fofana I., Impact of Local Overheating and Electrical Discharge on the Streaming Electrification of Transformer Oil, *2014 IEEE International Conference on Liquid Dielectrics, Bled, Slovenia*, (2014), 1-4
- [14] Lin L., Chen Q., Chi M., Wei X., Zhu X., Gao Z., Flow Electrification Characteristics of Typical Plane Oil-Pressboard Insulation Under AC/DC Voltage, *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, (2015)
- [15] Zdanowski M., Wolny S., Zmarzły D., Kędzia J., The analysis and selection of the spin-ning disk system parameters for the measurement of static electrification of insulation oils, *IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation*, nr 14(2), (2007), 480-486
- [16] Maciej Zdanowski, Józef Kędzia; „Research on the electrostatic properties of liquid dielectric mixtures”; *Journal of Electrostatics* 65 (2007), 506-510
- [17] Rouabeh J., Badania elektrostatycznych i elektrohydrodynamicznych właściwości olejów izolacyjnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Wrocław 1998
- [18] Kędzia J., Willner B., Electrification Current in the Spinning Disk System, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 1 No. 1, (1994), 58-62