

Piotr PRZYBYŁEK, Hubert MORAŃDA, Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Zjawisko „bubble effect” w izolacji papierowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i zesterzenia

Dr inż. Piotr PRZYBYŁEK

Asystent w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych. Autor ponad 25 publikacji z zakresu badań właściwości izolacji papierowo-olejowej.



e-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl

Dr inż. Hubert MORAŃDA

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, pracownik Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 50 publikacji z zakresu badań materiałowych, oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.



e-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

Prof. dr hab. inż. Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK

Profesor zwyczajny na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Wieloletni kierownik Zakładu Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych. Autorka ponad 150 publikacji z zakresu badań materiałowych, badań i diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Promotor dwudziestu prac doktorskich. Członek IEEE, Komitetu Elektrotechniki PAN oraz koordynator i kierownik międzynarodowych i krajowych projektów badawczych.



e-mail: hanna.moscicka@put.poznan.pl

1. Podstawy teoretyczne zjawiska „bubble effect”

Efekt bąbelkowania, z angielska „bubble effect”, jest to zjawisko wydzielania pary wodnej z izolacji papierowej transformatora. Uwolniona z izolacji papierowej para wodna, znajdująca się w polu elektrycznym może doprowadzić do groźnych wyładowań niepełnych, a także do niebezpiecznego wzrostu ciśnienia w kadzi transformatora.

W normie [1] wskazano na ryzyko natychmiastowego uszkodzenia izolacji wynikające głównie ze zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej wskutek możliwej obecności pęcherzyków pary wodnej w miejscach o dużym natężeniu pola elektrycznego, tj. w obszarach uzwojeń i odpyłów.

Zjawisko „bubble effect” występuje po przekroczeniu temperatury krytycznej izolacji, której wartość zależy głównie od zawartości wody w izolacji papierowej.

Wzrost temperatury izolacji do wartości krytycznej, przy której wystąpi efekt bąbelkowania, może być wywołany przez wzrost obciążenia transformatora, wysoką temperaturę otoczenia oraz uszkodzenie systemu chłodzącego. Prawdopodobieństwo wystąpienia efektu bąbelkowania jest szczególnie duże w przypadku wystąpienia wszystkich tych czynników jednocześnie.

W pracy [2] wykazano, iż sprzężenie zwrotne pomiędzy współczynnikiem strat dielektrycznych a mocą strat dielektrycznych w mocno zawilgoconej i zesterzanej izolacji papierowo-olejowej może być również przyczyną niebezpiecznego przyrostu temperatury do wartości, przy której występuje „bubble effect”.

Temperaturę krytyczną, przy której pojawi się efekt bąbelkowania, można opisać wzorem Pipera:

$$T = \frac{6996,7}{22,454 + 1,4495 \cdot \ln(WCP) - \ln(P)}, \quad (1)$$

gdzie:

T – temperatura krytyczna inicjacji efektu bąbelkowania w K,
 WCP – zawartość wody w papierze w %,
 P – ciśnienie całkowite w Tr równe sumie ciśnienia atmosferycznego P_a i ciśnienia słupa oleju P_o [3].

Z badań przeprowadzonych przez Oommena i Lindgrena [3] wynika, że w przypadku oleju o dużej zawartości gazów, wzór (1) daje błędne wartości temperatury krytycznej zainicjowania efektu bąbelkowania. Należy go wówczas uzupełnić o część uwzględniającą zawartość gazów rozpuszczonych w oleju:

$$T = \frac{6996,7}{22,454 + 1,4495 \cdot \ln(WCP) - \ln(P)} - e^{0,473 \cdot WCP} \cdot \left(\frac{g}{30}\right)^{1,585}, \quad (2)$$

gdzie:

g – zawartość gazów rozpuszczonych w oleju w %.

Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne związane z groźnym dla transformatora zjawiskiem uwalniania pary wodnej z izolacji papierowo-olejowej transformatora nazywanego z angielska „bubble effect”. Omówiono czynniki mające wpływ na temperaturę inicjacji tego zjawiska. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że temperatura uwalniania pęcherzyków pary wodnej z izolacji papierowej jest niższa dla papieru zesterzowanego niż dla papieru nowego.

Słowa kluczowe: efekt bąbelkowania, izolacja papierowo-olejowa transformatora.

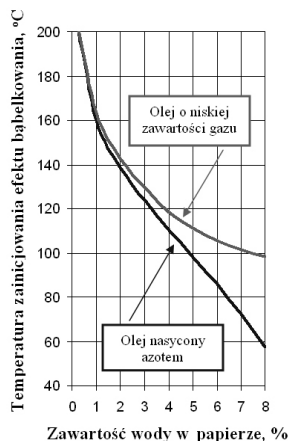
Bubble effect in oil-paper insulation of different water content and ageing degree

Abstract

In the paper theoretical fundamentals connected with a dangerous phenomenon of releasing water vapour from oil-paper insulation called the bubble effect are presented. The water vapour released from the paper insulation can result in dangerous partial discharges as well as in dangerous increase in the pressure inside the transformer tank. The high pressure in the tank can draw out the oil outside through the silica gel breather or any leakages in the transformer. Both partial discharges and pressure increase in the tank can be a reason for the transformer breakdown. In the paper the factors having influence on the temperature of the bubble effect initiation are discussed. The results of investigations of the bubble effect temperature initiation in oil-paper insulation of different ageing stages and different water content are presented. The ageing degree of the cellulose insulation is described using the average degree of polymerization (DP). The water content in cellulose was determined with Karl Fischer titration method. The stand for investigations of the bubble effect initiation temperature is shown in Fig. 2. The bubble effect phenomenon was recorded by means of a camera. As it can be seen in Fig. 3, the initiation temperature of the bubble effect is lower for the aged paper (DP=341) by about 12% than for the new one (DP=1357). Development of the bubble effect for new paper and water content in the paper equal to 3,38% is shown in Fig. 4.

Keywords: bubble effect, transformer oil-paper insulation.

Na podstawie przeprowadzonych badań Oommen i Lindgren [3] skonstruowali charakterystyki przedstawiające krytyczną temperaturę zainicjowania efektu bąbelkowania w zależności od zawartości wody w papierze w przypadku oleju o niskiej zawartości gazów oraz oleju nasyconego azotem (rys. 1).

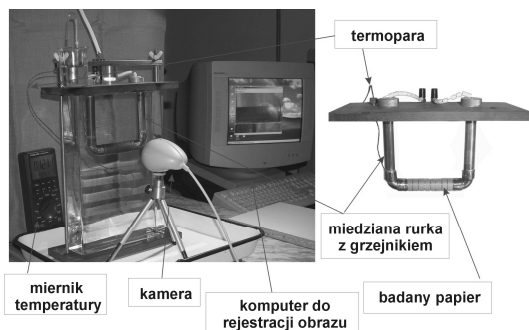


Rys. 1. Temperatura zainicjowania efektu bąbelkowania w zależności od zawartości wody w papierze w przypadku oleju o niskiej zawartości gazów i oleju nasyconego azotem; rysunek wykonano w oparciu o pracę [3]
Fig. 1. Temperature of the bubble effect initiation vs. the water content in paper in the case of oil of low gas content and nitrogen saturated oil (on the basis of work [3])

2. Badania temperatury inicjacji „bubble effect” dla papieru nowego oraz zestarzonego

Badania wpływu stopnia zesterzenia papieru nawojowego na temperaturę inicjacji efektu bąbelkowania przeprowadzono na modelu laboratoryjnym. Za miarę stopnia zesterzenia papieru przyjęto średni stopień polimeryzacji (DP). Do badań użyto papier nowy (DP=1357) oraz papier zestarzony (DP=341). Temperaturę inicjacji efektu bąbelkowania badano dla papieru o różnym stopniu zawilgocenia. Zawartość wody w papierze była wyznaczona przy użyciu metody opartej na reakcji Karla Fischera.

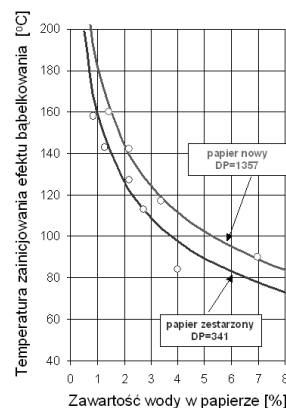
Model laboratoryjny, przedstawiony na rysunku 2, wykonano w postaci miedzianej U-rurki, na której był nawinięty papier nawojowy o kontrolowanej, zmienianej wilgotności. Wewnątrz rurki umieszczono grzejnik elektryczny o regulowanej mocy. Temperatura papieru była określana za pomocą termopary umieszczonej na powierzchni miedzianej rurki pod warstwami papieru. Badany model był zanurzony w oleju. Zbiornik oleju wykonano ze szkła o płaskich ścianach bocznych, co umożliwiała obserwację efektu bąbelkowania i jego rejestrację za pomocą kamery podłączonej do komputera.



Rys. 2. Układ do badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania
Fig. 2. Stand for investigations of the bubble effect initiation temperature

Badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania były wykonywane dla ciśnienia całkowitego $P=767$ Tr. Na ciśnienie całkowite składało się ciśnienie atmosferyczne oraz ciśnienie słupa oleju.

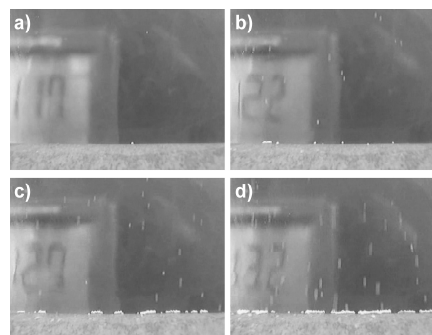
Na rysunku 3 przedstawiono temperaturę inicjacji efektu bąbelkowania dla papieru nowego oraz zestarzonego w zależności od zawartości wody w papierze.



Rys. 3. Temperatura inicjacji efektu bąbelkowania w funkcji zawartości wody w papierze dla izolacji nowej (DP=1357) oraz zestarzonej (DP=341)
Fig. 3. Temperature of the bubble effect initiation as a function of the water content in paper for new (DP=1357) and aged insulation (DP=341)

Na podstawie przedstawionych wyników badań można wyciągnąć niezwykle istotny wniosek, mówiący że temperatura inicjacji efektu bąbelkowania jest mniejsza dla papieru zestarzonego niż dla papieru nowego. Temperatura inicjacji efektu bąbelkowania dla papieru zestarzonego (DP=341) jest o kilkanaście procent niższa niż dla papieru nowego (DP=1357). Przykładowo, dla zawartości wody w papierze 3%, dla papieru nowego, temperatura inicjacji efektu bąbelkowania wynosi 125°C, natomiast dla papieru zestarzonego tylko 109°C.

Na rysunku 4 przedstawiono kolejne etapy rozwoju efektu bąbelkowania. Zdjęcia zostały zarejestrowane w trakcie badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania dla papieru nowego (DP=1357) o zawilgoceniu 3,38%.



Rys. 4. Rozwój efektu bąbelkowania dla papieru nowego o zawartości wody 3,38%; a) 117°C, b) 122°C, c) 127°C, d) 132°C
Fig. 4. Development of the bubble effect for new paper of water content 3,38%; a) 117°C, b) 122°C, c) 127°C, d) 132°C

3. Podsumowanie

Efekt bąbelkowania w transformatorach eksploatowanych w Polsce na szczęście nie występuje często. Wynika to przede wszystkim z warunków eksploatacji transformatorów, które pracują znacznie poniżej mocy znamionowej, na jaką zostały zaprojektowane. Znany jest przypadek awarii transformatora na terenie Polskich Sieci Elektroenergetycznych Zachód wywołany efektem bąbelkowania. Awaria ta miała miejsce w 2003 roku na transfor-

matorze 160 MVA, który w czasie wystąpienia zjawiska *bubble effect* był obciążony mocą 157 MVA. Przebieg awarii opisano w artykule [5].

Wg autorów normy [1], dla transformatorów dużej mocy, dla normalnego obciążenia cyklicznego, dopuszcza się najwyższą temperaturę metalowych części stykających się z materiałami izolacyjnymi na poziomie 120°C. Z przedstawionych w niniejszym artykule badań wynika, że dla temperatury 120°C dla izolacji zestarzonej efekt bąbelkowania pojawi się już przy zawilgoceciu 2,3% występującym lokalnie (rys. 3). Z prowadzonych przez nas badań transformatorów sieciowych wynika, że aż ponad 36% transformatorów posiada izolację celulozową o zawilgoceciu średnim wynoszącym powyżej 2,3%, co świadczy o poważnym zagrożeniu zjawiskiem *bubble effect*.

4. Literatura

[1] PN-IEC 60354:1999, Przewodnik obciążenia transformatorów olejowych.

- [2] P. Przybyłek, H. Mościcka-Grzesiak: Bubble effect in transformer insulation caused by dielectric losses, The 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, T9-119.
- [3] T.V. Oommen, S.R. Lindgren: Bubble evolution from transformer overload, Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, 2001, Vol. 1, s. 137-142.
- [4] M. Sakai, K. Maki, Y. Taniguchi, N. Daikuhara, S. Yanabu, A Research of Critical Temperature on Bubble Formation under Overloaded Oil-Immersed Transformer, The Transactions Of The Institute Of Electrical Engineers Of Japan, April 2001, volume 121-B, Number 4, s. 500-506.
- [5] P. Przybyłek, H. Mościcka-Grzesiak: Warunki wystąpienia „bubble effect” w transformatorze o izolacji papierowo-olejowej. Energetyka – Zeszyt tematyczny nr VI, Konferencja Naukowo-Techniczna Transformatory w eksploatacji, Kołobrzeg-Dźwirzyno, kwiecień 2005, s. 120-122.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki
ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

Systemy Pomiarowe i Sterowniki Programowalne (SPSP)

Cel Studiów

Celem studiów jest przekazanie wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych w zakresie: projektowania, wdrażania i utrzymania ruchu systemów automatyki, programowania sterowników PLC oraz systemów nadrzędnych (SCADA), projektowania, programowania i eksploatacji automatycznych systemów pomiarowych w laboratoriach badawczych i przemysłowych, metod opracowania danych w systemach zapewnienia jakości procesów przemysłowych.

Profil uczestnika studiów

Studia przeznaczone są dla pracowników o różnych specjalnościach, z wyższym wykształceniem o kierunku elektrycznym, elektronicznym, informatycznym lub pokrewnym, zajmujących się organizacją pomiarów w laboratoriach badawczych i przemysłowych lub eksploatacją oraz modernizacją systemów starowania. Ich ukończenie pozwoli uczestnikom na podwyższenie kwalifikacji niezbędnych do sprawnego opracowywania i wdrażania nowoczesnych systemów. Absolwent Studiów otrzymuje Świadectwo Ukończenia Studiów Podyplomowych w zakresie objętym nazwą studiów.

Studia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub w co drugi weekend (do wyboru) przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: re2@polsl.pl lub agnieszka.skorkowska@polsl.pl, http://imeia.elekt.polsl.pl

Kierownik studiów:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS