

Zdzisław Szczepański  
Ryszard Zybert

PORÓWNANIE ŁADUNKU ORAZ MOCY DOSTARCZANYCH DO  
UKŁADU JAKO WSKAŹNIKÓW INTENSYWNOŚCI WYŁADOWAŃ  
NIEZUPEŁNYCH

Wyładowania niezupełne stanowią jedną z głównych przyczyn degradacji układów izolacyjnych takich urządzeń jak: kondensatory, kable oraz transformatory energetyczne.

Ocena ich szkodliwości jest jednym z ważniejszych problemów jakie należy rozwiązać, aby ustrzec się przed niepożądaną awaryjnością tych urządzeń.

Wyładowania występujące w kawernach gazowych lub w dielektryku ciekłym układów izolacyjnych należą do typu wyładowań niezupełnych, którym poświęca się wiele uwagi w kraju i zagranicą. Niniejszy artykuł stanowi analizę wskaźników intensywności wyładowań niezupełnych, które należą do najczęściej stosowanych przy ocenie zagrożenia układów izolacyjnych urządzeń wysokonapięciowych z uwagi na wyładowania niezupełne.

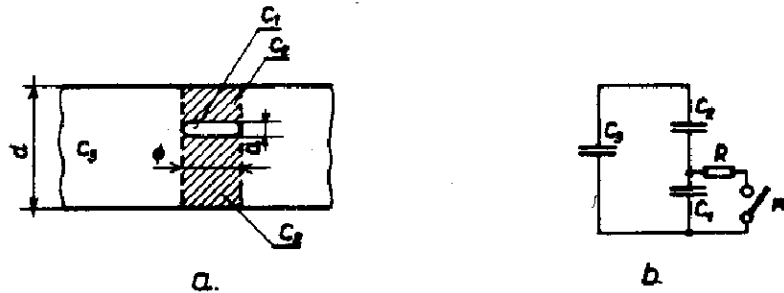
Rys. 1 pokazuje powszechnie stosowany schemat zastępczy dielektryku, który zawiera kawernę gazową.

Ładunek  $Q$  dopływający do układu w wyniku zaistniałego wyładowania w kawernie o pojemności  $C_1$ , zwany ładunkiem pozornym, wyraża się wzorem [1] :

$$Q = C \Delta U$$

---

Doc. dr hab. Zdzisław Szczepański, mgr inż. Ryszard Zybert,  
Politechnika Łódzka, Instytut Transformatorów, Maszyn i Aparatów  
Elektrycznych



Rys. 1 Schemat zastępczy dielektryku  
 a/ fragment układu izolacyjnego  
 b/ schemat zastępczy tego układu, w którym  
 $C_1$  oznacza pojemność wtrąciny gazowej,  
 $C_2$  - pojemność dielektryku usytuowanego  
 szeregowo z wtrąciną gazową,  $C_3$  - pojem-  
 ność pozostałej części dielektryku,  
 $W$  - wyłącznik, którego zamknięcie imituje  
 wyładowanie we wtrącinie gazowej,  
 $R$  - rezystancje związane z wyładowaniem

przy czym

$$C = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} ,$$

zaś  $\Delta U$  oznacza spadek napięcia na układzie powstały w wyniku wyładowania. Ponieważ wyładowanie zachodzi w czasie bardzo krótkim, wynoszącym  $10^{-8} - 10^{-7}$  s można uważać, że źródło zasilające jest w tym czasie odcięte od układu, a wówczas spadek napięcia  $\Delta U_1$  w kawernie gazowej jest związany następującą zależnością ze spadkiem napięcia  $\Delta U$ . [1]:

$$\Delta U = \Delta U_1 \frac{c_2}{c_2 + c_3}$$

przy czym

$$\Delta U_1 = U_{1z} - U_g$$

$U_{1z}$  - napięcie zapłonu wyładowania we wtrącinie gazowej,

$U_g$  - napięcie gaśnięcia wyładowania w tej wtrącinie.

W związku z tym ładunek pozorny  $Q$  może być wyrażony następująco:

$$Q = \left( \frac{1}{c_3} + \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} \right) / \frac{c_2}{c_2 + c_3} \Delta U_1$$

W układach praktycznych zachodzą następujące nierówności:

$$c_3 \gg c_1 \quad \text{oraz} \quad c_3 \gg c_2$$

zatem

$$Q = c_2 \Delta U_1$$

Ponieważ ładunek neutralizowany w kawernie gazowej  $Q_1 = (c_1 + c_2) \Delta U_1$ ,

w związku z tym

$$Q = \frac{1}{1 + \frac{c_1}{c_2}} Q_1 \quad \text{lub gdy} \quad c_2 \ll c_1 \quad Q = \frac{c_2}{c_1} Q_1 \quad //$$

ładunek pozorny mierzony podczas detekcji wyładowań w urządzeniach równa się ładunkowi rzeczywistemu neutralizowanemu w kawernie gazowej pomnożonemu przez stosunek pojemności  $C_2/C_1$ . Współczynnik  $C_2/C_1$  jest zatem ważną wielkością wpływającą na ocenę stopnia degradacji dielektryku. Mierzony jest bowiem ładunek pozorny, a tymczasem degradacja dielektryku związana jest z fizycznymi procesami zależnymi od ładunku  $Q_1$ , który jest neutralizowany w kawernie gazowej.

Interesującą jest także porównanie energii lub mocy dostarczonej do układu w wyniku wyładowań niezupełnych oraz energii lub mocy traconej w samej kawernie /we wtrącinie gazowej/ podczas wyładowania.

Zgodnie z [3] energia doprowadzona do układu  $\sum E_p$  w jednym półokresie zmian napięcia wyraża się następującą zależnością:

$$\sum E_p = k U_{1E}^2 / C_1 + C_2 / 1 - \frac{1}{2} k / n$$

gdzie

$$k = \frac{U_{1E} - U_g}{U_{1E}} \quad /którą to wartość można przyjąć w przybliżeniu jako stałą/,$$

zaś  $n$  oznacza liczbę wyładowań zachodzących w ciągu półokresu napięcia zasilającego układ.

Z drugiej strony energia tracona w kawernie w wyniku  $n$  wyładowań  $\sum E_1$  jest następująca:

$$\sum E_1 = \frac{1}{2} n / C_1 + C_2 / U_{1E}^2 - U_g^2 /$$

Ponieważ

$$U_{1z} - U_g = k \cdot U_{1z}$$

zad

$$U_{1z} + U_g = /2 - k/ U_{1z}$$

zatem

$$\sum E_1 = \frac{1}{2} n / C_1 + C_2/ k/2 - k/ U_{1z}^2$$

Zależność rozpatrywanych energii wyraża się zatem prosto

$$\sum E_p = \sum E_1$$

/2/

Jest bardzo istotnym, aby mierzony wskaźnik intensywności wyładowań miał wartość jak najbardziej zbliżoną do wartości wskaźnika bezpośrednio związanego z degradacją dielektryku. Porównując dwa wskaźniki intensywności wyładowań, to znaczy ładunek pozorny oraz moc lub energię związaną z wyładowaniami, należy stwierdzić, że wskaźnik oparty na mocy lub energii związanej z wyładowaniami niezupełnymi z wyżej przytoczonych powodów ma przewagę nad wskaźnikiem opartym na ładunku pozornym.

W początkowej fazie degradacji, gdy  $C_2 \ll C_1$  ładunek pozorny jest bardzo mały w porównaniu do ładunku  $Q_1$ , który jest bezpośrednio związany z tą degradacją podczas, gdy moc dostarczana do układu jest praktycznie równa mocy traconej w kawernie.

Ma to szczególnie duże znaczenie dla takich urządzeń jak transformatory, w przypadku których pomiar intensywności wyładowań jest oparty na ładunku pozornym. Wyładowania wewnętrznie chociaż zachodzą, mogą być niewykrywalne. Natomiast mogą być w tym przypadku wykrywalne wyładowania charakteru ślizgowego związane ze stosunkowo dużą wartością ładunku pozornego, a jak wiadomo, nie zawsze one powodują duże zagrożenie dla izolacji stałej. W celu zilustrowania przytoczonych wyżej rozważań zostaną przeprowadzone obliczenia dla układów

izolacyjnych skrajnie różniących się wymiarami, tzn. dla układów izolacyjnych stosowanych w kondensatorach i transformatorach energetycznych.

W obliczeniach, które autorzy uważają jako orientacyjne, przyjęto jednak wymiary izolacji występujące w praktyce. Oparto się na rys. 1a, przy czym  $a$  oznacza grubość kawerny, zaś  $d$  grubość izolacji. W obliczeniach przyjęto, że grubość  $d$  izolacji papierowo-olejowej kondensatora energetycznego wynosi  $70 \mu\text{m}$ , zaś jego przenikalność dielektryczna względna  $\epsilon' = 4,0$ . Jako drugi przykład izolacji przyjęto fragment izolacji transformatora o napięciu znamionowym 400 kV. Dla tego fragmentu izolacji przyjęto grubość  $d = 110 \mu\text{m}$  /izolacja między uzwojeniami/ oraz przenikalność względną  $\epsilon' = 3,0$ . Założono, że w obu układach izolacyjnych występuje wtrącina gazowa o wymiarach  $a = 10 \mu\text{m}$  i średnicy  $\phi = 1 \text{ mm}$  /rys. 1/.

Dla grubości kawerny gazowej wynoszącej  $10 \mu\text{m}$  naprężenie  $K_g$ , przy którym występują w szczelinie wyładowania, wynosi  $K_g = 400 \text{ kV/cm}$  [1].

Ponieważ

$$Q_1 = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}} \cdot U_1$$

$$\Delta U_1 = U_{1z} - U_g = k \cdot U_{1z}$$

przy czym w dalszych obliczeniach  $k$  przyjęto równe 0,3 [1], zatem

$$\Delta U_1 = 120 \text{ V}$$

zaś

$$Q_1 = \frac{\epsilon_0 \pi \phi^2}{4a} + \frac{\epsilon_0 \epsilon' \pi \phi^2}{4/d-a} / U_1 = 140 \text{ pC}$$

jak podano wyżej

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}}$$

z czego wynika, że:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{1}{1 + \frac{d-a}{\epsilon \cdot a}}$$

Dla przyjętej do obliczeń izolacji kondensatora otrzymujemy

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{1}{1 + \frac{70-10}{4 \cdot 10}} = \frac{2}{5}$$

W związku z tym

$$Q = 56 \text{ pC}$$

Stosunek zaś energii

$$\frac{\sum E_p}{\sum E_1} = 1$$

Dla rozpatrywanego przypadku izolacji transformatora można przyjąć, że  $C_2 \ll C_1$ , a więc

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{C_2}{C_1}$$

$$\frac{Q}{Q_1} = 0,27 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_1 = 83,5 \text{ pC}$$

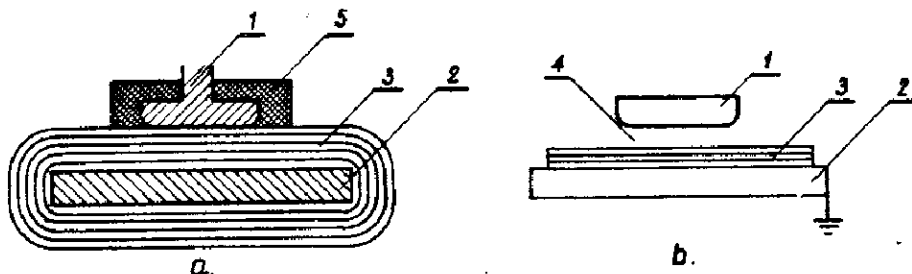
a więc

$$Q = 0,023 \text{ pC}$$

Natomiast iloraz energii jest taki, jak poprzednio

$$\frac{\sum E_p}{\sum E_1} = 1$$

Takie same obliczenia można przeprowadzić dla izolacji układów modelowych pokazanych na rys. 2, w których często bada się izolację papierowo-olejową.



Rys. 2 Układy modelowe do badania izolacji papierowo-olejowej  
 1, 2 - elektrody, 3 - izolacja papierowo-olejowa,  
 4 - szczelina powietrzna  
 a - grubość izolacji papierowo-olejowej 0,5 - 2 mm 4  
 b - grubość izolacji papierowo-olejowej 0,2 - 0,5 mm 5

I tak dla przypadku 2a zakładając, że wymiar szczeliny wynosi  $10 \mu\text{m}$ , a grubość izolacji modelu-1 mm, opierając się na wzorach /1/, /2/ i /3/ możemy obliczyć

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot 0,01}{1 - 0,01}} = 0,3 \cdot 10^{-1}$$

Widzimy, że iloraz ten dla układu modelowego różni się o dwa rzędy wielkości od stosunku ładunku pozornego do ładunku neutralizowanego



dla izolacji transformatora.

Natomiast iloraz energii dla układu modelowego

$$\frac{\sum E_p}{E_{R_1}} = 1$$

jest taki sam jak dla układu izolacyjnego transformatora.

Jak już wspomiano, obliczenia mają charakter orientacyjny, mimo to pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

### Wnioski

1. W transformatorach wyładowania wewnętrzne o małej intensywności, które mogą być bardziej szkodliwe niż wyładowania typu powierzchniowego w przypadku, gdy pomiar ich intensywności oparty jest na pomiarze ładunku pozornego, mogą być niewykrywalne. W rozważaniach przytoczonych w artykule nie wynika to ze zjawiska tłumienia, o którym się wspomina z uwagi na dużą indukcyjność jednej z elektrod tzn. uzwojenia transformatora.
2. Metoda detekcji oparta na pomiarze mocy doprowadzonej do układu w wyniku wyładowań niezupełnych ma wyższość nad metodą pomiaru ładunku pozornego i w związku z tym należy dążyć do jej udoskonalenia, aby mogła być ona szeroko stosowana.
3. W przypadku kondensatorów energetycznych stosunek pomiędzy ładunkiem neutralizowanym w kawernie gazowej a ładunkiem pozornym jest znacznie mniejszy niż ma to miejsce w przypadku transformatorów, zatem zagadnienie pomiaru intensywności wyładowań niezupełnych oparte na rozważanych w niniejszej pracy wskaźnikach intensywności wyładowań nie występuje tutaj tak ostro jak w przypadku transformatorów.

Artykuł ten został zgłoszony również do druku w Zeszytach Naukowych ELEKTRYKA Politechniki Łódzkiej.

Literatura

1. Szczepański Z. - Wylądowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych. WNT, W-wa, 1973.
2. Kreuger F.H. - Discharge detection in high voltage equipment. A Heywood Book, London, 1964.
3. Szczepański Z. - Ocena stosowanych wskaźników intensywności wylądowań niezupełnych niszczących układy izolacyjne. Archiwum Elektrotechniki, z. 3, 1975.
4. Galand J. - Les décharges partielles dans le papier imprégné d'huile. Conditions d'apparition et les produits de dégradation formes. Laboratoire Central des Industries Electriques 1970 /publ. wewn./.
5. Wodziński J. - O korelacji pomiędzy wartościami intensywności wylądowań niezupełnych a szybkością degradacji izolacji papierowo-olejowej. Symposium "Problemy wylądowań niezupełnych w układach elektroizolacyjnych", AGH - PTETIS Kraków, 1975.