

Józef Wrocławski

LOKALIZACJA WYŁADÓW NIEZUPEŁNYCH
W TRANSFORMATORACH OLEJOWYCH

1. Wprowadzenie

Zauważa się, że w ostatnim czasie coraz większego znaczenia nabiera problem ograniczania intensywności wyładowań niezpełnych /wnz/ w transformatorach. Przejawia się to w przepisach normalizacyjnych, coraz częściej wykorzystywanych przy zawieraniu kontraktów. Dla transformatorów o napięciu powyżej 300 kV wymagania na gruncie międzynarodowym reguluje norma IEC [4], zaś niektóre normy krajowe odnoszą się do napięć niższych. Na podstawie dotychczasowej praktyki można stwierdzić, że w transformatorach, przy najwyższym napięciu roboczym nie powinny występować wyładowania niezpełne /wnz/.

Coraz niższe poziomy wnz osiąga się trój etapowo :

- etap wstępny - likwidacja wnz powyżej 10000 pC poprzez eliminację wyraźnych błędów konstrukcyjnych, technologicznych i wykonawczych ; koszty tego etapu są niższe niż 0,5% wartości produkcji,
- etap zasadniczy - osiągnięcie wymagań IEC, likwiduje się tu wnz rzędu kilku tysięcy pC poprzez ich zlokalizowanie, a następnie wprowadzenie nowych rozwiązań technologicznych i wykonawczych ; koszty rzędu 1 - 2%,
- etap końcowy - obniżenie poziomu wnz do wartości 10 - 20 pC, wymaga wykonania szeroko zakrojonych badań, jak również nowych rozwiązań konstrukcyjnych, nowej technologii oraz czułych i dokładnych metod

mgr Józef Wrocławski - Instytut Energetyki, Oddział Transformatorów,
Łódź.

lokalizacji ; koszty przypuszczalnie przekroczą 5% wartości produkcji.

Należy dążyć do zrealizowania wszystkich wymienionych etapów ograniczania wnz w transformatorach, bowiem od przepięć, zwarc i przeciążeń można się zabezpieczyć, natomiast od występowania wnz niestety nie.

Wynika z tego, że chcąc ograniczać intensywność wnz, należy znać i umieć stosować różne sposoby lokalizacji wnz.

2. Metody lokalizacji źródeł wnz

Wnz mogą być rejestrowane metodą elektryczną na końcach uzwojeń transformatora lub też metodą akustyczną w dowolnym miejscu transformatora.

Impulsy elektryczne wnz pojawiające się na końcu uzwojenia mają przebieg złożony, ale można w nich wyróżnić trzy składowe :

a/ składową pojemnościową, przenoszoną przez siatkę pojemnościową uzwojenia,

b/ falę wędrowną, wynikającą ze sprzężeń elektromagnetycznych, przenoszoną galwanicznie,

c/ składową niskiej częstotliwości, wywołaną głównie drganiami obwodów rezonansowych utworzonych przez elementy indukcyjne i pojemnościowe uzwojeń.

Wszystkie te składniki można wykorzystać do lokalizacji, ponieważ ich parametry zależą od miejsca występowania wnz. Wykorzystanie dwu pierwszych składników omówiono szerzej w p. 3 i 4, trzecim składnikiem zajmowali się Teverka i Hon [8] , ale raczej bez szerszego praktycznego zastosowania.

Oprócz stosowania ww. składników, wnz można lokalizować ciekawą metodą "napięcie zapłonu - rozkład napięcia" - p. 5 lub też metodą akustyczną - p. 6.

Obecnie trudno wyrokować, w jakim kierunku będą rozwijać się sposoby lokalizacji wnz, można jedynie przypuszczać, że znajdzie tu szerokie zastosowanie żywiłowo rozwijająca się mikroelektronika. Bez względu jednak na metodę i jej nowoczesność, z powodu chociażby złożonej budowy transformatora i stosowanie różnorodnych materiałów, doświadczenie i wiedza obsługi urządzeń będzie odgrywać rolę decydującą.

3. Metoda składowej pojemnościowej

Metoda ta wykorzystuje zależność wartości składowej pojemnościowej od miejsca występowania wnz. Składowa rejestrowana na końcu uzwojenia jest funkcją kilku czynników :

$$V = f (Z_p, Z_s, Z, Q, T) \quad /1/$$

gdzie : V - napięcie rejestrowane przez miernik,

Z_p - impedancja urządzenia pomiarowego,

Z_s - impedancja urządzenia sprzęgającego,

Z - impedancja badanego układu,

Q - ładunek,

T - współczynnik przenoszenia.

Napięcie V, dla danego układu, zależy od Q i T. Wartość T zależy od miejsca występowania wnz. Mierząc więc V na obu końcach uzwojenia i biorąc stosunek napięć, możemy określić miejsce występowania wyładowania.

Pewną modyfikacją tej metody stosuje się dla ogólnego scharakteryzowania miejsca wnz [4] /metoda pomiaru wielczaciskowego/. Nówoczas do obu końców uzwojenia dołącza się mierniki i imituje się wyładowania np. w izolacji głównej transformatora, izolacji wzdłużnej, izolacji izolatora przepustowego. Uzyskane w ten sposób współczynniki lokalizacji, służą do określenia miejsca wnz. Metoda jest stosowana w IENOT już od wielu lat i dzięki niej można szybko i łatwo określać miejsca występowania wnz. Metoda daje poprawne rezultaty tylko przy jednym źródle wnz, a dokładność rośnie ze wzrostem stosunku pojemności wzdłużnych, do pojemności doziemnych, wymaga stosowania mierników szerokopasmowych.

4. Metoda fali wędrownej

Fala wędrowna jest składową impulsu wnz rejestrowanego na zacisku uzwojenia. Jest ona przenoszona od źródła wnz do zacisku uzwojenia wzdłuż połączeń galwanicznych. Prędkość rozchodzenia się fali zależy od rodzaju uzwojenia i wynosi 120 - 180 m/ μ s.

Metoda polega na pomiarze czasu opóźnienia między chwilą powstania wnz, a chwilą pojawienia się fali wędrownej na zacisku uzwojenia. Moment powstania wnz sygnalizowany jest przez składową pojemnościową. Innym,

a zarazem bardziej użytecznym sposobem jest pomiar czasu, jaki upływa między pojawieniem się fali wędrownej na jednym i na drugim końcu uzwojenia. Miejsce występowania wnz określa zależność :

$$x = \frac{l - \Delta t \cdot V}{2} \quad /2/$$

gdzie : l - długość uzwojenia,

V - prędkość rozchodzenia się fali wędrownej,

Δt - czas między falami na jednym i drugim końcu uzwojenia.

Wyraźne fale wędrowne uzyskuje się w uzwojeniach o małej pojemności wzdłużnej w porównaniu do pojemności doziemnej.

5. Metoda "napięcie zapłonu - rozkład napięcia" [2]

Przypuśćmy, że wnz w jakimś punkcie uzwojenia pojawiają się przy określonym napięciu doziemnym. Jeżeli uda się uzyskać to napięcie doziemne dwoma różnymi sposobami, to będzie można w stosunkowo dużej ilości przypadków, określić miejsce występowania wnz. To samo napięcie w danym punkcie uzwojenia, można otrzymać przez zmianę sposobu połączeń uzwojeń transformatora z ziemią np. uzziemiony zacisk gwiazdowy lub zacisk liniowy, oraz przez zmianę sposobu zasilania np. napięcie doprowadzone, wzbudzenie jednofazowe lub trójfazowe. W efekcie, wystarczy pomierzyć napięcie zapłonu wnz, wykreślić rozkład napięcia dotyczący zastosowanego układu połączeń i zasilania, aby w punkcie przecięcia rozkładów napięcia, otrzymać miejsce występowania wnz. Układy połączeń i zasilania winny być tak dobrane, aby rozkłady napięcia przecinały się pod możliwie dużym kątem.

W tabeli 1 podano przykłady układów połączeń i zasilania transformatorów, rozkłady napięć oraz wzory pozwalające obliczyć miejsce występowania wnz.


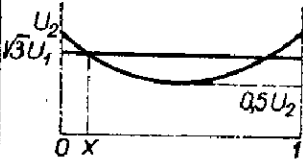

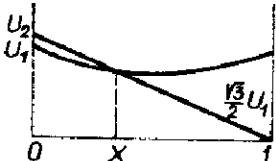

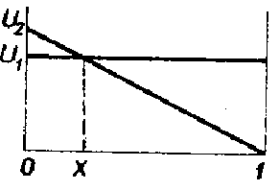

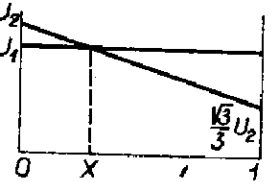

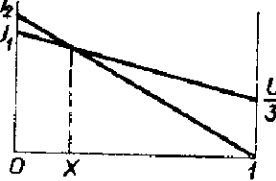
Z praktycznego punktu widzenia, metodę można stosować tylko do wnz występujących w skrajnych 30 - procentach długości uzwojenia.

W niektórych przypadkach nie uzyskuje się jednoznacznych wyników. Trzeba wówczas wykonać dodatkowe badania precyzujące miejsce wnz. Poniżej

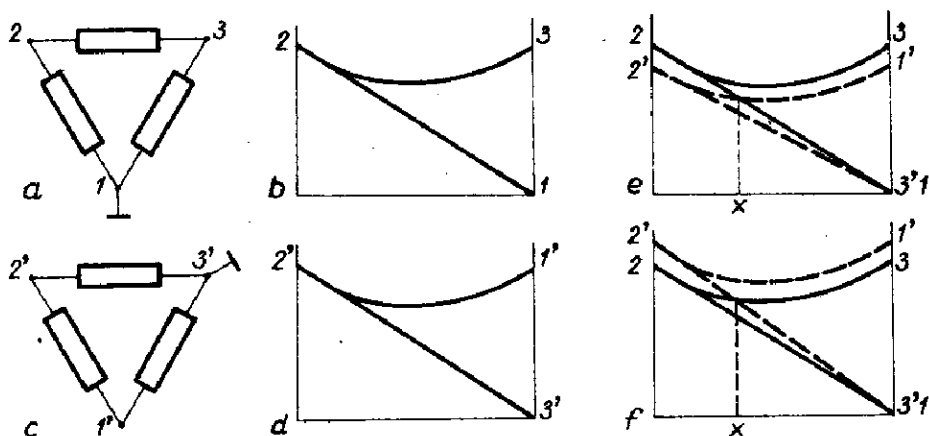
rys. 1 podano przykład wzbudzenia trójfazowego transformatora połączonego w trójkąt, z uzziemionym jednym zaciskiem liniowym.

Tabela 1

Przykłady zastosowania metody "napięcie zapłonu -
- rozkład napięcia"

Połączenie uzwojenia transformat.	Sposób wytworzenia napięcia U1	U2	Rozkład napięcia	Wzór
	ND	W		$x = \frac{3 - \sqrt{3} \sqrt{2a^2 - 1}}{6}$
	W-LZ1	W-LZ1		$x = 1 - \frac{a\sqrt{4-3a^2}-a^2}{2(1-a^2)}$
	ND	W-PGZ		$x = 1 - a$
	ND	W-LZ1		$x = \frac{1-a}{1-\frac{\sqrt{3}}{3}}$
	W-LZ2	W-PGZ		$x = \frac{1-a}{1-\frac{2a}{3}}$

Oznaczenia : ND - napięcie doprowadzone, W - wzbudzenie trójfazowe
LZ1 - uziemiony jeden zacisk liniowy, PGZ - uziemiony zacisk gwiazdowy, $a = U1/U2$



Rys. 1. Lokalizacja wz metodą "napięcie zapłonu - rozkład napięcia".

Stwierdzono wz w pobliżu zacisku 2 - rys. 1a, 1b. Z tych danych nie wynika, w którym uzwojeniu jest źródło wz, w 2 - 1 czy 2 - 3. Uziemia się wówczas zacisk 3 i próbę wykonuje ponownie - rys. 1c, 1d. Mogą wystąpić tu dwa przypadki. W przypadku pierwszym - rys. 1e - przecięcie linii wskazuje na wz w uzwojeniu 2 - 1, w drugim - rys. 1f - w uzwojeniu 2 - 3.

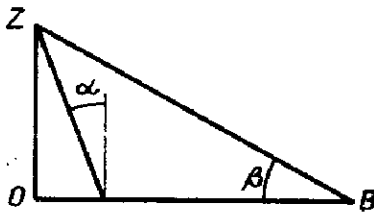
6. Metoda akustyczna

Zastosowanie ultradźwięków do lokalizacji wz datuje się od początku lat sześćdziesiątych [1], [9]. Później pojawia się cyfrowy pomiar różnicy czasów [6] oraz zastosowanie technik komputerowych [5]. Mimo wyraźnego postępu, wiele ośrodków badawczych w dalszym ciągu zajmuje się tym problemem [3], [7].

Wz w transformatorze powoduje powstanie fali dźwiękowej o widmie rozciągającym się aż do setek kiloherców. Istnieje wiele różnych poglądów na temat najużyteczniejszych częstotliwości. Nasze badania wykonywano częstotliwością 100 kHz, z czujnikami umieszczonymi na zewnątrz kadzi.

Metodę akustyczną można stosować dla potwierdzenia występowania wz wewnątrz transformatora oraz dla lokalizacji źródła wz. Najprostsza metoda lokalizacji polega na szukaniu na ściankach kadzi miejsca, gdzie uzyska się największy sygnał. Bardziej skomplikowana metoda polega na pomiarze czasu między wz /składowa pojemnościowa/ a momentem pojawienia

się drgań akustycznych lub też pomiarze różnicy czasu między impulsami dźwiękowymi. Na podstawie czasów oblicza się drogę, jaką przebył sygnał. Najprościej dokonać przeliczenia na drogę w oleju, ale dotyczy to fal docierających do czujnika drogą bezpośrednią. Fala dźwiękowa rys. 2 ze źródła Z, leżącego w oleju, dociera do czujnika bezpośrednio przez olej oraz częściowo w oleju i stali. Punkt A jest granicą, gdy czujnik leży na lewo od A, fala dociera szybciej bezpośrednio, gdy na prawo - szybciej na drodze : olej - stal.



Rys.2. Drogi fal w oleju i stali

Graniczny kąt α zależy od prędkości rozchodzenia się fali w oleju V_{ol} i stali V_{st} :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_{ol}}{V_{st}}\right) \quad /3/$$

Stosunek czasów : t_1 na drodze ZB i t_2 na drodze ZAB wynosi :

$$t_1/t_2 = \sin(\alpha + \beta) \quad /4/$$

Znając t_1 i t_2 możemy obliczyć kąt β , a więc określić położenie źródła wnz. Najwygodniej jednak operować jest tylko obszarem w stożku o kącie $2\alpha/32$ st/, ponieważ ze względu na brak fali przechodzącej przez stal /silne tłumienie/ uzyskuje się wyraźne obrazy fal /rys. 3/



Rys. 3. Przebieg fal ultradźwiękowych

Oprócz tych fal, do czujnika docierają również fale odbite i załamane, zamazujące obraz. Dlatego dąży się do zbierania dużych ilości informacji aby na ich podstawie otrzymać w miarę dokładny wynik.

Dla n czujników i jednego źródła wnz można napisać :

$$\begin{array}{l}
 x-x_1^2 + y-y_1^2 + z-z_1^2 = r_1^2 \\
 \dots\dots\dots \\
 x-x_1^2 + y-y_1^2 + z-z_1^2 = r_1^2 \\
 \dots\dots\dots \\
 x-x_n^2 + y-y_n^2 + z-z_n^2 = r_n^2
 \end{array}
 \quad /5/$$

gdzie: x_1, y_1, z_1 - współrzędne czujników ultradźwiękowych,

r_1 - odległość miejsca wnz od czujnika /obliczona z czasu/.

Są to równania powierzchni kulistych. Spotyka się nieraz stosowanie różnic cy czasów [6] i podobne równania opisują wówczas hiperboloidy obrotowe.

W IENOT opracowano program pozwalający rozwiązać układy tych równań /np. dla 10 czujników otrzymuje się 120 układów równań i tyleż rozwiązań/.

Do programu należy wprowadzić : obliczoną z czasów odległość źródła wnz od czujników, współrzędne czujników, wymiary kadzi oraz zakresy dokładności obliczeń. Program oblicza średnie położenie źródła wnz oraz odległości od tego punktu do czujników i porównuje je z wprowadzonymi danymi, odrzucając przekraczające zakresy dokładności. Pozostałe dane wykorzystuje do ponownych obliczeń i wykonuje je do momentu, gdy ustanie przekraczanie zakresu dokładności. Na zakończenie program drukuje współrzędne źródła wnz, odchylenia standardowe współrzędnych oraz rysunek rzutów ścian kadzi z naniesionymi punktami obliczeń.

7. Wnioski

1. Istnieje wiele metod lokalizacji wyładowań niezupełnych o różnym stopniu dokładności i komplikacji.

2. Metody lokalizacji należy dostosowywać do potrzeb i obiektu badanego, bo tylko wówczas można osiągnąć zadowalające rezultaty.

3. Do lokalizacji wyładowań o intensywnościach przekraczających 1000 pG, zwłaszcza w przypadku transformatorów w eksploatacji, zaleca się stosować metodę akustyczną, wykorzystując dużą liczbę informacji i obliczenia komputerowe. Powinno doskonalić się algorytmy obliczeń.

Literatura

1. Carpenter J.H., Kresge J.S., Musick J.G. : Ultrasonic Corona Detection in Transformers. IEEE Trans. on PAS Aug. 1965.
2. Harrold R.T. : Voltage vector analysis for corona location in transformers. IEEE Trans. on PAS Sept. 1973.
3. Howells E., Norton E.T. : Detection of partial discharge in transformers using acoustic emission techniques. Vol. PAS - 97 No 5 Sept./Oct. 1978.
4. IEC Publication 76 - 3. 1980 Power transformers. Part. 3. Insulation levels and dielectric tests.
5. Moro P., Poittevin J. : Localisation des decharges partielles dans les transformateurs par detection des ondes ultrasonores emises. 26/RGE Tome 87 No 1 Jan. 1978.
6. Rindorf H.J. : Acoustic Emission Source Location in Theory and in Practice. Technical Review. Brüel-Kjaer No 2. 1981.
7. Vesic P. : Uredaj za detekciju parcijalnih izbijanja u viskokenaponskim mjernim transformatorima. Transformatori-strucne informacije - KONCAR. 1978-1.
8. Veverka A., Hon A. : Bridge Connection for Location of Internal Discharges in Transformers. Elektrotechn. Obz. 94. 1965 cis. 9.
9. Vora J.P., Foster S.L. : Power Transformers and corona Testing. IEEE Trans. on PAS Aug. 1965.