

Krystian Leonard Chrzan¹

METODY DIAGNOSTYCZNE OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Streszczenie: Opisano najważniejsze metody diagnostyczne ograniczników przepięć: pomiaru temperatury sondami TINYTALK lub SAW, kompensacji, pomiaru prądu całkowitego, harmonicznym prądu i składowej rezystancyjnej prądu.

1. Wstęp

Zwiększenie niezawodności zasilania można osiągnąć m. in. przez ciągłe dozоровanie (monitorowanie) lub okresowe sprawdzanie (diagnozowanie) stanu urządzeń elektroenergetycznych. Najbardziej interesująca jest diagnostyka umożliwiająca tę operację bez konieczności wyłączenia napięcia, przeprowadzana w trybie ich normalnej pracy (on-line). Bardziej uciążliwe, z punktu widzenia ciągłości zasilania są metody które wymagają wyłączenia napięcia lub nawet przewiezienia aparatu do laboratorium (off-line). Można wyróżnić także metody specjalne, służące celom badawczym lub będące w zasadzie długotrwałą próbą typu, przeprowadzaną w warunkach naturalnych. Do takich metod należy pomiar temperatury warystorów za pomocą czujników powierzchniowych fal akustycznych SAW lub sond TINYTALK.

2. Metody pomiaru temperatury

Najprostszą metodą pomiaru temperatury warystorów są paski termiczne produkowane m.in. przez firmę Thermographic Measurements LTD. Na samoprzylepnym pasku znajduje się kilka punktów z substancją chemiczną, która ulega zaczernieniu gdy temperatura przekroczy określoną wartość. Wskaźniki te umożliwiają zatem rejestrację maksymalnej temperatury z dokładnością do ok. 3°C z zakresu 37 – 65°C lub 65 – 105°C. Paski termiczne stosowano bardzo często w próbach zabrudzeniowych. Do celów diagnostycznych są mniej przydatne i zbyt mało dokładne, ponadto konieczny jest demontaż ogranicznika aby przylepić je do powierzchni warystorów.

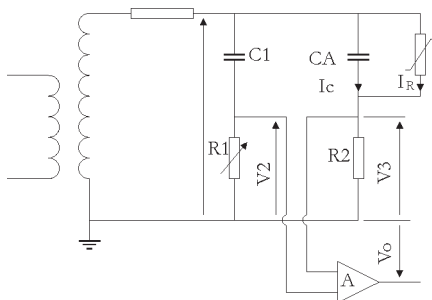
¹ Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, 50-370 Wroclaw, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27

Znacznie większe możliwości posiadają sondy Tinytalk produkowane przez firmę angielską Gemini Data Loggers. Miniaturowy czujnik umieszczony na drukowanej płytce wraz procesorem, pamięcią EPROM i baterią, po wbudowaniu do pojemnika o średnicy ok. 5 cm można umieścić w stosie warystorów. Zakres pomiarowy czujników wynosi od -40°C do $+120^{\circ}\text{C}$ z dokładnością $0,5^{\circ}\text{C}$ poniżej 75°C . W celu uruchomienia pomiaru lub odczytu danych, czujnik łączy się z komputerem za pomocą łącza szeregowego. Częstotliwość zapisywania danych do pamięci można zmieniać w zakresie od 1 s do 4,5 h. Dostępne są wersje z pamięcią 2 kB (1800 rejestracji) i z 8 kB (7600 rejestracji). Zaletą tych czujników jest stosunkowo niska cena, wadą – konieczność każdorazowego demontażu ogranicznika w celu odczytu rejestracji. Dlatego sondy te stosowane są do pomiaru temperatury w próbach zabrudzeniowych a, także – w ograniczonym zakresie – do monitorowania ograniczników.

Czujniki powierzchniowej fali akustycznej SAW dzięki swej zasadzie działania, są idealne do celów pomiaru temperatury w ogranicznikach przepięć [1]. Sensor jest elementem pasywnym nie wymagającym zasilania. Jest to szczególnie przydatne w przypadku monitoringu o długim czasie trwania, ponieważ nie jest konieczna wymiana baterii. Ich wymiary są podobne do typowego układu scalonego i dlatego mogą być z łatwością wbudowane do kolumny warystorów. Nie jest potrzebne jakiegokolwiek połączenie sond z otoczeniem. Sondy mogą pracować w zakresie temperatur od -50°C do $+200^{\circ}\text{C}$.

Sondy SAW umożliwiają zbudowanie kompleksowego systemu monitorowania ograniczników, który oprócz podstawowej funkcji diagnostycznej, można wykorzystać także do zliczania zadziałań ogranicznika i pomiaru energii udarów. Natomiast pod wpływem zabrudzeń temperatura może wzrastać w czasie rzędu minut i godzin. System może więc służyć do oceny narażenia zabrudzeniowego ograniczników w warunkach naturalnych, jak też w laboratorium.

Do diagnostyki ograniczników wykorzystywane są również kamery termowizyjne. Są one powszechnie stosowane m.in. do kontroli stanu styków w rozdzielniach i liniach elektroenergetycznych. W zasadzie można mierzyć tylko temperaturę zewnętrznej powierzchni osłony. W stanie ustalonym temperatura warystorów jest wyższa o kilka stopni, natomiast w stanie nieustalonym temperatura warystorów może być znacznie wyższa. W Polsce pomiary tego typu przeprowadzane są m.in. przez Zakład Pomiarowo-Badawczy Energopomiar „Elektryka” w Gliwicach oraz ABB Corporate Research w Krakowie [2].



Rys. 1. Pomiar składowej rezystancyjnej I_R metodą kompensacyjną [3]. C_A – pojemność ogranicznika, I_C , I_R – składowe pojemnościowa i rezystancyjna prądu płynącego przez warystory

3. Metoda kompensacyjna

Metoda ta umożliwia wydzielenie składowej rezystancyjnej prądu po zrównoważeniu układu mostkowego, którego gałęzie wysokiego napięcia składają się z badanego ogranicznika i bezstratnego kondensatora (Rys. 1). Aby skompensować pojemnościowy prąd I_C ogranicznika należy doprowadzić mostek do równowagi. W tym celu reguluje się wartość R_1 tak aby wartości chwilowe napięcia wejściowego V_1 i napięcia wyjściowego V_0 z wzmacniacza różnicowego nakładały się na siebie.

Z warunku równowagi mostka otrzymuje się równania:

$$R_2 \cdot C_A = R_1 \cdot C_1 = T \quad (1)$$

$$T \cdot \frac{dV_o}{dt} + V_o = R_2 \cdot I_R \quad (2)$$

Jeśli C_1 zostanie dobrane tak, aby spełniony był następujący warunek: $\omega_h \cdot T \ll 1$ (gdzie ω_h jest najwyższą harmoniczną w napięciu wyjściowym), to pierwszy człon w równaniu (2) można pominąć. Wówczas $V_o = R_2 \cdot I_R$, czyli napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do składowej rezystancyjnej I_R .

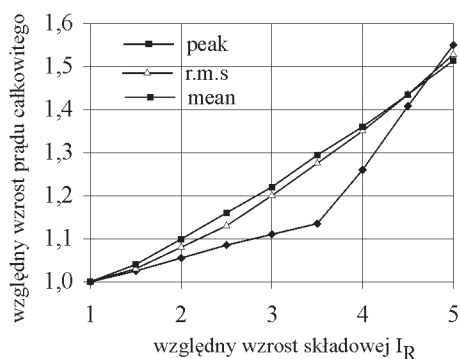
W powyższej analizie założono, że wartość pojemności ogranicznika C_A jest stała. W rzeczywistości jest ona funkcją temperatury, częstotliwości i napięcia. Jednak gdy pomiar wykonywany jest w jednakowej temperaturze i przy częstotliwości sieciowej, to błąd wynikający z tego założenia jest niewielki.

4. Metody pomiaru prądu

Metody te są bardziej rozpowszechnione niż metody pomiaru temperatury. Bardzo prostą i dokładną, lecz niestety metodą off-line jest pomiar parametrów charakterystyki U-I przy napięciu stałym. Dlatego stosuje się ją często podczas przeprowadzania badań degradacji warystorów [4], a rzadziej do diagnozowania kompletnych ograniczników. Pomiar prądu przy napięciu roboczym może być przeprowadzony metodą on-line, dlatego metody tego typu są chętnie stosowane w eksploatacji.

4.1. Pomiar prądu całkowitego

Pomiar prądu całkowitego, którego amplituda jest rzędu 1 mA, jest bardzo prosty. W celu oddzielenia prądu zewnętrznego, podstawę ogranicznika umieszcza się na niewielkich izolatorach. Pomiar prądu można wykonać mierząc napięcie na rezystancji około 20-200Ω lub za pomocą transformatorów prądowych (cewka Pearsen'a) [5]. Rezystor umieszczany jest we wspólnej obudowie liczników zadziałań, do których możliwe jest dołączanie niewielkiego, przenośnego miernika.



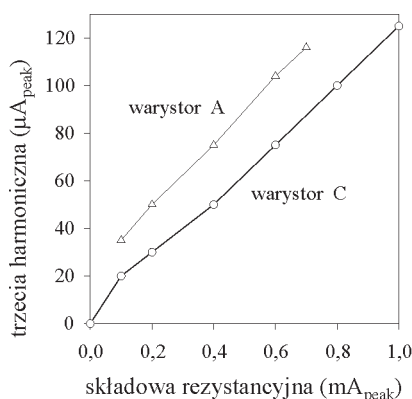
Rys. 2. Wpływ wzrostu składowej rezystancyjnej na wzrost prądu całkowitego [6]

Prąd całkowity zależy głównie od składowej pojemnościowej, ponieważ składowa rezystancyjna jest od niej znacznie mniejsza (zazwyczaj więcej niż 10-krotnie). Ponadto obydwie składowe są przesunięte w fazie o 90° , dlatego potrzebny jest znaczny wzrost składowej rezystancyjnej (np. dwukrotny) aby wartość maksymalna prądu całkowitego wzrosła o kilka procent. Z rysunku 2 widać, że dwu-

krotny wzrost składowej I_R powoduje wzrost prądu całkowitego o ok. 10%. Aby zwiększyć czułość metody, mierniki prądu całkowitego oprócz wartości maksymalnej i średniej prądu całkowitego mogą mierzyć także zawartość harmonicznych.

4.2. Pomiar harmonicznych prądu

Warystory tlenkowe są elementami o nieliniowej charakterystyce U-I. Jeśli nieliniowy rezystor jest zasilany ze źródła sinusoidalnego, to prąd oprócz harmonicznej podstawowej zawiera także wyższe harmoniczne. Gdy charakterystyka U-I jest symetryczna, wówczas prąd zawiera tylko harmoniczne nieparzyste, czyli 1-szą, 3-cią, 5-tą itd. Najprostszą metodą pomiaru harmonicznych jest zastosowanie filtra przepustowego, który odcina harmoniczną podstawową 50 Hz. Miernik taki mierzy prąd całkowity (bez filtra), a z włączonym filtrem harmoniczne 150 Hz, (w przypadku użycia filtra pasmowego) [7] lub harmoniczne 150, 250, 350 itd., gdy zastosowano filtr górnoprzepustowy. Wartość maksymalna składowej rezystancyjnej jest dla danego typu warystorów proporcjonalna do amplitudy trzeciej harmonicznej prądu (Rys. 3)



Rys. 3. Zależność amplitudy trzeciej harmonicznej prądu od amplitudy składowej rezystancyjnej prądu dla dwóch typów warystorów [7]

Dlatego pomiar trzeciej harmonicznej prądu jest równoważny pomiarowi jego składowej rezystancyjnej. Niestety, w praktyce napięcie sieci nie jest idealną sinusoidą, lecz zawiera wyższe harmoniczne. A zatem w trzeciej harmonicznej prądu warystora tylko część jej amplitudy wynika z jego nieliniowej charakterystyki, natomiast część pochodzi od zniekształconej krzywej napięcia zasilającego. W liniach wysokich napięć zawartość trzeciej harmonicznej w krzywej napięcia wynosi zazwyczaj 0,5 – 1 % [7]. Natomiast w liniach średnich napięć zawartość trzeciej harmonicznej może być znacznie wyższa, (np. 4%), a ponadto mogą występować harmoniczne parzyste [8]. Harmoniczne napięcia mogą być także przesunięte względem składowej podstawowej o różne kąty fazowe, co ma znaczny wpływ na kształt prądu całkowitego [9] oraz rezystancyjnego [10]. Stosowanie diagnostyki opartej o pomiar trzeciej harmonicznej w laboratorium, przy zastosowaniu źródła napięcia o czystej sinusoidzie nie jest obarczone błędami [11].

Produkowany przez firmę TransiNor As rejestrator LCM1 (Leakage Current Monitor) umożliwia wydzielenie z wyższych harmonicznych prądu składowej pochodzącej od trzeciej harmonicznej napięcia sieci [12]. Przyrząd ten składa się z trzech części:

- sondy prądowej (transformatora prądowego) który może być zamontowany na stałe w liczniku zadziałań lub dołączany na czas pomiaru,
- sondy polowej połączonej z sondą prądową, prąd indukowany w sondzie polowej dopływa do adaptera, który jest częścią sondy prądowej, gdzie jest wzmacniany,
- przyrządu pomiarowego analizującego sygnały z sondy prądowej i sondy polowej w celu wyznaczenia składowej rezystancyjnej prądu.

Analiza harmonicznych przeprowadzana jest metodą kompensacji. Trzecie harmoniczne zawarte w napięciu sieci generują prąd pojemnościowy I_{3c} o tej samej częstotliwości. Udział tego prądu w trzeciej harmonicznej prądu całkowitego I_{3t} może być znaczący. Dlatego w celu obliczenia trzeciej harmonicznej prądu generowanego przez nieliniowe warystory prąd I_{3c} jest odejmowany od trzeciej harmonicznej prądu całkowitego I_{3t}

$$I_{3r} = I_{3t} - I_{3c} \quad (3)$$

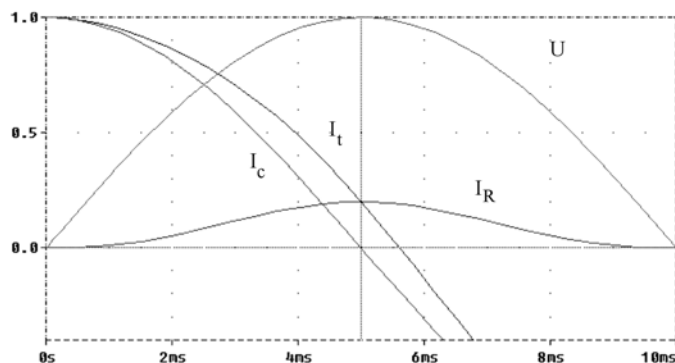
W ten sposób zmniejsza się wpływ harmonicznych zawartych w sygnale napięciowym na wyniki pomiarów. Amplitudę i kąt fazowy prądu I_{3t} oblicza się za pomocą transformaty Fourier'a prądu całkowitego I_t . Natomiast prąd I_{3c} obliczany jest w sposób bardziej skomplikowany, po przekształceniu transformatą Fourier'a prądu I_p z sondy połowej. Prąd ten zależy od pojemności rozproszenia, w tym także od sąsiednich faz, dlatego wprowadzić trzeba współczynnik poprawkowy $k_3 = 0,75 \times I_{1t} / I_{1p}$ i zastosować wzór:

$$I_{3c} = k_3 \cdot I_{3p} \quad (4)$$

gdzie: k_3 – współczynnik poprawkowy, I_{1t} , I_{1p} – harmoniczne podstawowe prądu całkowitego i prądu z sondy połowej.

4.3. Pomiar składowej rezystancyjnej prądu

Składowa pojemnościowa prądu wewnętrznego w wysokonapięciowych ogranicznikach beziskiernikowych wynosi od 0,5 - 3 mA, a składowa rezystancyjna od 10 - 250 μ A [12]. Ponieważ znacznikiem zmian starzeniowych jest składowa rezystancyjna, dlatego najdokładniejszą metodą diagnostyczną jest metoda, która polega na pomiarze prądu I_R . Najbardziej rozpowszechnioną metodą wyznaczenia wartości maksymalnej składowej rezystancyjnej prądu jest pomiar prądu całkowitego w chwili gdy napięcie osiąga maksimum (Rys. 4).



Rys. 4. Przebiegi składowych pojemnościowej I_C , rezystancyjnej I_R , prądu całkowitego I_t oraz napięcia U [9]

Aby dokładnie wyznaczyć składową rezystancyjną należy ograniczyć błędy fazowe napięcia wynikające z zastosowanego dzielnika napięciowego i impedancji wejściowej rejestratora. Natomiast błędy fazowe prądu są zazwyczaj pomijalnie małe [9]. Przy znacznej zawartości harmonicznych w sygnale napięcia zasilającego, wyznaczenie wartości

maksymalnej napięcia może być utrudnione lub wręcz niemożliwe (krzywa napięciowa może mieć np. dwa maksima). Harmoniczne mogą powodować spłaszczenie krzywej napięciowej w pobliżu maksimum, co może utrudniać jego wyznaczenie nawet przy zastosowaniu cyfrowych oscyloskopów o dużej rozdzielczości pionowej.

Wartość skuteczną składowej rezystancyjnej prądu $I_{R_{rms}}$ można obliczyć z poniższego wzoru [13]:

$$I_{R_{rms}} = \frac{P}{U_{rms}} \quad (5)$$

gdzie: U_{rms} – wartość skuteczna napięcia, P – moc średnia czynna, przy stosowaniu cyfrowej techniki pomiarowej U_{rms} i P oblicza się w następujący sposób:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n [u(k)]^2} \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n u(k) \cdot i(k) \quad (7)$$

gdzie: n jest liczbą próbek pomiarowych sygnału.

W tej metodzie wpływ zawartości harmoniczných w sygnale napięciowym jest zredukowany przez procedurę obliczeń (mnożenie i całkowanie).

Metody wyznaczania amplitudy składowej rezystancyjnej prądu przy maksimum napięcia lub obliczania mocy wymagają stosowania dzielnika napięciowego. Metody te mogą być zatem stosowane w laboratorium, a tylko wyjątkowo w warunkach polowych. Przy niewielkiej zawartości harmoniczných w sygnale napięciowym, do obliczania składowej rezystancyjnej prądu można stosować metodę kompensacji składowej pojemnościowej bez wykorzystania sygnału napięciowego) [14, 15].

Prąd całkowity I_t w czasie t jest sumą składowej pojemnościowej I_C i rezystancyjnej I_R [14], czyli:

$$I_t(t) = I_C(t) + I_R(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} + I_R(t) \quad (8)$$

W każdym półokresie, napięcie (i składowa rezystancyjna prądu) osiąga dwukrotnie tę samą wartość w czasie t_1 i t_2 :

$$I_t(t_1) = I_C(t_1) + I_R(t_1) = C \cdot \frac{du(t_1)}{dt} + I_R(t_1) \quad (9)$$

$$I_t(t_2) = I_C(t_2) + I_R(t_2) = C \cdot \frac{du(t_2)}{dt} + I_R(t_2) \quad (10)$$

Ponieważ $u(t_1) = u(t_2)$ to również $I_R(t_1) = I_R(t_2)$, więc po odjęciu stronami równań (10) od równania (9) otrzymuje się wyrażenie:

$$C = \frac{I_t(t_1) - I_t(t_2)}{\frac{du(t_1)}{dt} - \frac{du(t_2)}{dt}} \quad (11)$$

Po zsumowaniu równań (12.9) i (12.10) z podstawionym (12.11), otrzymuje się:

$$I_R(t_1) = I_R(t_2) = \frac{I_t(t_1) + I_t(t_2)}{2} \left[\frac{I_t(t_1) - I_t(t_2)}{2} \right] \left[\frac{\frac{du(t_1)}{dt} + \frac{du(t_2)}{dt}}{\frac{du(t_1)}{dt} - \frac{du(t_2)}{dt}} \right] \quad (12)$$

W półokresie, dla wartości napięcia spełniającego warunek $u(t_1) = u(t_2)$, pochodne spełniają następujący warunek:

$$\frac{du(t_1)}{dt} = - \frac{du(t_2)}{dt}$$

W takim przypadku równanie (12.12) można uprościć do:

$$I_R(t_1) = I_R(t_2) = \frac{I_{t(t_1)} + I_{t(t_2)}}{2} \quad (13)$$

Bardzo trudnym zagadnieniem jest określenie dopuszczalnych wartości prądu, po przekroczeniu których należy wycofać ogranicznik z eksploatacji. Często przyjmuje się, że dopuszczalny prąd całkowity może wzrosnąć dwa razy. Oznacza to, że prąd rezystancyjny może wzrosnąć około 10 razy [7]. Ustalenie wartości kryterium diagnostycznego, decydującego o wycofaniu aparatu elektrycznego podejmuje się na podstawie wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych.

Literatura

- [1] **Hinrichsen V., Chrzan K.L.:** *Monitorowanie ograniczników przepięć za pomocą pasywnych sond temperaturowych SAW*. Konf. Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce NIWE, Bielsko-Biała 2000, s. 315-322
- [2] **Florkowski M., Korendo Z.:** *Metody przetwarzania obrazów termowizyjnych w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych*. VII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych WN, Zakopane 1999, s. 119-126
- [3] **Naidu S.R., Srivastava K.D.:** *The validity of circuits for measuring the resistive leakage current of zinc oxide arresters*. Int. Symposium on HV Eng., Braunschweig, paper 82.12
- [4] **Chrzan K.:** *Degradacja warystorów ZnO przez udary prądowe*. Konferencja Nowe Materiały i Technologie w Elektrotechnice MATEL, Łódź-Dobieszków 1995, s. 189-193
- [5] **Klein T., Koehler W., Feser K., Schmidt W., Bebensee R.:** *A new monitoring system for metal oxide surge arresters*. Int. Symposium on HV Eng.: London 1999, paper 2.301
- [6] IEC document 37/224/FDIS:1999.08.31, Amendment 1 to IEC 60099-5, First Edition, 1996.02 Surge arresters - Part 5 :Selection and application recommendation (new section 6: *Diagnostic indicators of metal oxide surge arresters in service*)
- [7] **Shirakawa S., Endo F. et. all.:** *Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector*. IEEE Trans. on Power Delivery, July 1988, pp. 998-1003
- [8] **Shuter T.C., Vollkommer H.T., Kirkpatrick T.L.:** *Survey of harmonic levels on the american electric power distribution system*. IEEE Trans. on Power Delivery, Oct. 1989, pp. 2204-2211
- [9] **Chrzan K.L., Koehler W.:** *Diagnostics of high voltage metal oxide arresters, procedure errors*. Int. Symposium on HV Eng., London 1999, paper 2.385
- [10] **Zhu H., M.R Raghuvveer.:** *Influence of harmonics in system voltage on metal oxide surge arrester diagnostics*. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999, pp. 542-545

- [11] **Dengler K., Feser K., Koehler W., Schmidt W., Richter B.:** *On-line diagnosis of MO-varistors.* Int. Symposium on HV Eng., Montreal 1997, paper 3039
- [12] **Lundquist J., Stenstroem L., Schei A., Hansen B.:** *New method for measurement of the resistive leakage current of metal oxide surge arresters in service.* IEEE Trans. on Power Delivery, Nov. 1990, pp. 1811-1822
- [13] **Coffen L.T., McBride J.E.:** *High voltage ac resistive current measurements using a computer based digital watts technique.* IEEE Trans. on Power delivery, April 1991, pp. 550-556
- [14] **Spellman C.A., Haddad A.:** *A technique for on-line monitoring of ZnO surge arresters.* Int. Symposium on HV Eng., Montreal 1997
- [15] **Qin S.:** *The application of the mathematical method for measurement of the resistive current of ZnO.* Int. Symposium on HV Eng., Graz 1995, paper 4475

DIAGNOSTIC METHODS OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS

The most important diagnostic methods of metal oxide surge arresters were described: temperature measurement using TINYTALK sensors or SAW sensors (Surface Acoustic Wave), compensation method, total current measurement, current harmonics measurement and resistive current measurement.