II Sympozjum

AKTUALNE PROBLEMY W METROLOGII' 2013

Katedra Metrologii i Systemów Informacyjnych Politechniki Gdańskiej

WPŁYW KSZTAŁTU NAPIĘCIA NA POMIAR PRĄDU UPŁYWOWEGO OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 583471820 fax: 583472136 e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki pomiarów prądu upływowego dla tlenkowych ograniczników przepięć niskiego napięcia (ZnO) badanych przy nieodkształconym napięciu sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz ÷ 10 kHz oraz przy napięciu odkształconym o częstotliwości podstawowej 50 Hz. Prąd upływowy, a szczególnie jego składowa rezystancyjna, jest podstawą oceny stanu technicznego ogranicznika. Zastosowane procedury pomiarowe w przypadku napięcia odkształconego umożliwiły przeliczenie prądu upływowego ogranicznika na poziom występujący przy napięciu nieodkształconym. Przedstawiony algorytm korygowania prądu upływowego umożliwia wykonywanie analizy porównawczej ograniczników badanych w różnych warunkach napięciowych.

Słowa kluczowe: ograniczniki przepięć niskiego napięcia, warystory, diagnostyka

1. WSTĘP

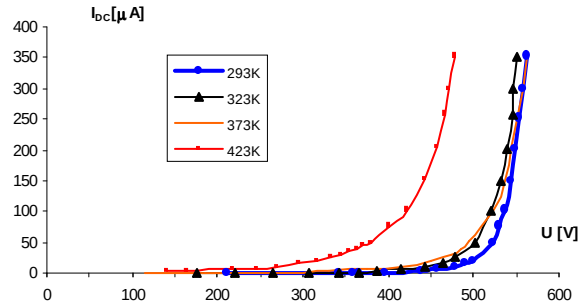
Ograniczniki niskiego napięcia (nn) są powszechnie stosowane w instalacjach elektroenergetycznych do zmniejszenia skutków przepięć atmosferycznych i łączeniowych. Elementy te na skutek oddziaływania napięcia w sieci, a szczególnie wskutek przepływu prądów wyładowczych, ulegają starzeniu, którego jednym z symptomów jest często wykorzystywana w diagnostyce stanu technicznego zmiana charakterystyki prądowo – napięciowej w obszarze przedprzebiciowym.

Interpretacja wyników pomiarów ogranicznika jest dość kłopotliwa, ponieważ wartość prądu upływowego zależy istotnie od kilku czynników:

- wartości skutecznej napięcia sieci,
- zawartości wyższych harmonicznych napięcia zasilającego (kształt krzywej napięcia),
- czasu pomiędzy włączeniem pod napięcie ogranicznika, a wykonaniem pomiaru,
- temperatury ogranicznika wynikającej z temperatury otoczenia i składowej rezystancyjnej prądu upływowego.

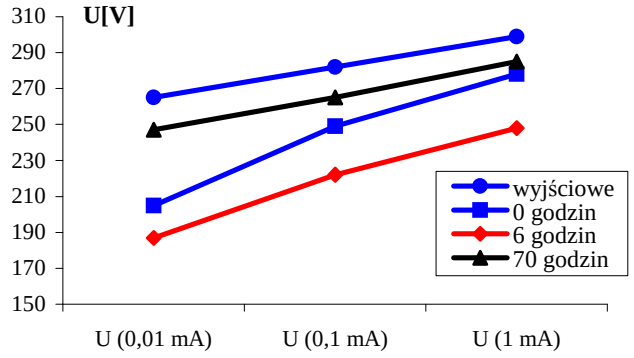
Niektóre z wymienionych czynników zależą od konstrukcji ogranicznika, a przede wszystkim od właściwości jego podstawowego elementu składowego – warystora lub stosu warystorów. Parametry poszczególnych warystorów, mimo zachowania wysokiej jakości składników masy warystorowej i kontroli parametrów procesu produkcyjnego, są zasadniczo zróżnicowane, zarówno w części charakterystyki przedprzebiciowej, jak i przewodzenia. W związku z tym, producenci warystorów wykonują szczegółowe badania parametrów poszczególnych krążków ceramiki ZnO w celu pogrupowania wyrobów o podobnych parametrach, co ma szczególne znaczenie dla ograniczników średniego i wysokiego napięcia składających się z kilku – kilkunastu warystorów. Dzięki tego rodzaju zabiegom uzyskuje się w przybliżeniu jednostajny rozkład napięcia wzdłuż drogi upływu ogranicznika.

W ogranicznikach charakteryzujących się prawidłowym stanem technicznym, o niewielkim prądzie upływowym nie przekraczającym 1 mA, nie należy spodziewać się nadmiernego wydzielania mocy czynnej prowadzącej do wzrostu temperatury. Dopiero nadmierne przegrzanie, powyżej temperatury 423K (150°C), związane np. z wysoką wartością prądu upływowego, powoduje zasadnicze zmiany charakterystyki prądowo – napięciowej (rys. 1).



Rys. 1. Wpływ temperatury otoczenia na zmianę charakterystyki $I(U)$ warystora nn mierzonego przy napięciu stałym

Podstawowe kryterium stabilności struktury ogranicznika związane z oddziaływaniem udarów prądowych sprowadza się do narażenia termicznego [1, 4]. Wydzielana moc w stanie przejściowym w objętości ogranicznika nagrzewa go do pewnej temperatury, w której następują zmiany strukturalne. Szczegółowe badania, w których próbki warystorów ZnO, o zróżnicowanej strukturze wewnętrznej, wykonywanych w warunkach przemysłowych, wygrzewano w temperaturze 523K (250°C) przez kilka minut, 6 i 70 godzin, zawiera praca [1]. Z analizy rysunku 2 wynika, że krótkotrwałe nagrzanie struktury warystora, do kilku godzin, powoduje nagłe zmniejszenie napięcia przebicia, nawet o kilkadziesiąt woltów. Natomiast czas wygrzewania do 70 godzin powoduje powrót w okolice charakterystyki początkowej wskutek relaksacji wewnętrznych naprężeń [1].



Rys. 2. Zmiany napięcia warystora przy prądzie 0,01 mA, 0,1 mA i 1 mA podczas wygrzewania w temperaturze 523K przez czas do 70 godzin, opracowano na podstawie [1]

Diagnostyka ograniczników przepięć niskiego napięcia zazwyczaj odbywa się poprzez stosowanie specjalnych przyrządów działających na zasadzie sprawdzenia jednego lub kilku punktów charakterystyki warystora, które nie powinny przekroczyć wartości granicznych podanych przez producenta. W urządzeniach tych zazwyczaj spotyka się generator napięcia stopniowanego, o szybkości narastania rzędu 1000 V/s. Napięcie to jest przykładane do warystora, mierzone w czasie testu i wyłączane po przekroczeniu prądu upływowego np. 1 mA.

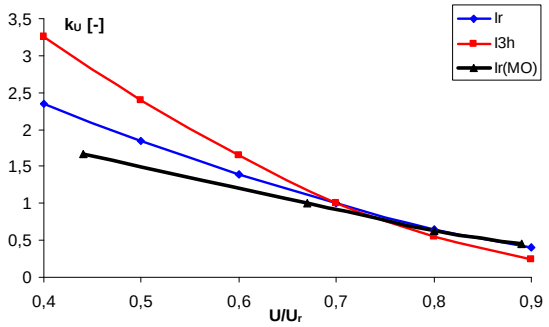
Inne sposoby diagnostyczne, które nie wymagają wyłączenia ogranicznika z sieci, mogą być oparte na pomiarach prądu upływowego za pomocą wysokoczułych cęg prądowych umożliwiających bezpośredni odczyt prądu upływowego już od 1 µA (np. cęgi Kyoritsu KEW 2432) lub na zasadzie rejestracji w okresowych odstępach czasu (np. przyrząd Kyoritsu KEW 5001) [2]. Pomiary te, proste w przeprowadzeniu, wymagają uwzględnienia szeregu współczynników korekcyjnych – wpływu temperatury - k_t, napięcia - k_U i zawartości harmonicznych (częstotliwości) w celu przeliczenia prądu upływowego na poziom odniesienia określony np. temperaturą 20°C, amplitudą napięcia pierwszej harmonicznej w sieci nn np. 230 V i brakiem wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym.

2. WPŁYW NAPIĘCIA I TEMPERATURY W POMIARACH PRĄDU UPŁYWOWEGO

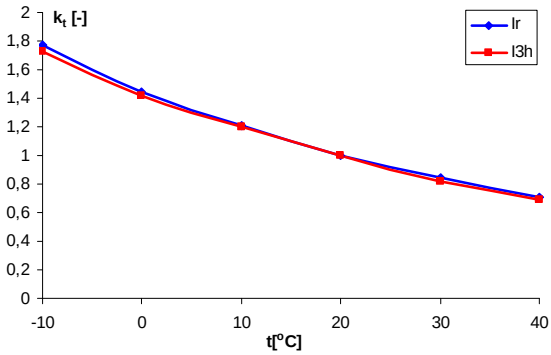
W pracy przedstawiono wyniki pomiarów prądu upływowego ograniczników ZnO nn, określając wpływ oddziaływania wyższych harmonicznych napięcia zasilającego oraz współczynniki korekcyjne - temperaturowe k_t i napięciowe k_U. Współczynniki te są niezbędne do przeliczenia prądu upływowego ogranicznika zmierzonego w dowolnych warunkach napięciowo – temperaturowych określonych temperaturą oraz napięciem skutecznym, uwzględniającym zawartość wyższych harmonicznych. Przeliczenie prądu upływowego następuje do poziomu odniesienia ustalonego przez mierzącego w celu jednoznacznego porównania wyników pomiarów wykonywanych w dłuższym horyzoncie czasowym, kiedy w warunkach eksploatacyjnych ewidentnie występują zmiany obu analizowanych wielkości. Współczynniki k_t oraz k_U mogą być określone dla danego typu ogranicznika po pomiarach prądu upływowego przeprowadzonego w różnych warunkach temperaturowo – napięciowych [3, 4].

Na rysunkach 3a i 3b przedstawiono przykładowe współczynniki k_t oraz k_U dla ograniczników nn o napięciu pracy U_c=275 V i znamionowym prądzie wyładowczym 20 kA o parametrach czasowych 8/20 µs. Dodatkowo naniesiono stabelaryzowane w [5] dane producenta przyrządu LCM500 wykorzystywanego w diagnostyce ograniczników średniego i wysokiego napięcia. Zaproponowano tu poziomy odniesienia U/U_r=0,7 i t=20°C, dla których pokazano wartości k_U (rys. 3a) oraz k_t (rys. 3b) dla składowej czynnej I_r oraz harmonicznej 3 rzędu w prądzie upływowym I_{3h}.

a)



b)



Rys. 3. Współczynniki poprawkowe [5, 6]– a) wpływu napięcia, b) temperatury do przeliczania pomiarów prądu upływowego na warunki odniesienia – 20°C i U/U_r=0,7

Stosunek I_r/I_{3h} zależy od poziomu napięcia i temperatury ogranicznika, która przy niewielkim poziomie składowej czynnej prądu upływowego, jest równa temperaturze otoczenia. W celu poprawnego przeliczenia wyników pomiarów producent ogranicznika powinien podać maksymalne dopuszczalne poziomy I_r i I_{3h} przy napięciu U/U_r=0,7 i dla t=20°C – parametry te są traktowane jako parametry odniesienia. Dodatkowo należy podać odpowiednie współczynniki k_t i k_U do przeliczenia prądów zmierzonych na warunki odniesienia.

Własne wyniki autora podane w [6], wskazują, że w przypadku ograniczników przepięć średniego napięcia, uzyskano podobne współczynniki dla U/U_r>0,7, natomiast wyraźnie mniejsze przy niewielkich napięciach zasilających, co może mieć związek z bardzo małymi wartościami prądów upływowych i dodatkowymi błędami ich pomiaru.

3. WPŁYW ODKSZTAŁCENIA NAPIĘCIA W POMIARACH PRĄDU UPŁYWOWEGO

W celu określenia sposobu prawidłowego przeliczania wyników pomiarów prądu upływowego uzyskiwanych przy napięciu odkształconym, wykonano serię pomiarów na ogranicznikach niskonapięciowych tego samego producenta o parametrach: napięcie trwałej pracy U_c=275 V, znamionowy prąd wyładowczy 8/20 µs – 20 kA. Ograniczniki pochodziły z 2 różnych okresów produkcji (typ I i typ II), co można łatwo zidentyfikować za pomocą numerów katalogowych produktu. Wszystkie ograniczniki typu I nie miały widocznych uszkodzeń zewnętrznych,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

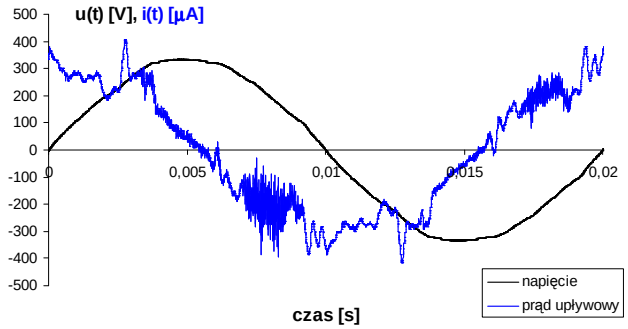
natomiast cztery obudowy warystorów typu II posiadały na powierzchni nalot węgla związany z wyładowaniami powierzchniowymi.

Każdy z ograniczników został poddany następującej procedurze diagnostycznej:

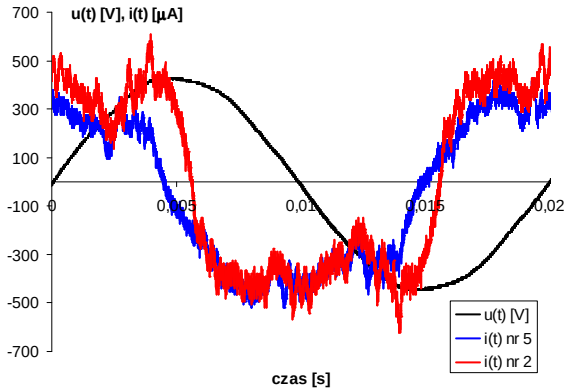
- pomiar prądu upływowego przy nieodkształconym napięciu przemiennym o wartości 150 V, 200 V, 230 V i 340 V wraz z analizą jego składowych harmonicznych,
- pomiar prądu upływowego przy odkształconym napięciu przemiennym o wartości około 238 V wraz z analizą jego składowych harmonicznych.

Pomiary prądu upływowego wykonano za pomocą bezindukcyjnej impedancji pomiarowej o rezystancji 50 Ω, na której mierzono przebieg napięcia.

Na rysunkach 4 i 5 pokazano kształt napięcia i prądu ogranicznika odpowiednio przy napięciu sieci niższym od napięcia trwałej pracy $U<U_c$ oraz przy $U>U_c$, kiedy występuje radykalny wzrost poziomu składowej rezystancyjnej.



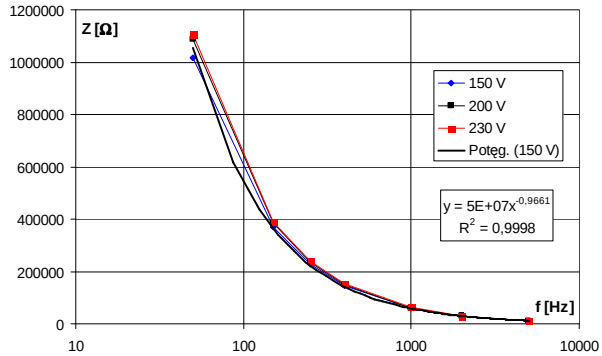
Rys. 4. Prąd upływowy i(t) ogranicznika nr 8 zmierzony przy napięciu sieci u(t) o wartości skutecznej 237,9 V



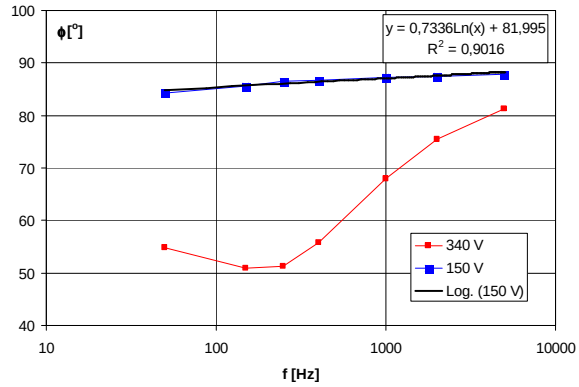
Rys. 5. Prąd upływowy i(t) ograniczników nr 2 (wypalenia) i nr 5 (bez wypaleń) zarejestrowany przy napięciu u(t) o wartości skutecznej 310 V [7]

W celu określenia wpływu częstotliwości harmonicznej napięcia od wartości prądu upływowego dla badanych ograniczników, dodatkowo wykonano badania prądu upływowego wymuszanego sygnałem napięciowym do 340 V, uzyskiwanym z wzorcowego generatora mocy. Badania te wykonano dla kilku ograniczników przepięć tego samego typu w zakresie częstotliwości do 5000 Hz. Zakres ten jest wystarczający, gdyż w sieci elektroenergetycznej zazwyczaj dominują wyższe nieparzyste harmoniczne 3, 5, 7, 9, 11, 13. Na podstawie uzyskanych charakterystyk $I(f)$ obliczono charakterystyki modułu $Z(f)$ i kąta przesunięcia $\phi(f)$ impedancji ogranicznika dla napięć z zakresu od 150 do 340 V, które pokazano odpowiednio na rysunkach 6a i 6b. W zakresie przedprzebiciowym ogranicznika dla $U<U_c$ występuje zmiana modułu impedancji ogranicznika, która silnie maleje w funkcji częstotliwości według charakterystyki potęgowej. Natomiast kąt przesunięcia fazowego nieznacznie wzrasta z częstotliwością od 84° do 88°, co aproksymowano z dobrą dokładnością zależnością logarytmiczną.

a)



b)



Rys. 6. a) Moduł i b) kąt przesunięcia impedancji badanego ogranicznika przepięć nn

Charakterystyka impedancyjna ogranicznika umożliwia wprowadzenie poprawki na zawartość wyższych harmonicznych poprzez realizację następującego algorytmu:

- obliczenie zawartości wyższych harmonicznych u_h i i_h w napięciu zasilającym i prądzie upływowym,
- obliczenie teoretycznych, wyższych harmonicznych prądu upływowego i_{th}, na podstawie charakterystyk z rysunków 6a i 6b oraz algorytmu szybkiej transformaty Fouriera FFT dla napięcia zasilającego,
- skorygowanie zawartości wyższych harmonicznych, w mierzonym prądzie upływowym według działania i_h-i_{th}.

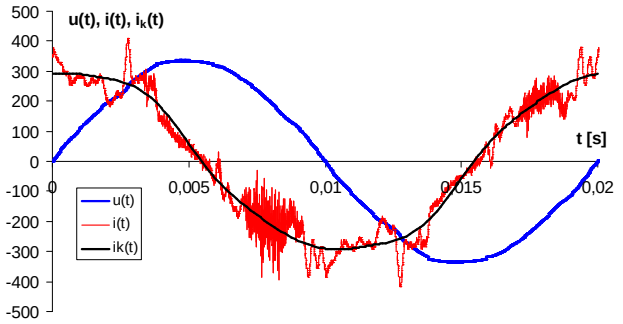
Korekta wyższych harmonicznych, która pozwala na uzyskanie przebiegu skorygowanego prądu upływowego $i_k(t)$ może wystąpić dla wszystkich prążków wyższych harmonicznych, nawet do rzędu 100 lub tylko dla tych, które powodują istotną zmianę prądu danej harmonicznej. W praktyce, ze względu na dominowanie w napięciu zasilającym harmonicznych nieparzystych 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, wystarcza uwzględnienie tylko wymienionych częstotliwości.

Skorygowanie przebiegu prądu występuje do częstotliwości 50 Hz (napięcie nieodkształcone) i pozwala na porównywanie wyników prądu upływowego dla ograniczników mierzonych, nawet przy napięciu silnie odkształconym. Uzyskany przebieg $i_k(t)$ pozwala na prawidłowe obliczenie istotnych dla oceny stanu technicznego ogranicznika parametrów: prądu upływowego, składowej rezystancyjnej na podstawie mocy czynnej według [8]. Błąd względny odniesiony do wyników pomiarów przy napięciu nieodkształconym, w przypadku obliczania składowej czynnej dla skorygowanego prądu upływowego $i_k(t)$, nie przekracza 5%. Natomiast dla pomiaru

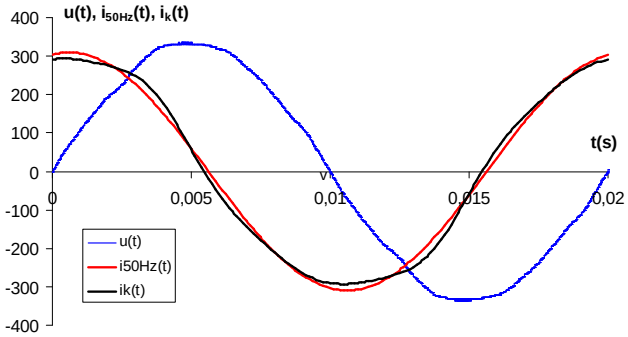
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

rzeczywistego wynosi aż 30%. Zaproponowana koncepcja korekty pomiarów ograniczników przepięć otrzymanych przy napięciach odkształconych, o ile dysponuje się charakterystykami częstotliwościowymi otrzymanymi od producenta dla danego typu ogranicznika, umożliwia porównywanie wyników badań i śledzenie zmian prądu upływowego i jego składowej czynnej. Ma to istotne znaczenie dla przewidywania tempa starzenia ogranicznika w czasie eksploatacji.

Zaproponowana metoda może być stosowana pod warunkiem zasilania ogranicznika napięciem $U<U_c$ oraz nie występowania silnego odkształcenia prądu upływowego związanego z występowaniem składowej rezystancyjnej większej lub porównywalnej z prądem pojemnościowym. W przypadku $U>U_c$, korekta jest również możliwa, ale pod warunkiem dysponowania charakterystyką impedancyjną dla ogranicznika charakteryzującego się dużą wartością składowej czynnej prądu upływowego.



Rys. 7. Zarejestrowane wartości napięcia $u(t)$ i prądu upływowego $i(t)$ przy napięciu odkształconym U=237,8 V. Skorygowany przebieg prądu upływowego $i_k(t)$ obliczono dla harmonicznych nieparzystych od 1 do 15



Rys. 8. Porównanie skorygowanego przebiegu prądu upływowego $i_k(t)$ z prądem harmonicznej podstawowej 50 Hz $i_{50Hz}(t)$ wynikającej z analizy algorytmem FFT przebiegu rzeczywistego $i(t)$

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W czasie pomiarów prądu upływowego ograniczników przepięć, nawet przy $U<U_c$, występują silne odkształcenia prądu, również w zakresie wyższych częstotliwości.

Obecność harmonicznych napięciowych wymusza konieczność wprowadzenia odpowiednich współczynników korekcyjnych w celu prawidłowego obliczenia prądu upływowego przy częstotliwości podstawowej 50 Hz.

Określenie charakterystyk częstotliwościowych ograniczników przepięć umożliwia skorygowanie prądów upływowych mierzonych w warunkach odkształconego napięcia.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Mielcarek W., Uwarunkowania technologiczne warystorów tlenkowych, IEl, Warszawa 2002.
2. Olesz M., Pomiary prądu upływowego w instalacjach i urządzeniach elektroenergetycznych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki nr 31, 2012, ISSN 1425-5766.
3. Jinliang He i inni, Thermal Characteristics of High Voltage Whole-Solid-Insulated Polymeric ZnO Surge Arresters, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 18, no. 4, 2003, pp. 1221-1227.
4. Heinrich Ch. i Hinrichsen V., Diagnostics and Monitoring of Metal-OxideSurge Arresters in High-Voltage Networks-Comparison of Existing and Newly Developed Procedures, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, 2001, pp 138 – 143.
5. Larsen V., Lien K., In-Service Testing and Diagnosis of Gapless Metal Oxide Surge Arresters, Materiały IX International Symposium on Lightning Protection, 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.
6. Olesz M., Diagnostyka niskonapięciowych warystorowych ograniczników przepięć, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki nr 31, 2012, ISSN 1425-5766.
7. Smulko J., Olesz M., Hasse L., Kaczmarek L., Lentka G., Problems of varistor quality assessment during exploitation, Metrology and Measurement Systems. Vol. XIX, No. 2, 2012, s. 395-404, ISSN 0860-8229.
8. Olesz M., Algorytmy obliczania składowej czynnej prądu upływu ograniczników przepięć, Przegląd Elektrotechniczny, nr 11a, 2012, s. 30-33, ISSN 0033-2097.

THE INFLUENCE OF VOLTAGE HARMONICS ON ARRESTER LEAKAGE CURRENT MEASUREMENT

The measurement of the metal – oxide surge arresters (MOSA) leakage current and the analysis of its components is a key diagnostic criterion according to technical standards. The paper presents leakage current measurements of low voltage ZnO surge arresters tested with deformed voltage (f=50 Hz) and non-deformed sinusoidal voltage in the range of 50 Hz – 10 kHz.

The proposed method requires knowledge of the following parameters: temperature of MOSA, RMS voltage, leakage current and voltage waveforms. The method can be used only for arrester supplying by voltage U lower than continuous operating voltage U_c and without occurrence of visible deformation of the leakage current. The relative error obtained by proposed method related to the measurement results at a not deformed voltage, does not exceed 5% in the case of calculation an resistive component.

Keywords: low voltage arresters, ZnO varistors, diagnostics

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl