

ZASTOSOWANIE POMIARÓW PRĄDÓW UPŁYWOWYCH W DIAGNOSTYCE OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 58 3471820 e-mail: marek.olesz@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono metody oceny stanu technicznego warystorowych ograniczników przepięć wysokiego napięcia (WN) stosowane w badaniach laboratoryjnych oraz w eksploatacji bez wyłączania ograniczników z sieci. Analiza metod diagnostycznych została uzupełniona wynikami pomiarów laboratoryjnych prądu upływowego ograniczników WN po wieloletniej eksploatacji w energetyce zawodowej.

Słowa kluczowe: ograniczniki przepięć wysokiego napięcia, warystory, diagnostyka.

1. WSTĘP

Ograniczniki przepięć WN spełniają istotną rolę w systemie elektroenergetycznym. Przede wszystkim, pod warunkiem prawidłowego doboru, zapewniają skuteczną ochronę elementów systemu, głównie transformatorów energetycznych, przed przepięciami pochodzenia piorunowego i łączeniowego. Ten ostatni rodzaj ochrony jest szczególnie ważny dla uzyskania długiego czasu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, co wymaga odpowiedniej koordynacji pomiędzy wytrzymałością elektryczną izolacji, a poziomem ochrony określonym charakterystykami ochronnymi ograniczników przepięć. Okresowa kontrola stanu technicznego ogranicznika poprzez pomiary prądów upływowych lub napięć obniżonych podczas przepływu znamionowego prądu wyładowczego pozwala kontrolować utrzymanie właściwego marginesu koordynacji izolacji, co umożliwi poprawną pracę transformatora w warunkach występujących narażeń napięciowych.

Podstawowymi elementami ograniczników WN są warystory wytworzone na bazie tlenku cynku ZnO z wieloma odpowiednimi domieszkami (głównie bizmutu - przewodnika o charakterze jonowym), które dzięki wielofazowej, ziarnistej strukturze charakteryzują się nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową. Charakterystyka napięciowo-prądowa warystora jest w przybliżeniu odcinkowo-liniowa. W początkowym zakresie przy napięciach wymuszających przepływ niewielkich prądów (do 1 mA) obserwuje się wysoką wartość rezystancji warystora, rzędu gigaomów. Dla niewielkiej zmiany napięcia U w tzw. obszarze przebicia, prąd I osiąga wartości rzędu kA według wzoru (1):

$$U = kI^\alpha \quad (1)$$

gdzie: k – stała zależna od rodzaju materiału,
 α – współczynnik nieliniowości charakterystyki.

Przy wyższych napięciach, wskutek redukcji barier między ziarnami ZnO, charakter przewodzenia prądu w warystorze jest typowo rezystancyjny przy rezystancji rzędu pojedynczych omów.

Z badań laboratoryjnych wynika, że degradacja warystorów ZnO zachodzi między innymi wskutek starzenia udarami prądowymi. Wielokrotne narażenie ich struktury przepływem prądów wyładowczych powoduje przesunięcie w prawo charakterystyki napięciowo-prądowej, co fizycznie wiąże się ze zmianą rozkładu wielkości ziaren w objętości warystora [1]. Zjawisko to ma związek z wpływem temperatury na mechanizm przewodzenia, szczególnie w warystorach mniejszych gabarytowo (np. niskiego napięcia), gdzie stosunkowo małe narażenia mogą wskutek słabszej absorpcji ударów prądowych powodować silne nagrzanie warystora i zmianę jego charakterystyki $U(I)$.

W sieciach WN energetyka zawodowa sprawdza stan technicznych ograniczników przepięć okresowo według wymagań instrukcji eksploatacji, w zakresie oględzin, np. [2]:

- izolatorów (pęknięcia, zarysowania, ślady wyładowań powierzchniowych, stan korozyjny okuć i przewodów łączących);
- liczby zadziałań ogranicznika, wartości prądu upływowego, stanu połączeń uziemiających;
- stanu przewodów - ciągłość, korozja, powłoki ochronne.

Na podstawie obserwacji wypełnia się kartę oględzin na której wpisuje się stan urządzenia – dobry, średni (naprawa w zaplanowanym terminie) i zły (natychmiastowa naprawa). Dodatkowo można nakazać przegląd specjalistyczny z wyszczególnioną listą określonych czynności pomiarowych np. w zakresie badań termowizyjnych lub pomiaru prądu upływowego i jego składowych [3]. Tego rodzaju działania dotyczą szczególnie obszaru stacji elektroenergetycznych WN/SN, gdzie zakłady energetyczne wprowadziły własne procedury kontroli.

W Polsce w odniesieniu do ograniczników przepięć WN często stosuje się metodę opatentowaną przez Instytut Energetyki [4], polegającą na zmierzeniu następujących parametrów prądu upływowego: wartość szczytowa I_{max} i średnia I_{sr} oraz zawartość składowych harmonicznych I_h . Na podstawie wyznaczonych wielkości wylicza się współczynniki p_1, p_2 i p_3 określone wzorami:

$$p_1 = \frac{I_{sr}}{I_{max}} \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{I_h}{I_{max}} \quad (3)$$

$$p_3 = \frac{I_h}{I_{sr}} = \frac{p_2}{p_1} \quad (4)$$

które następnie powinny zawierać się w zakresie $p_1 \in (0,5; 0,76)$, $p_2 \in (0,01; 0,06)$, $p_3 \in (0,01; 0,09)$.

W wymaganiach [2] w przypadku przekroczenia przez prąd upływowy wartości dopuszczalnej ustalonej jako 1,25 wartości prądu zmierzonej podczas prób odbiorczych lub też wzrostu zawartości harmonicznych, należy rozpocząć monitorowanie prądu upływowego w okresach 1÷2 tygodniowych. Dalsze narastanie prądu upływowego jest podstawą wykonania innych badań specjalistycznych i ewentualnie wycofania ogranicznika z eksploatacji.

W takich przypadkach w celu ostatecznej oceny ograniczników przepięć podaje się dopuszczalne poziomy prądu upływowego. Przykładowo, producent Tridelta dla ogranicznika typu SBK-II 96/10.2 przy wymuszeniu prądu upływowego o wartości maksymalnej 5 mA oczekuje poziomu napięcia odniesienia z zakresu 101,6 ÷ 106,3 kV.

Niekiedy w czasie pomiarów prądu upływowego mogą występować napięcia odkształcone w sieci lub w stosowanych zespołach probierczych, które powodują przepływ wyższych harmonicznych prądu utrudniając prawidłową ocenę ogranicznika. W związku z tym w celu sprawdzenia skuteczności metody [4] przy odkształconym napięciu sieciowym, w niniejszej pracy wykonano dodatkowe badania prądu upływowego przy napięciach o współczynniku zawartości wyższych harmonicznych przekraczających 10%.

2. DIAGNOSTYKA OGRANICZNIKÓW

Zalecenia dotyczące diagnostyki beziskiernikowych ograniczników przepięć SN i WN podaje załącznik D normy [5]. Norma [5] zawiera zasady doboru i stosowania ograniczników przepięć z tlenków metali w systemach trójfazowych o napięciu powyżej 1 kV.

Załącznik D [5] dotyczy monitoringu ograniczników przepięć z tlenków metali, polegającego na zastosowaniu liczników zadziałań, iskierników wskaźnikowych oraz urządzeń do odczytu prądu ciągłego, najlepiej z wydzieleniem składowej czynnej. Możliwość te rozszerzono o stosowanie prostych urządzeń sygnalizujących stan częściowego lub całkowitego zniszczenia elementu warystorowego (np. odłączniki) lub specjalnych przyrządów analizujących temperaturę, harmoniczne prądu upływowego, czy też straty mocy czynnej. Większą część załącznika poświęcono przedstawieniu zasad pomiaru składowej czynnej prądu upływowego według metod: wykorzystania napięcia jako sygnału odniesienia, kompensacji składowej pojemnościowej przy wykorzystaniu sygnału napięcia, kompensacji bez wykorzystania sygnału napięcia, kompensacji za pomocą analizy prądów w trzech fazach oraz analizy harmonicznych metodami: trzeciej harmonicznej, trzeciej harmonicznej z kompensacją harmonicznych w napięciu sieci, analizy harmonicznej pierwszego rzędu. Tabela D2 w [5] wskazuje, że w praktyce zawodowej zasadniczo stosuje się metody

analizy harmonicznych prądu upływowego, których początki sięgają lat 80-tych ubiegłego wieku.

Niewątpliwą zaletą metody analizy harmonicznych jest możliwość pomiaru stanu ogranicznika bez odłączania go z sieci. Ze względu na znaczny błąd wynikający z zawartości trzeciej harmonicznej w napięciu zasilającym, nawet w granicach 100% ÷ 350%, w praktyce najbardziej upowszechniła się metoda analizy trzeciej harmonicznej z kompensacją sygnałem związanym z trzecią harmoniczną prądu pojemnościowego ogranicznika [6], np. system Excount-II firmy ABB. Pewną poprawę dokładności wyznaczania składowej czynnej, szczególnie w warunkach wymuszeń wysokoczęstotliwościowych daje metoda wektorów ortogonalnych [7, 8].

Urządzenia wskaźnikowe stanowią część składową kompletnego ogranicznika lub jego dodatkowy element włączony szeregowo i dzielą się na wskaźniki uszkodzeń, odłączniki oraz liczniki zadziałań. Wskaźnik uszkodzenia, w przypadku przekroczenia amplitudy prądu lub czasu trwania określonej krytycznej wartości prądu, wskazuje tylko ten fakt, ale bez automatycznego odłączenia warystora od sieci. Odłącznik z kolei ma za zadanie izolowanie ogranicznika od układu sieci w chwili jego uszkodzenia. Zazwyczaj stosuje się do tego celu element wybuchowy wyzwalany przepływem prądu zwarciego o określonej amplitudzie i czasie trwania. Odłącznik z zasady nie jest przeznaczony do gaszenia prądu zwarciego. Wadą tego rozwiązania jest fakt, że po odłączeniu ogranicznika do chwili jego wymiany nie ma ochrony przeciwprzepięciowej w danym odcinku sieci elektroenergetycznej.

Innym sposobem określenia stopnia degradacji ogranicznika jest zastosowanie licznika zadziałań wyzwalanego prądem wyładowczym przekraczającym określoną amplitudę. W przypadku wielokrotnych wyładowań o czasach między wyładowaniami krótszych niż 50 ms, ze względu na konstrukcję układu zliczającego może nie nastąpić zliczenie wszystkich wyładowań. W niektórych konstrukcjach do zadziałania licznika potrzebny jest odpowiednio długi przepływ prądu następczego, co może powodować utrudnienia przy zliczaniu krótkich prądów wyładowczych.

Ciekawa metoda analizy stanu ogranicznika polega na zastosowaniu kamery termowizyjnej. Intensywne nagrzewanie struktury warystora powoduje lokalne zwiększenie temperatury obudowy izolacyjnej wskazując na problemy z warystorem lub penetrację wody do wnętrza osłony i lokalny wzrost prądów powierzchniowych w stosie warystorowym [3].

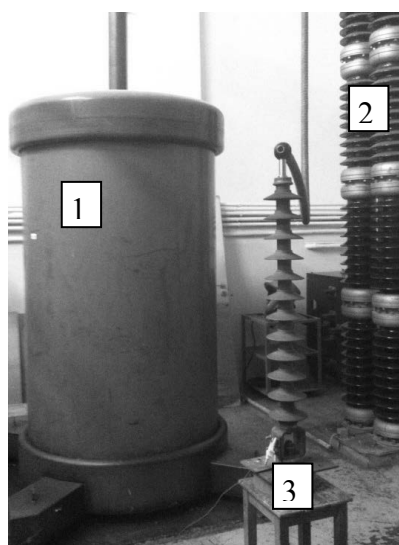
W praktyce najczęściej stosuje się metodę pomiaru prądu upływu, bazującą na określeniu składowej czynnej lub mocy strat wydzielonych na ograniczniku. Wykonuje się pomiary zarówno na ograniczniku włączonym w sieci (eksploatacyjne), jak i na odłączonym (laboratoryjne przy napięciu stałym lub przemiennym). W celu umożliwienia pomiaru prądu upływu montuje się specjalny izolowany zacisk uziemiający między ogranicznikiem a uziemieniem, do którego dołącza się okresowo (diagnostyka okresowa) lub na stałe przyrząd pomiarowy (monitoring z zapisem wartości prądu upływu).

3. METODYKA BADAŃ LABORATORYJNYCH

Podczas badań własnych realizowano pomiary prądu upływowego ograniczników WN przy zastosowaniu

dwóch źródeł napięcia o różnej zawartości wyższych harmonicznych. Pomiary dotyczyły kompletnych, eksploatowanych ograniczników w wykonaniu napowietrznym o napięciu trwałej pracy $U_c = 77$ kV i znamionowym prądzie wyładowczym 10 kA.

Badania wykonano za pomocą zespołów probierczych 50 Hz o napięciu do 150 kV oraz 300 kV (rys. 1) charakteryzujących się znacznym odkształceniem krzywej napięcia (współczynnik $THD > 10\%$). Napięcie mierzono za pomocą miernika WMUT 3 podłączonego do dzielnika pojemnościowego, a prąd wyznaczano na podstawie pomiaru napięcia na oporniku bezindukcyjnym. Obie podane wielkości rejestrowano oscyloskopem cyfrowym Tektronix TDS 5034B dla wyznaczenia składowej czynnej prądu upływowego. Kanały wejściowe oscyloskopu rejestrowały 10000 próbek w czasie 40 ms, na podstawie których następnie obliczano wyższe harmoniczne prądu i napięcia.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe z badanym ogranicznikiem: 1 – transformator wysokiego napięcia 300 kV, 2 – kondensator dzielnika napięciowego, 3 – ogranicznik przepięć

W celu określenia stanu technicznego sześciu ograniczników zmierzono ich prądy upływowe i wyznaczono składowe czynne przy napięciu trwałej pracy $U_c = 77$ kV oraz znamionowym $U_r = 96$ kV. Dodatkowo zgodnie z danymi producenta sprawdzono napięcie odniesienia ogranicznika przy wymuszeniu wartości maksymalnej prądu upływowego równej 5 mA. Według danych producenta napięcie odniesienia powinno zawierać się w granicach od 101,6 do 106,3 kV. Dodatkowo, dla obu zespołów probierczych określono wielkości charakterystyczne zgodne z metodyką proponowaną przez Instytut Energetyki [4]: wartość szczytową i średnią oraz zawartość składowych harmonicznych, a następnie obliczono wielkości p_1 , p_2 , p_3 odpowiednio według zależności (2), (3) i (4).

Pomiary miały na celu sprawdzenie poprawności pomiaru prądu upływowego przy różnej zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym oraz określenie wpływu wyższych harmonicznych napięcia na uzyskane wyniki badań. Wykonano również porównanie wyników badań ogranicznika o powierzchni suchej oraz w czasie oddziaływania sztucznego deszczu.

4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Zestawienie wyników pomiarów ogranicznika nr 4 na dwóch zespołach probierczych o znacznej i różnej zawartości

wyższych harmonicznych napięcia pokazano w tabeli 1. Nawet przy znacznej zawartości wyższych harmonicznych wskaźniki p_1 stanu technicznego ogranicznika są poprawne. Natomiast pozostałe wskaźniki p_2 i p_3 dotyczące wyższych harmonicznych jednoznacznie przekraczają podane w [4] poziomy dopuszczalne.

Duże odkształcenia krzywej napięcia powodują wzrost harmonicznych prądowych wyższych rzędów, co powoduje znaczne zwiększenie wartości prądu upływowego, w tym także jego składowej czynnej. Obliczenie rzeczywistej wartości składowej czynnej prądu upływowego dodatkowo wymaga znajomości charakterystyk częstotliwościowych ogranicznika, co pozwala wprowadzić kompensację dominujących składowych harmonicznych [9].

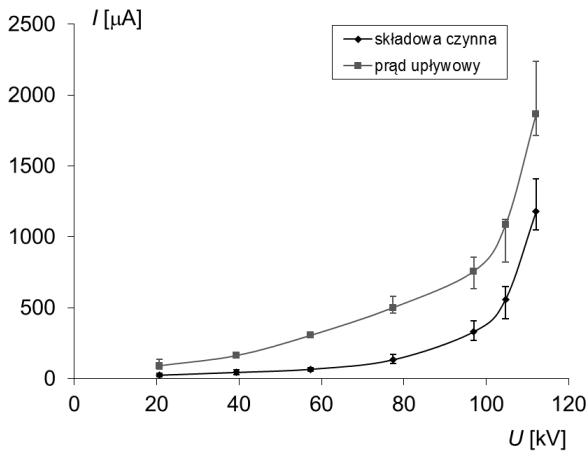
Tabela 1. Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości charakterystycznych prądu upływowego dla ogranicznika nr 4

| | zespół probierczy A | | zespół probierczy B | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| parametr prądu upływowego | $U=77$ kV THD_U 13% | $U=96$ kV THD_U 11% | $U=77$ kV THD_U 21% | $U=96$ kV THD_U 18% |
| wartość szczytowa I_{max} [μA] | 678,8 | 1021,9 | 948,9 | 1328,5 |
| wartość średnia I_{sr} [μA] | 408,4 | 597,8 | 491,1 | 779,0 |
| zawartość składowych harmon. I_h [μA] | 171,5 | 308,1 | 415,2 | 510,4 |
| p_1 | 0,60 | 0,58 | 0,52 | 0,59 |
| p_2 | 0,25 | 0,30 | 0,44 | 0,38 |
| p_3 | 0,42 | 0,52 | 0,85 | 0,66 |
| I_R [μA] | 43,6 | 247,18 | 172,36 | 408,17 |

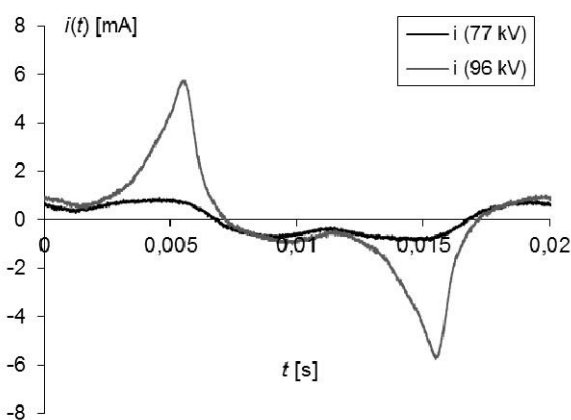
Stan techniczny badanych 6 ograniczników jest podobny. Na rysunku 2 pokazano mierzony zespołem probierczym B poziom prądu upływowego i jego składowej czynnej dla zespołu o THD_U rzędu 20%. Przy dużej zawartości 3-ciej harmonicznej w napięciu zasilającym, dla poszczególnych ograniczników składowa czynna prądu upływowego I_R , przy niewielkim rozrzucie mierzonych wartości (rys. 2), zachowuje stosunkowo niską wartość do napięcia trwałej pracy włącznie. Dla badanych ograniczników obserwuje się zmianę charakterystyki $I(U)$ po przekroczeniu napięcia U_c , co ma związek ze wzrostem składowej rezystancyjnej w prądzie upływowym (rys. 3). Dodatkowo wartości skuteczne napięcia przy amplitudzie prądu upływowego 5 mA są zgodne z wymaganiami producenta ograniczników, co sugeruje ich poprawny stan techniczny.

Przyłożenie do ogranicznika napięcia znamionowego $U_r = 96$ kV powoduje pojawienie się znacznej składowej czynnej, w której zawarte są także harmoniczne wyższych rzędów, ale o relatywnie mniejszych amplitudach w stosunku do składowej podstawowej (rys. 3).

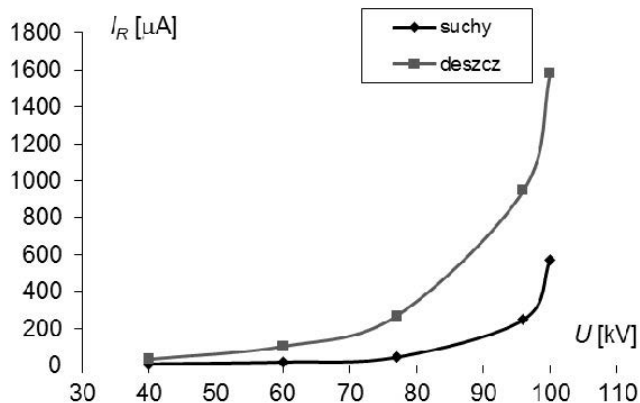
Porównanie wyników pomiarów ogranicznika o suchej i mokrej powierzchni wskazuje na zgodne z oczekiwaniami wyższe wartości składowej czynnej prądu upływowego w warunkach sztucznego deszczu (rys. 4).



Rys. 2. Charakterystyka prądowo – napięciowa dla 6 badanych ograniczników w zakresie prądu upływowego (zaznaczono wartości średnie, maksymalne i minimalne prądu upływowego) w warunkach zasilania zespołem B



Rys. 3. Przebieg prądu upływowego ogranicznika nr 4 zmierzony przy napięciu $U_c = 77$ kV i $U_r = 96$ kV przy warunkach zasilania zespołem probierczym A



Rys. 4. Wpływ stanu powierzchni ogranicznika nr 4 na wartość składowej rezystancyjnej prądu upływowego

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W warunkach znacznych odkształceń krzywej napięcia metoda zaproponowana w [4] może nieprawidłowo określać stan techniczny ograniczników przepięć. Dla wymienionej metody w [3, 4] nie podano obostrzeń związanych z kształtem napięcia zasilającego ogranicznik.

Obecność harmonicznych napięciowych podczas pomiarów eksploatacyjnych wymusza konieczność wprowadzenia dodatkowych obliczeń w celu wyznaczenia rzeczywistej wartości składowej czynnej prądu upływowego.

W warunkach opadu atmosferycznego przy napięciu trwałej pracy występuje kilkukrotne zwiększenie składowej czynnej prądu upływowego.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Dolnik B.: Investigation of Electrical Properties of ZnO Varistors Stressed by Current Pulses, Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 12 – 14.05.2014, pp. 511 – 514.
2. Instrukcja Standardy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych w PGE Dystrybucja S.A. Oddział Łódź-Teren.
3. Papliński P., Wańkiewicz J.: Niestandardowe metody badań ograniczników przepięć w eksploatacji, Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2014, pp. 118 – 120.
4. Papliński P., Czarnecki Z., Komorowska I.: Sposób diagnozowania stanu zużycia ograniczników przepięć. Patent Instytutu Energetyki nr 194371.
5. PN-EN 60099-5:2014-01, Ograniczniki przepięć - Część 5: Zalecenia wyboru i stosowania.
6. Lundquist J. i inni: New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, 1990, pp. 1811 – 1822.
7. Olesz M.: Wyznaczanie składowej rezystancyjnej prądu upływu ogranicznika metodą wektorów ortogonalnych, Przegląd Elektrotechniczny nr 11b, 2012, pp. 188 – 191.
8. Xu Z. i inni: A current orthogonality method to extract resistive leakage current of MOSA, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 28, no. 1, January 2013, pp. 93 – 101.
9. Olesz M.: Wpływ kształtu napięcia na pomiar prądu upływowego ograniczników przepięć, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki nr 32, 2012, pp. 49 – 52.

LEAKAGE CURRENT MEASUREMENTS AS A DIAGNOSTIC TOOL FOR HIGH VOLTAGE SURGE ARRESTERS

The paper presents some practical methods of technical state of high voltage ZnO surge arresters evaluation. Several methods of laboratory diagnostics and on-site tests were described. The analysis of commonly applied diagnostic methods was supplied by the results of leakage current measurements for HV surge arresters after outdoor exploitation. In condition of voltage distortion, should be used special corrective procedures in order to obtain the real value of the resistive leakage current component.

Keywords: high voltage arresters, varistors, diagnostics.