



Krystian Leonard Chrzan*, Zbigniew Pohl*

BŁĘDY FAZOWE W DIAGNOSTYCE OGRANICZNIKÓW BEZISKIERNIKOWYCH

Streszczenie: Opisano metodę pomiaru składowej rezystancyjnej prądu. Obliczono błędy fazowe podczas pomiaru przy pomocy dzielnika pojemnościowego i systemu cyfrowego. Zwrócono uwagę na wpływ harmonicznych w napięciu zasilającym. Zaproponowano modyfikację procedury pomiaru prądu rezystancyjnego.

Słowa kluczowe: ograniczniki beziskiernikowe, diagnostyka, błędy

1. Wstęp

Składowa pojemnościowa prądu wewnętrznego w wysokonapięciowych ogranicznikach beziskiernikowych wynosi od 0,5–3 mA a składowa rezystancyjna od 10–250 μ A [1]. Ponieważ markerem zmian starzeniowych jest składowa rezystancyjna, dlatego podczas diagnozy ogranicznika należy ją zmierzyć. Najbardziej rozpowszechnioną metodą wyznaczenia wartości maksymalnej składowej rezystancyjnej jest pomiar prądu całkowitego w chwili gdy napięcie osiąga maksimum.

Choć pomiar prądu jest prosty i możliwy do przeprowadzenia w trybie on line to jednak mierzony prąd całkowity, jego wartość maksymalna, skuteczna lub średnia są jedynie parametrami pomocniczymi. Znaczne wzrosty prądu rezystancyjnego powodują początkowo tylko niewielkie zmiany amplitudy, wartości skutecznej i średniej prądu całkowitego. Dlatego przy pomocy tych parametrów początkowe zmiany starzeniowe ogranicznika są trudno wykrywalne.

Ponieważ warystory są elementem nieliniowym, przy idealnie sinusoidalnym napięciu, prąd upływu zawiera wyższe harmoniczne. Metody diagnostyczne oparte na

* Politechnika Wroclawska

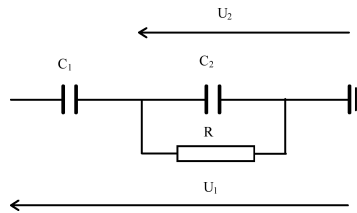
analizie harmonicznego prądu całkowitego wykorzystują w przybliżeniu liniową zależność pomiędzy zawartością trzeciej harmonicznej w jego widmie a amplitudą prądu rezystancyjnego [2]. W rzeczywistości w napięciu zasilającym zawarte są wyższe harmoniczne, wywołujące również wyższe harmoniczne w prądzie całkowitym ogranicznika. Do ich eliminacji z analizowanego prądu mogą służyć sondy polowe, w których indukowany jest sygnał proporcjonalny do napięcia. Pomiary oparte na analizie harmonicznego prądu bez kompensacji harmonicznymi wywołowanymi przez odkształcone od sinusoidy napięcie są obciążone dużym błędem.

2. Błędy fazowe pomiaru napięcia i prądu

Podczas diagnostyki ogranicznika pomiar prądu i napięcia wykonywany jest z określonym błędem pomiarowym. W tym jednak wypadku istotne są nie tylko błędy amplitudy ale też i błędy fazowe [3]. Błędy amplitudy można oszacować i zmniejszyć poprzez stosowanie dokładnej aparatury oraz przez dokładne obliczenie przekładni. Błędy fazowe powodują, że sygnał pomiarowy opóźnia się lub wyprzedza sygnał rzeczywisty w czasie. Związane jest to przede wszystkim z pojemnościami kabli pomiarowych, pojemnościami i rezystancjami wejściowymi przyrządów pomiarowych. Wpływ indukcyjności przy występujących częstotliwościach sieciowej 50 Hz i kilku harmonicznymi jest pomijalny.

2.1. Pojemnościowy dzielnik napięcia

Pojemność C_1 jest pojemnością kondensatora wysokonapięciowego, pojemność niskonapięciowa C_2 składa się także z pojemności kabli pomiarowych i pojemności wejściowej przyrządu pomiarowego. Przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami U_1 i U_2 wynika ze skończonej rezystancji wejściowej R przyrządu (rys. 1).



Rys. 1. Dzielnik pojemnościowy napięcia

$$\eta = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{\bar{U}_1 [1 + j\omega R(C_1 + C_2)]}{\bar{U}_1 j\omega C_1 R} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} - j \frac{1}{j\omega C_1 R} = A - jB \quad (1)$$

Przekładnia η jest zatem liczbą zespoloną a napięcie wysokie U_1 opóźnia się względem napięcia mierzonego U_2 o kąt α i odpowiadający mu czas Δt

$$\alpha = \arctg \frac{B}{A} \quad \Delta t = \frac{\alpha 20 \text{ ms}}{360} \quad (2)$$

Kąt pomiędzy napięciami jest odwrotnie proporcjonalny do iloczynu C_1 i R . Zmniejszenie błędu fazowego dzielnika pojemnościowego można praktycznie uzyskać przez zwiększenie pojemności kondensatora C_2 (zwiększenie η) i przez zwiększenie rezystancji wejściowej R . Zwiększenie C_1 (kondensator wysokonapięciowy) jest bowiem najczęściej niemożliwe.

Pojemność C_1 jest rzędu 100 pF a typowa rezystancja wejściowa wynosi 1 M Ω . W tabeli 1. zestawiono obliczenia przekładni i opóźnień napięciowego dla trzech wartości rezystancji wejściowej i dwóch wartości pojemności kondensatora niskonapięciowego.

Tabela 1. Przekładnia i przesunięcia napięć typowego dzielnika pojemnościowego

C_1	C_2	R	A	B	η	α	Δt
pF	μ F	M Ω	–	–	–	stopnie	μ s
138,2	1,3820	0,1	10001,00	230,7	10003,7	1,32	73
138,2	1,3820	1	10001,00	23,04	10001,03	0,132	7,3
138,2	1,3820	10	10001,00	2,304	10000,00	0,013	0,73
138,2	0,13820	0,1	1001,00	230,7	1027,08	12,98	721

Przy $R = 1$ M Ω i przekładni 10 000, przesunięcie czasowe napięć wynosi 7,3 μ s, zwiększenie rezystancji wejściowej do 10 M Ω , np. przy pomocy typowej sondy oscyloskopowej zmniejsza ten czas do zaledwie 0,73 μ s. Stosując $R = 0,1$ M Ω i przekładnię 1027, otrzymuje się przesunięcie wynoszące aż 721 μ s, czyli układ pomiarowy całkowicie nieprzydatny do celów diagnostyki.

2.2. Pomiar prądu

Pomiar ten wygodnie jest analizować gdy obiektem jest bezstratny kondensator wzorcowy ($\text{tg } \delta \sim 10^{-5}$), stanowiący najprostszy model ogranicznika dla napięcia mniejszego od trwałego napięcia pracy. Najczęściej prąd mierzony jest przy pomocy rezystancji rzędu 1 k Ω . W wyniku oddziaływania pojemności wejściowej przyrządu i kabla pomiarowego C_2 (rys. 1), prąd mierzony wyprzedza prąd, który płynąłby przez rezystor pomiarowy bez załączonej pojemności C_2 . Błąd fazowy powodowany przez C_2 wynosi:

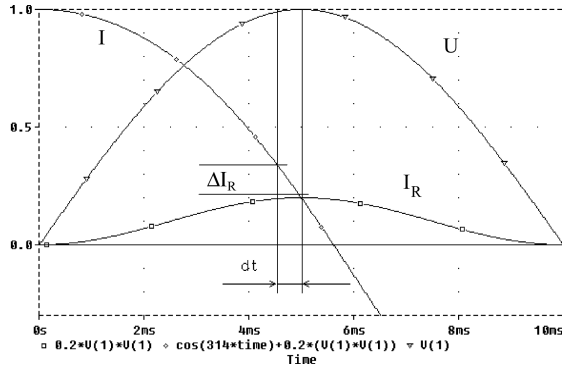
$$\beta = \text{arc tg } \frac{A}{B} \quad \Delta t = \frac{\beta 20 \text{ ms}}{360} \quad (3)$$

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = A \quad \frac{1}{\omega C_1 R} = B \quad (4)$$

Gdzie R jest rezystancją połączonych równolegle rezystancji pomiarowej i rezystancji wejściowej przyrządu. Dla typowych wartości $C_1 = 138$ pF (pojemność ogranicznika 110 kV, $C_2 = 375$ pF, rezystancji pomiarowej 1 k Ω i rezystancji wejściowej oscyloskopu 1 M Ω , błąd fazowy przy pomiarze prądu jest pomijalnie mały i wynosi 0,009 μ s.

2.3. Błędy fazowe przy idealnym napięciu sinusoidalnym

Jeśli przyjąć, że prąd mierzony jest bez przesunięcia fazowego, to błąd w wyznaczaniu amplitudy prądu rezystancyjnego w chwili gdy napięcie osiąga maksimum powodowany jest przesunięciem fazowym napięcia. Na rysunku 2 przedstawiono symulację komputerową przebiegów napięcia wysokiego U , prądu całkowitego I oraz prądu rezystancyjnego I_R . Założono, że prąd rezystancyjny zmienia się wg. zależności $I_R = A \cdot u^n$ (założono $A = 0,2$, $n = 2$). Jeśli dzielnik pojemnościowy sprawia, że napięcie niskie wyprzedza napięcie wysokie o czas dt , to określona wartość prądu rezystancyjnego I_R z pomiaru wartości prądu całkowitego I jest większa od wartości rzeczywistej o ΔI_R .



Rys. 2. Ilustracja błędów w określaniu prądu rezystancyjnego podczas pomiaru wartości prądu całkowitego w chwili maksimum napięcia

3. Wpływ wyższych harmonicznych

Napięcie w obwodach prądu przemiennego zawiera tylko harmoniczne nieparzyste, ponieważ jest ono tzw. sygnałem antysymetrycznym. W następnym półokresie napięcie ma taki sam przebieg, zmienia się tylko jego znak.

$$u\left(t + \frac{T}{2}\right) = -u(t) \quad (5)$$

$$u(t) = U_1(\sin \omega t + p_3 \sin 3\omega t + p_5 \sin 5\omega t + \dots) \quad (6)$$

Amplitudy kolejnych harmonicznych p_i zazwyczaj szybko maleją, tak że w obliczeniach wystarczy uwzględnić tylko kilka pierwszych. Jeśli obwód zawiera same odbiorniki rezystancyjne, to prąd jest dokładnie tak samo odkształcony jak napięcie.

$$i(t) = I_1(\sin \omega t + p_3 \sin 3\omega t + p_5 \sin 5\omega t + \dots) \quad (7)$$

Gdy obwód zawiera elementy indukcyjne, to prąd jest odkształcony mniej niż napięcie, a gdy jest złożony z kondensatorów to odkształcony jest bardziej. W tych przypadkach bowiem, reakcja jest dla każdej harmonicznej inna. Dla kondensatorów, prąd

harmonicznej o numerze k wynosi:

$$I_k = k\omega CU_k = k\omega Cp_k U_1 = kp_k I_1 \quad (8)$$

Dlatego w prądzie płynącym przez kondensator amplituda k -tej harmonicznej jest k razy większa niż w sygnale napięciowym.

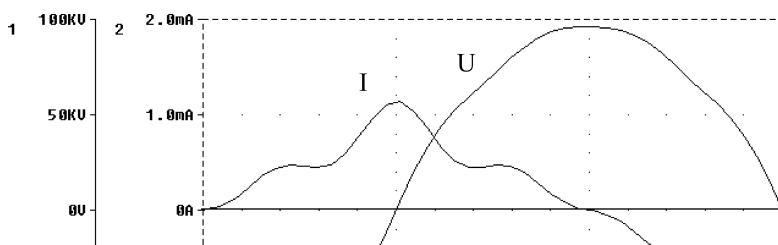
$$i(t) = I_1 (\cos \omega t + 3p_3 \cos 3\omega t + 5p_5 \cos 5\omega t + \dots) \quad (9)$$

Wartości skuteczne napięcia i prądu płynącego przez kondensator wynoszą:

$$U = \sqrt{1 + (p_3)^2 + (p_5)^2 + \dots + (p_k)^2} \quad (10)$$

$$I = \sqrt{1 + (3p_3)^2 + (5p_5)^2 + \dots + (kp_k)^2} \quad (11)$$

Już przy nieznacznym odkształceniu napięcia w sieci, prąd płynący przez kondensator jest znacznie bardziej zniekształcony. Na rysunku 3 przedstawiono napięcie złożone z 4 harmonicznych o zerowej fazie początkowej: 100 kV, 50 Hz; 5 kV, 150 Hz; 3 kV, 250 Hz; 2 kV, 350 Hz i prąd płynący przez kondensator 25 pF.



Rys. 3. Odkształcone napięcie i prąd płynący przez kondensator

Widać, że napięcie i prąd są przesunięte w fazie o 5 ms (90°) i tak jak dla przebiegów idealnie sinusoidalnych maksimum prądu wypada przy przejściu napięcia przez zero a przejście prądu przez zero następuje przy osiągnięciu wartości maksymalnej napięcia. Krzywe napięcia i prądu są symetryczne względem pionowej osi łączącej maksimum z osią czasu.

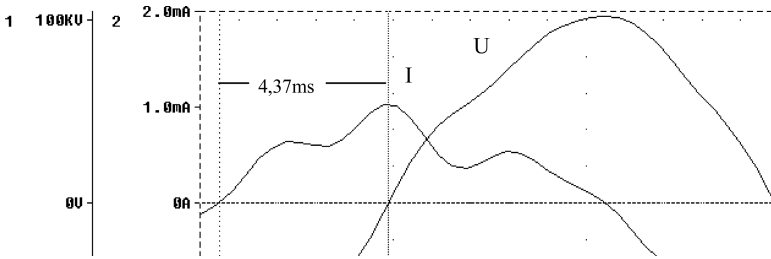
Jednak harmoniczne napięcia mogą być przesunięte fazowo względem pierwszej harmonicznej o różne kąty, analogiczne przesunięcia wystąpią w prądzie kondensatora.

$$u(t) = U_1 [\sin \omega t + p_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + p_5 \sin(5\omega t + \psi_5) + \dots] \quad (12)$$

$$i(t) = I_1 [\cos \omega t + 3p_3 \cos(3\omega t + \psi_3) + 5p_5 \cos(5\omega t + \psi_5) + \dots] \quad (13)$$

Zmienia to nieznacznie kształt napięcia, lecz ma większy wpływ na kształt prądu. Na rysunku 4 przedstawiono napięcie takie jak na rysunku 3 lecz z przesuniętą trzecią harmoniczną o $+90^\circ$. Pozostałe harmoniczne są w fazie z harmoniczną podstawową. Interesującym jest również, że prąd nie wyprzedza napięcia o 5 ms jak przy przebiegach sinusoidalnych i przy przebiegach z harmonicznymi nie przesuniętymi w fazie,

lecz załedwie o 4,37 ms. Zmniejszenie się przesunięcia z 5 ms do 4,37 ms wynika z niesymetrycznego kształtu napięcia względem linii łączącej szczyt napięcia z osią czasu. Należy podkreślić, że w przypadku sygnałów odkształconych nie można wnioskować o charakterze odbiorników (pojemnościowym bądź indukcyjnym) na podstawie pomiaru przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem.



Rys. 4. Odkształcone napięcie i prąd płynący przez kondensator, trzecia harmoniczna przesunięta o 90°

4. Błędy digitalizacji. Modyfikacja metody pomiarowej

Wyznaczenie maksymalnej wartości prądu rezystancyjnego metodą bezpośrednią polega na zmierzeniu wartości prądu całkowitego w chwili gdy napięcie osiąga maksimum. Określenie momentu maksymalnej wartości napięcia idealnie sinusoidalnego wyznaczyć można z określonym błędem, gdyż zmiany sinusoidy w pobliżu jej maksimum są nieduże. Obliczono zmiany sinusoidy przy próbkowaniu 100 i 1000 razy w półokresie. Z danych zebranych w tabeli 2. widać, że przy próbkowaniu 100-krotnym dla czasu 4,9, 5,0 i 5,1 ms zmiany sinusoidy są dopiero na 4 miejscu po przecinku. Jeśli pomiar wykonywany jest 10-bitowym przetwornikiem A/C to wartości sinusoidy w tych trzech momentach uznane będą za jednakowe. Przy pomiarze z rozdzielczością $1/1024$ błąd wyznaczenia czasu maksimum napięcia można uznać za równy 0,1 ms, czyli aż $100 \mu\text{s}$.

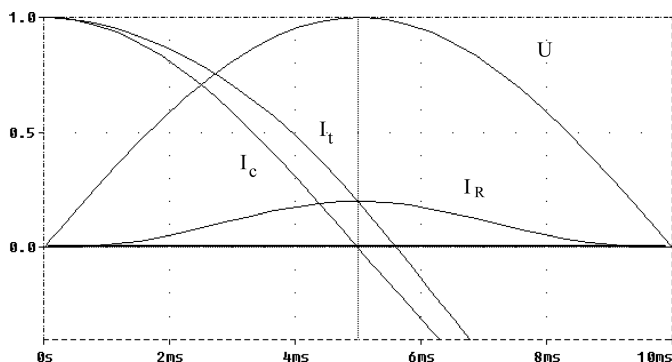
Tabela 2. Funkcja sinus w pobliżu maksimum. Próbkowanie 100 i 1000 razy w półokresie

$\Delta t = 0,1 \text{ ms}$	$t \text{ [ms]}$	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1
	$\sin \omega t$	0,99549	0,99798	0,99948	0,99999	0,99953
$\Delta t = 0,01 \text{ ms}$	$t \text{ [ms]}$	4,97	4,98	4,99	5,00	5,01
	$\sin \omega t$	0,999948	0,999975	0,999992	0,999999	0,999997

Jeśli próbkujemy sinusoidę 1000 razy w półokresie, co $10 \mu\text{s}$, to aby wyznaczyć maksimum napięcia z taką dokładnością potrzebowalibyśmy przetwornika, który miałby rozdzielczość $1/100\,000$, czyli aż 17-bitowego! Obecnie standardowymi są przetworniki 10 lub 12-bitowe, przetworniki 16-bitowe są wykonywane do zadań profesjo-

nalnych. Zatem przy standardowym przetworniku A/C błąd wyznaczenia momentu maksimum napięcia równy $100 \mu\text{s}$ jest wielokrotnie większy od błędu fazowego przy zastosowaniu dzielnika o przekładni 1:10 000 ze standardową rezystancją wejściową oscyloskopu $1 \text{ M}\Omega$, wynoszącym $7 \mu\text{s}$.

Do pomiaru napięcia stosujemy zazwyczaj dzielnik pojemnościowy złożony z bezstratnego kondensatora wysokonapięciowego. Jeśli dzielnik zastosujemy jako kondensator, to możemy określić maksymalną wartość prądu rezystancyjnego mierząc wartość prądu całkowitego ogranicznika w momencie przejścia prądu pojemnościowego kondensatora przez zero. W tym czasie zmiana obydwu prądów w czasie jest bardzo duża, można zatem określić moment przejścia prądu pojemnościowego znacznie dokładniej niż moment maksimum napięcia. Ponadto błąd fazowy pomiaru prądu jest bardzo mały, dlatego taki pomiar jest jeszcze bardziej dokładny. Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi prądów całkowitego I_t , płynącego przez ogranicznik, pojemnościowego z kondensatora I_c , napięcia U oraz prądu rezystancyjnego I_R , którego amplituda jest wyznaczana.



Rys. 5. Przebiegi prądów pojemnościowego, całkowitego, czynnego i napięcia

Jeśli napięcie zawiera wyższe harmoniczne to jego wierzchołek może mieć jeszcze bardziej płaski przebieg a trudności w wyznaczeniu maksimum mogą być większe.

Literatura

- [1] Lundquist J., Stenstrom L., Schei A., Hansen B.: *New Method for the Resistive Leakage Currents of Metal Oxide Surge Arresters in Service*, IEEE Trans. on Power Delivery, Nov. 1990, pp. 1811–1821
- [2] Shirakawa S. et all: *Maintenance of Surge Arresters by a Portable Arrester Leakage Current Detector*, IEEE Trans.on Power Delivery, July 1988, pp. 998–1003
- [3] Chrzan K., Koehler W.: *Diagnostics of Metal Oxide Arresters. Procedure Errors*, 11 th Int. Symposium on HV Engineering, London 1999

PHASE ERRORS IN THE DIAGNOSTICS OF SURGE ARRESTERS

A measurement method of active component of the current is presented. Phase errors for measurement with a voltage divider and digital system are calculated. Influence of harmonical components in the supply voltage is shown. Some modification of the measurement procedure is proposed.

Pracę wykonano w ramach grantu KBN nr 8 T10B 06814