Józef CZUCHA
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Przetworniki pomiarowe prądu w urządzeniach zabezpieczeń nadprądowych

Dr inż. Józef CZUCHA

Ukończył studia w 1967, w 1974 uzyskał stopień doktora i obecnie adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej. Jest (współ)autorem ponad 80 prac naukowych, w tym monografii z techniki zabezpieczeń przyrządów półprzewodnikowych. Główną dziedziną naukową są urządzenia energoelektroniczne wielkiej mocy i technika ultraszybkich zabezpieczeń prądowych urządzeń i instalacji elektrycznych.

e-mail: jczucha@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

Przeprowadzono analizę charakterystyk kilku typów przetworników pomiarowych prądu stosowanych w technice zabezpieczeń prądowych. Wykazano, że rozrzut charakterystyk dynamicznych „klasycznych" przetworników opartych na detekcji cieplnych skutków prądu jest bardzo duży. Również boczniki rezystancyjne i przekładniki prądowe indukcyjne w warunkach szybkich zmian prądu wnoszą wielki błąd pomiarowy, osiągający nawet kilkadziesiąt procent. Ze względu na szerokie pasmo przenoszenia coraz częściej stosowane są przetworniki z półprzewodnikowym czujnikiem Halla i dla pomiaru wielkich wartości prądów zmiennych, o bardzo dużej stromości zmian, układy z cewkami Rogowskiego.

Słowa kluczowe: przetworniki pomiarowe prądu, zabezpieczenia prądowe.

Current transducers for over current protecting devices

Abstract

In the paper, properties of various current transducers for overcurrent protecting devices are analysed. It is noticeable that dynamic characteristics of classical transducers based upon current thermal effects are broadly dispersed. Resistive shunts and instrument transformers may generate significant errors approaching even several tens percent. More and more frequently transducers comprising Hall sensors are applied due to their wide-band signal transmission in circuits with high rate of current rise Rogowski coils are used.

Keywords: current transducers, over current protecting devices.

1. Wstęp

Podstawową funkcją urządzeń zabezpieczeń nadprądowych jest ograniczenie skutków cieplnych i elektrodynamicznych prądów przetężeniowych, w szczególności zwarciowych, charakteryzujących się dużą szybkością narastania. Często konieczny jest pomiar chwilowej wartości prądu o wartości ponad 100 kA i stromości dochodzącej do 10^9 As^{-1}.

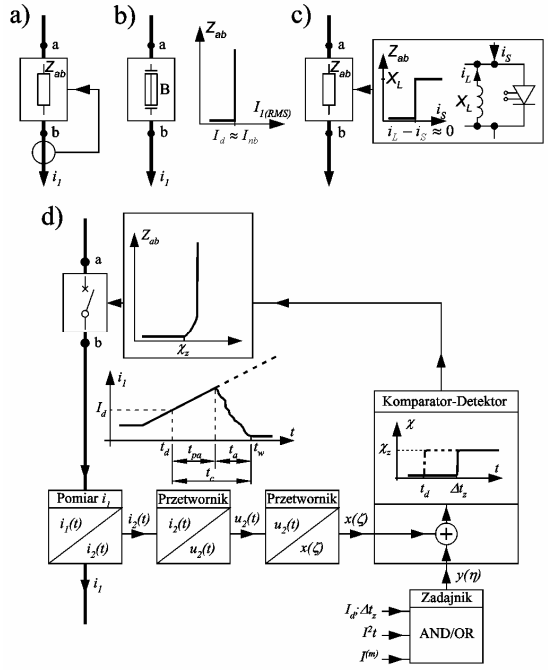
Miarą skutków cieplnych prądu *i(t)* w czasie t_x w urządzeniach instalacji elektroenergetycznej są :
- całka Joule'a prądu zwarciowego

$$I^2 t_x = \int_0^{t_x} [i(t)]^2 dt \tag{1}$$

- zastępczy prąd cieplny

$$I_{th(t_x)} = \sqrt{\frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} [i(t)]^2 dt} \tag{2}$$

Ograniczanie skutków wywołanych prądem przetężeniowym w urządzeniach instalacji elektroenergetycznej realizuje się przez wtrącenie szeregowej impedancji Z_{ab} bieguna łącznika elektroenergetycznego (rys.1a). W praktyce może to być impedancja łuku łącznika zestykowego (rys.1d), wkładki bezpiecznika topikowego (rys.1b) czy łącznika bezzestykowego (rys.1c). Dla sterowania pracą tych urządzeń konieczny jest dobór odpowiedniego przetwornika pomiarowego prądu.



Rys. 1. Schemat blokowy obwodu pomiaru i wyłączania prądu: a) – schemat ogólny, b) - bezpiecznik topikowy, c) - łącznik bezzestykowy, d) - łącznik zestykowy
Fig. 1. Block diagram of circuits for current detection and interruption: a) – the general diagram, b) – the fuse, c) – the contactless switch, d) – the contact CB

2. Charakterystyki urządzeń pomiaru prądu

Na przykładzie z rys. 1d), w bloku pomiaru prądu zachodzi transformacja prądu wejściowego $i_1(t)$ na sygnał wyjściowy. W przypadku przekładników indukcyjnych sygnałem tym jest prąd wtórny, którego wartość znamionowa wynosi najczęściej 5 A, a dla innych przetworników prądu – 20 mA. Jeśli chodzi o boczniki, sygnałem wyjściowym jest napięcie, najczęściej o wartości znamionowej 60 mV, zaś dla przetworników elektronicznych – 10 V. Sygnał prądowy lub napięciowy, zależny od czasu, jest przetwarzany na sygnał $x(\zeta)$, którym może być np. wygięcie termobimetalu, siła elektromagnesu, lub sygnał generowany przez układy cyfrowe.

W bloku komparatora następuje porównanie sygnału $x(\zeta)$ z zadeklarowaną przez użytkownika odpornością wyrażoną np. prądem nastawy wyzwalacza I_d, czasem Δt_z zwłoki zadziałania wyzwalacza, dopuszczalna wartością I^2t, czy innymi parametrami. Sygnał wyjściowy $\chi(t)$ z komparatora uruchamia proces zmiany impedancji Z_{ab} bieguna łącznika, czego skutkiem ma być ograniczenie lub wyłączenie prądu.

2.1. Przetworniki prądu

W technice zabezpieczeń nadprądowych w instalacjach elektroenergetycznych znane są rozwiązania ograniczników i wyłączników prądu, w których zmiana impedancji bieguna łącznika jest wynikiem przemian energetycznych wywołanych zmiennością prądu bezpośrednio w torze prądowym stanowiącym biegun łącznika (rys.1b). Są to układy z bezpośrednimi detektorami prądu przetężeniowego. Inne, poprzez odpowiednie przetworzenie zmienności prądu w kolejnych przetwornikach sygnałowych mogą uruchamiać proces, który (pośrednio) prowadzi do zmiany impedancji toru prądowego łącznika (rys.1d), które można nazwać pośrednimi detektorami prądu przetężeniowego.

2.1.1. Bezpośrednie detektory prądu przetężeniowego

W rzeczywistych torach prądowych przy przepływie prądu ma miejsce przemiana energii elektrycznej na cieplną, której często przytaczaną miarą jest temperatura. Przyrost temperatury toru prądowego ϑ_p ponad temperaturę otoczenia ϑ_o, upraszczając, zależy od prądu I_1

$$\vartheta_p - \vartheta_o = kI_1^2 \tag{3}$$

gdzie k - współczynnik zależny od właściwości fizycznych, geometrycznych i warunków chłodzenia materiału tego odcinka toru prądowego.

Pomiar, przetworzenie na sygnał odwzorowujący skutki przepływu prądu, porównanie z wartościami zadanymi i wygenerowanie sygnału uruchamiającego proces wyłączania prądu ma miejsce w urządzeniu, często zwanym wyzwalaczem nadprądowym.

a) Wyzwalacze termobimetalowe (BMR)

Powszechnie stosowanym typem detektora przetężeń w instalacjach odbiorczych jest wyzwalacz nadprądowy termobimetalowy o charakterystyce czasowo-prądowej zależnej. Rozrzut charakterystyk działania tych wyzwalaczy jest bardzo duży. Na przykład, przy przepływie prądu $I = 2{,}55I_{nw}$ (I_{nw} – prąd nastawy wyzwalacza) czas zadziałania może być w przedziale 1 s do 120 s. Wymaga to dobierania urządzeń zabezpieczanych tymi wyzwalaczami o odporności na prądy przetężeniowe powyżej górnej charakterystyki, przy dopuszczalnych prądach przeciążeniowych odpowiednio poniżej dolnej charakterystyki działania.

b) Bezpieczniki topikowe (F)

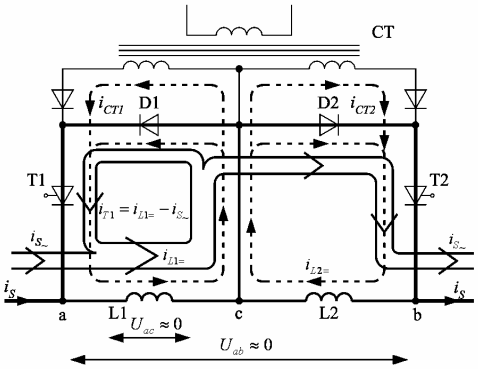
Przez odpowiednie ukształtowanie topika bezpiecznika można uzyskać oczekiwaną charakterystykę czasu zmiany impedancji bezpiecznika w funkcji prądu (charakterystyka *t-I)*. Ze względu na trudną do uzyskania powtarzalność wykonania i wpływ procesów starzeniowych w materiale topików, rozrzut czasu działania bezpieczników topikowych jest duży, szczególnie w zakresie niewielkich prądów przeciążeniowych. Na przykład wyłączenie prądu przeciążeniowego $I = 1{,}45I_n$ (I_n – prąd znamionowy wkładki topikowej) może wystąpić w przedziale 1 h do 4 h. Czas wyłączania prądu zwarciowego przez bezpieczniki topikowe jest na ogół bardzo krótki, ok. 10 ms, a przy dużych względnych wartościach prądu nawet poniżej 5 ms.

c) Półprzewodnikowy ogranicznik prądu (HICL)

Na rys. 2 podano schemat układu, w którym pomiar prądu odbywa się przez porównanie w spolaryzowanym łączniku tyrystorowym T1 wartości prądu $i_1(t)$ w zabezpieczanym obwodzie z wartością prądu $i_L(t)$ dławika L1 zasilanego z zewnętrznego źródła prądu CT. W chwili t_L, spełnienia warunku:

$$i_1(t_L) - i_L(t_L) \approx 0 \tag{4}$$

do obwodu wtrącona zostaje (z opóźnieniem ok. 3μs) reaktancja dławika L1.



Rys. 2. Schemat półprzewodnikowego ogranicznika prądu: T1 - spolaryzowany łącznik tyrystorowy, L1, D1, CT - elementy obwodu źródła prądu polaryzującego łącznik T1, indeks 2 – dla podzespołów w symetrycznych gałęziach dla przeciwnego zwrotu prądu i_1
Fig. 2. Diagram of a semiconductor current limiter: T1 – the polarized thyristor switch, L1, D1,CT – the elements of current polarizing circuit

Przy przeciwnej do zaznaczonej na rys. 2 polaryzacji prądu i_1 funkcję pomiaru i ograniczania prądu przejmuje gałąź z elementami oznaczonymi indeksem 2.

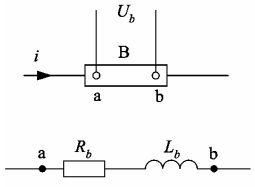
Detekcja zerowej wartości chwilowej prądu przez porównanie z wymuszoną przez zewnętrzne źródło prądowe CT, wartością prądu I_L dławika jest bardzo precyzyjna (kilkaset mA), a ograniczenie jego wartości odbywa się praktycznie bezzwłocznie. Wymagane jest jednak zewnętrzne źródło prądowe CT i dławiki L1, L2 o parametrach odpowiadających prądowi I_s Szczegółowe cechy tego rozwiązania są opisane w [1, 2].

2.1.2. Pośrednie detektory prądu przetężeniowego

a) Boczniki rezystancyjne (RSh)

Jest to odcinek toru prądowego o rezystancji R_b, z którym jest związany strumień pola magnetycznego odwzorowany na schemacie zastępczym (rys. 3) i w równaniu (5) indukcyjnością L_b. Zatem spadek napięcia na boczniku wynosi

$$U_b = R_b\, i(t) + L_b \frac{di}{dt} \tag{5}$$



Rys. 3. Schemat zastępczy bocznika rezystancyjnego
Fig. 3. Resistive shunt diagram

Uchyb pomiarowy bocznika rezystancyjnego jest związany ze składową indukcyjną spadku napięcia. W zależności od realizowanej funkcji przez wyzwalacz nadprądowy, najczęściej podlega ocenie wartość chwilowa lub skuteczna prądu w obwodzie.

Maksymalny względny uchyb wartości chwilowej napięcia δu na boczniku występuje przy największej stromości prądu, praktycznie w początkowej fazie przejściowego prądu zwarciowego i można go obliczyć:

- dla obwodów prądu przemiennego o pulsacji ω i zwarciowym prądzie początkowym I_k'' z zależności:

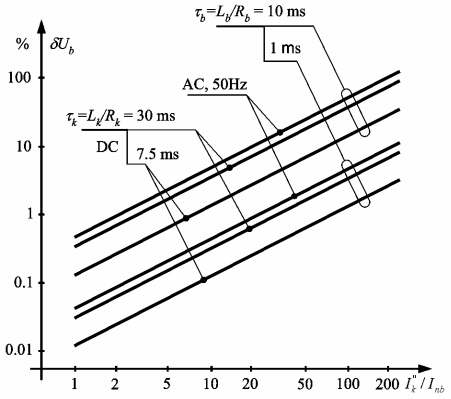
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\delta U_{b(AC)} = \sqrt{2}\,\omega\,\tau_b\,\frac{I_k''}{I_{nb}} \qquad (6)$$

- dla obwodów prądu stałego o maksymalnej stromości $(di_{k(DC)}/dt)_m$ prądu zwarciowego $I_{k(DC)}$ z zależności:

$$\delta U_{b(DC)} = \frac{\tau_b}{I_{nb}}\left(di/dt\right)_m = \frac{\tau_b}{\tau_k}\frac{I_{k(DC)}}{I_{nb}} \qquad (7)$$

gdzie $\tau_b = L_b/R_b$, $\tau_k = L_k/R_k$ stałe czasowe bocznika pomiarowego i obwodu zwarciowego. Powyższe zależności zilustrowano na rys. 4 w funkcji I_k''/I_{nb}.



Rys. 4. Maksymalny względny błąd napięcia na boczniku w funkcji I_k''/I_{nb}
Fig. 4. Relative voltage error for resistive shunt vs. I_k''/I_{nb}

Względny uchyb wartości skutecznej napięcia $\delta U_{b(RMS)}$ na boczniku w przedziale czasu $\langle 0; t_x \rangle$, (przy założeniu liniowo narastającego prądu) można obliczyć z zależności:

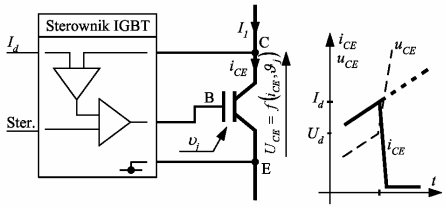
$$\delta U_{b(RMS)} = \sqrt{\frac{\frac{1}{t_x}\int_o^{t_x}\left[R_b\,i(t) + L_b\,di/dt\right]^2 dt}{\frac{1}{t_x}\int_o^{t_x}\left[R_b\,i(t)\right]^2 dt}} \approx \sqrt{1 + 3\frac{\tau_b}{t_x} + 3\left(\frac{\tau_b}{t_x}\right)^2} \qquad (8)$$

Spadek napięcia na boczniku przy przepływie prądu zmiennego jest obarczony błędem zależnym od parametru bocznika - $L_b/R_b = \tau_b$ - jego stałej czasowej, która nawet dla specjalnych wykonań tzw. boczników bezindukcyjnych, szczególnie o małej rezystancji znamionowej jest nie krótsza niż ok.1 µs, a dla „klasycznych" boczników osiąga wartość ok. 100 µs dla I_{nb} kilkadziesiąt amperów do nawet ponad 1 ms dla większych prądów.

b) Pomiar spadku napięcia na przewodzącym przyrządzie półprzewodnikowym (SSS)

Wiele typów współczesnych przyrządów półprzewodnikowych mocy (PPM) charakteryzuje się zdolnością łączenia prądów nawet powyżej 2,5 kA w obwodach o napięciu ponad 1 kV, przy nieosiągalnym w technice łukowego wyłączania prądu krótkim czasie wyłączania $t_w \approx 5$ µs. W tak krótkim czasie w rzeczywistych obwodach energetycznych przyrost prądu zwarciowego ΔI_k ponad prąd nastawy I_d elektronicznego wyzwalacza jest niewielki i może być wyłączony przez ten PPM. Jest to aktywna forma zabezpieczeń PPM przed skutkami prądów zakłóceniowych. Miarą wartości prądu w torze z PPM jest spadek napięcia na strukturze półprzewodnikowej PPM. Na rys. 5 podano schemat ideowy układu realizującego wyłączenie prądu przez łącznik tranzystorowy IGBT, gdy wartość napięcia $u_{(C\text{-}E)} = f(i_{(C\text{-}E)}, \vartheta_j) > U_d$, którego typowa wartość wynosi ok. 3,5 V.

Dostępne na rynku rozwiązania techniczne sterowników tranzystorów IGBT realizują taki sposób detekcji prądu przetężeniowego i jego wyłączania.



Rys. 5. Schemat ideowy łącznika półprzewodnikowego z detekcją prądu I_d przez pomiar spadku napięcia U_d na biegunie łącznika
Fig. 5. Overcurrent semiconductor switch, which applies the current detection based upon the voltage drop measurement across the switch pole. I_d, U_d – setting current and voltage

c) Przekładniki prądowe indukcyjne (ICT)

Deklarowany, na ogół mały uchyb transformacji prądu w powszechnie spotykanych rozwiązaniach przekładników prądowych wymaga spełnienia warunków, które z zasady są dochowane w obwodach o sinusoidalnie zmiennych prądach o standardowej częstotliwości 50 Hz i niewielkich prądach przeciążeniowych. Na podstawie badań przekładników prądowych indukcyjnych można ocenić, że jest zachowana klasa dokładności pomiaru prądów odkształconych o widmie harmonicznych do ok. 2 kHz.

Znacznie większe uchyby mogą wystąpić przy transformacji przebiegów wolnozmiennych, np. przejściowego prądu zwarciowego z dużym udziałem składowej nieokresowej.

Relacja między składową nieokresową po stronie wtórnej $i_{2(nok)}$ i po stronie pierwotnej $i_{1(nok)}$ (z uwzględnieniem przekładni) jest następująca [3]:

$$i_{2(nok)}(t) \approx i_{1(nok)}(t) - I_{1(nok)}^{(m)}\frac{\tau_k}{\tau_{2p} - \tau_k}\left(e^{-\frac{t}{\tau_{2p}}} - e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right) \qquad (9)$$

gdzie: $I_{1(nok)}^{(m)}$ -amplituda składowej nieokresowej uzwojenia pierwotnego o elektromagnetycznej stałej czasowej odpowiednio obwodu zwarciowego $\tau_k = L_k/R_k$, oraz $\tau_{2p} = (L_{2p} + L_0)/(R_{2p} + R_0)$ obwodu wtórnego przekładnika (L_{2p}, R_{2p}) i obciążenia (L_0, R_0).

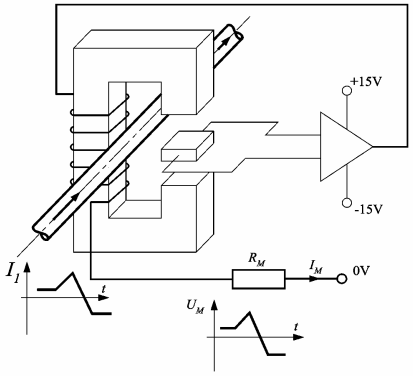
Błąd transformacji składowej nieokresowej jest określony przez drugi człon powyższego równania i będzie miał wartość bliską zeru, gdy $\tau_{2p} > 50\,\tau_k$. Dla instalacji elektroenergetycznych wartości τ_k są w przedziale ok. 5 ms do 30 ms i powyższy warunek jest spełniony dla standardowych przekładników pomiarowych charakteryzujących się dużym przekrojem rdzenia i dużą liczbą zwojów uzwojenia wtórnego, dla których τ_{2p} osiąga wartości nawet ponad 5 s. W przypadku rozwiązań technicznych przekładników „miniaturowych" dla wielu oferowanych rozwiązań τ_{2p} często wynosi zaledwie 10 ms i wówczas błąd transformacji może przekraczać nawet kilkadziesiąt procent.

d) Przekładniki prądowe indukcyjne skompensowane (LEM)

W przekładnikach prądowych indukcyjnych skompensowanych, w odróżnieniu od wyżej opisanych „klasycznych" przekładników indukcyjnych, prąd I_M w uzwojeniu wtórnym jest wymuszony przez regulator z zewnętrznego źródła prądowego o takiej wartości, że wypadkowy strumień w magnetowodzie sprzęgającym uzwojenia pierwotne i wtórne ma wartość równą zero. Detektorem zerowej wartości strumienia w magnetowodzie jest czujnik Hall'a. Urządzenia oparte na tej zasadzie, rys. 6, w latach 1972 do 1997 były produkowane, o ile wiadomo autorowi, wyłącznie przez firmę Liasons Electroniques Mecaniques LEM S.A. Geneve, stąd przyjęła się nazwa tych przekładników – „LEM".

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Podstawowe zalety tego rozwiązania to separacja galwaniczna obwodu pierwotnego i wtórnego oraz szerokie pasmo częstotliwości przenoszenia prądu – od składowej DC do nawet ponad 100 kHz AC. W przypadku pomiaru prądu przy dużej dynamice zmian potencjału przewodu, na przykład w obwodach falowników napięcia, konieczna jest minimalizacja pasożytniczych sprzężeń pojemnościowych obwodu pierwotnego i przetwornika prądowego.



Rys. 6. Przetwornik prądowy indukcyjny skompensowany: I_1 – prąd mierzony, U_M - napięcie wyjściowe
Fig. 6. Hall closed loop current transducer: I_1 measured current, U_M –output voltage

e) Przetworniki Rogowskiego (RCT)

Opisany w 1912r [4] sposób pomiaru prądu został praktycznie wdrożony dopiero po prawie stu latach, gdy dostępne już były „idealne" wzmacniacze całkujące. W cewce pomiarowej obejmującej obszar niemagnetycznego środowiska ($\mu = \mu_o$) o przekroju S, w którym płynie prąd $i_1(t)$ indukuje się siła elektromotoryczna $e(t)$, która po scałkowaniu jest proporcjonalna do mierzonego prądu.

Dzięki dostępnym obecnie wzmacniaczom operacyjnym, pasmo przenoszenia przetworników Rogowskiego jest bardzo szerokie, od kilku Hz do dziesiątek MHz przy błędzie nieliniowości w deklarowanym przez producenta przedziale częstotliwości nawet poniżej 2%. Inne zalety, to w zasadzie nieograniczona odporność na przeciążenia, łatwe uzyskanie dużej wytrzymałości napięciowej między obwodami wejściowymi i wyjściowymi i nieinwazyjne „podłączenie się" do mierzonego obwodu – pętla cewki pomiarowej jest elastyczna i nie zamknięta.

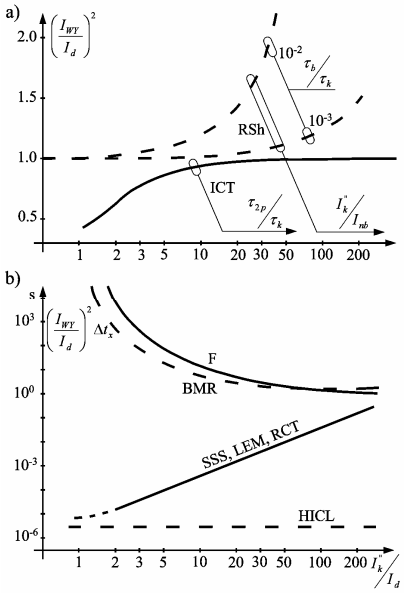
3. Podsumowanie

Przedstawione przetworniki pomiarowe prądu charakteryzuje różny sposób pomiaru prądu i algorytm jego przetwarzania na sygnał wykonawczy inicjujący proces ograniczania i wyłączania prądu. Różnice ich charakterystyk występują w skrajnych przypadkach zmienności prądu.

Ponieważ skutek cieplny prądu w instalacjach elektrycznych jest proporcjonalny do kwadratu prądu, dlatego na rys. 7a) podano charakterystyki $(I_{WY}/I_d)^2$ prądu I_{WY} przetwornika pomiarowego odniesione do prądu I_d nastawy wyzwalacza współpracującego z bocznikiem w funkcji ilorazu prądu zwarciowego i prądu znamionowego bocznika I_k''/I_{nb} - krzywe RSh, gdzie parametrem jest iloraz stałych czasowych τ_b/τ_k, oraz dla indukcyjnego przekładnika prądowego w funkcji ilorazu stałej czasowej obwodu obciążenia przekładnika i obwodu zwarciowego τ_{2p}/τ_k. - krzywa ICT.

Uchyb pomiarowy boczników rezystancyjnych (RSh) znacząco wzrasta gdy stała czasowa bocznika i mierzonego prądu $\tau_b/\tau_k > 10^{-3}$ oraz $I_k''/I_{nb}>20$. Natomiast uchyb pomiarowy typowych indukcyjnych przekładników prądowych (ICT) nie przekracza 2% przy pomiarze prądów harmonicznych od ok. 35 Hz do 2 kHz. W przypadku pomiaru prądu z udziałem składowej nieokresowej uchyb ICT znacznie wzrasta gdy $\tau_{2p}/\tau_k<50$. Taka sytuacja często ma miejsce w przypadku stosowania przekładników o małej mocy znamionowej.

Na rys. 7b) podano charakterystyki $(I_{WY}/I_d)^2\Delta t_x$ różnicy względnych, odniesionych do I_d wartości całek Joule'a prądu I_{WY} przetworników pomiarowych charakteryzujących się typowym dla nich rozrzutem czasu zadziałania Δt_x w funkcji krotności prądu zwarciowego I_k''/I_d odpowiednio dla przetworników oznaczonych wyżej F, BMR, SSS, LEM, RCT i HICL.



Rys. 7. Charakterystyki: - a) $(I_{WY}/I_d)^2$ dla bocznika RSh w funkcji I_k''/I_{nb} oraz przekładnika prądowego ICT w funkcji τ_{2p}/τ_k; - b) $(I_{WY}/I_d)^2\Delta t_x$ w funkcji I_k''/I_d przetworników oznaczonych w tekście odpowiednio F, BMR, SSS, LEM, RCT i HICL
Fig. 7. Parameters: - a) $(I_{WY}/I_d)^2$ *for* RSh vs. I_k''/I_{nb} and for ICT vs. τ_{2p}/τ_k; - b) $(I_{WY}/I_d)^2\Delta t_x$ vs. I_k''/I_d for current transducers, respectively F, BMR, SSS, LEM, RCT and HICL

Cieplne bezpośrednie przetworniki prądu, bezpieczniki topikowe (F) i wyzwalacze termobimetalowe (BMR) są tanimi rozwiązaniami, jednak charakteryzują się dużym rozrzutem czasu działania, szczególnie dla niewielkich przeciążeń. Przetworniki pomiarowe prądu wykorzystujące współczesne technologie materiałów półprzewodnikowych, np. SSS, LEM, RCT charakteryzują się liniową charakterystyką w szerokim paśmie częstotliwości i przeciążeń mierzonego prądu. Czas opóźnienia sygnału wyjściowego tych przetworników nie przekracza ok. 3 μs i przyrost parametru I^2t nawet dla $I_k''/I_d \approx 100$ nie przekracza kilkunastu procent. Przetworniki RCT i w niektórych wersjach wykonania LEM można instalować w sposób „nieinwazyjny" w istniejących już instalacjach elektroenergetycznych. Pewne specjalne rozwiązania, np. wymieniony hybrydowy HICL cechuje wyjątkowo powtarzalna charakterystyka działania.

4. Literatura

[1] P. Hempowicz: Wyłącznik ograniczający z możliwością szybkiego i wielokrotnego samoczynnego ponownego załączania. Automatyka Elektroenergetyczna Nr 4/2004, s.15-19.
[2] J. Czucha: Hybrid Inductance-Thyristor Short-Circuit Current Limiting Device. 10-th Intern. Confer. SAP2005, 19-22 Sept.2005, Łodz, p.197-200.
[3] S. Dzierzbicki: Badania aparatów elektrycznych. PWN Warszawa, 1972.
[4] W. Rogowski, W. Steinhaus, Die Messung der magnetische Spannung, Arch. Elektrotech. Z1, 1912, S. 141-150.

Artykuł recenzowany

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl