

Badanie wpływu prądów obciążenia na skuteczność zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego

Streszczenie. Wyłączniki różnicowoprądowe (RCD), są urządzeniami mogącymi zapewnić bardzo dobrą ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym, ale mogą również powodować zbędne wyłączenia zasilania w chronionych obwodach. W artykule opisano wpływ prądów obciążenia, płynących przez uzwojenia pierwotne przekładnika sumującego na generowany sygnał w obwodzie wtórnym, połączonym bezpośrednio z wyzwalaczem elektromagnetycznym.

Abstract. Residual Current Devices (RCDs) can provide reliable protection against electric shock, yet they may cause unnecessary power outages in the protected circuits. The paper describes the effect of load currents flowing through primary windings on the signal generated in the secondary circuit, directly connected to the electromagnetic trigger. (**Determination of the effect of load currents on the effectiveness of the residual current circuit device.**)

Słowa kluczowe: wyłącznik różnicowoprądowy, przekładnik sumujący, prądy obciążenia, ochrona uzupełniająca.

Keywords: residual current protective device, additive transformer, load currents, subsidiary protection.

Wstęp

Standardy bezpieczeństwa wynikające z aktualnych norm, optymalizują proces projektowania i budowy instalacji elektrycznej, ograniczając do minimum ryzyko wystąpienia porażenia prądem elektrycznym w trakcie jej eksploatacji. Podstawowa zasada ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym określa, że części niebezpieczne nie mogą być dostępne, a dostępne części przewodzące nie mogą być niebezpieczne w warunkach normalnej pracy instalacji elektrycznej niskiego napięcia (nn), jak i w przypadku pojedynczego uszkodzenia [1]. Ochronę przed porażeniem realizuje się poprzez zastosowanie określonych środków technicznych [2, 3], których zadanie polega na:

- zapobiegnięciu przepływowi prądu rażeniowego przez ciało człowieka lub zwierzęcia, albo
- ograniczeniu czasu przepływu prądu rażeniowego do wartości dopuszczalnych, albo
- ograniczeniu wartości prądu przepływającego przez ciało.

W instalacjach nn, ochrona przeciwporażeniowa powinna składać się z odpowiednio dobranego środka ochrony podstawowej i niezależnego środka ochrony przy uszkodzeniu lub wzmocnionego środka ochrony, który zapewnia zarówno ochronę podstawową jak i ochronę przy uszkodzeniu [2]. W warunkach specjalnych, wynikających z wpływów środowiskowych lub z przeznaczenia instalacji, norma [2] wymaga zastosowania dodatkowo środka ochrony uzupełniającej. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w zakresie ochrony uzupełniającej są wyłączniki RCD o znamionowym prądzie różnicowym 30 mA. Zabudowanie w instalacjach nn tego typu wyłączników RCD, zapewnia skuteczną ochronę przeciwporażeniową (samoczynne wyłączenie w dopuszczalnym czasie), zarówno w sytuacji dotyku bezpośredniego jak również przy dotyku pośrednim [4], ale może powodować również zbędne wyłączenia [5-8].

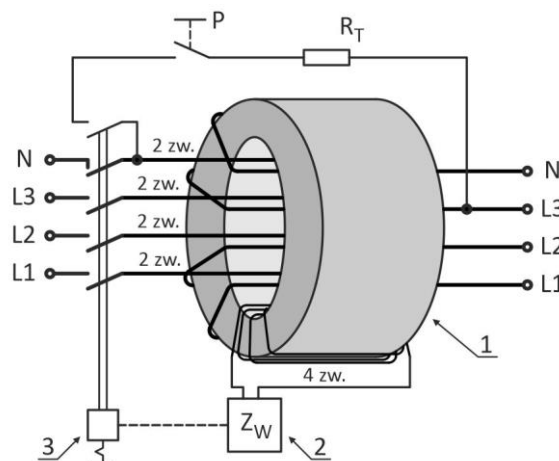
W artykule opisano wpływ konstrukcji wewnętrznej wyłącznika RCD oraz prądów obciążenia płynących przez uzwojenia pierwotne przekładnika sumującego, na indukowany prąd niezrównoważenia w obwodzie wtórnym. Badania i pomiary wykonywano w obwodach testowych, w których nie występowały prądy upływnościowe.

Budowa wewnętrzna wyłączników RCD

W instalacjach elektrycznych ogólnego przeznaczenia (budownictwo mieszkaniowe, biura, obiekty użyteczności publicznej, drobny przemysł, itd.), powszechnie montowane

są wyłączniki RCD typu AC lub A. Oba typy są wyłącznikami o działaniu niezależnym od napięcia panującego w instalacji. W przypadku obniżenia napięcia sieciowego (np. wskutek zwarcia) lub wystąpienia przerwy (np. przewodu neutralnego), zabezpieczony wyłącznikiem RCD obwód nadal będzie chroniony.

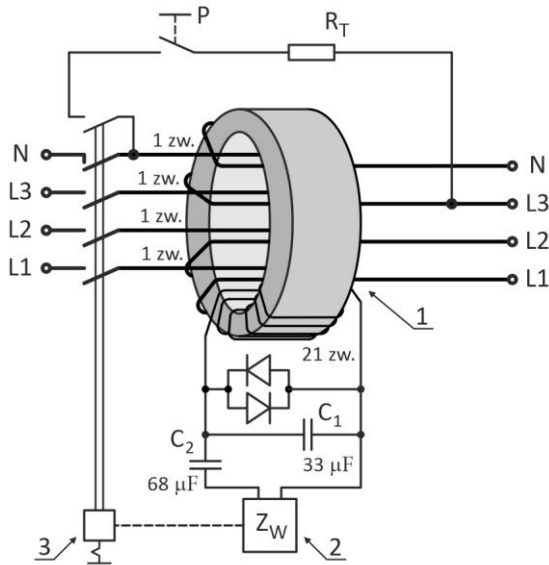
Pod względem konstrukcji wewnętrznej, oba typy wyłączników RCD (AC i A), wykonywane są w dwóch podstawowych wariantach – z bezpośrednim podłączeniem wyzwalacza elektromagnetycznego do uzwojenia wtórnego przekładnika sumującego (rys. 1) oraz z zastosowaniem układu dopasowania impedancyjnego (rys. 2).



Rys. 1. Budowa wewnętrzna wyłącznika RCD o bezpośrednim zasilaniu wyzwalacza elektromagnetycznego (Model A), 1 – rdzeń przekładnika sumującego, 2 – wyzwalacz, 3 – mechanizm zatraskowy styków, P – przycisk testu, R_T – rezystor testowy

Głównym elementem decydującym o prawidłowym funkcjonowaniu wyłącznika RCD jest sumujący przekładnik prądowy. W produkowanych obecnie wyłącznikach RCD o działaniu niezależnym od napięcia instalacji, przekładnik sumujący oprócz prawidłowej detekcji prądu różnicowego, odpowiada również za dostarczenie odpowiedniej energii do wyzwalacza elektromagnetycznego (2), aby nastąpiło mechaniczne rozłączenie styków. Producenci wyłączników RCD w celu ograniczenia kosztów produkcji jak również ze względu na miniaturyzację (np. łączenie w jednej obudowie

wyłącznika nadprądowego z wyłącznikiem RCD), stosując coraz częściej rdzenie przekładników sumujących o małym przekroju poprzecznym, wykonane z materiałów amorficznych lub nanokrystalicznych [9]. W tego typu rozwiązaniach (rys. 2), dla zagwarantowania odpowiedniej czułości na prąd różnicowy, nawijane są uzwojenia wtórne o większej liczbie zwojów oraz montowany jest układ dopasowania impedancyjnego w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego. Wyłączniki RCD o takiej budowie wewnętrznej cechują się bardzo krótkimi czasami zadziałania [10], ale mogą również błędnie wyłączać chronione obwody instalacji [11-13].



Rys.2. Budowa wewnętrzna wyłącznika RCD z układem dopasowania impedancyjnego w obwodzie wtórnym (Model B), 1 – rdzeń przekładnika sumującego, 2 – wyzwalacz, 3 – mechanizm zatraskowy styków, P – przycisk testu, R_T – rezystor testowy

Wyłącznik RCD, aby zapewniał prawidłowe wyłączenie, konstrukcja wewnętrzna jego przekładnika sumującego wraz z wyzwalaczem elektromagnetycznym, powinna spełniać dwa podstawowe kryteria:

- wyzwalacz elektromagnetyczny powinien rozłączyć styki główne wyłącznika przy przepływie pierwotnego prądu różnicowego w zakresie $(0,5 \div 1) \cdot I_{\Delta n}$ wyłącznika [14], oraz
- napięcie uchybu pojawiające się przy przepływie maksymalnego długotrwałego prądu obciążenia wyłącznika, nie powinno powodować zbędnych wyłączeń.

Analiza pracy sumującego przekładnika prądowego

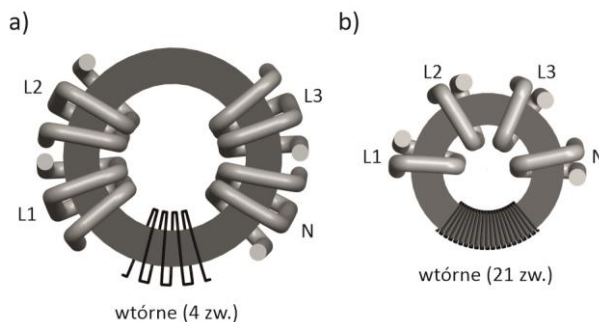
Sumujący przekładnik prądowy, będący magnetycznym sprzężeniem uzwojeń, odwzorowuje się najczęściej przy użyciu schematu zastępczego przeliczonego na jedną stronę uzwojeń. W przypadku wyłączników RCD montowanych w obwodach trójfazowych, sumowaniu magnetycznemu podlegają prądy trzech faz oraz prąd przewodu neutralnego. Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym można zapisać zależnością [15]:

$$(1) \quad e_2 = M_{L1} \frac{di_{L1}}{dt} + M_{L2} \frac{di_{L2}}{dt} + M_{L3} \frac{di_{L3}}{dt} + M_N \frac{di_N}{dt}$$

gdzie: M_{L1} , M_{L2} , M_{L3} , M_N - indukcyjności wzajemne między przewodami L1, L2, L3, N a uzwojeniem wtórnym.

W produkowanych seryjnie wyłącznikach RCD, ze względów konstrukcyjnych (ograniczona przestrzeń montażowa wewnątrz obudowy modułowej), uzwojenia

pierwotne nie są jednakowo rozmieszczone względem uzwojenia wtórnego. Na rysunku 3, przedstawiono wizualizację rozmieszczenia uzwojeń pierwotnych oraz uzwojenia wtórnego w wyłącznikach RCD, na których wykonywano badania (budowa wnętrza wyłączników zgodnie z rysunkami 1 oraz 2).



Rys. 3. Wizualizacja rozmieszczenia uzwojeń na rdzeniu przekładnika sumującego w wyłącznikach RCD, a) Model A, b) Model B

Przyjmując uproszczenie, że indukcyjność wzajemna jednego uzwojenia jest inna od pozostałych, np.:

$$(2) \quad M_{L1} > M_{L2} = M_{L3} = M_N = M$$

to zależność (1) można zapisać w postaci:

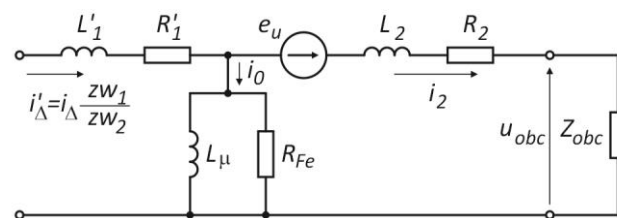
$$(3) \quad e_2 = M \frac{d(i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_N)}{dt} + (M_{L1} - M) \frac{di_{L1}}{dt}$$

W przypadku gdy obwód instalacji, chroniony przez wyłącznik RCD jest sprawny technicznie i nie występują prądy upływowe doziemne, to suma geometryczna prądów pierwotnych jest równa zero. W przypadku powstania uszkodzenia izolacji lub dotyku bezpośredniego w obrębie chronionego obwodu instalacji za wyłącznikiem RCD, popłynie prąd doziemny, wówczas suma geometryczna prądów pierwotnych będzie równa i_{Δ} .

W zależności (3) występuje składnik uchybowy, którego wartość zależy od niejednakowych sprzężeń między uzwojeniami pierwotnymi a uzwojeniem wtórnym przekładnika sumującego (w rozważanym przypadku proporcjonalny do prądu w fazie L1):

$$(4) \quad e_u = (M_{L1} - M) \frac{di_{L1}}{dt}$$

Na podstawie zależności (3), schemat zastępczy sumującego przekładnika prądowego, przeliczony na stronę wtórną uzwojeń można przedstawić w postaci rysunku 4.



Rys. 4. Schemat zastępczy sumującego przekładnika prądowego z uwzględnieniem wpływu napięcia uchybowego na transformację

Dla wyłącznika RCD – Model A (rys. 1), impedancję Z_{obc} stanowi impedancja cewki wyzwalacza Z_W . W przypadku wyłącznika RCD – Model B (rys. 2), dodatkowo impedancja obwodu strony wtórnej przekładnika sumującego. Wartość napięcia uchybowego wpływa bezpośrednio na wypadkowe

napięcie zasilania wyzwalacza elektromagnetycznego oraz na jego prądowy próg wyzwolenia. Wyzwalacz będzie reagował przy mniejszych wartościach prądu różnicowego płynącego po stronie pierwotnej przekładnika sumującego co może powodować zbędne wyłączenia napięcia w chronionych obwodach instalacji.

Dobierając rdzeń przekładnika oraz konstrukcję obwodu wtórnego uwzględnia się zależności:

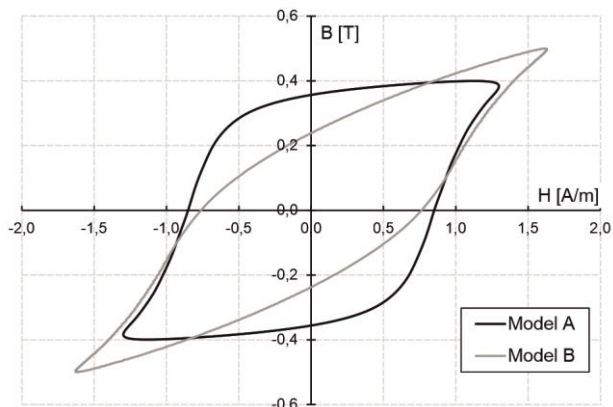
- w Modelu A (rys. 1) – przekładnik sumujący powinien charakteryzować się maksymalnie dużą impedancją gałęzi magnesowania (indukcyjność L_{m1} , rezystancja R_{Fe}),
- w Modelu B (rys. 2) – dopasowanie impedancyjne obciążenia obwodu wtórnego przekładnika do impedancji gałęzi magnesowania powinno zapewnić wydzielenie maksymalnej mocy na cewce wyzwalacza.

W tabeli 1, zestawiono podstawowe parametry techniczne uzwojeń oraz rdzeni przekładników z badanych wyłączników RCD.

Tabela 1. Parametry techniczne rdzeni oraz uzwojeń badanych wyłączników RCD

Wymiary rdzenia:	Model A	Model B
średnica zewnętrzna - d_z	24,3 mm	16,8 mm
średnica wewnętrzna - d_w	16,1 mm	9,8 mm
wysokość - h	23,3 mm	20,1 mm
masa rdzenia	39,7 g	17,6 g
uzwojenie pierwotne	LY 2,5 mm ²	DN 2,8 mm ²
liczba zwojów	2	1
uzwojenie wtórne	DN 0,018 mm ²	DN 0,013 mm ²
liczba zwojów	4	21

Na rysunku 5, przedstawiono wykresy pętli histerezy rdzeni z badanych wyłączników RCD przy magnesowaniu prądem przemiennym 50 Hz.



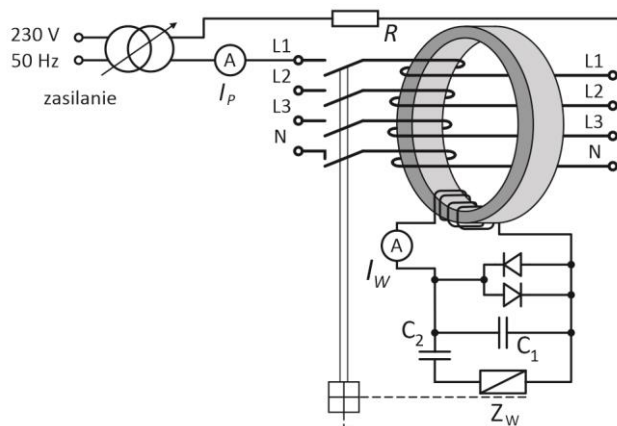
Rys. 5. Pętle histerezy rdzeni dla badanych wyłączników RCD

W wyłącznikach RCD, rdzeń przekładnika sumującego powinien być wykonany z materiału o bardzo dużej przenikalności magnetycznej w celu uzyskania odpowiednio dużego napięcia po stronie wtórnej przy określonej liczbie zwojów i przy możliwie małej stratności. Powyższe wymagania spełniają rdzenie wykonane z materiałów amorficznych, nanokrystalicznych lub typu permaloj [9].

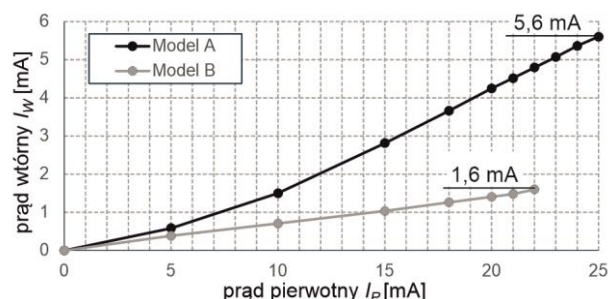
Wyznaczenie progu wyzwolenia wyłączników RCD

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla wyłączników różnych producentów typu AC o znamionowym prądzie różnicowym 30 mA oraz dopuszczalnym długotrwałym prądzie 25 A. W artykule przedstawiono wyniki dla dwóch wybranych egzemplarzy (Model A i B). W tego typu wyłącznikach RCD, wykorzystywany jest wyzwalacz elektromagnetyczny spolaryzowany o tzw. odpadającej zworze [16]. W trakcie badań wymuszano wolno narastający prąd sinusoidalny (50 Hz) w jednym uzwojeniu

pierwotnym przekładnika do wartości, przy której nastąpiło zadziałanie wyzwalacza (rys. 6). Zakres transformacji prądów przez przekładniki sumujące dla obu badanych wyłączników RCD przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Układ pomiarowy do wyznaczenia punktu zadziałania wyzwalacza w wyłączniku RCD

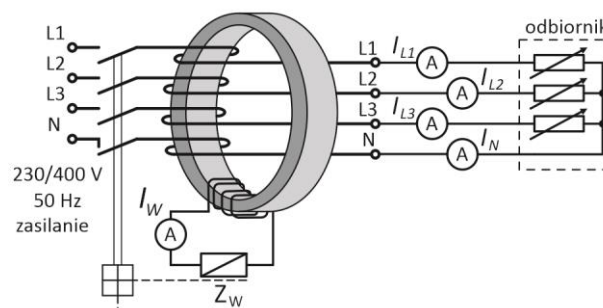


Rys. 7. Charakterystyka transformacji prądów przez przekładnik sumujący badanych wyłączników RCD

W wyłączniku RCD – Model A, wyzwalacz zadziałał przy prądzie pierwotnym 25,4 mA (prąd wtórny 5,6 mA), w przypadku Modelu B przy prądzie pierwotnym 21,3 mA (prąd wtórny 1,6 mA). Badane wyłączniki RCD spełniają wymagania zapisane w normie [10].

Pomiar prądu nierównoważenia przekładnika

W trakcie badań przez wyłączniki RCD przepływały prądy obciążenia od zera do wartości znamionowej w różnych konfiguracjach: obciążenie symetryczne trójfazowe, dwufazowe oraz jednofazowe (rys. 8).

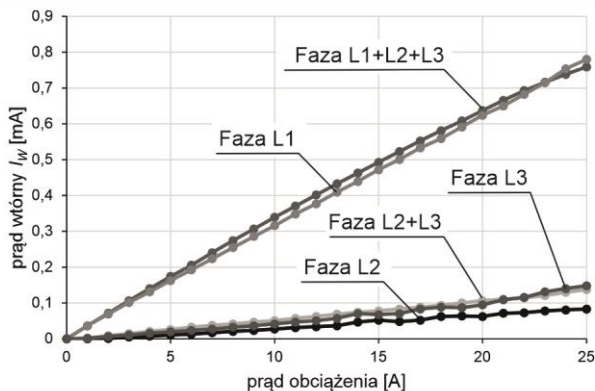


Rys. 8. Układ pomiarowy do wyznaczenia prądu nierównoważenia przekładnika sumacyjnego

W trakcie badań wykonywano pomiary prądów we wszystkich przewodach czynnych chronionego obwodu instalacji oraz w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego. W przypadku obciążenia trójfazowego

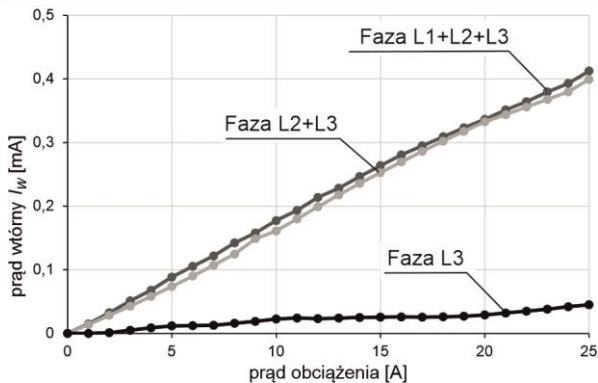
symetrycznego, wymuszano jednakowe prądy w poszczególnych przewodach fazowych, natomiast w przewodzie neutralnym płynął resztkowy prąd powrotny. W przypadku obciążenia dwufazowego (przerwa w jednej z faz po stronie zasilania wyłącznika RCD), wymuszano jednakowe prądy w dwóch fazach natomiast w przewodzie neutralnym płynął prąd powrotny o takiej samej wartości. Dla obciążenia jednofazowego, podłączano zasilanie tylko do jednego przewodu fazowego oraz neutralnego.

Na rysunku 9, w postaci charakterystyk przedstawiono uzyskane wyniki badań dla wyłącznika Model A. Największe wartości prądu niezrównoważenia po stronie wtórnej generowane są przez prąd pierwotny przepływający uzwojeniem fazy L1 (dla znamionowego prądu pierwotnego 25 A w tej fazie, prąd wtórny wynosił 0,78 mA).



Rys. 9. Prąd niezrównoważenia obwodu wtórnego wyłącznika RCD – Model A, dla różnych wariantów obciążenia obwodów

Na rysunku 10, przedstawiono wybrane wyniki badań dla wyłącznika – Model B. W przypadku tego wyłącznika, największe wartości prądu niezrównoważenia po stronie wtórnej generowane są przez prąd pierwotny płynący w fazie L2 (dla wartości 25 A, prąd wtórny wynosił 0,4 mA).



Rys. 10. Prąd niezrównoważenia obwodu wtórnego wyłącznika RCD – Model B, dla różnych wariantów obciążenia obwodów

W przypadku obu badanych wyłączników, występuje jedno uzwojenie pierwotne, które generuje największy prąd niezrównoważenia po stronie wtórnej przekładnika.

Wnioski

Przeprowadzone pomiary wykazały, że przy znamionowym prądzie pierwotnym wyłącznika RCD, prąd niezrównoważenia przekładnika sumującego stanowi odpowiednio dla Modelu A – 14% a dla Modelu B – 25%,

wartości prądu zadziałania wyzwalacza. Występujący prąd niezrównoważenia bezpośrednio wpływa na obniżenie progu zadziałania wyłącznika RCD.

Uwzględniając konstrukcję wewnętrzną wyłącznika RCD, obecnie powszechnie produkowane są Modele B (z układem dopasowania impedancyjnego). Takie rozwiązanie umożliwia zastosowanie rdzenia przekładnika sumującego o mniejszym przekroju poprzecznym ale wpływa na konieczność zwiększenia liczby zwojów, uzwojenia wtórnego. Wpływa to na wzrost napięcia w obwodzie wtórnym przekładnika ale jednocześnie obniża wartości prądu, przy której powinien zareagować wyzwalacz elektromagnetyczny. Wyłączniki RCD o takiej budowie, są bardziej wrażliwe prądowo oraz podatne na wywoływanie zbędnych wyłączeń w chronionych obwodach instalacji.

Autor: dr inż. Paweł Czaja, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: pawel.czaja@pcz.pl

LITERATURA

- [1] PN-EN 61140:2016-07 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym. Wspólne aspekty instalacji i urządzeń
- [2] PN-HD 60364-41:2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [3] Czapp S., Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach i instalacjach niskiego napięcia, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa (2023)
- [4] Czapp S., Testing Sensitivity of A-Type Residual Current Devices to Earth Fault Currents with Harmonics, *Sensors* 20 (2020), 2044
- [5] Gruhn T., Glenney J., Savostianik M., Type B ground-fault protection on adjustable frequency drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54 (2018), No. 1, 934 – 939
- [6] Bao G., Gao X., Jiang R., Huang K., A novel differential high-frequency current transformer sensor for aeries arc fault detection, *Sensors*, 19 (2019), 3649
- [7] Yang K., Zhang R., Chen S., Zhang F., Yang J., Zhang X., Series arc fault detection algorithm based on autoregressive bispectrum analysis, *Algorithms*, 8 (2015), 929–950
- [8] Liu Y., Xie X., Hu Y., Qian Y., Sheng G., Jiang X., A novel transient fault current sensor based on the PCB Rogowski coil for overhead transmission lines, *Sensors*, 16 (2016), 742
- [9] Czaja P., Pluta W., Właściwości magnetyczne rdzeni przekładników sumujących wyłączników różnicowoprądowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr 12, 109-112
- [10] Czaja P., Influence of the design of a residual current device on its break time, *Energies*, 15 (2022), 9054
- [11] Luo I.X., Du Y., Wang X.H., Chen M.L., Tripping Characteristics of Residual Current Devices Under Nonsinusoidal Currents, *IEEE Transaction on Industry Applications*, 47 (2011), No. 3, 1515–1521
- [12] Gurevich V., RCD Nuisance Tripping: Who's Guilty and What Needs to be Done? *Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering*, 13 (2013), No. 11, 30–40
- [13] Roldan-Porta C., Escriva-Escriva G., Carcel-Carrasco F.J., Roldan-Blay C., Nuisance tripping of residual current circuit breakers: A practical case. *Electric Power Systems Research*, 106 (2014), 180–187
- [14] PN-EN 61008-1:2007 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego I podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne
- [15] Czaja P., Examination of the impact of design of a residua current protective device on the release frequency range, *Progress In Applied Electrical Engineering*, PAEE (2017), 8009009
- [16] Czapp S., Horiszny J., Badania symulacyjne układu wyzwalania wyłącznika różnicowoprądowego w warunkach zwiększonej częstotliwości prądu różnicowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 2, 242-247