

Badanie wybranych właściwości wyłączników różnicowoprądowych typu F

Streszczenie. W instalacjach elektrycznych niskiego napięcia instaluje się coraz więcej przekształtników energoelektronicznych (systemy fotowoltaiczne, instalacje ładowania pojazdów elektrycznych, układy napędowe o regulowanej prędkości obrotowej silnika), a mają one wpływ na dobór typu wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych (AC, A, F lub B). W obwodach, w których pojawia się prąd różnicowy zawierający składowe o częstotliwości innej niż 50 Hz, może być konieczne zastosowanie wyłącznika różnicowoprądowego typu F. W artykule omówiono wyniki badań progu zadziałania tego typu wyłączników różnicowoprądowych przy prądach różnicowych o częstotliwościach innych niż 50 Hz. Przedstawiono również reakcję wyłączników różnicowoprądowych typu F na pomiar impedancji pętli zwarciowej wykonany dwoma miernikami różniącymi się czasem przepływu prądu pomiarowego. Uzyskane wyniki wskazują, jaki należy dobrać miernik, aby nie następowało zbędne wyzwalanie wyłączników różnicowoprądowych typu F podczas tego pomiaru.

Abstract. In low-voltage electrical installations, power electronic converters are more widely used (in photovoltaic systems, charging systems for electric vehicles, variable-speed drive systems), and they affect the selection of the type of tripping of residual current devices (AC, A, F or B). In circuits where a residual current having components of a frequency other than 50 Hz appears, it may be necessary to use a type F residual current device. The article discusses the testing of the tripping threshold of this type of residual current devices at residual currents with frequencies other than 50 Hz. The response of type F residual current devices to the measurement of the earth fault loop impedance performed with two meters differing in the measuring current flow time is presented as well. The obtained results indicate which meter should be selected so that there is no unwanted tripping of type F residual current devices during this measurement. (Testing of selected properties of type F residual current devices).

Słowa kluczowe: wyłączniki różnicowoprądowe, prąd różnicowy, częstotliwość, impedancja pętli zwarciowej.

Keywords: residual current devices, residual current, frequency, earth fault loop impedance.

Wstęp

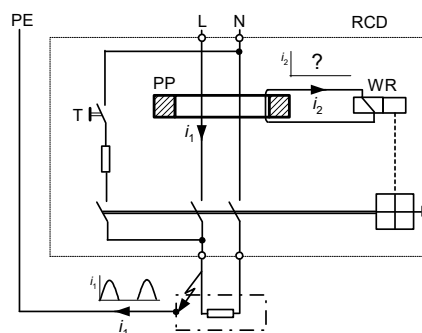
Wyłączniki różnicowoprądowe są to zabezpieczenia, które powszechnie występują w nowoczesnych instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. Wykorzystywane są do zapewnienia skutecznej ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu w ramach samoczynnego wyłączenia zasilania oraz ochrony przeciwporażeniowej uzupełniającej w razie dotyku bezpośredniego [1, 2]. W niektórych instalacjach specjalnych, w których występuje zwiększone zagrożenie porażeniem, jak np. w instalacjach wymienionych w normach [3–5], stosowanie wyłączników różnicowoprądowych jest obowiązkowe.

Jednym z czynników, który powinien być rozpatrywany przy doborze wyłącznika różnicowoprądowego, jest jego zdolność do wykrywania kształtu przebiegu prądu różnicowego, spodziewanego w chronionym obwodzie. Z tego punktu widzenia rozróżnia się następujące podstawowe typy wyłączników różnicowoprądowych [6, 7]:

- typ AC – wykrywający prąd sinusoidalny o częstotliwości sieciowej (zwykle 50 Hz);
- typ A – wykrywający prąd taki jak wyłączniki typu AC, a ponadto prądy pulsujące stałe, w tym zawierające składową stałą wygładzoną o wartości nieprzekraczającej 6 mA;
- typ F – wykrywający prądy takie jak wyłączniki typu A, a ponadto prąd pulsujący stały zawierający składową stałą wygładzoną o wartości nieprzekraczającej 10 mA oraz prąd zawierający harmoniczne;
- typ B – wykrywający prądy takie jak wyłączniki typu F, a ponadto prąd stały wygładzony oraz prąd sinusoidalny o częstotliwości nieprzekraczającej 1000 Hz.

Konieczność dopasowania typu wyłącznika różnicowoprądowego do spodziewanego przebiegu prądu różnicowego wynika z konstrukcji i zasady działania tego zabezpieczenia. Głównymi elementami wyłącznika różnicowoprądowego są m.in. przekładnik prądowy sumujący (PP) i wyzwalacz różnicowy (WR) – rys. 1. Aby wyłącznik różnicowoprądowy (RCD) otworzył obwód główny, w którym doszło do uszkodzenia izolacji doziemnej,

przez wyzwalacz WR powinien płynąć wystarczająco duży prąd i_2 . Wartość tego prądu zależy od wartości prądu pierwotnego i_1 (prądu różnicowego) oraz w dużej mierze od jakości transformacji prądu przez przekładnik. Gdy i_1 będzie prądem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz, nawet wyłącznik typu AC poradzi sobie z wykryciem takiego prądu. Jeżeli jednak prąd i_1 będzie miał częstotliwości inną niż 50 Hz lub będzie jednokierunkowy (np. półfalowy jak na rys. 1), to warunki pracy przekładnika sumującego są trudniejsze. Jak wynika z badań wpływu częstotliwości prądu różnicowego [8–14] lub składowej stałej [15, 16] na działanie wyłączników różnicowoprądowych, ich próg zadziałania może znacznie przesunąć się w kierunku większych wartości prądu, a w niektórych przypadkach wyłączniki te mogą w ogóle nie reagować na prąd różnicowy, co jest niebezpieczne z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej.



Rys.1. Uproszczony schemat obwodu z wyłącznikiem różnicowoprądowym (RCD). PP – przekładnik prądowy sumujący, WR – wyzwalacz różnicowy, T – przycisk TEST, i_1 – prąd pierwotny (różnicowy) przekładnika PP, i_2 – prąd wtórny przekładnika PP (prąd płynący przez wyzwalacz WR)

Drugim czynnikiem związanym z doбором wyłączników różnicowoprądowych i eksploatacją instalacji z tymi zabezpieczeniami jest ich reakcja na pomiar impedancji

pętli zwarciowej. Pomiar ten jest przeprowadzany w ramach sprawdzania instalacji elektrycznych [17], ale może sprawiać kłopoty. Podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej dość często dochodzi do zbędnego zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego, co uniemożliwia prawidłowe wykonanie tego pomiaru.

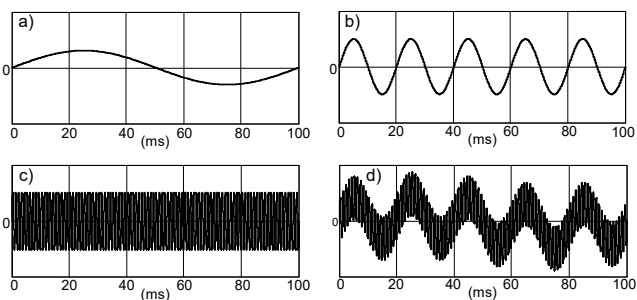
Dotychczasowe badania i publikacje skupiały się głównie na wyłącznikach różnicowoprądowych typu AC, A i B. Wyłączniki różnicowoprądowe typu F nie są jeszcze szeroko stosowane i na ich temat nie ma wielu publikacji. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wymagania normy [7] odnoszącej się do parametrów technicznych wyłączników różnicowoprądowych typu F oraz wyniki badań działania tych wyłączników przy prądach różnicowych o częstotliwości innej niż 50 Hz. Omówiono również wyniki badań reakcji wyłączników różnicowoprądowych typu F na pomiar impedancji pętli zwarciowej, aby ocenić możliwość wykonania tego pomiaru stosunkowo dużym prądem bez zbędnego wyzwalania wyłączników różnicowoprądowych.

Wybrane wymagania norm dla wyłączników różnicowoprądowych typu F

Wyłączniki różnicowoprądowe typu F powinny spełniać wymagania norm PN-EN 61008-1 [6] i PN-EN 62423 [7]. W odniesieniu do kształtu prądu różnicowego wyłączniki te mają reagować na następujące przebiegi:

- 1) sinusoidalny o częstotliwości sieciowej (zwykle 50 Hz);
- 2) pulsujący stały o kącie opóźnienia: 0° , 90° , 135° ;
- 3) pulsujący stały o kącie opóźnienia 0° z nałożoną składową stałą wygładzoną o wartości do 10 mA;
- 4) odkształcony zawierający następujące częstotliwości: 10 Hz, 50 Hz, 1000 Hz.

Najistotniejszą różnicą w porównaniu z wyłącznikami różnicowoprądowymi typu AC i typu A jest wymagane działanie przy prądzie różnicowym odkształconym zawierającym częstotliwości 10 Hz, 50 Hz i 1000 Hz. Na rys. 2 przedstawiono przebieg probierczy wraz z jego składowymi.



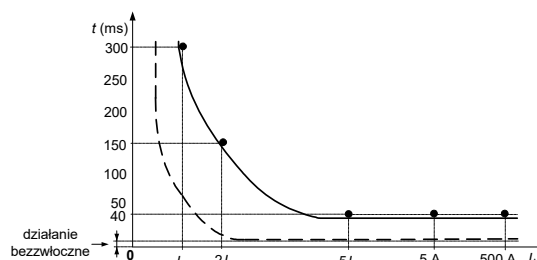
Rys.2. Składowe przebiegi probierczego i wypadkowy przebieg probierczy prądu różnicowego, przy którym bada się próg zadziałania wyłączników różnicowoprądowych typu F: a) składowa 10 Hz, b) składowa 50 Hz, c) składowa 1000 Hz, d) wypadkowy przebieg prądu zawierający składowe 10 Hz, 50 Hz i 1000 Hz

Przebieg probierczy ma w przybliżeniu odwzorowywać prąd ziemnozwarciowy, który może pojawić się w obwodzie silnika o regulowanej prędkości obrotowej z wykorzystaniem przekształtnika. Zakłada się, że przekształtnik jest zasilany z obwodu jednofazowego. Częstotliwość 1000 Hz utożsamiana jest z częstotliwością impulsowania PWM i to ona w znacznym stopniu decyduje o progu zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego. W praktyce częstotliwość PWM przekształtników może być znacznie wyższa, zatem celowe jest zbadanie reakcji wyłączników różnicowoprądowych typu F na prąd różnicowy o częstotliwościach innych niż 50 Hz, w szczególności wyższych niż 1000 Hz.

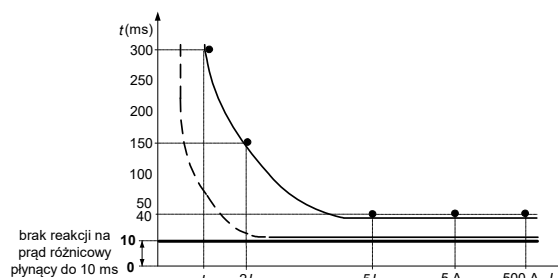
Z punktu widzenia eksploatacji instalacji z wyłącznikami różnicowoprądowymi, również typu F, bardzo istotne są ich charakterystyki czasowo-prądowe, które wskazują, czy dany wyłącznik ma działanie zwłoczne. Można wyróżnić trzy podstawowe charakterystyki (rys. 3) i związane z nimi typy wyłączników różnicowoprądowych:

- bezzwłoczne,
- krótkozwłoczne – przetrzymywanie przez co najmniej 10 ms, najczęściej spotykane oznaczenie to **G**,
- zwłoczne (selektywne) – przetrzymywanie przez co najmniej 40 ms, oznaczenie **S**.

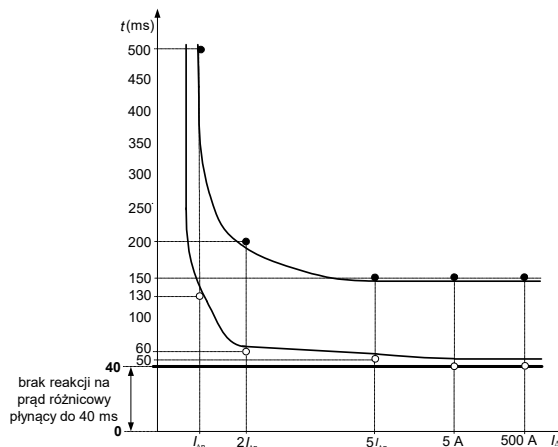
a)



b)



c)

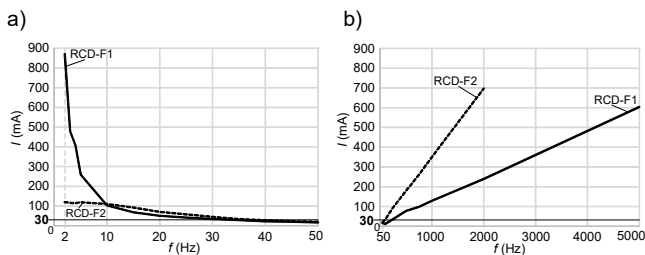


Rys.3. Charakterystyki czasowo-prądowe wyłączników różnicowoprądowych: a) bezzwłoczny, b) krótkozwłoczny (brak reakcji na prąd różnicowy płynący do 10 ms), c) selektywny (brak reakcji na prąd różnicowy płynący do 40 ms)

Zgodnie z normą [7], od wyłączników różnicowoprądowych typu F wymaga się przetrzymywania przejściowych prądów upływowych o czasie trwania do 10 ms, zatem z zasady wyłączniki te są wyłącznikami krótkozwłocznymi. Informacja ta jest bardzo istotna przy wykonywaniu pomiaru impedancji pętli zwarciowej. Stosując mierniki wymuszające prąd pomiarowy półfalowy (10 ms przy 50 Hz) nie będzie następowało zbędne wyzwalanie wyłączników różnicowoprądowych typu F, nawet gdy prąd pomiarowy będzie znacznie większy niż prąd $I_{\Delta n}$ wyłącznika, co wykazano w niniejszym artykule.

Badanie prądu zadziałania przy częstotliwości prądu różnicowego innej niż 50 Hz

Badaniom prądu zadziałania w funkcji częstotliwości prądu różnicowego poddano dwa wyłączniki różnicowoprądowe typu F o znamionowym prądzie różnicowym zadziałania $I_{\Delta n} = 30$ mA. Wymuszano wolno narastający prąd różnicowy (od około 15 mA do zadziałania wyłącznika, ale nie większy niż 1 A) o określonej częstotliwości z przedziału od 1 Hz do 6000 Hz. Rys. 4 przedstawia wyniki badań. Dla częstotliwości niższych niż 50 Hz (rys. 4a) oba badane wyłączniki charakteryzują się podobną wrażliwością na częstotliwość prądu różnicowego pod warunkiem, że nie jest ona niższa niż 10 Hz. Dla częstotliwości z przedziału 2–10 Hz próg zadziałania wyłącznika RCD-F1 silnie rośnie przy zbliżaniu się do 2 Hz. Poniżej 2 Hz żaden badanych wyłączników nie reagował na prąd różnicowy nawet o wartości 1 A.



Rys.4. Rzeczywisty prąd zadziałania dwóch wyłączników różnicowoprądowych typu F o $I_{\Delta n} = 30$ mA (RCD-F1, RCD-F2) w funkcji częstotliwości prądu różnicowego. Zakres częstotliwości: a) 2–50 Hz, b) 50–5000 Hz

W przypadku częstotliwości wyższych niż 50 Hz próg zadziałania każdego z wyłączników różnicowoprądowych silnie rośnie w miarę zwiększania częstotliwości prądu (rys. 4b), ale zauważa się wyraźne różnice w reakcji badanych zabezpieczeń. Wyłącznik RCD-F2 wyzwała tylko w przedziale do 2000 Hz, natomiast RCD-F1 do 5000 Hz. Ryzykowne jest zatem wykorzystywanie wyłączników typu F, gdy prąd różnicowy zawiera składowe o bardzo wysokiej częstotliwości.

Badanie reakcji na pomiar impedancji pętli zwarciowej

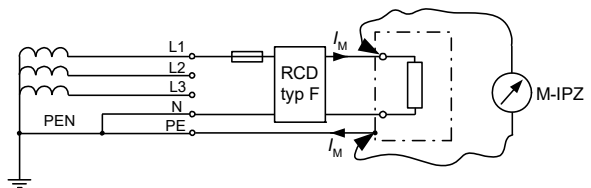
Powszechnie stosowane mierniki impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykorzystują metodę tzw. sztucznego zwarcia [18–24]. Zgodnie z rys. 5 i 6 miernik dokonuje pomiaru napięcia U_1 , które w założeniu jest napięciem źródła zasilania sieci, a po załączeniu obciążenia pomiarowego Z_M (następuje przepływ prądu pomiarowego I_M) mierzy napięcie U_2 . Impedancję mierzoną wyznacza się na podstawie następującej ogólnej zależności:

$$(1) \quad \underline{Z} = \underline{Z}_M \frac{U_1 - U_2}{U_2} = \underline{Z}_M \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

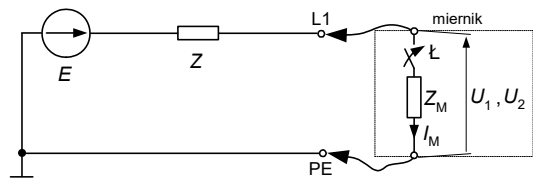
gdzie: Z – impedancja mierzona, Z_M – impedancja miernika, U_1 – napięcie rejestrowane przez miernik przed załączeniem obciążenia pomiarowego, U_2 – napięcie rejestrowane przez miernik po załączeniu obciążenia pomiarowego (stan sztucznego zwarcia).

Błąd roboczy, tzn. błąd całkowity w znamionowych warunkach pracy miernika nie powinien przekraczać 30% [25]. Aby spełnić to wymaganie, należy stosować m.in. prąd pomiarowy o odpowiednio dużej wartości [26, 27]. Prąd pomiarowy I_M jest jednak dla wyłącznika różnicowoprądowego prądem różnicowym i w związku z tym podczas pomiaru może nastąpić zbędne zadziałanie tego wyłącznika. Z wyżej przytoczonych wymagań normy

[7] wiadomo jednak, że wyłączniki różnicowoprądowe typu F nie powinny reagować na prąd pomiarowy/różnicowy płynący do 10 ms.



Rys.5. Przyłączenie miernika impedancji pętli zwarciowej (M-IPZ) w układzie TN. RCD – wyłącznik różnicowoprądowy, I_M – prąd pomiarowy

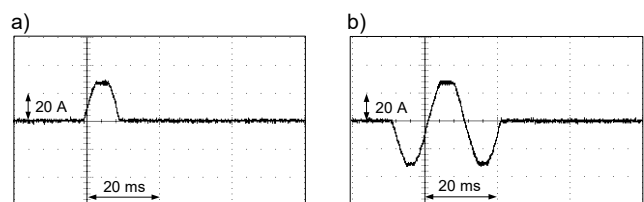


Rys.6. Uproszczony schemat zastępczy obwodu podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej L1-PE. E – napięcie (fazowe) źródła zasilania sieci, U_1 , U_2 – napięcia rejestrowane przez miernik odpowiednio przed i po zamknięciu łącznika λ , I_M – prąd pomiarowy, Z – impedancja mierzona, Z_M – impedancja miernika M-IPZ

Dla zweryfikowania tego wymagania normy przeprowadzono pomiary impedancji pętli zwarciowej w laboratoryjnym obwodzie, w którym kolejno instalowano następujące wyłączniki różnicowoprądowe o $I_{\Delta n} = 30$ mA:

- typu AC, bezzwłoczny (oznaczenie AC1),
- typu AC, krótkozwłoczny (oznaczenie AC2),
- typu A, bezzwłoczny (oznaczenie A1),
- typu A, krótkozwłoczny (oznaczenie A2),
- typu F (oznaczenie F1),
- typu F (oznaczenie F2).

Po zainstalowaniu danego wyłącznika pomiar impedancji pętli zwarciowej wykonywano trzykrotnie w odstępach kilku sekund pomiędzy próbami i odnotowywano, czy wyłącznik przy tym pomiarze zadziałał. Do pomiaru wykorzystano dwa mierniki o przebiegach prądu pomiarowego przedstawionych na rys. 7. W przypadku miernika wymuszającego prąd półfalowy (miernik 1) kolejne trzy próby w odstępach kilku sekund wykonywano dla każdej biegunowości prądu.



Rys.7. Oscylogramy prądu pomiarowego: a) miernika 1, czas przepływu prądu 10 ms, wartość szczytowa prądu około 30 A; b) miernika 2, czas przepływu prądu 30 ms, wartość szczytowa prądu około 30 A

Wyniki badań wyłączników różnicowoprądowych zawarto w tab. 1. Wyłączniki różnicowoprądowe typu F, zgodnie z oczekiwaniem, nie reagowały na prąd pomiarowy półfalowy (miernik 1). W przypadku miernika 2 zadziałanie wyłączników typu F nastąpiło przy każdej próbie ponieważ czas przepływu prądu (30 ms) znacznie przekraczał ich wymagany czas przetrzymywania określony na 10 ms. Zatem stosując prąd półfalowy pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodzie chronionym wyłącznikiem typu F nie powinien sprawiać problemów.

Tabela 1. Wyniki badań wyl. różnicowoprądowych ($I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$)

P r ó b a	Badany wyłącznik różnicowoprądowy					
	typ AC (AC1) bezzwłoczny	typ AC (AC2) krótko- zwłoczny	typ A (A1) bezzwłoczny	typ A (A2) krótko- zwłoczny	typ F (F1)	typ F (F2)
miernik 1 (10 ms, półfala dodatnia)						
1	T	N	T	N	N	N
2	N	N	T	N	N	N
3	N	N	T	N	N	N
miernik 1 (10 ms, półfala ujemna)						
1	T	N	T	N	N	N
2	N	N	T	N	N	N
3	N	N	T	N	N	N
miernik 2 (30 ms, przebieg sinusoidalny)						
1	T	T	T	T	T	T
2	T	T	T	T	T	T
3	T	T	T	T	T	T
Oznaczenia: N – wyłącznik nie zadziałał przy pomiarze T – wyłącznik zadziałał zgodnie przy pomiarze						

Jeżeli porównać wyniki otrzymane dla wyłączników typu F z wynikami otrzymanymi dla wyłączników krótkozwłocznych typu AC i typu A, to widać, że są one identyczne. W przypadku wyłącznika bezzwłoczny typu A zadziałanie nastąpiło przy każdej próbie, ponieważ takie wyłączniki nie mają określonej zwłoki w działaniu, a ponadto od typu A oczekuje się reakcji na prąd różnicowy przemienny (miernik 2) i prąd różnicowy półfalowy (miernik 1). Wyłącznik różnicowoprądowy bezzwłoczny typu AC nie reagował przy próbach nr 2 i 3 dla każdej biegunowości prądu półfalowego, ponieważ podczas próby nr 1 prądem półfalowym jego rdzeń magnetyczny został wprowadzony w stan nasycenia. To cecha charakterystyczna rdzeni przekładników sumujących, w które zwykle wyposaża się wyłączniki różnicowoprądowe typu AC.

Wnioski

Wyłączniki różnicowoprądowe typu F są przeznaczone do instalacji, w których prądy ziemnozwarciowe mogą zawierać wyższe harmoniczne. Wyniki badań tych wyłączników wskazują jednak dość silną zależność ich progów zadziałania od częstotliwości prądu różnicowego. Jeden z badanych wyłączników typu F o $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ nie reagował na prąd różnicowy o wartości nawet 1 A, gdy częstotliwość wynosiła ponad 2 kHz.

Z badań reakcji wyłączników różnicowoprądowych typu F na pomiar impedancji pętli zwarciowej wynika, że nie reagują one na półfalowy prąd pomiarowy (czas przepływu 10 ms). Wykorzystanie miernika o takim przebiegu prądu pomiarowego umożliwia wykonanie pomiaru prądem o stosunkowo dużej wartości (np. kilkadziesiąt amperów), co sprzyja dobrej dokładności pomiaru.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Stanisław Czapp, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: stanislaw.czapp@pg.edu.pl

mgr inż. Hanan Tariq, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: hanan.tariq@pg.edu.pl

dr inż. Kornel Borowski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: kornel.borowski@pg.edu.pl

LITERATURA

- [1] PN-HD 60364-4-41:2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [2] Czapp S., Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach i instalacjach niskiego napięcia. PWN, Warszawa 2023

- [3] PN-HD 60364-7-701:2010 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-701: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Pomieszczenia wyposażone w wannę lub prysznic
- [4] PN-HD 60364-7-705:2007 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-705: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Gospodarstwa rolnicze i ogrodnictwo
- [5] PN-HD 60364-7-722:2019-01 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-722: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Zasilanie pojazdów elektrycznych
- [6] PN-EN 61008-1:2013-05 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne
- [7] PN-EN 62423:2013-06 Wyłączniki różnicowoprądowe typu F i typu B z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym i bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego
- [8] Czapp S., The effect of PWM frequency on the effectiveness of protection against electric shock using residual current devices, *Conference-Seminar International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, Lagow, Poland, 15-18 June 2010, <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2010.5524515>
- [9] Czapp S., The effect of earth fault current harmonics on tripping of residual current devices, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 1, 196-201
- [10] Czapp S., Tariq H., Behavior of residual current devices at frequencies up to 50 kHz, *Energies*, 14 (2021), 1785, <https://doi.org/10.3390/en14061785>
- [11] Horgos M., Erdei Z., Barz C., Birsan I., Ilia M., Contributions to testing residual current devices at different frequency values. *6th Int. Conf. on Modern Power Sys. (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania, 18-21 May 2015
- [12] Slangen T.M.H., Lustenhouwer B.R.F., Čuk V., Cobben J.F.G., The effects of high-frequency residual currents on the operation of residual current devices. *19th Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'21)*, Almeria, Spain, 28-30 July 2021
- [13] Sutaria J., Espin-Delgado A., Rönberg S., Measurements and modeling of the frequency behavior of residual current devices- from 4 Hz to 40 kHz. *Electric Power Systems Research*, 209 (2022), 108052, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108052>
- [14] Shopov Y., Filipova-Petrakieva S., Boychev B., Investigation of residual current devices in high frequencies. *10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Sozopol, Bulgaria, 11-14 September 2018
- [15] Czapp S., Tariq H., Tripping of F-type RCDs for sinusoidal residual current with superimposed smooth DC component, *2022 International Conference ELEKTRO (ELEKTRO)*, Kraków, Poland, 23-26 May 2022, <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO53996.2022.9803395>
- [16] Czapp S., Tariq H., Cieslik S., Behavior of residual current devices at earth fault currents with DC component, *Sensors*, 22 (2022), 8382, <https://doi.org/10.3390/s2218382>
- [17] PN-HD 60364-6:2016-07 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzenie
- [18] Czapp S., Fault loop impedance measurement in low voltage network with residual current devices, *Elektronika ir Elektrotehnika*, 122 (2012), nr 6, 109-112
- [19] Roskosz R., Jakubiuk K., Śwędrowski L., Świsulski D., Wołoszyk M., Ziółko M., Sposób i układ do pomiaru impedancji pętli zwarciowej w sieciach niskiego napięcia z wyłącznikami różnicowoprądowymi, Pat.221693, 2015
- [20] Katarzyński J., Olesz M., Pomiar impedancji pętli zwarciowej w instalacjach fotowoltaicznych dużych mocy z magazynowaniem energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 3, 25-27, doi:10.15199/48.2022.03.06
- [21] Kasperek M., Mezera D., Voltage quality parameters in LV distribution grids in dependence, on short circuit impedance, *22nd Int. Conf. Electricity Distribution*, Stockholm, 10-13 June 2013, <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0580>
- [22] Aigner M., Schmutzger E., Sigl Ch., Measurement of fault loop impedances in different low voltage network configurations, *Electrical Engineering Electronic Journal*, 2013, nr 1
- [23] Pedersen K.O.H., Nielsen A.H., Poulsen N.K., Short-circuit impedance measurement, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 150 (2003), nr 2, 169-174, <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20030193>
- [24] Neamt L., Neamt A., Chiver O., Improved procedure for earth fault loop impedance measurement in TN low-voltage network, *Energies*, 14 (2021), 205, <https://doi.org/10.3390/en14010205>
- [25] PN-EN 61557-3:2007 Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1000 V i stałych do 1500 V – Urządzenia przeznaczone do sprawdzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych – Część 3: Impedancja pętli zwarcia
- [26] Czapp S., Borowski K., Verification of safety in low-voltage power systems without nuisance tripping of residual current devices, *Electric Power Systems Research*, 172 (2019), 260-268, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.027>
- [27] Borowski K., Czapp S., Pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi selektywnymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), nr 2, 289-292, doi:10.15199/48.2023.02.60