

**BADANIE DZIAŁANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH
PRZY CZĘSTOTLIWOŚCIACH PRĄDU RÓŻNICOWEGO MNIJSZYCH NIŻ 50 HZ**Stanisław CZAPP¹, Łukasz KAŁKA¹1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-13-98 e-mail: stanislaw.czapp@pg.gda.pl

Streszczenie: Zdecydowana większość powszechnie stosowanych wyłączników różnicowoprądowych jest przystosowana do wykrywania prądu różnicowego o częstotliwości 50/60 Hz. Układ detekcji prądu różnicowego i wyzwalania wyłącznika jest wrażliwy na zmianę częstotliwości i bywa tak, że wyłącznik w ogóle nie reaguje na prądy różnicowe o częstotliwości znacznie odbiegającej od 50/60 Hz. W artykule przedstawiono wyniki badań działania wyłączników różnicowoprądowych przy częstotliwościach prądu różnicowego mniejszych niż 50 Hz. Badania wykazały, że próg zadziałania wyłączników różnicowoprądowych może silnie wzrastać wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości tego prądu.

Słowa kluczowe: częstotliwość prądu, ochrona przeciwporażeniowa, wyłączniki różnicowoprądowe

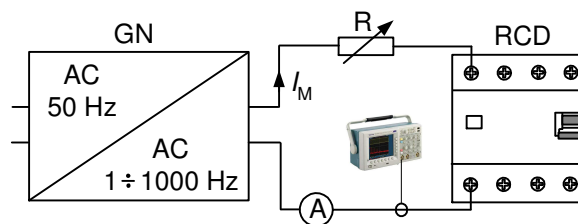
1. WPROWADZENIE

Wyłączniki różnicowoprądowe są obecnie bardzo szeroko stosowane, a instalowanie ich w niektórych obwodach jest obligatoryjne [1]. Z pewnością przyczyniają się one do polepszenia bezpieczeństwa w instalacjach elektrycznych [2], jednakże w pewnych warunkach nie działają poprawnie, co może doprowadzić do braku skutecznej ochrony przeciwporażeniowej. Poprawne działanie wyłącznika różnicowoprądowego zależy m.in. od właściwego jego doboru z punktu widzenia zdolności do wykrywania kształtu przebiegu i częstotliwości prądu różnicowego. Dotychczasowe badania wyłączników różnicowoprądowych [2-13] skupiały się przede wszystkim na ocenie wpływu podwyższonej częstotliwości prądu różnicowego oraz odkształcenia prądu różnicowego na próg zadziałania wyłączników różnicowoprądowych. Brak jest prac, w których szczegółowo analizuje się działanie tych zabezpieczeń przy małych częstotliwościach prądu różnicowego. W kolejnych punktach przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wyłączników różnicowoprądowych oraz ocenę ich czułości na prądy różnicowe o częstotliwościach mniejszych niż 50 Hz.

2. BADANIE DZIAŁANIA WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH

Badanie rzeczywistego prądu zadziałania wyłączników różnicowoprądowych przeprowadzono w układzie, jak na rysunku 1. Generator napięcia GN umożliwiający

wymuszanie przebiegów o częstotliwości w zakresie (1÷1000) Hz połączono z jednym biegunem wyłącznika różnicowoprądowego RCD, a z drugim biegunem rezystorem R o płynnie regulowanej rezystancji zwiększając wartość prądu różnicowego I_M aż do zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego. Jego próg zadziałania odczytywano z wykorzystaniem odpowiedniego amperomierza i oscyloskopu cyfrowego.



Rys. 1. Schemat układu do badania działania wyłączników różnicowoprądowych

Badaniom poddano kilkadziesiąt wyłączników różnicowoprądowych. Były to wyłączniki o następujących typach wyzwalania:

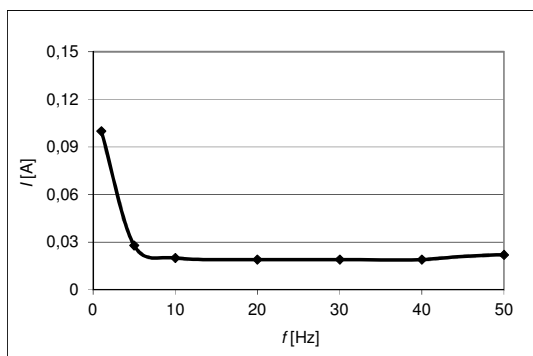
- AC – wyłączniki reagujące na prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz) – najbardziej rozpowszechnione w Polsce,
- A – wyłączniki reagujące na prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz) oraz na prąd pulsujący stały,
- B – wyłączniki reagujące na te same prądy co wyłączniki typu A, a ponadto na prąd stały wygładzony oraz prąd przemienny sinusoidalny o częstotliwości nieprzekraczającej 1000 Hz.

Prądy pomiarowe wymuszano w zakresie częstotliwości (1÷50) Hz. Przykładowe wyniki badań wyłączników różnicowoprądowych o $I_{\Delta n} = 30$ mA przedstawiono na rysunkach od 2 do 11. Wyłączniki typu AC: RCD1 (rys. 2) i RCD4 (rys. 3) w zakresie częstotliwości (10÷50) Hz charakteryzują się zbliżonym prądem zadziałania, który nie przekracza 30 mA. Poniżej 10 Hz prąd zadziałania wrasta i przy częstotliwości 1 Hz wynosi około 100 mA czyli ponad trzykrotnie przekracza znamionowy prąd różnicowy zadziałania. Kolejne badane wyłączniki różnicowoprądowe typu AC (RCD3, RCD5, RCD6 –

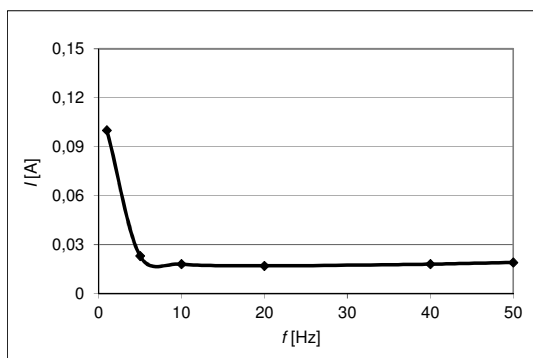
rysunki odpowiednio 4, 5 i 6) wykazują wyraźnie gorsze własności niż wyłączniki RCD1 i RCD4. Zauważa się wyraźny wzrost prądu zadziałania wraz ze zmniejszaniem częstotliwości, a poniżej 10 Hz wyłączniki te w ogóle nie wyzwały.

Wyłączniki typu A przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz zachowują się dość podobnie jak wyłączniki typu AC. W przypadku wyłączników RCD15 (rys. 7) i RCD16 (rys. 8) przy obniżaniu częstotliwości do 10 Hz prąd zadziałania rośnie nieznacznie. Poniżej tej częstotliwości wzrasta gwałtownie. Inne wyłączniki typu A (RCD12 i RCD14 – rysunki odpowiednio 9 i 10) są bardziej wrażliwe na obniżenie częstotliwości.

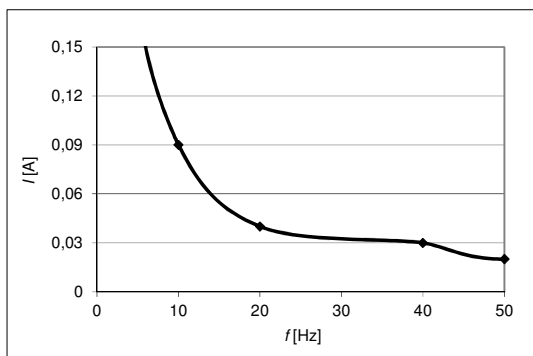
Jedynym wyłącznikiem różnicowoprądowym działającym poprawnie w badanym zakresie częstotliwości jest wyłącznik typu B (RCD20) o charakterystyce przedstawionej na rysunku 11 (charakterystyka $I_{\Delta n}$).



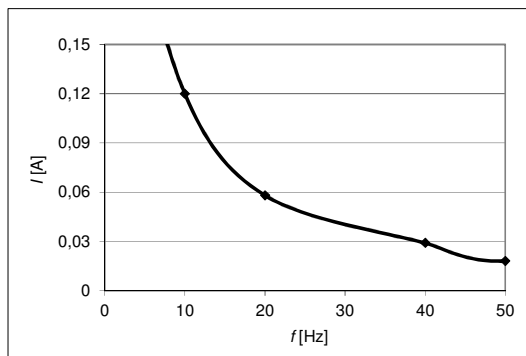
Rys. 2. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD1 (typu AC, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 1) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



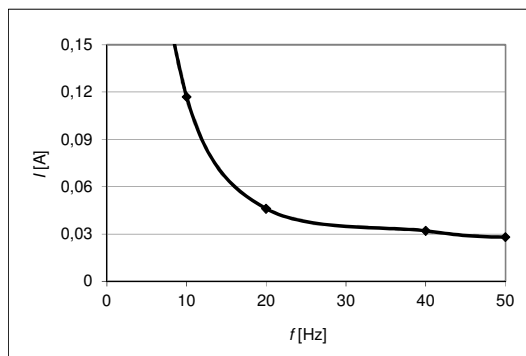
Rys. 3. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD4 (typu AC, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 2) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



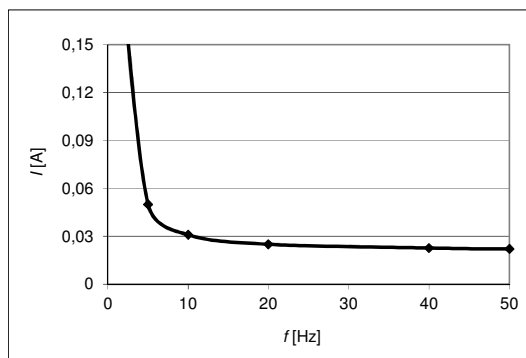
Rys. 4. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD3 (typu AC, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 2) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



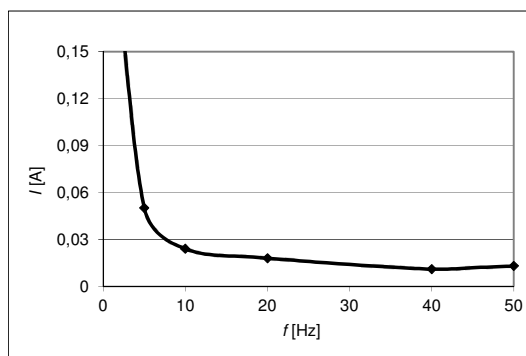
Rys. 5. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD5 (typu AC, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 3) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



Rys. 6. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD6 (typu AC, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 4) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



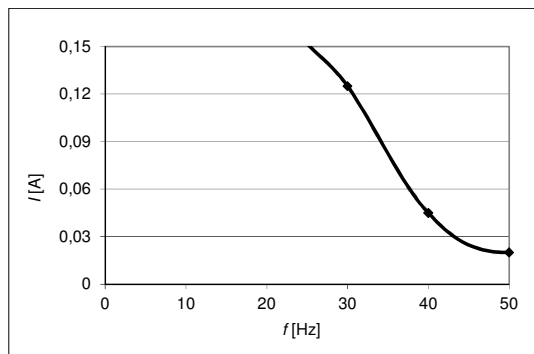
Rys. 7. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD15 (typu A, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 2) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



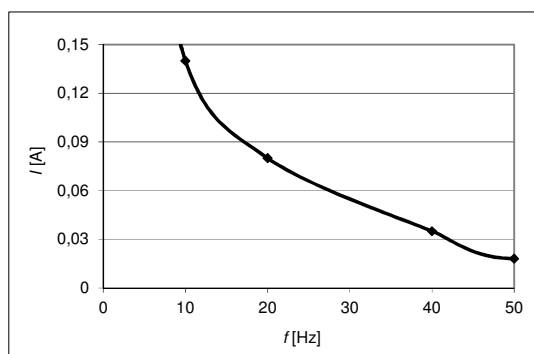
Rys. 8. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD16 (typu A, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 4) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz

Należało się tego spodziewać, ponieważ poprawnego działania aż do częstotliwości 1000 Hz wymaga od tych

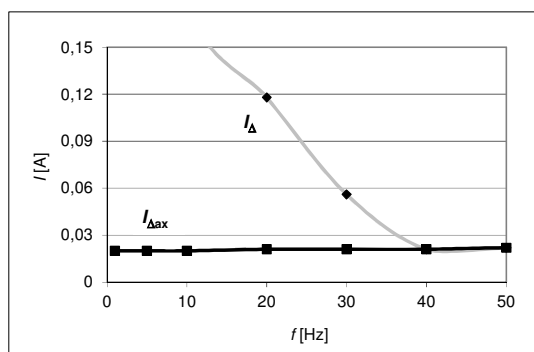
wyłączników norma [14]. Należy jednak zwrócić uwagę, że prawidłowe działanie tego typu wyłączników jest uwarunkowane obecnością napięcia pomocniczego. Jeżeli brak jest tego napięcia, to przy zmniejszaniu częstotliwości prądu różnicowego prąd zadziałania silnie rośnie (charakterystyka I_{Δ}).



Rys. 9. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD12 (typu A, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 1) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz



Rys. 10. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD14 (typu A, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 2) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz

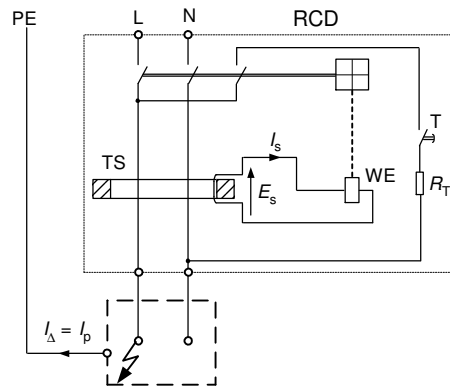


Rys. 11. Prąd zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego RCD20 (typu B, $I_{\Delta n} = 30$ mA, producent 1) przy częstotliwościach prądu różnicowego z zakresu (1÷50) Hz. Linia I_{Δ} – działanie bez zasilania pomocniczego, linia $I_{\Delta ax}$ – działanie z zasilaniem pomocniczym

3. PRZYCZYNY WZROSTU PRĄDU ZADZIAŁANIA

Głównymi elementami wyłącznika różnicowoprądowego odpowiedzialnymi za detekcję prądu różnicowego i wyzwalanie są (rys. 12):

- przekładnik sumujący,
- wyzwalacz różnicowy.



Rys. 12. Budowa wyłącznika różnicowoprądowego. TS – przekładnik sumujący, WE – elektromechaniczny wyzwalacz różnicowy, R_T – rezystancja w obwodzie testowym, T – przycisk TEST, E_s – napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym, I_p – prąd pierwotny (różnicowy), I_s – prąd wtórny

Częstotliwość prądu różnicowego wpływa na oba te elementy i zasadniczo to one są odpowiedzialne za charakterystyki prądu zadziałania wyłączników różnicowoprądowych w funkcji częstotliwości prądu różnicowego.

Zadaniem przekładnika sumującego TS jest wytworzenie w obwodzie wtórnym prądu I_s zapewniającego pobudzenie wyzwalacza różnicowego. Prąd ten zależy m.in. od napięcia indukowanego E_s w uzwojeniu wtórnym przekładnika. Napięcie indukowane przy przepływie sinusoidalnego prądu różnicowego jest określone następującą zależnością:

$$E_s = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot B \cdot S_{Fe} \quad (1)$$

gdzie:

- f – częstotliwość prądu różnicowego,
- N_s – liczba zwojów uzwojenia wtórnego,
- Φ – strumień magnetyczny w rdzeniu przekładnika,
- B – indukcja magnetyczna w rdzeniu przekładnika,
- S_{Fe} – przekrój poprzeczny rdzenia.

Z zależności tej wynika, że przy niezmiennych wartościach innych wielkości, napięcie wtórne w stanie jałowym jest proporcjonalne do częstotliwości. Przy znamionowym prądzie różnicowym o częstotliwości mniejszej niż znamionowa napięcie indukowane nie osiąga dostatecznie dużej wartości. Przy częstotliwości prądu różnicowego równej 1 Hz powinno następować praktycznie 50-krotne zmniejszenie napięcia indukowanego w stosunku do wartości osiąganego przy 50 Hz.

Częstotliwość prądu różnicowego ma również wpływ na wartość impedancji elementów znajdujących się w obwodzie wtórnym przekładnika. Zmiana reaktancji obwodu wtórnego X_L , zgodnie ze znaną zależnością, jest proporcjonalna do zmiany częstotliwości:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (2)$$

Zmniejszenie reaktancji powinno spowodować zwiększenie wartości prądu wtórnego (w stosunku do warunków przy częstotliwości 50 Hz), co jest korzystne. Niestety, malejąca wartość napięcia indukowanego nie zawsze jest rekompensowana zmniejszoną impedancją obwodu

wtórnego przekładnika i prąd zadziałania wyłącznika może silnie wrastać. Wpływ na to ma konstrukcja przekładnika, wyzwalacza różnicowego oraz obecność dodatkowych elementów elektronicznych w obwodzie wtórnym.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych badań prądu zadziałania wyłączników różnicowoprądowych w funkcji częstotliwości prądu różnicowego można wywnioskować, że przy częstotliwościach mniejszych niż 50 Hz czułość tych zabezpieczeń może znacznie pogarszać się, zarówno w przypadku wyłączników typu AC, jak i typu A. W skrajnych przypadkach wyłączniki mogą w ogóle nie reagować na prąd różnicowy wielokrotnie większy od znamionowego prądu różnicowego zadziałania wyłącznika, co sprawia, że ochrona przeciwporażeniowa może być nieskuteczna. Wykorzystanie wyłączników różnicowoprądowych do ochrony przeciwporażeniowej w obwodach, w których częstotliwość prądu różnicowego może być mniejsza niż 50 Hz wymaga zastosowania aparatów o znanej i korzystnej charakterystyce prądu zadziałania w funkcji częstotliwości prądu różnicowego.

5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-HD 60364-4-41:2009 (wersja polska) Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
2. Czapp S.: Wyłączniki różnicowoprądowe w ochronie przeciwporażeniowej przy odkształconym prądzie różnicowym. Seria Monografie, nr 99, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2009, 184 s. ISBN 978-83-7348-287-6.
3. Czaja P., Borowik P.: The influence of frequency converters on the release threshold of Residual Current Devices. *Elektronika*, 2015, nr 12, s. 37-40.
4. Czapp S.: The impact of higher-order harmonics on tripping of residual current devices. *Int. Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*, Poznan, Poland, 2008. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635569.
5. Czapp S.: The effect of earth fault current harmonics on tripping of residual current devices. *Int. School on*
6. Czapp S.: Comparison of residual current devices tripping characteristics for selected residual current waveforms. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 2010, nr 4, s. 7-10.
7. Grünebast G.: Allstromsensitive Fehlerstromschutzeinrichtungen. Teil 2: Vorschriftsmässiger Einsatz, *Elektropraktiker*, 2008, vol. 62, nr 2, 144-149.
8. Lee T. M., Chan T. W.: The effects of harmonics on the operational characteristics of residual current circuit breakers. *Int. Conf. on Energy Management and Power Delivery, Proc. of EMPD'95*, vol. 2, Nov. 1995, s. 715-719. DOI: 10.1109/EMPD.1995.500786.
9. Luo X., Du Y., Wang X. H., Chen M. L.: Tripping characteristics of residual current devices under nonsinusoidal currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, vol. 47, nr 3, s. 1515-1521. DOI: 10.1109/TIA.2011.2125939.
10. Featherstone A.M., Sastrosubroto A.S.: An examination of RCD performance during system disturbances. *IEE Colloquium on Safeguarding Industrial Plant During Power System Disturbances*, 1989.
11. Freschi F.: High-frequency behavior of residual current devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, nr 3, s. 1629-1635. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2191423.
12. Roldan-Porta C., Escriva-Escriva G., Cárcel-Carrasco F. J., Roldan-Blay C.: Nuisance tripping of residual current circuit breakers: A practical case. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 106, s. 180-187. DOI:10.1016/j.epsr.2013.07.020.
13. Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Kowalak R., Lubośny Z., Małkowski R.: Detection of high frequency current components by residual current devices. *The Sixteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2014*, Annecy, France, 25-28.05.2014.
14. IEC/TR 60755:2008 General requirements for residual current operated protective devices. 2nd edition.

TESTING OF RESIDUAL CURRENT DEVICES UNDER RESIDUAL CURRENT AT FREQUENCIES LOWER THAN 50 HZ

The majority of commonly used residual current devices is designed for detection the residual current with frequency of 50/60 Hz. Detecting and tripping system of residual current devices is sensitive to the change in frequency and it happens that they do not respond to the residual current when the frequency is significantly different from 50/60 Hz. The paper presents the results of a study of tripping characteristics of residual current devices at frequencies lower than 50 Hz. The study has shown that the tripping threshold of residual current devices may strongly increase with decreasing frequency of residual current.

Keywords: current frequency, protection against electric shock, residual current devices