

doi:10.15199/48.2016.01.21

Skuteczność działania zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD w układach napędowych z falownikiem napięcia PWM

Streszczenie. W artykule opisano wpływ wartości częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego oraz częstotliwości kluczenia falowników PWM na skuteczność działania wyłączników RCD włączonych w obwody zasilania napędów elektrycznych. Pokazano przebiegi prądów różnicowych dla różnych wartości częstotliwości kluczenia tranzystorów falownika. Przeprowadzono próby skuteczności działania kilkunastu wyłączników RCD włączonych w obwód zasilania napędu. Pokazano wpływ konstrukcji wyłączników RCD na zakres częstotliwościowy wyzwalania. Wskazano problemy związane z zastosowaniem typowych wyłączników RCD jako środka ochrony przeciwporażeniowej w obwodach z falownikami PWM.

Abstract. Influence of the first harmonic frequency and switching frequency of the PWM inverters on operation effectiveness of the Residual Current Devices switched into electrical drives are described in this paper. Waveforms of the leakage currents for different switching frequency and first harmonic frequency of the inverter are shown. Testes of effectiveness of more than ten RCD-s into the supply line of the inverter are performed. Influence of the RCD-s structure on operation range are described. The problems of the typical RCD-s applications in the electrical circuits with PWM inverters, as a protective equipments against electric shock are indicated. (**Operation Effectiveness of Residual Current Protective Devices in Electrical Drives with PWM Voltage Inverter**)

Słowa kluczowe: napęd elektryczny z falownikiem PWM, wyłącznik RCD, skuteczność ochrony

Keywords: electrical drive with PWM inverter, RCD switch, effectiveness of protective

Wstęp

Układy napędowe z silnikiem asynchronicznym klatkowym są w obecnym czasie najpopularniejszymi przemysłowymi napędami elektrycznymi. Implementacja nowoczesnych metod sterowania silnikiem klatkowym wymaga zastosowania w napędach przemienników częstotliwości. Przeмиenniki składają się najczęściej z prostownika diodowego, obwodu pośredniczącego napięcia stałego z kondensatorem o dużej pojemności oraz tranzystorowego falownika napięcia sterowanego metodą modulacji szerokości impulsów (PWM – Pulse Width Modulation). Zastosowanie falowników PWM umożliwia wykorzystanie różnych metod regulacji prędkości lub momentu silnika. Od najprostszych metod skalarnych ($U/f = \text{const}$) [1], poprzez metody orientacji względem wektora pola (FOC – Field Oriented Control) [1], do metody bezpośredniego sterowania momentem (DTC – Direct Torque Control) [1], czy metody opartej na modelu multiskalarnym silnika asynchronicznego (MM – Multiscalar Model) [2]. W każdej z tych metod sterowania, falownik generuje trójfazowe napięcie wyjściowe o częstotliwości pierwszej harmonicznej odpowiadającej aktualnie wymaganej prędkości wirowania pola w stojanie silnika. Napięcie to ma charakter ciągu prostokątnych impulsów o częstotliwości rzędu od kilku do kilkunastu kiloherców i amplitudzie równej wartości napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym oraz zmiennej szerokości i biegunowości. Stromość narastania i opadania impulsów napięciowych PWM znacznie przekracza wartości 1000V/μs. Zawartość niższych harmonicznych napięć wyjściowych falownika silnie zależy od częstotliwości kluczenia. Impulsowy charakter napięć wyjściowych falownika powoduje, że suma chwilowych napięć fazowych zasilanego silnika jest różna od zera. Dodatkowo niekorzystnym zjawiskiem jest odkształcenie prądu wejściowego prostownika diodowego.

Niesymetria zasilania objawia się pojawieniem napięcia niezrównoważenia w punkcie neutralnym uzwojeń stojana oraz napięć wałowych i łożyskowych. Napięcia te wywołują przepływ prądów wałowych i łożyskowych oraz prądów upływu w przewodzie ochronnym. W pracy [3] opisano powstawanie zaburzeń wywołanych asymetrią zasilania oraz powstawanie zakłóceń elektromagnetycznych związanych z działaniem falowników PWM, a także przeanalizowano przebiegi prądu ziemnozwarciowego w

obwodzie silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości w zależności od częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM oraz od częstotliwości kluczenia tranzystorów. Autorzy pracy [5] przeprowadzili pomiary prądu upływowego w przewodach ochronnych falownika PWM i silnika indukcyjnego. W pracy [6] pokazano wyniki badań skuteczności działania wyłączników RCD w napędach z falownikami PWM.

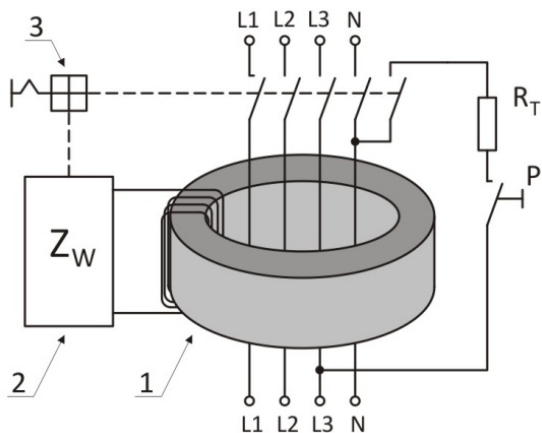
Wpływ konstrukcji wyłączników różnicowoprądowych na zakres częstotliwościowy wyzwalania

Najpopularniejszym obecnie środkiem ochrony przeciwporażeniowej uzupełniającej jest wyłącznik różnicowoprądowy RCD o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} \leq 30mA$. Najistotniejszym elementem wyłącznika RCD jest przekładnik sumujący, decydujący o progu zadziałania oraz o uzyskaniu niezbędnej energii do wyzwolenia wyłącznika (rys. 1). O wymaganym poziomie prądu w obwodzie wtórnym przekładnika decyduje wartość zmian indukcji magnetycznej w jego rdzeniu, jaką wywołuje prąd różnicowy o określonym kształcie i częstotliwości. W obwodzie wtórnym przekładnika sumującego często montowane są dodatkowe elementy elektroniczne zapewniające zwłokę czasową lub eliminujące zbędne wyłączenia w przypadku krótkich impulsów prądowych.

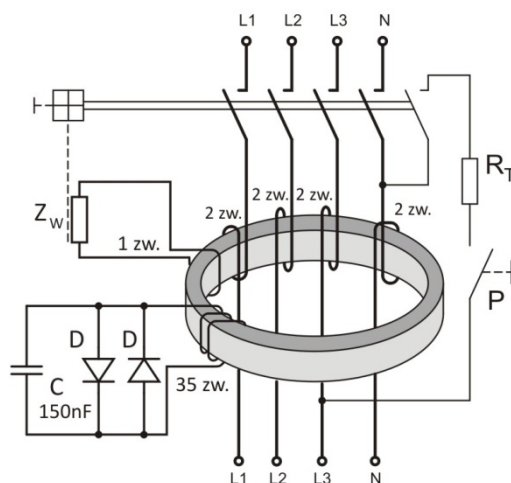
W produkowanych obecnie seryjnie wyłącznikach RCD ze względów ekonomicznych, coraz częściej wykorzystuje się na rdzenie przekładników sumujących, materiały magnetyczne o stosunkowo niskiej początkowej przenikalności magnetycznej. W związku z tym, dla zagwarantowania prawidłowego progu wyzwalania, stosuje się w obwodzie wtórnym przekładnika dopasowanie impedancyjne, uzyskując wydzielenie maksymalnej mocy w wyzwalaczu elektromagnetycznym.

Zastosowanie urządzeń energoelektronicznych w instalacjach elektrycznych generuje powstawanie prądów różnicowych w szerokim zakresie częstotliwości. W niektórych przypadkach w przebiegu płynącego prądu różnicowego dominującymi mogą być składowe zawierające wyższe harmoniczne. W napędach elektrycznych z falownikami PWM dominujące składowe prądu różnicowego mogą mieć częstotliwości rzędu kilku Hz. W przypadku wyłączników z układem dopasowania

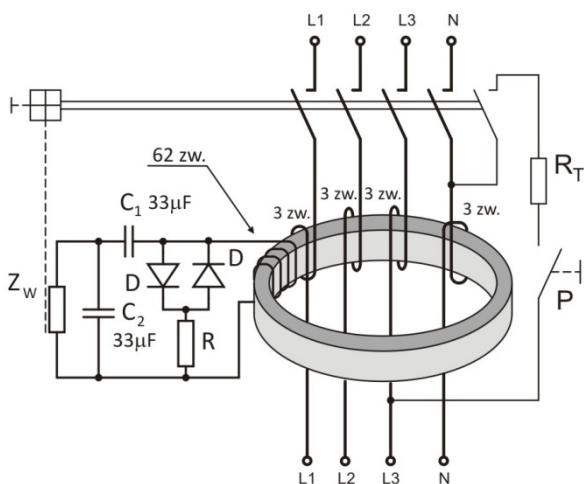
mocowego, dla częstotliwości prądów różnicowych daleko odbiegających od 50Hz, można spodziewać się nieprawidłowego ich działania. Na rysunku 2 i 3 pokazano przykładowe schematy, wybranych do badań, wyłączników RCD typu A oraz AC różnych producentów z obwodami dopasowania mocowego.



Rys. 1. Konstrukcja wyłącznika RCD o działaniu niezależnym od napięcia instalacji: 1 – przekładnik prądowy sumujący, 2 – obwód elektromagnetycznego wyzwalacza o odpadającej zworze, 3 – mechanizm zatraskowy styków, P – przycisk testu, R_T – rezystor testowy



Rys. 3. Schemat wyłącznika RCD – producent 2, $I_n = 25$ A, $I_{\Delta n} = 30$ mA, typ AC



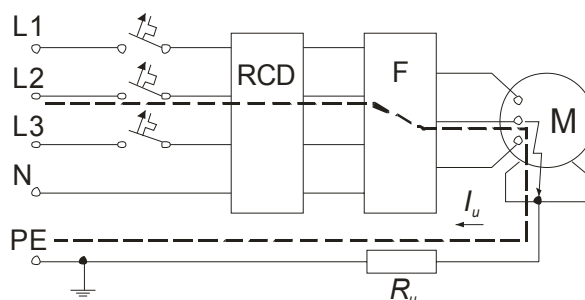
Rys. 2. Schemat wyłącznika RCD – producent 1, $I_n = 40$ A, $I_{\Delta n} = 30$ mA, typ A

Z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika typowych układów napędowych z przemiennikami częstotliwości istotnym staje się próg zadziałania wyłączników RCD dla częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika o wartościach równych i niższych od 50Hz, czyli w warunkach najczęściej spotykanych w napędach z regulowaną prędkością. Istotną jest również zależność prądu wyzwolenia wyłącznika RCD od częstotliwości kluczkowania tranzystorów falownika PWM.

Próby skuteczności wyzwalań wyłączników RCD w obwodzie z falownikiem PWM

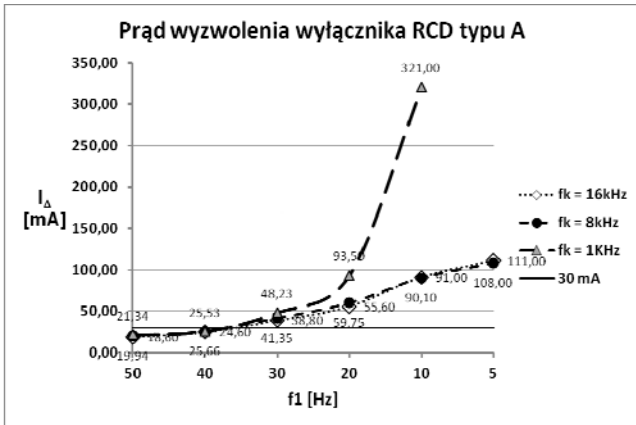
W układzie pomiarowym z falownikiem PWM zasilającym silnik asynchroniczny o mocy 4kW zmierzono prądy wyzwolenia wyłączników RCD wymuszając przepływ prądu różnicowego za pomocą opornika dekadowego włączonego pomiędzy jedną z faz silnika, a przewodem ochronnym PE.

Schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 4. Pomiarów dokonano dla kilkunastu wybranych wyłączników RCD typu AC i A o różnych konstrukcjach układu wyzwalań i różnych producentów. Podczas pomiarów, częstotliwość pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM f_1 ustawiano na 5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz i 50Hz. Częstotliwość kluczkowania zaworów falownika PWM f_k ustawiano na 16kHz, 8kHz i 1kHz. Wyniki pomiarów przykładowego wyłącznika RCD typu A pokazano na rysunku 5, natomiast na rysunku 6 wyniki pomiarów wyłącznika RCD typu AC. Otrzymane wyniki wskazują na silną zależność prądu wyzwalań wyłącznika od częstotliwości kluczkowania zaworów falownika PWM. Powodem tego jest wysoka zawartość niższych harmonicznych w prądzie różnicowym przy niewielkich wartościach częstotliwości kluczkowania. Prąd wyzwalań zwiększa się wraz ze zmniejszaniem częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika osiągając poniżej 40Hz wartości nie zapewniające wymaganego poziomu ochrony przeciwporażeniowej. Wartość skuteczną prądu wyzwolenia wyłącznika mierzono za pomocą miernika True RMS o maksymalnym zakresie częstotliwości 100kHz.

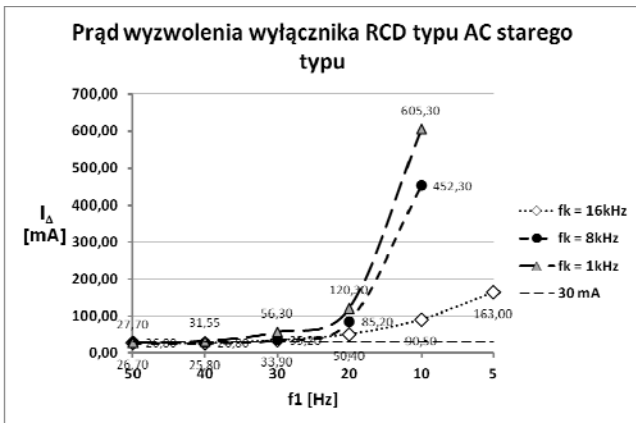


Rys. 4. Schemat blokowy układu pomiarowego [6]

Na rysunku 7 pokazano przebieg czasowy prądu różnicowego w przewodzie ochronnym pomiędzy silnikiem, a falownikiem, dla częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego $f_1 = 30$ Hz przy częstotliwości kluczkowania falownika $f_k = 1$ kHz, natomiast na rysunku 8 dla $f_1 = 30$ Hz i $f_k = 8$ kHz. Wyraźnie widoczny jest impulsowy charakter prądu upływu w przewodzie ochronnym.

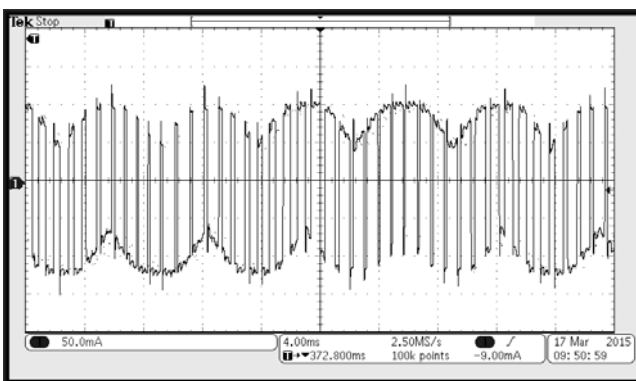


Rys. 5. Zależność prądu wyzwolenia wyłącznika RCD typu A od częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM



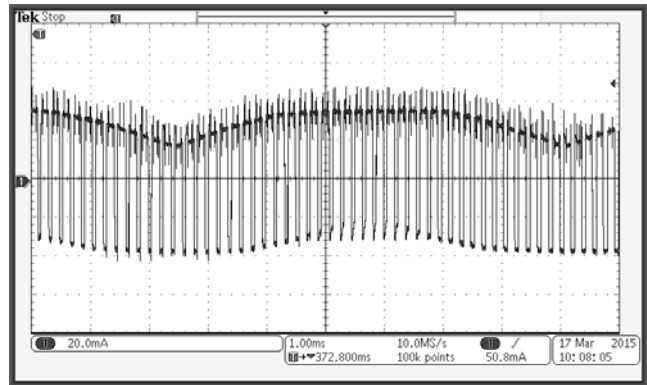
Rys. 6. Zależność prądu wyzwolenia wyłącznika RCD typu AC od częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM

Zastosowanie w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego elementów elektronicznych zapewniających zwłokę czasową lub eliminujących zbędne wyłączenia, w przypadku krótkich impulsów prądowych (rys. 2 i rys. 3), powoduje brak reakcji wyłącznika przy wyższych częstotliwościach kluczowania falownika PWM.



Rys. 7. Przebieg prądu różnicowego dla $f_1 = 30\text{Hz}$ i częstotliwości kluczowania falownika PWM $f_k = 1\text{kHz}$

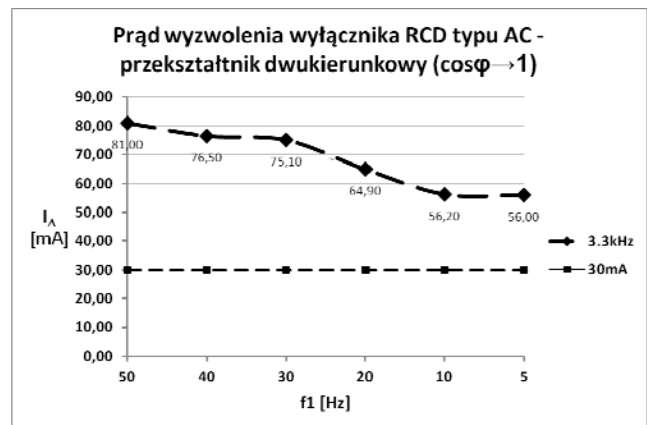
Przebiegi prądu upływu w przewodzie ochronnym są zmodulowane amplitudowo harmonicznymi częstotliwości podstawowej napięcia wyjściowego falownika.



Rys. 8. Przebieg prądu różnicowego dla $f_1 = 30\text{Hz}$ i częstotliwości kluczowania falownika PWM $f_k = 8\text{kHz}$

Próby skuteczności wyzwalania wyłączników RCD w obwodzie z falownikiem PWM w układzie dwukierunkowego przemiennika częstotliwości

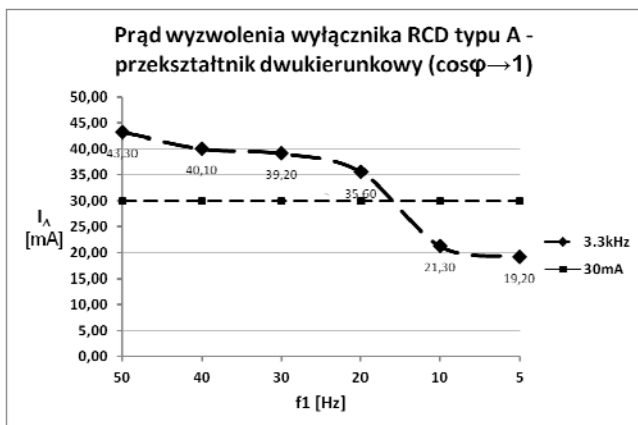
W ostatnich latach w napędach z silnikiem asynchronicznym zaczęto stosować przemienniki umożliwiające dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej. Zamiast prostownika diodowego, w urządzeniach tych stosuje się tranzystorowy prostownik sieciowy, który zbudowany jest w topologii analogicznej do falownika maszynowego. Taki układ przemiennika częstotliwości zapewnia nie tylko dwukierunkowy przepływ energii (hamowanie odzyskowe), ale również sterowanie wartością współczynnika mocy. Zapewnia to praktycznie sinusoidalny kształt prądów fazowych. Przekształtniki dwukierunkowe stosuje się jednak tylko w grupach napędów, gdzie jest to ekonomicznie uzasadnione. Należą do nich między innymi układy napędowe, gdzie występuje duży moment bezwładności wirujących mas (możliwe jest wtedy odzyskanie energii podczas hamowania) oraz napędy dźwigowe, a także generatory elektryczne pracujące ze zmienną prędkością obrotową (na przykład generatory w elektrowniach wiatrowych) [7], [8].



Rys. 9. Zależność prądu wyzwolenia wyłącznika RCD typu AC od częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM: $f_1 = 40\text{Hz}$, $f_k = 3,3\text{kHz}$ – falownik w układzie przemiennika dwukierunkowego pracującego przy $\cos\varphi \rightarrow 1$

Do pomiarów wykorzystano układ napędowy z przemiennikiem dwukierunkowym zasilającym silnik asynchroniczny o mocy 4kW. Podczas pomiarów częstotliwość pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM f_1 ustawiano na 5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz i 50Hz. Częstotliwość kluczowania zaworów falownika PWM f_k wynosiła na stałe 3,3kHz. Układ pomiarowy był połączony według rysunku 4. Do pomiaru prądu upływu

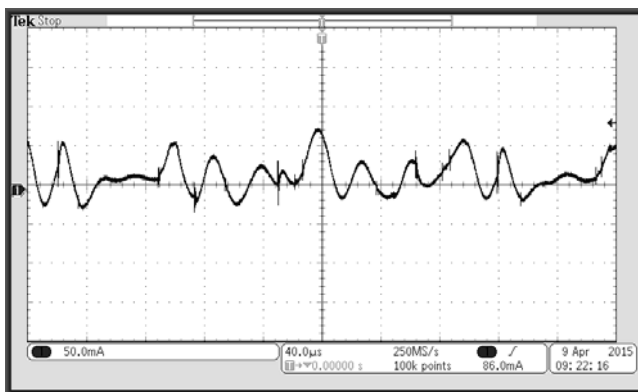
użyto miernika True RMS. Wyniki pomiarów prądów zadziałania przykładowych wyłączników RCD typu AC oraz A pokazano odpowiednio na rysunkach 9 i 10.



Rys. 10. Zależność prądu wyzwolenia wyłącznika RCD typu A od częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM $f_1 = 40\text{Hz}$ $f_k = 3,3\text{kHz}$ – falownik w układzie przemiennika dwukierunkowego pracującego przy $\cos\phi \rightarrow 1$

Na rysunkach 9 i 10 wyraźnie widać odwrotną tendencję zmian prądu wyzwalania wyłączników RCD w zależności od częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika PWM w stosunku do układu z przekształtnikiem, w którym od strony sieci zastosowano prostownik diodowy. Główną przyczyną tego zjawiska jest oddziaływanie trzeciej harmonicznej podstawowej częstotliwości napięcia wyjściowego falownika na układ dopasowania impedancyjnego w obwodzie wtórnym przekładnika.

Na rysunku 11 pokazano przykładowy przebieg prądu upływu w przewodzie PE dla układu napędowego z przekształtnikiem dwukierunkowym przy $\cos\phi \rightarrow 1$. Otrzymane przebiegi nie mają charakteru impulsowego.



Rys. 11. Przebieg prądu różnicowego dla częstotliwości kluczkowania falownika PWM $f_k = 3,3\text{kHz}$ oraz $f_1 = 40\text{Hz}$ – falownik w układzie przemiennika dwukierunkowego pracującego przy $\cos\phi \rightarrow 1$

Wnioski

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że prądy upływu, płynące w przewodzie ochronnym, będące wynikiem powstającego napięcia niezrównoważenia w punkcie zerowym obwodu z falownikiem PWM osiągają dla rezystancji ciała ludzkiego wartości wielokrotnie przewyższające wartości bezpieczne. Wartości tych prądów są zależne od częstotliwości kluczkowania falownika PWM

oraz od aktualnej wartości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika.

W przypadku przekształtników z prostownikiem diodowym od strony sieci zasilającej, wartości prądów zadziałania badanych wyłączników RCD wzrastają wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika, osiągając wartości wielokrotnie większe od wartości bezpiecznej przy niskich częstotliwościach f_1 . Wartości tych prądów zależą silnie od wartości częstotliwości kluczkowania falownika. Impulsowy charakter prądu upływu w przewodzie PE jest jedną z przyczyn braku wyzwolenia wyłączników RCD w chronionym obwodzie.

W układach przekształtników dwukierunkowych, z prostownikiem tranzystorowym od strony sieci, wartości prądów zadziałania badanych wyłączników RCD maleją wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika, osiągając wartości niższe od wartości bezpiecznej przy niskich częstotliwościach f_1 . Jedną z przyczyn tego zjawiska jest oddziaływanie układu dopasowania impedancyjnego w obwodzie wtórnym przekładnika.

Otrzymane wyniki badań potwierdzają niską skuteczność ochrony przeciwporażeniowej poprzez zastosowanie standardowych wyłączników RCD w obwodach instalacji, w których zastosowano falowniki sterowane metodą PWM. Wartości prądów wyzwalania wyłączników RCD otrzymane podczas badań układu napędowego z przekształtnikiem dwukierunkowym, również nie mieszczą się w dopuszczalnych granicach.

Autorzy:

dr inż. Paweł Czaja, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: czajap@el.pcz.czest.pl

dr inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: aj@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] Tunia H., Kaźmierkowski M.: *Automatic Control of Converter-Fed Drives*, (1994), PWN, Warszawa
- [2] Krzeźmiński Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*, (2001), Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk
- [3] Kempki A.: *Elektromagnetyczne zaburzenia przewodzone w układach napędów przekształtnikowych*, (2005), Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra
- [4] Czapp S.: *Wyłączniki różnicowoprądowe z ochronie przeciwporażeniowej przy odkształconym prądzie różnicowym*, (2009), Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk
- [5] Berkan W., Mazurek P., Michalski A., Pytlak A., Świątek H.: *Analiza prądów zasilania i prądów upływu w przewodach ochronnych przekształtnika częstotliwości z falownikiem tranzystorowym w układzie napędowym prądu przemiennego*, (2003), Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 217, Warszawa, ss. 93-107
- [6] Czaja P., Jąderko A.: *Wpływ prądów upływu w przewodach ochronnych przekształtników z falownikiem PWM na działanie zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD*, (2013), Przegląd Elektrotechniczny 12/2013, ss. 203-206
- [7] Krzeźmiński Z., Pietryka J., Szewczyk J., Włas M.: *Przekształtniki dwukierunkowe ze zwrotem energii do sieci*, (2005), Napędy i sterowanie, nr 6/2009, ss. 56-61
- [8] Krzeźmiński Z.: *Konstrukcje i regulacja energooszczędnych układów napędowych z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników napięcia*, (2011), Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, nr 05/2011, ss. 75-81