

Dokładność transformacji harmonicznycy prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki prądowe

Streszczenie. Podstawowym czynnikiem powodującym zwiększenie wartości błędów prądowego i kątownego dla transformacji składowych wyższych częstotliwości jest zjawisko dodatkowego odkształcenia prądu wtórnego przez indukcyjny przekładnik prądowy wynikające z nieliniowości charakterystyki magnesowania jego rdzenia magnetycznego. Głównym celem tego artykułu jest potwierdzenie, że dostępne na rynku indukcyjne przekładniki prądowe mogą zapewniać dokładną transformację wyższych harmonicznycy pierwotnego prądu odkształconego.

Abstract. The primary factor causing the increase in the values of current error and phase displacement for the transformation of higher frequency components is the phenomenon of additional distortion of the secondary current by the inductive current transformer. It results from the non-linearity of the magnetization characteristics of its magnetic core. The main purpose of this article is to confirm that the inductive current transformers available on the market can ensure accurate transformation of distorted current harmonics. (The application of power sources with a wide operating frequency range in test systems intended for testing the accuracy of current transformers).

Słowa kluczowe: harmoniczne, prąd odkształcony, dodatkowe odkształcenie prądu wtórnego, przekładnik prądowy.

Keywords: harmonics, distorted current, current distortion, additional distortion of secondary current, current transformer.

Wstęp

Indukcyjne przekładniki są powszechnie stosowanymi urządzeniami w elektroenergetycznych układach pomiarowych i zabezpieczeniowych. Występowanie w sieci elektroenergetycznej wyższych harmonicznycy napięć i prądów stwarza konieczność opracowania nowych wymagań dotyczących dokładności przekładników [1–7]. Niesinusoidalne przebiegi prądów i napięć mogą być przyczyną nieprawidłowych pomiarów rozliczeniowych mocy czynnej i bierniej. W artykule [1] zaproponowano rozszerzenie klas dokładności dla przekładników prądowych, uwzględniając wymagania w zakresie dokładności transformacji wyższych harmonicznycy. Podstawowym czynnikiem powodującym wzrost wartości błędów prądowego i kątownego dla transformacji składowych wyższych częstotliwości jest zjawisko dodatkowego odkształcenia prądu wtórnego przez indukcyjny przekładnik prądowy wynikające z nieliniowości charakterystyki magnesowania jego rdzenia magnetycznego [8–10]. Pierwszym etapem oceny dokładności indukcyjnego przekładnika prądowego jest sprawdzenie jego właściwości metrologicznych podczas transformacji prądu sinusoidalnego zgodnie z normą PN-EN / IEC 61869-2 lub IEEE C57.13 [11,12]. Dotychczas opublikowano wiele artykułów dotyczących sposobów i układów pomiarowych do sprawdzania dokładności przekładników w szerokim zakresie częstotliwości [13–17]. Aktualne normy PKN, IEC i IEEE nie wskazują metodyki wyznaczania błędów indukcyjnych przekładników dla transformacji prądów odkształconych i sygnałów wyższej częstotliwości niż 50 Hz / 60 Hz. W normie PN-EN / IEC 61869-6 określono jedynie dodatkowe wymagania dla przekładników małej mocy w zakresie dokładności transformacji harmonicznycy [18]. Norma PN-EN / IEC 61869-10 zawiera te wymagania dla pasywnych przekładników prądowych małej mocy [19]. W raporcie technicznym IEC 61869-103 opisano ograniczenia eksploatacyjne wynikające z zastosowania przekładników do oceny jakości energii elektrycznej [20]. W tym dokumencie przedstawiona została koncepcja układów pomiarowych do sprawdzania dokładności przekładników w szerokim zakresie częstotliwości. Kolejny problem stanowi dobór odpowiedniego źródła zasilania umożliwiającego generację prądu odkształconego zawierającego określone wartości skuteczne wyższych harmonicznycy. Jednym

z proponowanych w literaturze rozwiązań jest system probierczy składający się ze wzmacniacza audio, generatora arbitralnego i transformatora wielkoprądowego [21–27]. Konieczne jest wtedy zastosowanie przekładnika wzorcowego przeznaczonego do dokładnej transformacji prądów odkształconych. Ponadto, możliwe jest przeprowadzenie badań dokładności w szerokim zakresie częstotliwości przez przetłowe przekładniki prądowe w warunkach amperozwojów znamionowych [28–32]. W tym przypadku wykonuje się dodatkowe uzwojenie pierwotne o takiej samej liczbie zwojów jak uzwojenie wtórne. Pomiaru wykonuje się porównując prądy o tej samej wartości znamionowej przepływające w uzwojeniach dodatkowym i wtórnym.

W tym artykule przedstawiono porównanie wartości błędów prądowego i kątownego dwóch indukcyjnych przekładników prądowych dla transformacji harmonicznycy prądów odkształconych. Pierwszy z nich klasy 0,2 jest wykonany z rdzeniem toroidalnym z permaloju Ni80Fe20, a drugi klasy 0,5 ze stali transformatorowej [33–35]. Ponadto, porównano procentowe wartości generacji własnej wyższych harmonicznycy w przypadku obu badanych przekładników. Zjawisko to wynika z nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego, co powoduje dodatkowe odkształcenia prądu wtórnego. Dlatego, podczas transformacji prądu sinusoidalnego w prądzie wtórnym pojawiają się wyższe harmoniczne niższego rzędu. W przypadku transformacji prądu odkształconego, w wyniku tego samego zjawiska, następuje zmiana wartości skutecznych wyższych harmonicznycy niskiego rzędu. Najważniejszym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych badań jest to, że indukcyjny przekładnik prądowy może zapewniać szerokopasmową dokładność konieczną do dokładnej transformacji prądu odkształconego. Dlatego sprawdzone jednostki mogą zostać zastosowane w układach do pomiaru mocy odkształconej i oceny jakości energii.

Układ pomiarowy i przedmiot badań

Badania dokładności transformacji harmonicznycy prądu odkształconego przeprowadzono dla dwóch dostępnych na rynku indukcyjnych przekładników prądowych niskiego napięcia. Klasy dokładności określono dla transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz. Badany przekładnik klasy 0,2 wykonany jest z rdzeniem

magnetycznym z permalaju (PP1), natomiast klasy 0,5 z rdzeniem ze stali elektrotechnicznej (PP2). Obie jednostki zostały wykonane z tą samą przekładnią prądową wynoszącą 300 A / 5 A i mocą znamionową 5 VA. Zgodnie z normą PN-EN / IEC 61869-2 badanie dokładności transformacji należy przeprowadzić dla 5%, 20%, 100% i 120% (150% lub 200%, jeśli zakres pracy został rozszerzony) prądu znamionowego oraz 25% i 100% obciążenia znamionowego [11]. W przypadku badanych przekładników znamionowy współczynnik mocy wynosił 0,8 ind. Obciążenie indukcyjne znacząco pogarsza właściwości metrologiczne indukcyjnego przekładnika prądowego dla transformacji harmoniczných wyższego rzędu (np. od 60.). Jest to spowodowane wzrostem wraz z częstotliwością wartości skutecznej napięcia wtórnego, a więc indukcji pola magnetycznego w rdzeniu [30]. Powoduje to przesunięcie punktu pracy przekładnika w górę charakterystyki magnesowania, a więc w kierunku obszaru nasycenia. Z tego względu podczas przeprowadzanych badań zastosowano obciążenie rezystancyjne.

Badany przetłoty przekładnik prądowy (BPP) podczas badań dokładności jest zasilany z dodatkowego uzwojenia pierwotnego zawierającego 60 zwojów wykonanego przez okno rdzenia magnetycznego. Pomiary przeprowadzono w warunkach amperozwojów znamionowych przy założeniu równomiernego rozkładu zwojów uzwojeń pierwotnego i wtórnego na powierzchni rdzenia badanych przekładników. Układ pomiarowy (Rysunek 1) zasilany jest z programowalnego źródła zasilania (PZZ) pozwalającego na generację prądów odkształconych w dodatkowym uzwojeniu pierwotnym badanego przekładnika prądowego o zaciskach oznaczonych jako P2A i P1A. Wartości skuteczne poszczególnych harmoniczných i ich przesunięcia fazowe mogą przyjmować dowolne wartości ograniczone przez wartość maksymalną napięcia wyjściowego. Pomiary wykonano dla prądu odkształconego zawierającego podstawową harmoniczną o częstotliwości 50 Hz i jedną wyższą harmoniczną rzędu od 2. do 100. o udziale stanowiącym 10%. Badania dokładności transformacji przekładników prądowych przeprowadzono dla 5%, 20%, 100% i 120% prądu znamionowego oraz 25% i 100% obciążenia znamionowego o charakterze rezystancyjnym. W każdym przypadku do prądu o częstotliwości 50 Hz dodawano kolejno pojedyncze harmoniczne z zakresu od 100 Hz do 5 kHz.

Na Rysunku 1 symbolami P1 i P2 oznaczono zaciski uzwojenia pierwotnego przekładnika. Rezystory pomiarowe R1 i R3 służą odpowiednio do pomiaru prądu dodatkowego uzwojenia pierwotnego i pomiaru prądu różnicowego. Rezystor R2 odzwierciedla rezystancję obciążenia uzwojenia wtórnego badanego przekładnika prądowego. Zastosowanie cyfrowego watomierza (CW) pozwala na pomiar wartości skutecznych i przesunięć fazowych wyższych harmoniczných napięć rezystorów pomiarowych poprzez zastosowanie szybkiej transformaty Fouriera (FFT) [8,9,36,37]. Transformator separacyjny (TS) oddziela układ pomiarowy od źródła zasilania. Pozwala to na uziemienie jednego z zacisków uzwojenia wtórnego transformatora separacyjnego, co jest niezbędne do poprawnego działania układu różnicowego.

Wartość skuteczna hk harmoniczných prądu pierwotnego w układzie pomiarowym przedstawionym na Rysunku 1 jest wyznaczana na podstawie zależności:

$$(1) \quad I_{1hk} = \frac{U_{R1hk}}{R_1}$$

gdzie: I_{1hk} – wartość skuteczna hk harmoniczných prądu pierwotnego; U_{R1hk} – wartość skuteczna hk harmoniczných napięcia na rezystorze R_1 .

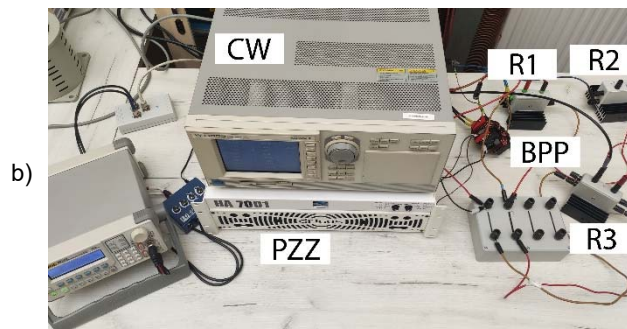
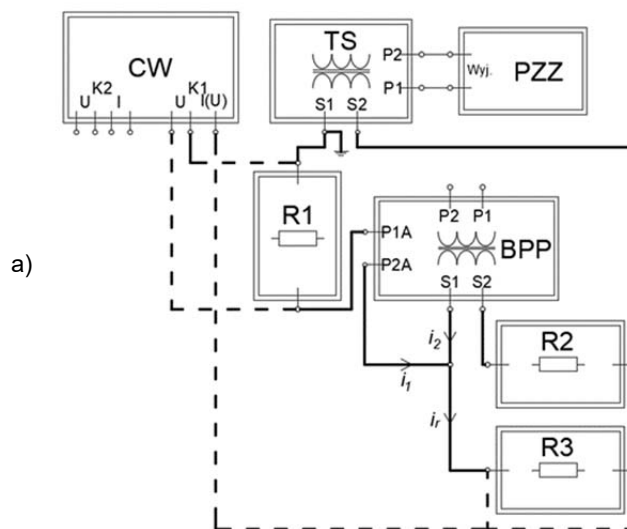
Wartość skuteczna hk harmoniczných prądu różnicowego jest wyznaczana na podstawie zależności:

$$(2) \quad I_{rhk} = \frac{U_{R3hk}}{R_3}$$

gdzie: I_{rhk} – wartość skuteczna hk harmoniczných prądu różnicowego; U_{R3hk} – wartość skuteczna hk harmoniczných napięcia na rezystorze R_3 .

Wartość procentowa błędu całkowitego jest wtedy wyznaczana na podstawie zależności:

$$(3) \quad \varepsilon_{\%Ihk} = \frac{U_{R3hk} \cdot R_1}{R_3 \cdot U_{R1hk}} \cdot 100\%$$

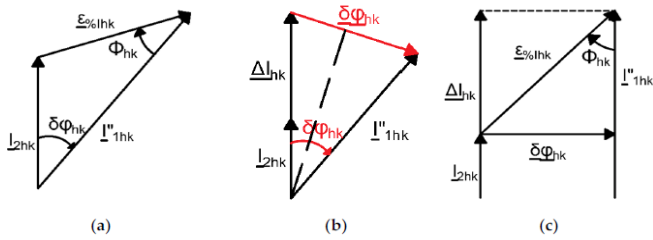


Rys.1. Układ pomiarowy do sprawdzania dokładności transformacji prądów odkształconych przez przekładnik prądowy: a) schemat, b) zdjęcie

W celu wyznaczenia wartości błędu prądowego i kąтового transformacji danej harmoniczných prądu odkształconego w układzie przedstawionym na Rysunku 1 mierzone są następujące wartości:

- wartość skuteczna prądu I_{1hk} w dodatkowym uzwojeniu pierwotnym określana dla harmoniczných rzędu hk ,
- wartość skuteczna prądu różnicowego I_{rhk} pomiędzy uzwojeniami pierwotnym i wtórnym,
- kąt przesunięcia fazowego φ_{hk} pomiędzy hk harmonicznymi prądów w dodatkowym uzwojeniu pierwotnym i_1 i połączeniu różnicowym i_r .

Na Rysunku 2 przedstawiono wykresy wskazowe indukcyjnego przekładnika prądowego: (a) prądy pierwotny i wtórny oraz błąd całkowity (przed przekształceniem), (b) przekształcenie małej wartości kąta przesunięcia fazowego na wektor przesunięcia fazowego, (c) błędy prądowy i kątowy oraz całkowity (po przekształceniu).



Rys.2. (a) Wykresy wskazowe indukcyjnego przekładnika prądowego: (a) prądy pierwotny i wtórny oraz błąd całkowity (przed przekształceniem), (b) przekształcenie małej wartości kąta przesunięcia fazowego na wektor przesunięcia fazowego, (c) błędy prądowy i kątowy oraz całkowity (po przekształceniu)

Podczas konstruowania wykresu wskazowego dla przekładnika, ze względu na bardzo małą wartość kąta przesunięcia fazowego $\delta\varphi_{hk}$ z Rysunku 2a, stosuje się przekształcenie wartości kąta na wektor zgodnie z Rysunkiem 2b. Po zastosowaniu tej konwersji, wykres wskazowy można przedstawić jak na Rysunku 2c. Wektor błędu prądowego jest rzutem wektora błędu całkowitego na oś Y, natomiast błąd kątowy jest rzutem wektora błędu całkowitego na oś X.

Stosując twierdzenie cosinusów do wykresu wskazowego z Rysunku 2a, z prądu różnicowego I_{rhk} , przesunięcia fazowego φ_{hk} i prądu pierwotnego I''_{1hk} można wyznaczyć wartość skuteczną I_{2hk} harmonicznej prądu wtórnego [8,36]:

$$(4) I_{2hk} = \sqrt{\left(\frac{U_{R1hk}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{R3hk}}{R_3}\right)^2 - 2 \cdot \frac{U_{R1hk}}{R_1} \cdot \frac{U_{R3hk}}{R_3} \cdot \cos \varphi_{hk}}$$

Na Rysunku 2b kąt przesunięcia fazowego φ_{hk} pomiędzy wektorami I_{2hk} i I_{1hk} może być przedstawiony jako długość wektora przesunięcia fazowego zgodnie z zależnością:

$$(5) |\delta\varphi_{hk}| \cong \sin \delta\varphi_{hk} \cdot 100\%$$

Powyższe przybliżenie jest poprawne dla niewielkich wartości kąta φ_{hk} .

Zgodnie z wykresem wskazowym przedstawionym na Rysunku 2c wartość procentowa błędu całkowitego może być obliczona zgodnie z zależnością:

$$(6) \varepsilon_{\%I_{hk}} = \sqrt{\Delta I_{hk}^2 + (\sin \delta\varphi_{hk} \cdot 100\%)^2}$$

gdzie: ΔI_{hk} – wartość procentowa błędu prądowego dla harmonicznej rzędu hk , $\varepsilon_{\%I_{hk}}$ – wartość procentowa błędu całkowitego dla harmonicznej rzędu hk .

Stosując definicję błędu prądowego zgodnie z normą PN-EN / IEC 61869-2 oraz zależności (1) i (4) wartość błędu prądowego dla harmonicznej rzędu hk określa równanie [8,36]:

$$(7) \Delta I_{hk} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{R1hk}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{R3hk}}{R_3}\right)^2 - 2 \cdot \frac{U_{R1hk}}{R_1} \cdot \frac{U_{R3hk}}{R_3} \cdot \cos \varphi_{hk} - \frac{U_{Shk}}{R_S}}}{\frac{U_{R1hk}}{R_1}} \cdot 100\%$$

Po przekształceniu zależności (6) wartość błędu kąтового może być określona na podstawie wyznaczonych wartości błędów całkowitego (3) i prądowego (7) [8,36]:

$$(8) \varphi_{hk} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{U_{R3hk} \cdot R_3}{R_3 \cdot U_{R1hk}} \cdot 100\%\right)^2 - \Delta I_{hk}^2}}{100\%} \right)$$

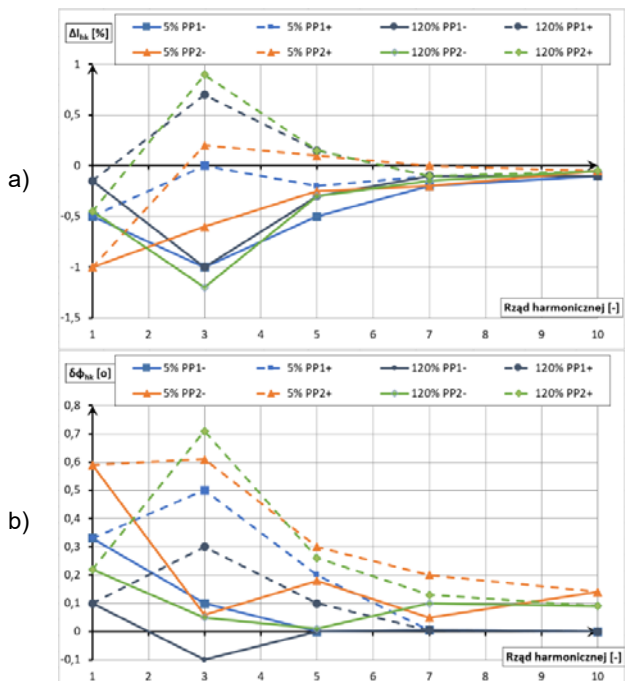
Wyniki pomiarów wartości błędów prądowego i kąтового transformacji harmoniczných prądów odkształconych

Przedstawione wyniki zostały podzielone na dwa zakresy. Pierwszy z nich dotyczy harmoniczných od podstawowej do 10. rzędu, natomiast drugi harmoniczných rzędu od 11. do 100. Pozwoli to na lepsze zaobserwowanie wpływu dodatkowego odkształcenia prądu wtórnego spowodowanego nieliniowością charakterystyki magnesowania rdzenia przekładnika. Zjawisko to zostało określone w publikacjach [5,7,8,30] jako generacja własna indukcyjnego przekładnika prądowego wyższých harmoniczných niskiego rzędu do prądu wtórnego. Wartości skuteczne i przesunięcie fazowe tych harmoniczných względem składowej podstawowej prądu odkształconego silnie zależą od wartości skutecznych podstawowej i trzeciej harmoniczných oraz przesunięcia fazowego między nimi [8,36]. Kolejnym ważnym czynnikiem mającym wpływ na stopień nasilenia tego zjawiska jest wartość i współczynnik mocy obciążenia strony wtórnej indukcyjnego przekładnika prądowego [30]. Czynniki te warunkują wartość indukcyjnej magnetycznej w rdzeniu przekładnika, co determinuje punkt pracy na jego charakterystyce magnesowania. Zjawisko generacji własnej ma istotny wpływ na wartości błędów prądowego i kąтового transformowaných harmoniczných niskiego rzędu. Dostosowując wartość przesunięcia fazowego pomiędzy zadawanymi harmonicznymi podstawową i wyższą niskiego rzędu można uzyskać najbardziej ujemne (oznaczoną na rysunkach znakiem (-)) oraz najbardziej dodatnie (oznaczoną na rysunkach znakiem (+)) wartości błędów przekładnika [8,28]. Zatem, aby uzyskać przedstawione na wykresach wartości graniczne błędów prądowego i kąтового transformacji harmoniczných prądu odkształconego przez badany przekładnik prądowy dokonano serii pomiarów jego dokładności transformacji. Dla harmoniczných rzędu do 10. włącznie regulowano przesunięcie fazowe pomiędzy zadawanymi składową podstawową i wyższą harmoniczną w zakresie od 0° do 360°, co 10°.

Na Rysunku 3 przedstawiono porównanie wyznaczonych wartości granicznych błędów prądowego i kąтового dla obu badanych przekładników prądowych w zakresie od 1. do 10. harmoniczných przy obciążeniu strony wtórnej przekładnika mocą czynną o wartości 5 W.

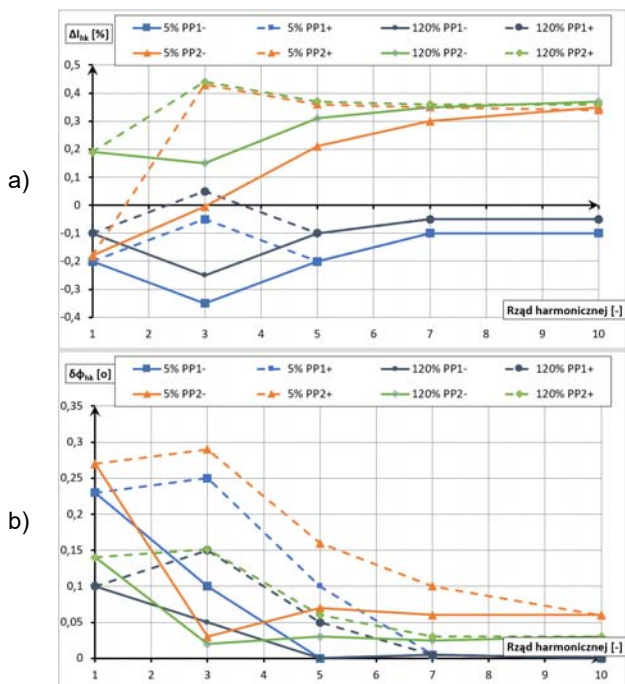
W wyniku występowania zjawiska generacji dla przekładnika PP2 wartość błędu prądowego transformacji 3. harmoniczných dla 120% prądu znamionowego znajduje się w przedziale od -1,18% do 0,88%. W przypadku 5. harmoniczných, w tych samych warunkach eksploatacyjnych, wartość błędu prądowego znajduje się w przedziale od -0,32% do 0,13%, w zależności od jej zadanego przesunięcia fazowego względem podstawowej harmoniczných. Wartości błędu kąтового dla przekładnika PP2 znalazły się w przedziale od 0,05° do 0,71° dla 3. harmoniczných oraz od 0,01° do 0,26° dla 5. harmoniczných. Dla przekładnika PP1 wartość błędu prądowego transformacji 3. harmoniczných dla 120% prądu znamionowego znajduje się w przedziale od -0,98% do 0,72%. W przypadku 5. harmoniczných, w tych samych warunkach eksploatacyjnych, wartość błędu prądowego znajduje się w przedziale od -0,33% do 0,15%. Wartości błędu kąтового znalazły się w przedziale od -0,10° do 0,27° dla 3 harmoniczných oraz od 0° do 0,1° dla 5. harmoniczných. W przypadku obu badanych indukcyjnych przekładników w zakresie harmoniczných rzędu od 1. do 7. dokładność transformacji szczególnie istotnie zależy od wartości generowaných harmoniczných niższego rzędu przez badany przekładnik (w wyniku nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego).

Dlatego podczas sprawdzania dokładności transformacji harmonicznego prądu odkształconego należy przeprowadzić pomiary dla przesunięcia fazowego każdej wyższej harmonicznej względem podstawowej harmonicznej w zakresie od 0° do 360° , co najmniej z krokiem co 10° .



Rys.3. Wartości błędów prądowego (a) i kąтового (b) obu badanych przekładników prądowych w zakresie harmonicznego rzędu od 1. do 10. przy obciążeniu strony wtórnej mocą czynną o wartości 5 W

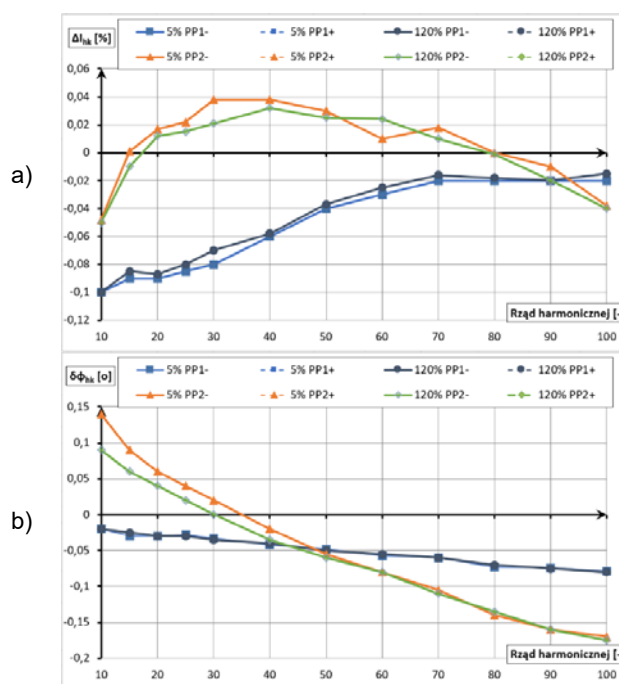
Na Rysunku 4 przedstawiono porównanie wyznaczonych wartości granicznych błędów prądowego i kąтового dla obu badanych przekładników prądowych w zakresie od 1. do 10. harmonicznego przy obciążeniu strony wtórnej przekładnika mocą czynną o wartości 1,25 W.



Rys.4. Wartości błędów prądowego (a) i kąтового (b) obu badanych przekładników prądowych w zakresie harmonicznego rzędu od 1. do 10. przy obciążeniu strony wtórnej mocą czynną o wartości 1,25 W

Dodatknie wartości błędów prądowych dla przekładnika PP2 wynikają z zastosowanej poprawki zwojowej. W takim przypadku przekładnia zwojowa ma inną wartość niż prądowa. Przekładnik PP1 nie jest korygowany. Należy zauważyć, że oba badane przekładniki w tych warunkach eksploatacyjnych charakteryzują się mniejszymi wartościami błędów prądowych i kąтового niż przy obciążeniu mocą czynną o wartości 5 W. Zmniejszenie obciążenia strony wtórnej zapewniło redukcję wpływu zjawiska generacji własnej indukcyjnego przekładnika i poprawę właściwości metrologicznych dla transformacji prądów odkształconych. Wynika to z obniżenia punktu pracy przekładników na charakterystyce magnesowania ich rdzenia magnetycznego dla transformacji prądów o wysokich wartościach, gdzie występowały najwyższe wartości generacji własnej harmonicznego niskiego rzędu do prądu wtórnego.

Na Rysunku 5 przedstawiono porównanie wyznaczonych wartości granicznych błędów prądowego i kąтового dla obu badanych przekładników prądowych w zakresie od 10. do 100. harmonicznego przy obciążeniu strony wtórnej przekładnika mocą czynną o wartości 5 W.



Rys.5. Wartości błędów prądowego (a) i kąтового (b) obu badanych przekładników prądowych w zakresie harmonicznego rzędu od 10. do 100. przy obciążeniu strony wtórnej mocą czynną o wartości 5 W

W zakresie harmonicznego rzędu od 11. do 100. przekładnik PP1 (z rdzeniem z permalaju) wykazuje porównywalnie wysokie właściwości metrologiczne jak przekładnik PP2 (z rdzeniem ze stali elektrotechnicznej). Zaprezentowane wyniki wskazują, że w zakresie częstotliwości transformowanych harmonicznego od 50 Hz do 5 kHz dobór materiału magnetycznego jest najbardziej istotny dla transformacji składowej o częstotliwości podstawowej. Wynika to z faktu, że w obu przypadkach nie nastąpił istotny wzrost strat mocy czynnej w rdzeniu i nie wystąpiło znaczące obniżenie wartości przenikalności magnetycznej wraz ze wzrostem częstotliwości transformowanej harmonicznego.

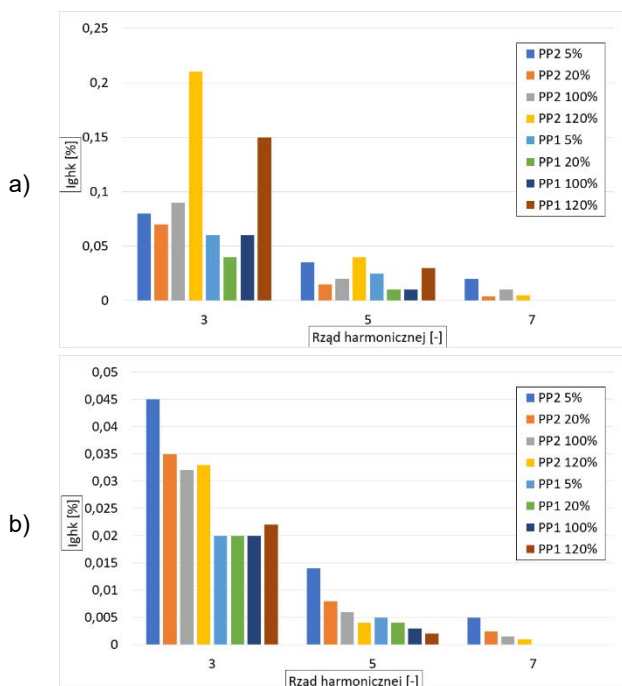
Generacja harmonicznego niskiego rzędu może być wyznaczona jako procentowa wartość składowej podstawowej prądu pierwotnego [7]. Taka definicja pozwala na porównywanie różnych typów przekładników

indukcyjnych lub tego samego przekładnika podczas pracy w różnych punktach charakterystyki magnesowania (wartość indukcji w rdzeniu magnetycznym zależy od wartości skutecznej prądu wtórnego i obciążenia uzwojenia wtórnego). Wartość skuteczną generowanej harmonicznej można określić na podstawie wzoru:

$$(9) \quad I_{ghk\%} = \frac{n \cdot I_{ghk}}{U_{R1hk}} \cdot 100\%$$

gdzie: n – znamionowa przekładnia prądowa badanego przekładnika (300 A / 5 A), I_{ghk} – wartość skuteczna generowanej harmonicznej po stronie wtórnej badanego przekładnika wyznaczona podczas transformacji sinusoidalnego prądu pierwotnego.

Na Rysunku 6 przedstawiono zestawienie wartości generowanych harmonicznych niższego rzędu dla obu badanych przekładników przy obciążeniu uzwojenia wtórnego 100% i 25% wartości znamionowej.



Rys.6. Zestawienie wartości generowanych harmonicznych niższego rzędu dla obu badanych przekładników przy obciążeniu uzwojenia wtórnego: (a) 100%, (b) 25% wartości znamionowej

Wyniki powyższej analizy pozwalają już dla prądu sinusoidalnego stwierdzić, czy badany przekładnik prądowy może zostać zastosowany do transformacji prądu odkształconego. Wysokie wartości procentowe generowanych harmonicznych niskiego rzędu będą powodowały wysokie wartości błędów prądowego i kąтового transformacji harmonicznych niskiego rzędu. Zatem, istotnie nieliniowy przebieg charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego dyskwalifikuje indukcyjny przekładnik prądowy do zastosowania w celu transformacji harmonicznych prądu pierwotnego w szerokim zakresie częstotliwości. Na podstawie Rysunku 6 można stwierdzić, że przekładnik PP1 generuje mniejsze wartości wyższych harmonicznych niższego rzędu niż przekładnik PP2. Dla przekładnika PP2 najwyższy poziom generacji uzyskano dla obciążenia znamionowego i prądu stanowiącego 120% prądu znamionowego. Jest to przypadek, w którym punkt pracy na charakterystyce magnesowania jest najwyższy. Wartości generowanych harmonicznych wynikają zatem z zagięcia charakterystyki w

obszarze nasycenia, nie zaś z materiału magnetycznego zastosowanego na rdzeń przekładnika. Gdy obciążenie uzwojenia wtórnego zostało zmniejszone do 25% wartości znamionowej, najwyższe poziomy generacji uzyskano dla prądu stanowiącego 5% prądu znamionowego. W tym przypadku punkt pracy na charakterystyce magnesowania przesunął się w kierunku dolnego przegięcia charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego.

Podsumowanie

Przeprowadzane badania wykazały, że indukcyjne przekładniki prądowe klas 0,2 i 0,5 określanych dla transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz o rdzeniach magnetycznych wykonanych odpowiednio z permalaju i stali elektrotechnicznej generują porównywalne wartości wyższych harmonicznych niższego rzędu. Najbardziej istotny wpływ na dokładność transformacji w szerokim zakresie częstotliwości ma punkt pracy na charakterystyce magnesowania rdzenia magnetycznego danego indukcyjnego przekładnika prądowego. W przypadku, gdy ten punkt jest położony w pobliżu jej zagięcia wynikającego z nasycenia (przy dużych obciążeniach i wartościach prądów pierwotnych) lub obniżenia przenikalności magnetycznej (przy małych obciążeniach i wartościach prądów pierwotnych), następuje wzrost generacji własnej harmonicznych niskiego rzędu do prądu wtórnego. Zjawisko to w przypadku badanych indukcyjnych przekładników prądowych było najbardziej istotne z uwagi na dokładność transformacji harmonicznych prądów odkształconych. Wyznaczone wartości błędów prądowego i kąтового dla badanego przekładnika klasy 0,2 w zakresie częstotliwości harmonicznych od 50 Hz do 5 kHz nie przekraczały odpowiednio: $\pm 1,0\%$ i $\pm 0,5^\circ$. Dla badanego przekładnika klasy 0,5 w tym samym zakresie częstotliwości wyznaczone wartości błędów prądowego nie przekraczały wartości $\pm 1,2\%$ oraz błędów kątowych wartości $\pm 0,8^\circ$. Najwyższe wartości błędów odczytano w przypadku transformacji 3. harmonicznej w wyniku występowania zjawiska generacji własnej dla prądu odkształconego o wartość 120% prądu znamionowego badanych indukcyjnych przekładników prądowych przy 100% obciążenia znamionowego uzwojenia wtórnego.

Autor: mgr. inż. Piotr Kaczmarek, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 22, 90-537 Łódź, E-mail: piotr.kaczmarek@dokt.p.lodz.pl.

LITERATURA

- 1 Kaczmarek M., Stano E., Proposal for Extension of Routine Tests of the Inductive Current Transformers to Evaluation of Transformation Accuracy of Higher Harmonics. International Journal of Electrical Power and Energy Systems 113 (2019), doi:10.1016/j.ijepes.2019.06.034.
- 2 Murray R., de Kock J., Instrument Transformers Influence on Harmonic Measurements for Grid Code Compliance. In Proceedings of the 2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference, GEMCCon 2018; 2019.
- 3 Kaczmarek M., Stano E., Measuring System for Testing the Transformation Accuracy of Harmonics of Distorted Voltage by Medium Voltage Instrument Transformers. Measurement (Lond) 181 (2021), doi:10.1016/j.measurement.2021.109628.
- 4 Mingotti A., Peretto L., Bartolomei L., Cavaliere D., Tinarelli R., Are Inductive Current Transformers Performance Really Affected by Actual Distorted Network Conditions? An Experimental Case Study. Sensors 20 (2020), 927, doi:10.3390/s20030927.
- 5 Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Why Should We Test the Wideband Transformation Accuracy of Inductive Current Transformers? Energies (Basel) 15 (2022), doi:10.3390/en15155737.
- 6 Crotti G., Giordano D., D'Avanzo G., Letizia P.S., Luiso M., A New Industry-Oriented Technique for the Wideband

- Characterization of Voltage Transformers. *Measurement (Lond)* 182 (2021), 109674, doi:10.1016/j.measurement.2021.109674
- 7 Kaczmarek M., Stano E., Why Should We Test the Wideband Transformation Accuracy of Medium Voltage Inductive Voltage Transformers? *Energies (Basel)* 14 (2021), 4432, doi:10.3390/en14154432.
 - 8 Kaczmarek M., Stano E., The Influence of the 3rd Harmonic of the Distorted Primary Current on the Self-Generation of the Inductive Current Transformers. *IEEE Access* 10 (2022), 55876–55887, doi:10.1109/access.2022.3177892.
 - 9 Kaczmarek M., The Source of the Inductive Current Transformers Metrological Properties Deterioration for Transformation of Distorted Currents. *Electric Power Systems Research* 107 (2014), 45–50, doi:10.1016/j.epsr.2013.09.007
 - 10 Kaczmarek M., Inductive Current Transformer Accuracy of Transformation for the PQ Measurements. *Electric Power Systems Research* 150 (2017), 169–176, doi:10.1016/j.epsr.2017.05.006.
 - 11 IEC 61869-2, Inst. Transf. - Additional Requirements for Current Transformers; IEC: Geneva, Switzerland, (2012)
 - 12 IEEE C57.13-2016, IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers; (2016);
 13. Harmonics Rms Values on the Frequency Characteristics of Ratio Error and Phase Displacement of a Wideband Voltage Divider. *Electric Power Systems Research* 167 (2019), doi:10.1016/j.epsr.2018.10.013.
 - 14 Wang B., Ma G., Xiong J., Zhang H., Zhang L., Li Z., Several Sufficient Conditions for Harmonic Source Identification in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* 33 (2018), doi:10.1109/TPWRD.2018.2870051
 - 15 Cataliotti A., Cosentino V., A New Measurement Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems Based on the Approach of the IEEE Std. 1459-2000. *IEEE Transactions on Power Delivery* 25 (2010), doi:10.1109/TPWRD.2009.2034480
 - 16 Stano E., Kaczmarek M., Analytical Method to Determine the Values of Current Error and Phase Displacement of Inductive Current Transformers during Transformation of Distorted Currents Higher Harmonics. *Measurement* 200 (2022), 111664, doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111664.
 - 17 Stano E., Measuring System for Testing Wideband Transformation Accuracy of Higher Harmonics of Distorted Current by Inductive Current Transformers. *Przeglad Elektrotechniczny* 96 (2020), doi:10.15199/48.2020.04.39.
 - 18 IEC 61869-6, Inst. Transf. - Additional General Requirements for Low-Power Instrument Transformers; Geneva, Switzerland, (2016);
 - 19 IEC 61869-10, Inst. Transf. - Additional Requirements for Low-Power Passive Current Transformers; IEC: Geneva, Switzerland, (2017);
 - 20 IEC 61869-103, Inst. Transf. - The Use of Instrument Transformers for Power Quality Measurement; IEC: Geneva, Switzerland, (2010);
 - 21 Cristaldi L., Faifer M., Laurano C., Ottoboni R., Toscani S., Zannoni M., A Low-Cost Generator for Testing and Calibrating Current Transformers. *IEEE Trans Instrum Meas* 68 (2019), doi:10.1109/TIM.2018.2870264
 - 22 Kaczmarek M., Kaczmarek P., Comparison of the Wideband Power Sources Used to Supply Step-up Current Transformers for Generation of Distorted Currents. *Energies (Basel)* 13 (2020), doi:10.3390/en13071849.
 - 23 Brodecki D., Stano E., Andrychowicz M., Kaczmarek P., Emc of Wideband Power Sources. *Energies (Basel)* 14 (2021), doi:10.3390/en14051457.
 - 24 Kaczmarek M.L., Stano E., Application of the Inductive High Current Testing Transformer for Supplying of the Measuring Circuit with Distorted Current. *IET Electr Power Appl* 13 (2019), doi:10.1049/iet-epa.2018.5803
 - 25 Kaczmarek M., Kaczmarek P., Stano E., The Performance of the High-Current Transformer during Operation in the Wide Frequencies Range. *Energies (Basel)* 15 (2022), doi:10.3390/en15197208.
 - 26 Crotti G., Delle Femine A., Gallo D., Giordano D., Landi C., Letizia P.S., Luiso M., Calibration of Current Transformers in Distorted Conditions. In *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*; 2018; Vol. 1065
 - 27 Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Understanding the Frequency Characteristics of Current Error and Phase Displacement of the Corrected Inductive Current Transformer. *Energies (Basel)* 15 (2022), doi:10.3390/en15155436.
 - 28 Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Understanding the Frequency Characteristics of Current Error and Phase Displacement of the Corrected Inductive Current Transformer. *Energies (Basel)* 15 (2022), doi:10.3390/en15155436
 - 29 Kaczmarek M., Kaczmarek P., Stano E., Evaluation of the Current Shunt Influence on the Determined Wideband Accuracy of Inductive Current Transformers. *Energies (Basel)* 15 (2022), doi:10.3390/en15186840
 - 30 Kaczmarek M., Kaczmarek P., Stano E., The Effect of the Load Power Factor of the Inductive CT's Secondary Winding on Its Distorted Current's Harmonics Transformation Accuracy. *Energies (Basel)* 15 (2022), doi:10.3390/en15176258.
 - 31 Takahashi K., Yamawaki M., Tadokoro T., Current Ratio Transfer Standard and Improved Equivalent Ampere Turn Method. *IEEE Trans Instrum Meas* 62 (2013), 1716–1722, doi:10.1109/TIM.2013.2256711
 - 32 Cataliotti A., Cosentino V., Crotti G., Giordano D., Modarres M., Di Cara D., Tinè G., Gallo D., Landi C., Luiso M., Metrological Performances of Voltage and Current Instrument Transformers in Harmonics Measurements. In *Proceedings of the I2MTC 2018 - 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference: Discovering New Horizons in Instrumentation and Measurement*, Proceedings; 2018; pp. 1–6.
 - 33 McLyman T., *Transformer and Inductor Design Handbook*, Fourth Edition; (2017)
 - 34 Rylko M.S., Hartnett K.J., Hayes J.G., Egan M.G., Magnetic Material Selection for High Power High Frequency Inductors in DC-DC Converters. In *Proceedings of the Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*; 2009
 - 35 Lesniewska E., Modern Methods of Construction Problem Solving in Designing Various Types of Instrument Transformers. *Energies (Basel)* 15 (2022), doi:10.3390/en15218199
 - 36 Stano E., Kaczmarek M., Wideband Self-Calibration Method of Inductive Cts and Verification of Determined Values of Current and Phase Errors at Harmonics for Transformation of Distorted Current. *Sensors* 20 (2020), 2167, doi:10.3390/s20082167
 - 37 Kaczmarek M., Estimation of the Inductive Current Transformer Derating for Operation with Distorted Currents. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 62 (2014), 363–366, doi:10.2478/bpasts-2014-0036