

Oddziaływanie indukcyjności obciążenia obwodu wtórnego indukcyjnego przekładnika prądowego na dokładność transformacji harmonicznego prądu odkształconego

Streszczenie W artykule poddano analizie wpływ indukcyjności obciążenia obwodu wtórnego indukcyjnego przekładnika prądowego na dokładność transformacji harmonicznego prądu odkształconego. Obciążenie indukcyjne powoduje znaczący wzrost wartości błędów prądowego i kątownego wraz ze wzrostem częstotliwości transformowanej harmonicznej. Wykazano również możliwość zastosowania opracowanego toru probierczego i przetwornika wzorcowego do sprawdzania dokładności transformacji harmonicznego prądu odkształconego przez indukcyjne przekładniki prądowe.

Abstract This paper analyses the effect of the load inductance of the secondary circuit of an inductive current transformer on the transformation accuracy of the distorted current harmonics. The inductive load causes a significant increase of the values of current error and phase displacement with the increase of the frequency of the transformed harmonic. The feasibility of using the developed high-current test circuit and the reference transducer to determine the harmonic transformation accuracy of distorted current by the inductive current transformers was also verified. (The influence of the load inductance in the secondary winding of the inductive current transformer on the distorted current transformation accuracy of distorted current harmonics).

Słowa kluczowe: transformacja harmonicznego, współczynnik mocy obciążenia, błąd prądowy, przekładnik prądowy, błąd kątowny
Keywords: harmonics transformation, load power factor, current error, current transformer, phase displacement.

Wstęp

Indukcyjne przekładniki prądowe (PP) są powszechnie stosowane w sieciach elektroenergetycznych do transformacji prądów o znacznych wartościach na wartości dostosowane do urządzeń pomiarowych i zabezpieczeniowych przyłączonych do ich stron wtórnych [1–8]. Druga edycja normy IEC 61869-1 obowiązująca od 14.06.2023 r. zawiera wymagania dla opcjonalnych klas dokładności indukcyjnych PP zdefiniowane dla transformacji harmonicznego prądu i napięć odkształconych oraz przebiegów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości [9]. Wymagania te są zbliżone z dotychczas prezentowanymi w normie PN-EN/IEC 61869-6 dla przekładników małej mocy [10]. Szczegółowe wymagania dla indukcyjnych PP zostały zdefiniowane w normie PN-EN/IEC 61869-2 [11]. Dla wszystkich klas obciążenie uzwojenia wtórnego powinno mieć współczynnik mocy 0,8, z wyjątkiem sytuacji, gdy obciążenie jest mniejsze niż 5 VA wówczas, należy zastosować współczynnik mocy 1,0, przy minimalnej wartości obciążenia 1 VA. Nadana opcjonalna klasa dokładności będzie zatem dotyczyć określonego obciążenia uzwojenia wtórnego w tym również jego rezystancyjnego bądź rezystancyjno-indukcyjnego charakteru. Do wyznaczenia dokładności transformacji harmonicznego prądu odkształconego może zostać zastosowany układ pomiarowy z dwukanałowym synchronicznym przetwornikiem analogowo-cyfrowym [12–16]. W cyklu artykułów została zaproponowana różnicowa metoda pomiarowa charakteryzująca się znacząco niższą niepewnością pomiarową [6,17–21]. W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania dotyczące scharakteryzowania właściwości metrologicznych i eksploatacyjnych indukcyjnych PP w zakresie transformacji prądów odkształconych [22–29]. Wyniki pomiarów i analiz wskazują, że dokładność indukcyjnych PP zależy od zjawiska generacji własnej wyższych harmonicznego do prądu wtórnego spowodowanego nieliniowością charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego [21,30,31]. Sprawdzenie dokładności indukcyjnych PP może być również przeprowadzone z wykorzystaniem metody amperozwojów znamionowych [17]. Rozwiązanie to

jest stosowane tylko dla indukcyjnych PP typu przelotowego z uwagi na konieczność wykonania dodatkowego uzwojenia pierwotnego o liczbie zwojów równej znamionowej przekładni prądowej badanego przekładnika. W innym przypadku uzwojenie pierwotne musi zostać zasilane prądem znamionowym, który może być wytworzony z wykorzystaniem transformatora probierczego zasilanego z systemu programowalnego źródła napięcia zmiennego [17,32–36]. Wyniki i analizy przedstawione w [31] dotyczą charakterystyk metrologicznych wyznaczonych dla transformacji prądów odkształconych przez korygowany indukcyjny PP [20]. Zawarte w artykule wykresy wskazowe wskazują czynniki warunkujące wartości błędów prądowego i kątownego transformacji harmonicznego prądu odkształconego. Wiele opracowań dotyczyło kompensacji błędów indukcyjnych PP [37–40]. Jednakże, ze względu na zjawisko generacji własnej wyższych harmonicznego przedstawione w [21,30,31], proponowane rozwiązania mogą być nieskuteczne.

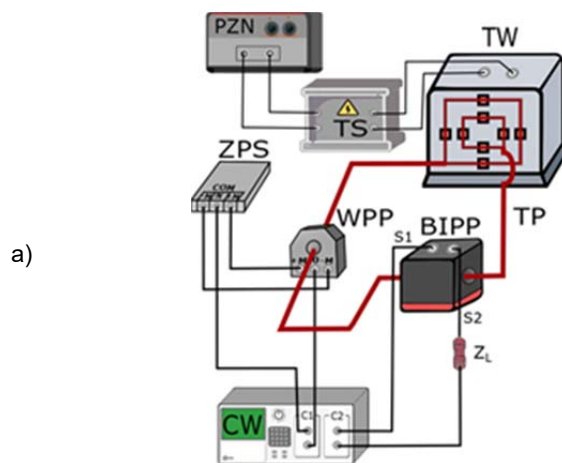
W artykule przedstawiono wpływ współczynnika mocy obciążenia uzwojenia wtórnego indukcyjnych PP (100 A/ 1 A i 100 A/ 5 A) na przebieg ich charakterystyk metrologicznych wyznaczonych w warunkach transformacji prądu odkształconego zawierającego pojedynczą wyższą harmoniczną o częstotliwości od 100 Hz do 5 kHz. Porównano wartości błędów prądowych i kątownych wyznaczone dla harmonicznego odkształconego prądu pierwotnego dla dwóch charakterów obciążenia uzwojenia wtórnego o współczynniku mocy równym 1 i 0,8 ind. W przypadku rezystancyjno-indukcyjnego obciążenia zwiększenie rzędu transformowanej harmonicznego prądu pierwotnego powoduje wzrost jej wartości skutecznej w napięciu wtórnym indukcyjnego PP i tym samym wzrost maksymalnej wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu. W konsekwencji punkt pracy na charakterystyce magnesowania rdzenia magnetycznego przybliża się do obszaru nasycenia i dokładność transformacji PP ulega pogorszeniu w wyniku wzrostu mocy pozornej obciążenia. W celu zapewnienia optymalnych warunków pracy indukcyjnego PP należy stosować układy odbiorcze o charakterze rezystancyjnym. Indukcyjne PP transformujące odkształcony prąd pierwotny mogą wówczas spełniać

wymagania klasy dokładności zdefiniowane dla transformacji prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz przy zachowaniu tych samych wartości granicznych błędów lub bardziej restrykcyjne wymagania opcjonalnych klas dokładności w szerokim zakresie częstotliwości. Obciążenie rezystancyjne uzwojenia wtórnego indukcyjnego PP można zapewnić stosując rezystory pomiarowe np. jako źródło napięcia wejściowego do przetwornika analogowo-cyfrowego. Nowatorski charakter przedstawionych wyników i analiz wynika z zastosowania wzorcowego przetwornika prądowego Danisense DC200IF o szerokim zakresie częstotliwości pracy i układu probierczego oraz toru wieloprądowego zapewniających zasilanie układu prądem o wartości skutecznej przekraczającej 200 A dla podstawowej harmonicznej i 20 A dla składowych wyższej częstotliwości w zakresie do 5 kHz. Ponadto, porównano otrzymane wyniki dla indukcyjnych PP o tej samej znamionowej wartości prądu pierwotnego wynoszącej 100 A ale dwóch różnych znamionowych wartości prądu wtórnego 5 A (kl. 0,5; 50 Hz) i 1 A (kl. 0,2; 50 Hz).

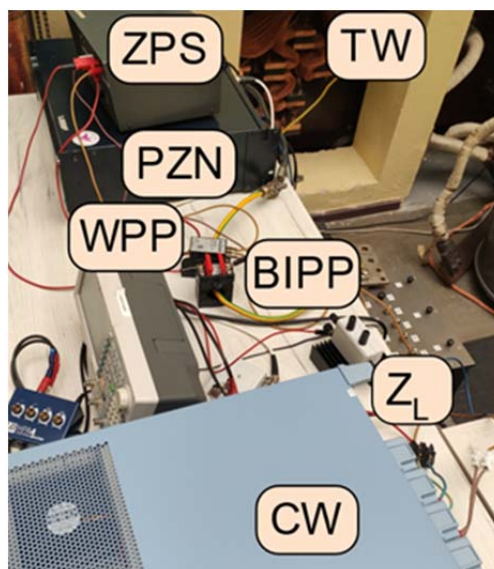
Układ pomiarowy i przedmiot badań

Wpływ współczynnika mocy obciążenia uzwojenia wtórnego na dokładność transformacji harmonicznych odkształconego prądu pierwotnego wybranych indukcyjnych PP wyznaczono w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1. Pierwszy badany indukcyjny PP charakteryzuje się znamionową przekładnią prądową równą 100 A/ 1 A i klasą dokładności 0,2 określoną dla transformacji prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz zgodnie z normą PN-EN/IEC 61869-2 [11]. Jego znamionowa moc pozorna obciążenia uzwojenia wtórnego wynosi 2,5 VA. Wobec tego, zgodnie z normą PN-EN/IEC 61869-2, należy stosować podczas sprawdzenia jego dokładności obciążenie rezystancyjne. Drugi badany indukcyjny PP charakteryzuje się znamionową przekładnią prądową równą 100 A/ 5 A i klasą dokładności 0,5 określoną dla transformacji prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz. Jego znamionowa moc pozorna obciążenia uzwojenia wtórnego wynosi 5 VA. Wobec tego, zgodnie z normą PN-EN/IEC 61869-2, należy stosować podczas sprawdzenia jego dokładności obciążenie o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym 0,8 przy obciążeniu znamionowym. Jednak zgodnie z dokumentem interpretacyjnym IEC 61869-2/ISH1 do normy PN-EN/IEC 61869-2 sprawdzenie dokładności dla obciążenia o wartości 1,25 VA (co stanowi 25% obciążenia 5 VA) należy wykonać przy obciążeniu rezystancyjnym [41]. Zastosowany wzorcowy przetwornik prądowy charakteryzuje się błędem prądowym o wartości nie przekraczającej 0,1% w zakresie od 10 Hz do 5 kHz, 2% w zakresie od 5 kHz do 100 kHz i 10% w zakresie od 100 kHz do 200 kHz. Dodatkowo zapewnia transformację prądu pierwotnego z błędem kątowym o wartości nie przekraczającej 0,1° w zakresie od 10 Hz do 5 kHz, 0,5° w zakresie od 5 kHz do 100 kHz i 2° w zakresie od 100 kHz do 200 kHz. Dokładność przetwornika do 5 kHz została zweryfikowana za pomocą metod amperozwojów znamionowych [17,28]. Na rysunku 1 przedstawiono układ pomiarowy do sprawdzania dokładności transformacji prądów sinusoidalnych i harmonicznych prądu odkształconego indukcyjnych PP. Na rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia: BIPP – badany indukcyjny przekładnik prądowy, CW – cyfrowy watomierz, PZN – programowalne źródło napięcia zmiennego, TP – tor prądowy, TS – transformator separacyjny, TW – transformator wieloprądowy, WPP – wzorcowy przetwornik prądowy, Z_L – impedancja obciążenia uzwojenia wtórnego:

rezystancyjna (współczynnik mocy 1) lub rezystancyjno-indukcyjna (współczynnik mocy 0,8), ZPS – zasilacz prądu stałego.



a)



b)

Rys.1. Układ pomiarowy do sprawdzania dokładności transformacji prądów sinusoidalnych i harmonicznych prądu odkształconego indukcyjnych PP a) schemat układu, b) zdjęcie układu

W przedstawionym układzie pomiarowym wartość błędu prądowego transformacji hk harmonicznej prądu odkształconego przez indukcyjny PP została wyznaczona na podstawie pomiaru w dwóch modułach cyfrowego watomierza wartości skutecznych harmonicznych prądów wtórnych badanego indukcyjnego PP i wzorcowego przetwornika prądowego. Wartość błędu prądowego określona dla kolejnych harmonicznych wyznaczana jest z zależności:

$$(1) \quad \Delta I_{hk} = \frac{k_{IPP} \cdot I_{IPP2hk} - n_{DS} \cdot I_{DS2hk}}{n_{DS} \cdot I_{DS2hk}} \cdot 100\%$$

gdzie: k_{IPP} – znamionowa przekładnia prądowa badanego indukcyjnego PP $k_{IPP} = \frac{I_{1N}}{I_{2N}}$, I_{1N} – znamionowa wartość skuteczna prądu pierwotnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego, I_{2N} – znamionowa wartość skuteczna prądu wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego, I_{IPP2hk} – wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego badanego indukcyjnego PP, I_{DS2hk} – wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego

wzorcowego przetwornika prądowego, n_{DS} - znamionowa przekładnia prądowa wzorcowego przetwornika prądowego.

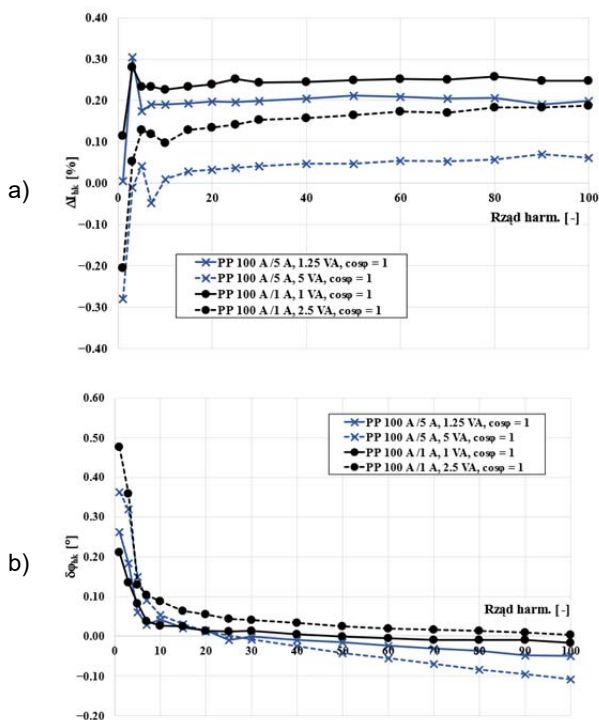
Błąd kątowy dla hk harmonicznej wyznaczany jest jako różnica faz między wskazami prądu wtórnego wzorcowego przetwornika prądowego i prądu wtórnego badanego indukcyjnego PP wyznaczonymi względem tego samego napięcia odniesienia.

$$(2) \quad \delta\varphi_{hk} = \varphi_{DS2hk} - \varphi_{IPP2hk}$$

gdzie: φ_{DS2hk} – faza wskazu hk harmonicznej prądu wtórnego wzorcowego przetwornika prądowego względem napięcia odniesienia, φ_{IPP2hk} – faza wskazu hk harmonicznej prądu wtórnego badanego indukcyjnego PP względem napięcia odniesienia.

Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 5 kHz

Badania wykonano dla odkształconych prądów pierwotnych o wartościach składowej podstawowej 5%, 20%, 100% i 120% znamionowego prądu pierwotnego indukcyjnych PP i 10% udziale pojedynczej wyższej harmonicznej z zakresu od 100 Hz do 5 kHz. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów wartości błędów a) prądowego i b) kąтового dwóch badanych indukcyjnych PP dla obciążenia rezystancyjnego 5 VA lub 2,5 VA przy $\cos\varphi$ równym 1 (linie przerywane) oraz dla 25% tego obciążenia 1,25 VA lub 1 VA przy $\cos\varphi$ równym 1 (linie ciągłe). Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP zostały wykonane dla składowej podstawowej odkształconego prądu pierwotnego o wartości 5% znamionowego prądu pierwotnego badanych PP.

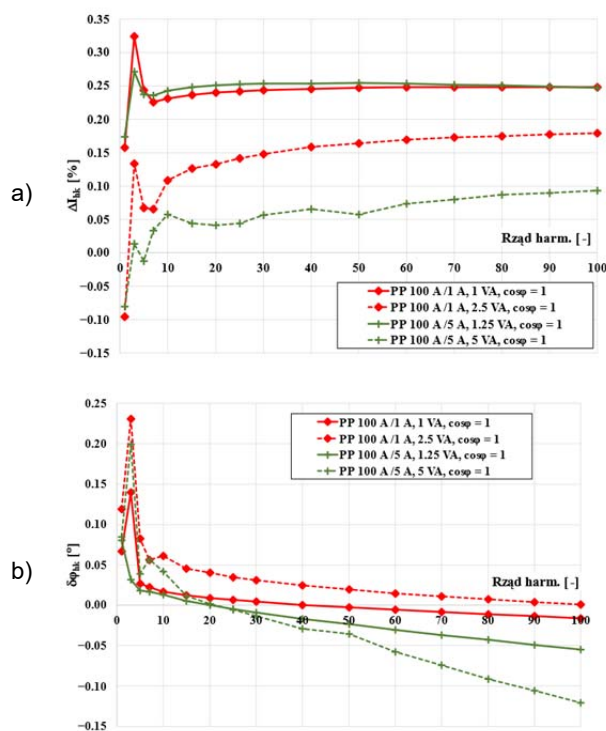


Rys.2. Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP 100 A/5 A i 100 A/1 A dla obciążenia rezystancyjnego i 5% wartości znamionowej prądu pierwotnego (a) błąd prądowy; (b) błąd kątowy

Zwiększone wartości błędów prądowych i kątowych harmonicznych rzędów 3. i 5. wynikają z generacji własnej badanych indukcyjnych PP. Wynika to z nieliniowości charakterystyk magnesowania rdzenia magnetycznego. To

zjawisko zostało szczegółowo omówione w artykułach [17,18,21,42,43]. Ponadto, zastosowanie poprawki zwojowej uzwojenia wtórnego spowodowało przesunięcie wartości błędu prądowego w kierunku dodatnim [20]. Wraz ze wzrostem obciążenia uzwojenia wtórnego, wartości błędów prądowych przesuwały się w kierunku wartości ujemnych [31,44,45]. W badaniach przypadkach dla obu przekładników wartości błędu kąтового nie przekraczają $\pm 0,5^\circ$, a błędu prądowego $\pm 0,35\%$. Należy zaznaczyć, że wartości graniczne błędów dla klasy 0,2 (50 Hz/ 60 Hz) wynoszą $\pm 0,75\%$ i $0,5^\circ$.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów wartości błędów a) prądowego i b) kąтового dwóch badanych indukcyjnych PP dla obciążenia rezystancyjnego 5 VA lub 2,5 VA przy $\cos\varphi$ równym 1 (linie przerywane) oraz dla 25% tego obciążenia 1,25 VA lub 1 VA przy $\cos\varphi$ równym 1 (linie ciągłe). Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP zostały wykonane dla składowej podstawowej odkształconego prądu pierwotnego o wartości 120% znamionowego prądu pierwotnego badanych PP.

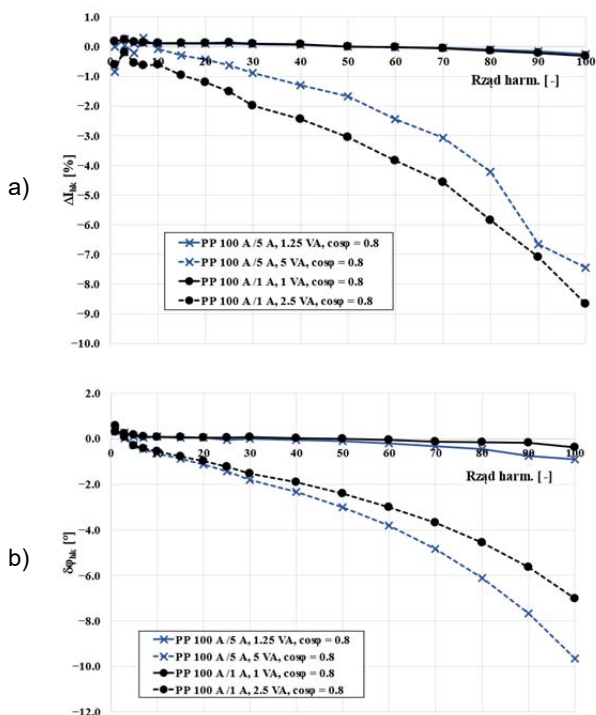


Rys.3. Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP 100 A/5 A i 100 A/1 A dla obciążenia rezystancyjnego i 120% wartości znamionowej prądu pierwotnego (a) błąd prądowy; (b) błąd kątowy

Wzrost wartości skutecznej odkształconego prądu pierwotnego do 120% wartości znamionowej powoduje wzrost wartości błędów prądowego i kąтового transformacji harmonicznych 3. i 5. rzędu, co wynika ze zwiększenia intensywności zjawiska generacji wyższych harmonicznych do prądu wtórnego badanych indukcyjnych PP w wyniku przesunięcia punktu pracy na charakterystyce magnesowania bliżej obszaru nasycenia [18,21,30,31]. Również w tym przypadku nie zostały przekroczone wartości graniczne błędów prądowego i kąтового zdefiniowane dla klasy 0,2 50 Hz/ 60 Hz.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiarów wartości błędów a) prądowego i b) kąтового dwóch badanych indukcyjnych PP dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego 5 VA lub 2,5 VA przy $\cos\varphi$ równym 0,8 (linie przerywane) oraz dla 25% tego obciążenia 1,25 VA lub 1 VA przy $\cos\varphi$

równym 0,8 (linie ciągłe). Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP zostały wykonane dla składowej podstawowej odkształconego prądu pierwotnego o wartości 5% znamionowego prądu pierwotnego badanych PP.

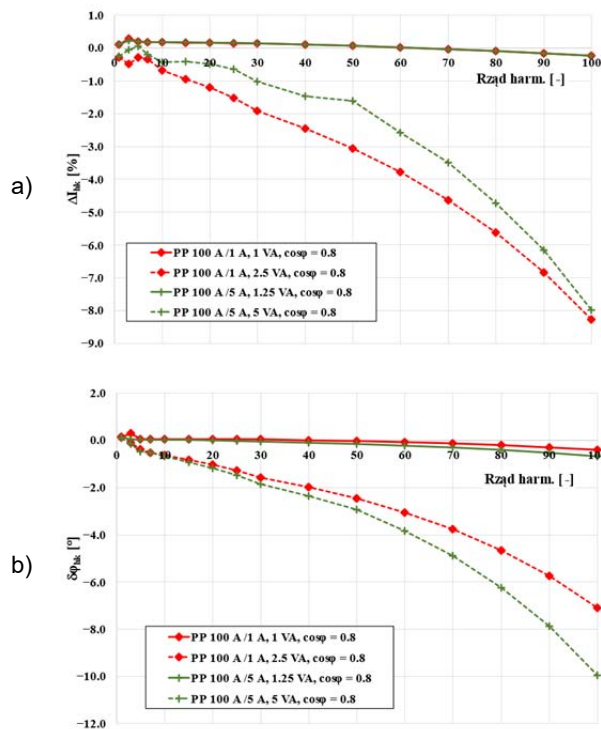


Rys.4. Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP 100 A/5 A i 100 A/1 A dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego $\cos\phi = 0,8$ i 5% wartości znamionowej prądu pierwotnego (a) błąd prądowy; (b) błąd kątowy

Zastosowanie obciążenia o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym powoduje istotny wzrost wartości błędów transformacji harmonicznnych szczególnie w przypadku obciążenia znamionowego. Wynika to z większej wartości indukcyjności obciążenia, która wynosi 0,38 mH dla 5 VA, a dla 25% obciążenia znamionowego wynosi 0,01 mH [44]. Wraz ze wzrostem częstotliwości transformowanej harmonicznnej reaktancja obciążenia wzrasta i przy zachowanym udziale wyżej harmonicznnej w odkształconym prądzie pierwotnym powoduje wzrost wartości napięcia wtórnego. Czynnikiem ten powoduje, że położenie punktu pracy na charakterystyce namagnesowania rdzenia magnetycznego przesuwa się w kierunku obszaru nasycenia i dlatego wymagane są wyższe wartości prądu wzbudzenia rdzenia. To prowadzi do zwiększenia wartości błędów prądowego i kątowego wraz ze wzrostem częstotliwości transformowanej harmonicznnej w przypadku obciążeń rezystancyjno-indukcyjnych. Zjawisko to jest tożsame do występującego w przypadku zwiększania obciążenia uzwojenia wtórnego [46].

W badanych przypadkach dla obu przekładników wartości błędu kątowego przekraczają $\pm 6,5^\circ$, a błędu prądowego $\pm 8,5\%$ przy obciążeniu znamionowym oraz wartości błędu kątowego przekraczają $\pm 0,9^\circ$, a błędu prądowego $\pm 0,25\%$ przy 25% obciążenia znamionowego. Należy zaznaczyć, że wartości graniczne błędów dla klasy 0,5 (50 Hz/ 60 Hz) wynoszące $\pm 1,5\%$ i $1,5^\circ$ zostają przekroczone w przypadku obciążenia znamionowego. Zgodnie z normą IEC 61869-1 granice dopuszczalnych wartości błędów opcjonalnej klasy dokładności WB1 nie zostały przekroczone (dla klasy 0,5: $\pm 5\%/^\circ$ do 1 kHz, $\pm 10\%/^\circ$ do 1,5 kHz i $\pm 10\%/20^\circ$ do 3 kHz, dla klasy 0,2: $\pm 2\%/^\circ$ do 1 kHz, $\pm 4\%/^\circ$ do 1,5 kHz i $\pm 5\%/^\circ$ do 3 kHz) [9].

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów wartości błędów a) prądowego i b) kątowego dwóch badanych indukcyjnych PP dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego 5 VA lub 2,5 VA przy $\cos\phi$ równym 0,8 (linie przerywane) oraz dla 25% tego obciążenia 1,25 VA lub 1 VA przy $\cos\phi$ równym 0,8 (linie ciągłe). Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP zostały wykonane dla składowej podstawowej odkształconego prądu pierwotnego o wartości 120% znamionowego prądu pierwotnego badanych PP.



Rys.5. Charakterystyki metrologiczne indukcyjnych PP 100 A/5 A i 100 A/1 A dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego $\cos\phi = 0,8$ i 120% wartości znamionowej prądu pierwotnego (a) błąd prądowy; (b) błąd kątowy

W przypadku obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego wzrost wartości skutecznej odkształconego prądu pierwotnego do 120% wartości znamionowej nie powoduje wzrostu wartości błędów prądowego i kątowego. Wynika to z faktu, że zmiana punktu pracy spowodowana zmianą wartości prądu pierwotnego nie jest istotna w porównaniu ze zmianą wynikającą ze wzrostu reaktancji obciążenia wraz ze wzrostem częstotliwości transformowanej harmonicznnej. W badanych przypadkach dla obu przekładników wartości błędu kątowego przekraczają $\pm 6,5^\circ$, a błędu prądowego $\pm 8,0\%$ przy obciążeniu znamionowym oraz wartości błędu kątowego przekraczają $\pm 0,35^\circ$, a błędu prądowego $\pm 0,3\%$ przy 25% obciążenia znamionowego. Należy zaznaczyć, że wartości graniczne błędów dla klasy 0,5 (50 Hz/ 60 Hz) wynoszące $\pm 1,5\%$ i $1,5^\circ$ zostają przekroczone w przypadku obciążenia znamionowego. Zgodnie z normą IEC 61869-1 granice dopuszczalnych wartości błędów opcjonalnej klasy dokładności WB1 nie zostały przekroczone (dla klasy 0,5: $\pm 5\%/^\circ$ do 1 kHz, $\pm 10\%/^\circ$ do 1,5 kHz i $\pm 10\%/20^\circ$ do 3 kHz, dla klasy 0,2: $\pm 2\%/^\circ$ do 1 kHz, $\pm 4\%/^\circ$ do 1,5 kHz i $\pm 5\%/^\circ$ do 3 kHz) [9].

Podsumowanie

Podsumowując, najważniejsze wnioski wynikające z przedstawionych wyników badań i analiz: obciążenie

indukcyjne powoduje znaczące obniżenie dokładności transformacji harmonicznego prądu odkształconego. Należy jednak podkreślić, że we wszystkie przypadkach wymagania opcjonalnej klasy dokładności WB1 są spełnione. Obciążenie rezystancyjne może zapewnić pracę przekładnika prądowego z klasą dokładności przewidzianą dla transformacji sinusoidalnego prądu o częstotliwości 50 Hz, przy tych samych wartościach granicznych błędów prądowego i kąтового. Wzrost częstotliwości transformowanej harmonicznego prądu w przypadku obciążenia uzwojenia wtórnego o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym powoduje wzrost napięcia wtórnego i związane z tym zwiększenie indukcji magnetycznej w rdzeniu, co prowadzi do znacznego obniżenia dokładności transformacji przekładnika prądowego. W artykule wykazano możliwość zastosowania opracowanego toru probierczego i przetwornika wzorcowego do sprawdzania dokładności transformacji harmonicznego prądu odkształconego przez indukcyjne przekładniki prądowe.

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] 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.
- [2] Yang T., Pen H., Wang D., Wang Z., Harmonic Analysis in Integrated Energy System Based on Compressed Sensing. *Appl. Energy* 165 (2016), 583–591, doi:10.1016/j.apenergy.2015.12.058.
- [3] Dirik H., Duran I.U., Gezegin C., A Computation and Metering Method for Harmonic Emissions of Individual Consumers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68 (2019), 412–420, doi:10.1109/TIM.2018.2843538.
- [4] Zobaa A.F., Abdel Aleem S.H.E., A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads. *IEEE Trans. Ind. Informatics* 10 (2014), 1401–1412, doi:10.1109/TII.2014.2307196.
- [5] Mazin H.E., Xu W., Huang B., Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads. *IEEE Trans. Power Deliv.* 26 (2011), 1187–1195, doi:10.1109/TPWRD.2010.2093544.
- [6] Kaczmarek M., Stano E., Review of Measuring Methods, Setups and Conditions for Evaluation of the Inductive Instrument Transformers Accuracy for Transformation of Distorted Waveforms. *Energies* 16 (2023), doi:10.3390/en16114360.
- [7] Kaczmarek M., Stano E., Challenges of Accurate Measurement of Distorted Current and Voltage in the Power Grid by Conventional Instrument Transformers. *Energies* 16 (2023), 2648, doi:10.3390/en16062648.
- [8] Kaczmarek M., The Influence of the Sinusoidal Conductive Interferences on Metrological Properties of the Voltage Transformers under the Change of Their Operation Conditions. *Prz. Elektrotechniczny* 86 (2010), 34–35.
- [9] IEC 61869-1, *Ins. Trans. - General Requirements*; 2nd ed.; Genewa, Szwajcaria, (2023);
- [10] IEC 61869-6, *Ins. Transf. - Additional General Requirements for Low-Power Instrument Transformers*; Geneva, Switzerland, (2016);
- [11] IEC 61869-2, *Ins. Trans.—Additional Requirements for Current Transformers*; IEC: Geneva, Switzerland, (2012);
- [12] Cristaldi L., Faifer M., Laurano C., Ottoboni R., Toscani S., Zanon M., A Low-Cost Generator for Testing and Calibrating Current Transformers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68 (2019), 2792–2799, doi:10.1109/TIM.2018.2870264.
- [13] Brandolini A., Faifer M., Ottoboni R., A Simple Method for the Calibration of Traditional and Electronic Measurement Current and Voltage Transformers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 58 (2009), 1345–1353, doi:10.1109/TIM.2008.2009184.
- [14] Laurano C., Toscani S., Zanon M., A Simple Method for Compensating Harmonic Distortion in Current Transformers: Experimental Validation. *Sensors* 21 (2021), 2907, doi:10.3390/s21092907.
- [15] Frigo G., Agustoni M., Calibration of a Digital Current Transformer Measuring Bridge: Metrological Challenges and Uncertainty Contributions. *Metrology* 1 (2021), 93–106, doi:10.3390/metrology1020007.
- [16] Siegenthaler S., Mester C., A Computer-Controlled Calibrator for Instrument Transformer Test Sets. In Proceedings of the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement; IEEE, 2017; Vol. 66, pp. 1184–1190.
- [17] 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.
- [18] Kaczmarek M., Stano E., Nonlinearity of Magnetic Core in Evaluation of Current and Phase Errors of Transformation of Higher Harmonics of Distorted Current by Inductive Current Transformers. *IEEE Access* 8 (2020), 118885–118898, doi:10.1109/ACCESS.2020.3005331.
- [19] Kaczmarek M., Stano E., Why Should We Test the Wideband Transformation Accuracy of Medium Voltage Inductive Voltage Transformers? *Energies* 14 (2021), 4432, doi:10.3390/en14154432.
- [20] Stano E., The Method to Determine the Turns Ratio Correction of the Inductive Current Transformer. *Energies* 14 (2021), doi:10.3390/en14248602.
- [21] 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.
- [22] Kaczmarek M., The Source of the Inductive Current Transformers Metrological Properties Deterioration for Transformation of Distorted Currents. *Electr. Power Syst. Res.* 107 (2014), 45–50, doi:10.1016/j.epr.2013.09.007.
- [23] 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 (Switzerland)* 20 (2020), 927, doi:10.3390/s20030927.
- [24] Mingotti A., Bartolomei L., Peretto L., Tinarelli R., On the Long-Period Accuracy Behavior of Inductive and Low-Power Instrument Transformers. *Sensors* 20 (2020), 5810, doi:10.3390/s20205810.
- [25] Kaczmarek M., Wide Frequency Operation of the Inductive Current Transformer with Ni80Fe20 Toroidal Core. *Electr. Power Components Syst.* 42 (2014), 1087–1094, doi:10.1080/15325008.2014.913744.
- [26] Locci N., Muscas C., Comparative Analysis between Active and Passive Current Transducers in Sinusoidal and Distorted Conditions. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 50 (2001), 123–128, doi:10.1109/19.903889.
- [27] Cataliotti A., Di Cara D., Emanuel A.E., Nuccio S., Current Transformers Effects on the Measurement of Harmonic Active Power in LV and MV Networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 26 (2011), 360–368, doi:10.1109/TPWRD.2010.2079336.
- [28] Kaczmarek M., Szczyński A., Stano E., Operation of the Electronic Current Transformer for Transformation of Distorted Current Higher Harmonics. *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15124368.
- [29] Kaczmarek M., Właściwości Metrologiczne Przekładnika Prądowego Wyższych Częstotliwości. *Prz. Elektrotechniczny* 90 (2014), 132–135, doi:10.12915/pe.2014.03.28.
- [30] Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Why Should We Test the Wideband Transformation Accuracy of Inductive Current Transformers? *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15155737.
- [31] Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Understanding the Frequency Characteristics of Current Error and Phase Displacement of the Corrected Inductive Current Transformer. *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15155436.
- [32] 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), 1310–1317, doi:10.1049/iet-epa.2018.5803.
- [33] Kaczmarek M., Kaczmarek P., Comparison of the Wideband Power Sources Used to Supply Step-up Current Transformers for Generation of Distorted Currents. *Energies* 13 (2020), 1849, doi:10.3390/en13071849.

- [34] Kaczmarek M., Stano E., New Approach to Evaluate the Transformation Accuracy of Inductive CTs for Distorted Current. *Energies* 16 (2023), doi:10.3390/en16073026.
- [35] Kaczmarek M., Kaczmarek P., Stano E., The Performance of the High-Current Transformer during Operation in the Wide Frequencies Range. *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15197208.
- [36] Stano E., System Pomiarowy Do Sprawdzania Dokładności Transformacji Poszczególnych Harmonicznych Prądu Odkształconego Przez Indukcyjne Przekładniki Prądowe. *Prz. Elektrotechniczny* 96 (2020), 187–190, doi:10.15199/48.2020.04.39.
- [37] Ballal M.S., Wath M.G., Suryawanshi H.M., A Novel Approach for the Error Correction of Ct in the Presence of Harmonic Distortion. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68 (2019), 4015–4027, doi:10.1109/TIM.2018.2884575.
- [38] Haghjoo F., Pak M.H., Compensation of CT Distorted Secondary Current Waveform in Online Conditions. *IEEE Trans. Power Deliv.* 31 (2016), 711–720, doi:10.1109/TPWRD.2015.2448634.
- [39] Collin A.J., Femine A.D., Gallo D., Langella R., Luiso M., Compensation of Current Transformers' Nonlinearities by Tensor Linearization. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68 (2019), 3841–3849, doi:10.1109/TIM.2019.2905908.
- [40] Gallo D., Landi C., Luiso M., Real-Time Digital Compensation of Current Transformers over a Wide Frequency Range. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 59 (2010), 1119–1126, doi:10.1109/TIM.2010.2044616.
- [41] IEC 61869-2:2012/ISH1:2022, *Interpretation Sheet 1 - Instrument Transformers - Part 2: Additional Requirements for Current Transformers*; Geneva, Switzerland, (2022);
- [42] 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.
- [43] Kaczmarek M., Inductive Current Transformer Accuracy of Transformation for the PQ Measurements. *Electr. Power Syst. Res.* 150 (2017), 169–176, doi:10.1016/j.epsr.2017.05.006.
- [44] 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* 15 (2022), doi:10.3390/en15176258.
- [45] 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.
- [46] Kaczmarek M., Estimation of the Inductive Current Transformer Derating for Operation with Distorted Currents. *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* 62 (2014), 363–366, doi:10.2478/bpasts-2014-0036.