

Sposób i układ do pomiaru parametrów zastępczych systemu elektroenergetycznego

Method and system for measurement of the power system equivalent parameters

Streszczenie. W artykule zaproponowano metodę identyfikacji parametrów zastępczych systemu elektroenergetycznego oraz przedstawiono jej praktyczną realizację. Badania eksperymentalne opracowanej metody przeprowadzono dla układu pomiarowego, w którym do punktu przyłączeniowego o nieznannej impedancji zastępczej przyłączony jest mostek Graetza z obciążeniem RC. Proponowana metoda polega na tym, że w obwodzie mierzone są jednocześnie prąd i napięcie w punkcie przyłączeniowym, a następnie za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyznaczone są parametry zastępcze systemu zasilania. Parametrami zastępczymi są indukcyjność, rezystancja i amplituda pierwszej harmonicznej napięcia źródła zasilania.

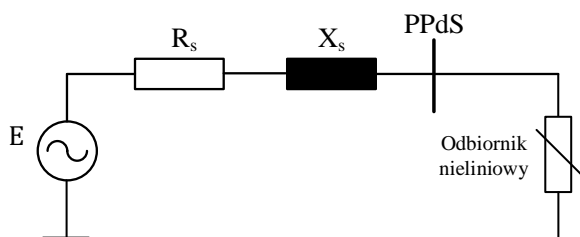
Abstract. This paper deals with a method for identifying the equivalent parameters of a power system and presents its practical implementation. Experimental tests of the developed method were carried out for a measuring circuit in which a Graetz bridge with an RC load is connected to a connection point of unknown equivalent impedance. The proposed method consists of simultaneously measurements of the current and voltage at the connection point in the circuit, and then the equivalent parameters of the power system are determined using the least squares method. The equivalent parameters are the inductance, resistance and amplitude of the first harmonic of the power source voltage.

Słowa kluczowe: sztywność systemu zasilania, impedancja zastępcza, obciążenie nieliniowe, identyfikacja.

Keywords: power system stiffness, equivalent impedance, non-linear load, identification.

Wstęp

Jakość energii elektrycznej zależy od operatora systemu (dostawcy energii) i użytkownika (odbiorcy energii). Aspekty te można rozpatrywać w kategorii zapewnienia zgodności (ang. *compliance*), czyli jakość napięcia zasilania u odbiorcy nie powinna zakłócać normalnej pracy odbiornika, a odbiornik nie powinien wpływać na jakość napięcia zasilania. Zadanie to jest jednak niełatwe, ponieważ obciążenia systemu elektroenergetycznego (SEE) są często odbiornikami nieliniowymi. W wyniku oddziaływań tych odbiorników z SEE powstają odkształcenia napięć w sieci zasilającej, co prowadzi do pogorszenia jakości zasilania u innych odbiorców. Zjawisko to zależy od zastępczej impedancji systemu zasilania. Na impedancję tę składają się impedancje zastępcze elementów systemu, którymi są generatory, dławiki zwarciove, linie zasilające, transformatory oraz inne odbiorniki energii elektrycznej przyłączone do systemu. Moc zwarciova systemu ma charakter indukcyjny, co oznacza, że schematy zastępcze elementów systemu zawierają głównie reaktancję indukcyjną [1]. Dzięki temu efektywność przesyłu energii jest wysoka, ale sztywność zasilania jest obniżona. Schemat zastępczy symetrycznego SEE pracującego w stanie ustalonym z przyłączonym odbiornikiem nieliniowym, można przedstawić jak na rysunku 1. Z punktu przyłączeniowego do systemu (PPdS) odbiorca energii elektrycznej „widzi” zastępcze źródło napięcia E oraz impedancję wyjściową systemu składającą się z rezystancji R_s i reaktancji X_s , które charakteryzują sztywność tego źródła.



Rys. 1. Schemat zastępczy systemu zasilania z przyłączonym odbiornikiem nieliniowym

W każdym punkcie systemu, do którego można podłączyć urządzenie elektryczne, wartość impedancji może być zmienna w czasie [2]. Zmniejsza się przez to przydatność wskaźników jakości energii. Przykładowo współczynnik zawartości harmonicznych prądu (THDi) oraz napięcia zasilania (THDu) zależą od zastępczej impedancji systemu w poszczególnych punktach przyłączeniowych. To względem tych wskaźników identyfikowane są często odbiorniki energii elektrycznej pod kątem wprowadzanych zaburzeń do systemu zasilającego. Znajomość impedancji zastępczej systemu jest kluczowa dla analizy i minimalizacji wpływu odbiorników nieliniowych na SEE. Od tej impedancji zależy skuteczność tłumienia wyższych harmonicznych prądu za pomocą pasywnych filtrów harmonicznych. Dla układów zasilania z odbiornikami nieliniowymi i dołączonymi kondensatorami do kompensacji mocy biernej występowanie impedancji zastępczej systemu może powodować zjawiska rezonansowe. W rezultacie tego mogą pojawić się znacznie większe odkształcenia napięć i prądów w systemie. Właściwe oszacowanie impedancji zastępczej zwiększa także skuteczność działania zabezpieczeń przeciwporażeniowych [3].

Uwzględniając powyższe, można stwierdzić, że monitorowanie impedancji zastępczej systemu zasilania jest niezbędne do analizy i ograniczania tych niekorzystnych zjawisk. Określenie wpływu impedancji systemu zasilania na charakterystyki obwodu z obciążeniem nieliniowym wydaje się jednym z podstawowych problemów prowadzonych analiz w zakresie poprawy jakości energii elektrycznej i zmniejszania wzajemnych oddziaływań odbiorników nieliniowych i systemu elektroenergetycznego. Parametry zastępcze: rezystancja R_s oraz reaktancja X_s decydują o sztywności systemu elektroenergetycznego [4]. W [5] terminu „sztywność systemu” używa się do opisu zmienności napięć w węzłach sieci zasilającej, w funkcji zmian obciążenia systemu. Przyjmuje się, że im większa wartość impedancji zastępczej systemu tym system zasilania jest mniej sztywny [6]. Im system zasilania jest sztywniejszy, tym mniejszy będzie wpływ obciążenia na napięcie zasilające. Sztywność systemu wraz z rosnącą liczbą odnawialnych źródeł energii i odbiorników nieliniowych odgrywa coraz większą rolę w badaniach propagacji

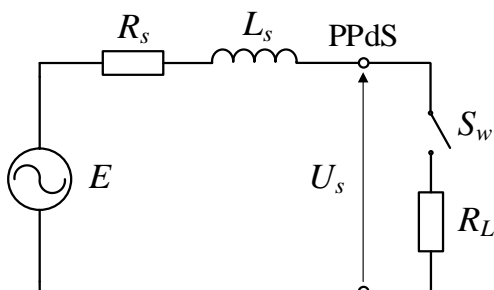
wyższych harmonicznym w systemie elektroenergetycznym oraz rozplywu mocy czynnej i biernej w systemie.

Metody pomiaru parametrów zastępczych systemu elektroenergetycznego

W standardzie IEC/TR 60725 [7] określono, że reaktancja sieci zasilającej o napięciu zasilania 230 V i częstotliwości 50 Hz jest równa $X_s = 0,25 \Omega$, natomiast rezystancja $R_s = 0,4 \Omega$. Są to wartości odniesienia, ponieważ parametry te mogą być zmienne w czasie pracy systemu. Wtedy też parametry te można określić na podstawie pomiarów.

Metody pomiaru impedancji sieci zasilającej dzielą się na inwazyjne i bezinwazyjne [8]. Metody inwazyjne polegają na tym, że do sieci zasilającej generowane są sygnały zakłócające o szerokim widmie częstotliwości, a uzyskane w odpowiedzi chwilowe przebiegi napięcia i prądu są wykorzystywane do wyznaczania impedancji systemu zasilania. Do tego celu wykorzystuje się często urządzenia energoelektroniczne oraz procesy przejściowe występujące np. podczas załączania kondensatorów, w których to, w momencie załączenia powstaje chwilowe zwarcie skutkujące przepływem prądu o dużej zawartości składowych harmonicznym. Takie zakłócenia mogą mieć negatywny wpływ na pracę systemu elektroenergetycznego. Z kolei metody nieinwazyjne wykorzystują składowe harmoniczne napięć i prądów w systemie powstające na skutek istniejących źródeł wyższych harmonicznym [9]. Zaletą tych metod jest ciągłość pomiaru. Nie jest potrzebny generator zaburzeń, którego moc powinna być porównywalna do mocy zwarciowej badanej sieci zasilającej. Metody te umożliwiają pomiar impedancji systemu zasilania w funkcji częstotliwości. Indukcyjność zastępcza określana jest na podstawie składowych harmonicznym napięć i prądów, wyznaczanych za pomocą szeregu Fouriera.

Pomiar zastępczej impedancji systemu zasilania często realizowany jest za pomocą metody sztucznego zwarcia [10]. Schemat zastępczy układu pomiarowego dla tej metody prezentuje rysunek 2. W układzie pomiarowym konieczne jest dobranie takiego sterowania obciążeniem R_L , aby umożliwić pomiar napięcia U_s oraz prądu przy otwartym i następnie zamkniętym łączniku S_w , gdy następuje załączenie obciążenia R_L . Następnie obliczane są amplituda prądu płynącego w obwodzie oraz napięcia U_s , a także ich przesunięcia fazowe, odpowiednio przy odłączonym i załączonym obciążeniu rezystancyjnym R_L . Na podstawie tak określonych wielkości wyznaczane są rezystancja zastępcza systemu zasilania R_s i reaktancja indukcyjna $X_s = \omega L_s$. Indukcyjność L_s obliczana jest na podstawie reaktancji X_s dla częstotliwości kątowej źródła zasilania $\omega = 2\pi f$ (gdzie $f = 50$ Hz).



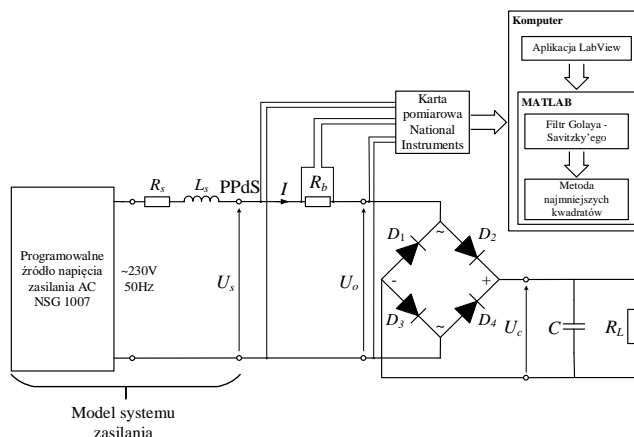
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego dla metody sztucznego zwarcia [10]

Proponowany w artykule sposób pomiaru parametrów zastępczych systemu polega na wykorzystaniu jednoczesnego pomiaru napięcia i prądu w punkcie (PPdS),

bez konieczności stosowania obciążenia o kontrolowanym załączaniu oraz bez stosowania dyskretnej transformaty Fouriera.

Układ do pomiaru parametrów zastępczych systemu elektroenergetycznego

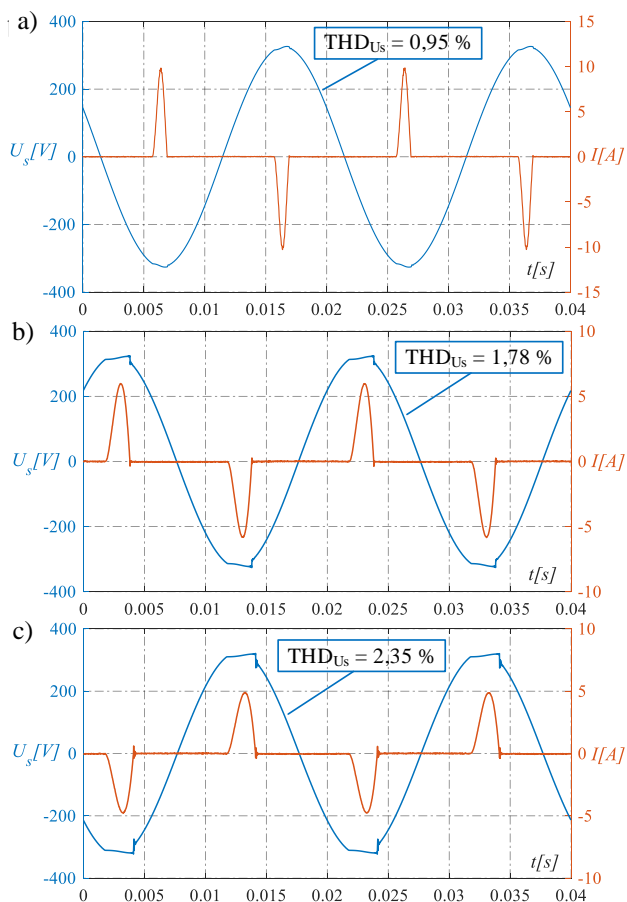
Proponowany układ pomiarowy do wyznaczania parametrów zastępczych systemu elektroenergetycznego prezentowany jest na rysunku 3. Schemat układu różni się od tego dla klasycznej metody sztucznego zwarcia przedstawionego na rysunku 2. Obciążeniem przyłączanym do systemu jest element nieliniowy - mostek Graetza składający się z czterech diod. Do wyjścia mostka przyłączone jest równoległe obciążenie rezystancyjno - pojemnościowe, składające się z rezystora R_L i kondensatora C . Przyjęto, że reaktancja zastępcza źródła zasilania ma charakter indukcyjny i napięcie zasilania $E(t)$ jest sinusoidalne. Model systemu zasilania utworzono wykorzystując programowalne źródło napięcia NSG 1007 o mocy maksymalnej 5 kVA, szeregową indukcyjność L_s i rezystancję R_s . Prąd obwodu przepływający przez rezystor R_b oraz napięcie w punkcie PPdS mierzone są przez kartę pomiarową firmy National Instruments na dwóch jednocześnie próbkowanych kanałach analogowych, o rozdzielczości 16 bitów i szybkości próbkowania do 100 kS/s/ch. Zmierzone wartości napięcia i prądu są zapisywane następnie do pliku tekstowego na komputerze i poddawane filtracji za pomocą filtru Golaya - Savitzky'ego w programie MATLAB. Otrzymane w taki sposób wartości chwilowe przebiegów są następnie przetwarzane metodą najmniejszych kwadratów. Skąd wyznaczane są parametry zastępcze systemu elektroenergetycznego.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego parametrów zastępczych systemu zasilania

Przykładowe pomiary przeprowadzono dla kilku wartości indukcyjności L_s i rezystancji R_s , oraz pozostałych parametrów obwodu: $C = 680 \mu F$, $R_L = 500 \Omega$ i $R_b = 0,1 \Omega$. Indukcyjność L_s jest to całkowita indukcyjność widziana z zacisków punktu PPdS, na którą składa się indukcyjność źródła napięciowego AC oraz dodatkowej szeregowej indukcyjności L_d dołączanej w trakcie pomiarów. W analogiczny sposób reprezentowana jest rezystancja R_s . Parametry obciążenia RC prostownika dobrano tak, aby widmo częstotliwościowe prądu I było możliwie szerokie. Napięcie źródła zasilania wynosiło 230 V o częstotliwości $f = 50$ Hz. Wybrane przebiegi napięć i prądów w PPdS prezentowane są na rysunku 4. Prąd obwodu I posiada przerwy w przewodzeniu oraz charakteryzuje się dużą zawartością wyższych harmonicznym. Przepływ tych harmonicznym prądu przez impedancję układu zasilania powoduje niesinusoidalny spadek napięcia na tej impedancji

i przyczynia się do odkształcenia napięcia U_s . Odkształcenia te są zasadniczo małe, jeżeli w obwodzie nie jest włączona dodatkowa indukcyjność i rezystancja – rysunek 4a. Jest to typowe dla sztywnego systemu zasilania. Zwiększając wartości indukcyjności L_s i rezystancji R_s odkształcenia te są coraz większe – rysunek 4b i 4c. Wynika to z faktu, że układ zasilania jest wówczas mniej sztywny.



Rys. 4. Chwilowe przebiegi napięcia U_s i prądu obwodu I w punkcie PPdS a) bez dodatkowej indukcyjności L_d i rezystancji R_d oraz dla dodatkowej indukcyjności i rezystancji: b) $L_d = 1$ mH, $R_d = 0,3$ Ω i c) $L_d = 2$ mH, $R_d = 0,8$ Ω

Parametry zastępcze systemu zasilania mogą być określone na podstawie chwilowych wartości napięcia U_s i prądu I , których przykładowe przebiegi prezentowane są na rysunku 4. Uwzględniając, że dla przyjętego modelu systemu zasilania, reakcja zastępcza ma charakter indukcyjny i napięcie zasilania $E(t)$ jest sinusoidalne, to schemat zastępczy obwodu zasilania na rysunku 3 można opisać równaniem:

$$(1) \quad E(t) - R_s I(t) - L_s \frac{dI(t)}{dt} = U_s(t)$$

Napięcie źródła zasilania $E(t)$ w równaniu (1) można przedstawić następująco:

$$(2) \quad E(t) = E_{h1} \sin(\omega t + \psi_1) = E_{h1} \cos(\psi_1) \sin(\omega t) + E_{h1} \sin(\psi_1) \cos(\omega t)$$

gdzie: E_{h1} oznacza amplitudę pierwszej harmonicznej napięcia źródła zasilania.

Podstawiając (2) do (1) otrzymuje się równanie:

$$(3) \quad E_{h1c} \cdot \sin(\omega t) + E_{h1s} \cdot \cos(\omega t) - R_s I(t) - L_s \frac{dI(t)}{dt} = U_s(t)$$

gdzie:

$$(4) \quad E_{h1c} = E_{h1} \cdot \cos(\psi_1); \quad E_{h1s} = E_{h1} \cdot \sin(\psi_1)$$

Dla pewnej chwili t_k równanie (4) może być przedstawione w postaci:

$$(5) \quad \begin{bmatrix} \sin(\omega t_k) & \cos(\omega t_k) & -I(t_k) & -\dot{I}(t_k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{h1c} \\ E_{h1s} \\ R_s \\ L_s \end{bmatrix} = U_s(t_k)$$

Parametry zastępcze źródła zasilania: E_{h1c} , E_{h1s} , R_s i L_s wyznaczone są z równania (5) za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Zadanie identyfikacji metodą najmniejszych kwadratów dla (5) w postaci macierzowej można zapisać następująco:

$$(6) \quad \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{Y}$$

gdzie:

$$(7) \quad \mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} \sin(\omega t_0) & \cos(\omega t_0) & -I(t_0) & -\dot{I}(t_0) \\ \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) & -I(t_1) & -\dot{I}(t_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin(\omega t_p) & \cos(\omega t_p) & -I(t_p) & -\dot{I}(t_p) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} E_{h1c} \\ E_{h1s} \\ R_s \\ L_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} U_s(t_0) \\ U_s(t_1) \\ \dots \\ U_s(t_p) \end{bmatrix}$$

Rozwiązaniem układu (6) jest:

$$(8) \quad \mathbf{C} = [\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G}]^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{Y}$$

Mierząc napięcie $U_s(t_k)$ i prąd $I(t_k)$, a następnie wyznaczając pochodną prądu po czasie $\dot{I}(t_k)$ oraz wektory wartości chwilowych przebiegów $\sin(\omega t_k)$ i $\cos(\omega t_k)$ o pulsacji $\omega = 2\pi f$ i amplitudzie równej 1 wyznaczone są nieznanne współczynniki zdefiniowane w wektorze \mathbf{C} , które określają parametry zastępcze systemu zasilania. Amplitudę pierwszej harmonicznej napięcia źródła zasilania E_{h1} można wyznaczyć następująco:

$$(9) \quad E_{h1} = \sqrt{E_{h1c}^2 + E_{h1s}^2}$$

Stosując powyższe, przeprowadzono eksperymentalną weryfikację proponowanej metody. Przyjmując wstępnie, że parametry zastępcze L_s oraz R_s wynikają jedynie z elementów zastępczych źródła napięcia AC, czyli w obwodzie nie jest dołączona dodatkowa indukcyjność L_d . Taki przypadek odpowiada przebiegom napięcia i prądu, które prezentowane są na rysunku 4a. Wyznaczono parametry zastępcze, otrzymując: $E_{h1} = 325,38$ V, $L_s = 0,134$ mH i $R_s = 0,243$ Ω . Następnie, pomiędzy zacisk fazowy źródła zasilania i PPdS włączono dodatkową szeregową indukcyjność L_d o wartości 1 mH oraz rezystancję R_s o wartości 0,3 Ω , zwiększając tym samym całkowitą impedancję zastępczą układu zasilania. Pozostałe parametry badanego układu pozostały niezmiennie. Ponownie wyznaczono parametry zastępcze, według proponowanej metody, otrzymując w wyniku: $E_{h1} = 325,50$ V, $L_s = 1,12$ mH i $R_s = 0,53$ Ω . Z pomiarów tych wynika, że po dołączeniu dodatkowej indukcyjności szeregowo 1 mH, zmierzona całkowita indukcyjność zastępcza L_s zwiększa się o 0,986 mH (w odniesieniu do wartości przed dołączeniem

dotychczasowej indukcyjności 1 mH), czyli o wartość bardzo bliską tej dodatkowej indukcyjności. Całkowita rezystancja zastępcza R_s w odniesieniu do jej wartości przed dołączeniem dodatkowej rezystancji $0,3 \Omega$ zwiększa się o $0,287 \Omega$, czyli o wartość bardzo bliską tej dodatkowej rezystancji. Przedstawiony przykład wykonania, na danych liczbowych potwierdza, że sposób pomiaru i układ pomiarowy według wynalazku może być użyty w zastosowaniach technicznych. Wyniki identyfikacji dla kilku wybranych indukcyjności i rezystancji zamieszczono w tabeli 1. Napięcie $E_{h1sk} = E_{h1}/\sqrt{2}$ jest to zidentyfikowane napięcie skuteczne pierwszej harmonicznej źródła zasilania.

Tabela 1. Wyniki identyfikacji parametrów systemu zasilania dla różnych indukcyjności L_d i rezystancji R_d

Testowane elementy, modelujące system zasilania dla sinusoidalnego źródła zasilania 230 V i częstotliwości 50 Hz	Parametry otrzymane w identyfikacji		
	E_{h1sk} [V]	L_s [mH]	R_s [Ω]
$L_d = 0$ mH, $R_d = 0 \Omega$	230,14	0,134	0,243
$L_d = 0,25$ mH, $R_d = 0,13 \Omega$	230,17	0,356	0,37
$L_d = 0,5$ mH, $R_d = 0,2 \Omega$	230,18	0,606	0,43
$L_d = 0,68$ mH, $R_d = 0,7 \Omega$	230,15	0,80	0,98
$L_d = 1$ mH, $R_d = 0,3 \Omega$	230,16	1,12	0,53
$L_d = 2$ mH, $R_d = 0,8 \Omega$	230,13	2,08	0,97
$L_d = 5$ mH, $R_d = 1,3 \Omega$	230,09	4,87	1,41

Dla wszystkich testowanych dodatkowych dławików z wyjątkiem dławika o wartości $L_d = 5$ mH zidentyfikowane wartości indukcyjności L_s są zawyżone w porównaniu do wartości podanych w pierwszej kolumnie tabeli 1. Jest to spowodowane impedancją zastępczą źródła zasilania AC. W wyniku identyfikacji przeprowadzonej bez dodatkowych elementów, indukcyjności L_d i rezystancji R_d (przyłączając układ pomiarowy bezpośrednio do źródła zasilania) otrzymano indukcyjność $L_s = 0,134$ mH oraz rezystancję $R_s = 0,243 \Omega$. Dlatego też, całkowita indukcyjność zastępcza widziana z zacisków przyłączeniowych PPdS jest równa sumie tej indukcyjności oraz testowanej indukcyjności dodatkowej L_d . Analogicznie należy przedstawiać zidentyfikowaną całkowitą rezystancję zastępczą R_s . Dla

indukcyjności testowej $L_d = 5$ mH, w porównaniu do pozostałych testowanych indukcyjności, wyznaczona indukcyjność L_s jest nieco zaniżona. Może to wynikać z pojawiających się zwiększonych oscylacji w przebiegach napięcia i prądu, w chwili, gdy następuje przerwa w przewodzeniu prądu $I_{(t)}$. Zastosowane dławiki powietrzne modelujące dodatkową indukcyjność L_d mają tolerancję $\pm 3 \%$, co może wpływać na błąd pomiaru. Zaletą proponowanej metody jest możliwość identyfikacji amplitudy napięcia źródła zasilania dla harmonicznej podstawowej.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda pomiaru parametrów zastępczych systemu zasilania, którego impedancja zastępcza ma charakter indukcyjny wyróżnia się prostotą realizacji pomiaru na tle metod dostępnych w literaturze. Do określenia parametrów zastępczych systemu wystarczy jednoczesny pomiar prądu w obwodzie oraz napięcia na zaciskach zasilających prostownik w punkcie przyłączeniowym do systemu zasilania.

Zaletą proponowanej metody jest możliwość identyfikacji indukcyjności zastępczej systemu L_s , rezystancji zastępczej systemu R_s , a także amplitudy napięcia źródła zasilania dla harmonicznej podstawowej E_{h1} .

Metodę można określić jako metodę bezinwazyjną, ponieważ nie ma potrzeby stosowania układu z kontrolowanym załączaniem. Można wykorzystać przebiegi prądu i napięcia obwodu systemu elektroenergetycznego do którego przyłączony jest zasilacz DC. Metoda może być użyteczna w układach zasilania, do których przyłączane są zasilacze UPS (ang. *Uninterruptible Power Supply*), ponieważ nie ma potrzeby odłączania urządzenia w trakcie pomiaru, co także czyni metodę praktyczną.

Autorzy: dr inż. Paweł Strzabala, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: pstrzabala@tu.kielce.pl; prof. dr hab. inż. Mirosław Wciślik, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: wcislik@tu.kielce.pl.

LITERATURA

- [1] Das J.C.: *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2015
- [2] Jimenez Y., Duarte C., Petit J.: *Characterization of current switching transients for appliance identification*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15), Vol. 1, Nr 13, 2015, s. 184 - 189
- [3] Borowski K.: *Przegląd metod pomiaru impedancji pętli zwarciowej i ocena ich przydatności do obwodów z wyłącznikami różnicowoprądowymi*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 45, 2015, s. 19 – 22
- [4] Czornik J., Haltóř M.: *Wpływ filtrów harmoniczných na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 3, 2020, s. 42-46
- [5] Oziembleski K., Opala K.: *Stabilność statyczna systemów elektroenergetycznych (SEE) Kołysania mocy*, Energetyka, Nr 10, 2015, s. 632-637
- [6] Bingham R. P.: *Easy First Step: 'Stiffness' and Electrical Systems*, Dostępne online pod adresem: <https://www.ecmag.com/section/integrated-systems/easy-first-step-stiffness-and-electrical-systems>, 2019 (dostęp online 10.03.2020)
- [7] IEC/TR 60725:2012: *Consideration of reference impedances and public supply network impedances for use in determining the disturbance characteristics of electrical equipment having a rated current $\leq 75A$ per phase*.
- [8] Gül Ö., Othman R.: *Expert System Design for Determining the Harmonic Resonance and the Capacitor Safety Level*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16), Madrid, 2016, s. 644 – 649
- [9] Borkowski D.: *Nieinwazyjne metody pomiaru zastępczej impedancji harmonicznej elektroenergetycznego systemu zasilającego*, Autoreferat postępowania habilitacyjnego, AGH, Kraków, 2018
- [10] Czapp S.: *Wybrane problemy pomiaru impedancji pętli zwarciowej w instalacjach z zasilaczami UPS*, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, Vol. 8, nr 3, 2017, s. 26 – 33