

KOMPENSACJA ASYMETRII POWODOWANEJ NISKOEMISYJNYMI ODBIORNIKAMI I ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII W SIECIACH NISKICH NAPIĘĆ

Łukasz TOPOLSKI¹, Zbigniew HANZELKA²

1. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
tel.: 695 048 757 e-mail: lukas.topolski@gmail.com
2. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
tel.: 12 617 28 78 e-mail: hanzel@agh.edu.pl

Streszczenie: Gwałtowny wzrost przyłączanych do sieci niskich napięć 1-fazowych, niskoemisyjnych odbiorników i źródeł odnawialnych, takich jak: pompy ciepła, fotowoltaika oraz układy mikrokogeneracyjne, znacząco wpływa na wzrost asymetrii prądowej i napięciowej, co często prowadzi do przekraczania dopuszczalnych wartości dla napięć fazowych i nieprawidłowej pracy tych urządzeń. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów skuteczności kompensacji asymetrii za pomocą transformatora symetryzującego w dwóch różnych sieciach niskiego napięcia zasilających odbiorców i prosumentów zlokalizowanych na terenie jednego z operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD).

Słowa kluczowe: asymetria, składowe symetryczne, transformator symetryzujący, odnawialne źródła energii.

1. WPROWADZENIE

Intensywny rozwój energetyki rozproszonej, wynikający z postępującego wyczerpywania się zasobów złóż paliw kopalnych, konieczności ograniczenia emisji substancji szkodliwych do atmosfery oraz rosnących cen energii elektrycznej, powoduje, że obserwowany jest coraz większy udział przyłączanych do sieci niskich napięć 1-fazowych, niskoemisyjnych odbiorników i odnawialnych źródeł energii (OZE). Niestety, przyłączanie tych urządzeń do sieci niskich napięć znacząco wpływa na wzrost asymetrii prądowej i napięciowej, głównie poprzez duże zróżnicowanie w produkcji (zależnym od warunków atmosferycznych) i popycie (zależnym od funkcjonowania odbiorców) na energię elektryczną w danej chwili czasu oraz poprzez nierównomierne rozłożenie i przypadkowe (losowe) załączanie tych urządzeń w tym samym czasie do poszczególnych faz układu 3-fazowego [1]. Z kolei wzrost asymetrii napięć często prowadzi do przekraczania dopuszczalnych wartości dla napięć fazowych i nieprawidłowej pracy urządzeń zasilanych z tych sieci.

Wdrożenie skutecznych metod kompensacji asymetrii znacząco przyczyniłoby się do przyłączania większej liczby odbiorników i źródeł odnawialnych, przy zachowaniu poprawnych warunków dostawy energii elektrycznej.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów skuteczności kompensacji asymetrii za pomocą transformatora symetryzującego w dwóch różnych sieciach niskiego napięcia zasilających odbiorców i prosumentów zlokalizowanych na terenie jednego z OSD.

2. ASYMETRIA

2.1. Źródła asymetrii

Źródłami asymetrii w sieciach niskich napięć mogą być: źródło zasilania, linia dystrybucyjna oraz odbiorniki lub odnawialne źródła energii. Z reguły, w normalnych warunkach pracy sieci, źródło zasilania jest symetryczne. Pewną asymetrią charakteryzują się linie dystrybucyjne, co jest wynikiem rozmieszczenia przewodów fazowych w układzie różnym od trójkąta równobocznego [2]. Natomiast głównym źródłem asymetrii w sieciach niskich napięć są obecnie 1-fazowe odbiorniki, a w niedalekiej przyszłości będą nim również 1-fazowe odnawialne źródła energii.

Rozpatrując asymetrię powodowaną przez niesymetryczne odbiorniki i źródła odnawialne, można wyróżnić dwa stany [1]:

- stan asymetrii deterministycznej, powodowany nierównomiernym przyłączeniem odbiorników (źródeł odnawialnych) do poszczególnych faz
- stan asymetrii probabilistycznej, powodowany przypadkowym (losowym) załączaniem i wyłączaniem odbiorników i zmienną produkcją energii elektrycznej przez źródła odnawialne.

2.2. Skutki asymetrii

Skutków długotrwałego występowania asymetrii prądów i napięć jest wiele, a do najpoważniejszych z nich zalicza się [1, 3, 4]:

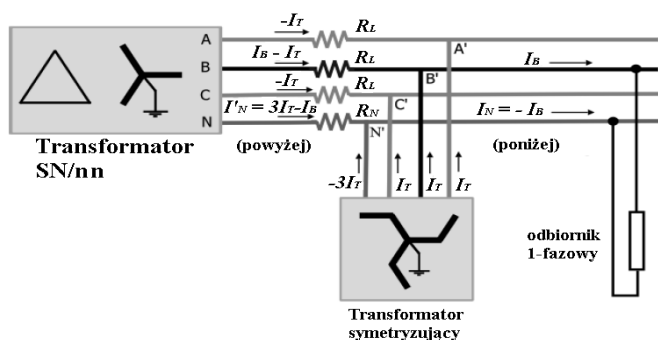
- obniżenie sprawności przesyłu energii elektrycznej spowodowane przepływem dodatkowych prądów składowej symetrycznej kolejności zerowej i przeciwnej przez linie elektroenergetyczne i transformatory
- skrócenie czasu życia linii elektroenergetycznych i transformatorów powodowane zwiększonym obciążeniem cieplnym izolacji tych urządzeń
- problemy z ustawieniem przełącznika zacsepów transformatora w celem utrzymania napięcia na obwodzie w dopuszczalnych wartościach
- brak możliwości oddawania nadwyżek energii elektrycznej do sieci przez źródła OZE w przypadku wzrostu któregośkolwiek napięcia fazowego poza dopuszczalną wartość, co skutkuje wyłączeniem falownika celem jego ochrony przed uszkodzeniem

- problemy z poprawną pracą trójfazowych maszyn elektrycznych (np. generatorów, silników, pomp, wentylatorów), co objawia się nierównomierną pracą powodowaną drganiem i wibracjami układu, problemami z rozruchem, utykaniem w trakcie pracy
- nieprawidłowe działanie lub zniszczenie odbiorników RTV i AGD powodowane zasilaniem tych urządzeń małym lub zbyt dużym napięciem fazowym.

3. KOMPENSACJA ASYMETRII ZA POMOCĄ TRANSFORMATORA SYMETRYZUJĄCEGO

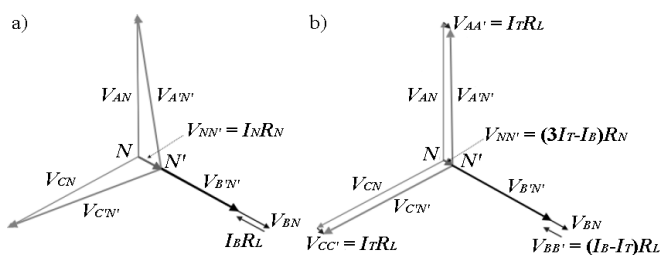
Jednym ze sposobów kompensacji asymetrii prądów i napięć w sieciach 3-fazowych czteroprzewodowych, zasilających odbiorniki i odnawialne źródła energii, jest zainstalowanie na problematycznym obwodzie tzw. transformatora symetryzującego. Transformator symetryzujący jest to 3-fazowy transformator o układzie połączeń uzwojeń w zygzak, który przyłącza się równolegle w wybranym miejscu sieci. Urządzenie to konstrukcyjnie jest bardzo podobne do tradycyjnego transformatora dystrybucyjnego SN/nn [4].

Zasada symetryzacji prądów i napięć za pomocą transformatora symetryzującego została przedstawiona na rysunku 1.



Rys.1. Przykład obrazujący zasadę symetryzacji prądów i napięć za pomocą transformatora symetryzującego [4]

Załączenie transformatora symetryzującego powoduje, że część prądu I_N wracającego przewodem neutralnym N płynie przez transformator symetryzujący (dzieje się tak, ponieważ połączenie uzwojeń transformatora w zygzak charakteryzuje się małą impedancją dla składowej symetrycznej kolejności zerowej prądu), a następnie jest on równomiernie rozdzielany na poszczególne fazy. Skutkuje to zmniejszeniem spadku napięcia w fazie B , ponieważ zmniejszeniu uległ prąd płynący tą fazą ($I_B - I_T$) oraz zmniejszeniem spadku napięcia w przewodzie neutralnym N o wyrażenie $3I_T - I_B$ [4]. Dzięki temu napięcia fazowe stają się bardziej symetryczne, tak jak zostało to pokazane na rysunku 2b.



Rys.2. Gwiazda napięć fazowych przed (a) i po (b) załączeniu transformatora symetryzującego [4]

Parametry znamionowe urządzenia wykorzystanego do testów zostały przedstawione w tablicy 1.

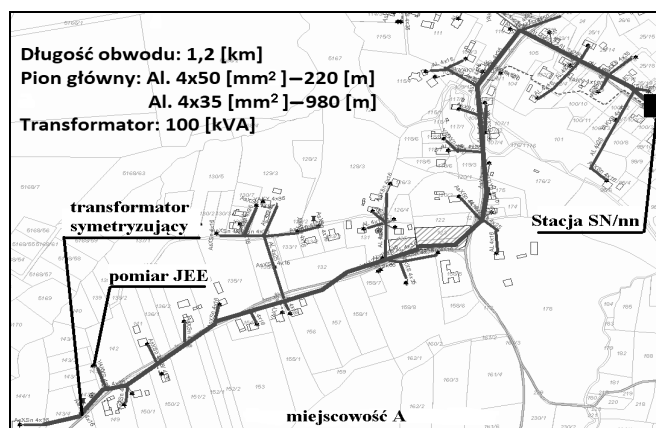
Tablica 1. Zestawienie podstawowych danych znamionowych transformatora symetryzującego wykorzystanego do testów [5]

znamionowa moc pozorna S_N	35 [kVA]
napięcie znamionowe U_N	400 [V]
układ sieci	3-fazowy TN/TT
stopień ochrony obudowy	IP55
masa	125 [kg]

4. OCENA SKUTECZNOŚCI KOMPENSACJI ASYMETRII ZA POMOCĄ TRANSFORMATORA SYMETRYZUJĄCEGO

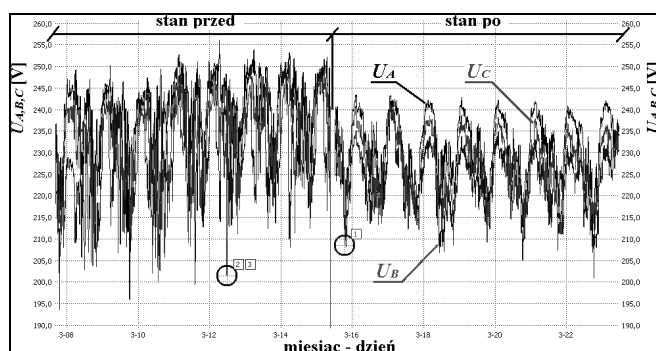
4.1. Kompensacja asymetrii w sieci niskiego napięcia bez udziału odnawialnych źródeł energii

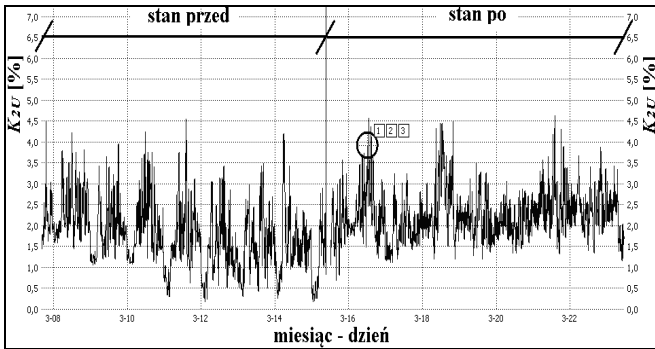
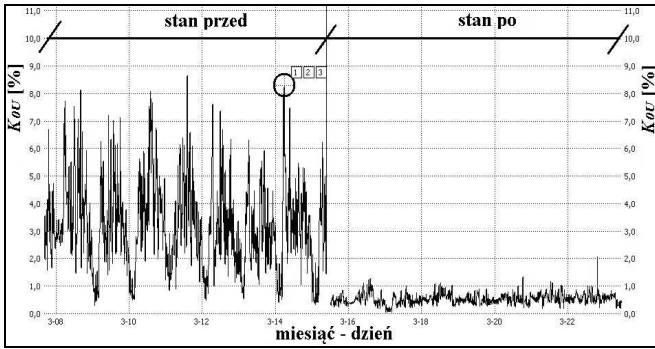
Do przeprowadzenia pierwszego testu skuteczności kompensacji asymetrii za pomocą transformatora symetryzującego wybrano pewną sieć niskiego napięcia zlokalizowaną w miejscowości „A”, charakteryzującą się dużym udziałem składowej symetrycznej kolejności przeciwnej i zerowej w napięciu zasilającym. Mapa układu sieci została zaprezentowana na rysunku 3.



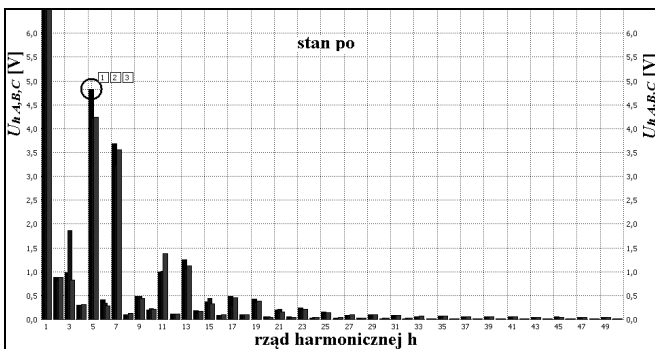
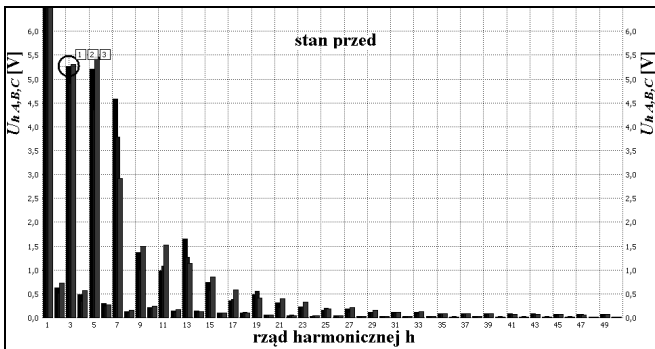
Rys.3. Mapa układu sieci niskiego napięcia w miejscowości „A”

Na lokalizację transformatora symetryzującego wybrano przedostatni słup na obwodzie. Pomiar wskaźników jakości energii elektrycznej został przeprowadzony za pomocą analizatora klasy A w złączu kablowym zlokalizowanym powyżej urządzenia symetryzującego. Czas uśredniania mierzonych parametrów został ustawiony na 10 min. Pomiar został przeprowadzony w dniach 7–23 marca 2018 roku, a transformator symetryzujący został załączony pod napięcie 15 marca 2018 roku. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4 i 5.





Rys.4. Wykres napięć fazowych i współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia przed i po załączeniu urządzenia symetryzującego

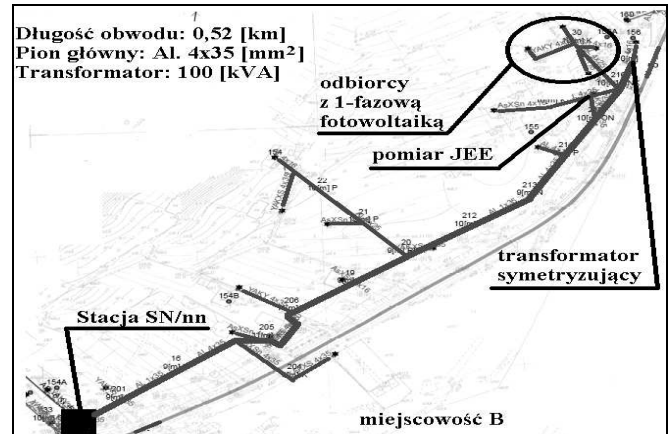


Rys.5. Wykres widma harmonicznych napięcia przed i po załączeniu urządzenia symetryzującego

4.2. Kompensacja asymetrii w sieci niskiego napięcia z udziałem jednofazowych źródeł odnawialnych

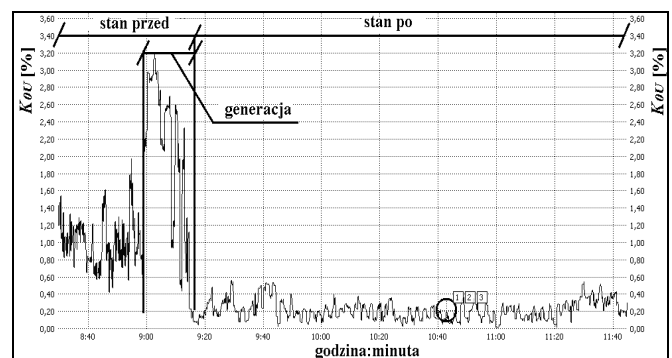
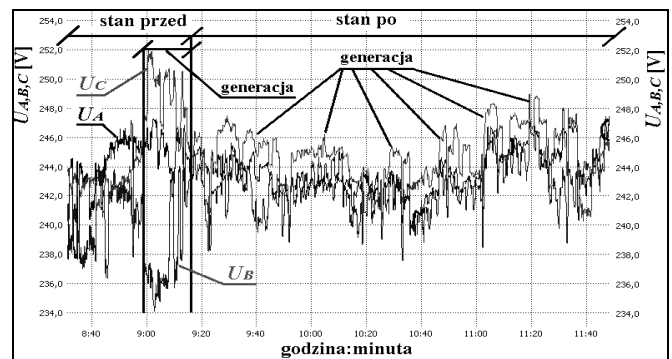
Do drugiego eksperymentu wybrano pewną sieć niskiego napięcia zlokalizowaną w miejscowości „B”, w gminie Ochotnica Dolna. Gmina ta w 2016 roku, w ramach Programu Priorytetowego Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej „Wspieranie

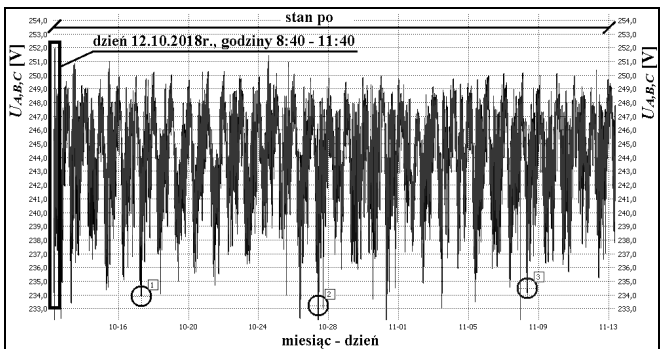
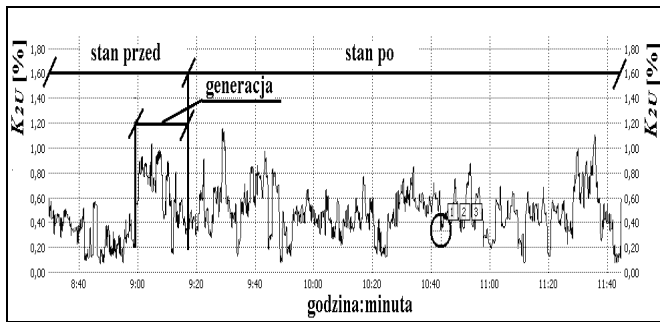
rozproszonych, odnawialnych źródeł energii”, otrzymała dofinansowanie na budowę 1-fazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych do grzania wody z możliwością oddawania nadwyżek energii elektrycznej do sieci [6]. Układ sieci niskiego napięcia przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Mapa układu sieci niskiego napięcia w miejscowości „B”

Na lokalizację transformatora symetryzującego wybrano ostatni słup ciągu głównego obwodu. Pomiar wskaźników jakości energii elektrycznej wykonano za pomocą analizatora klasy A w jednym ze złączy kablowych, powyżej urządzenia symetryzującego. W celu uwidocznienia krótkotrwałych zmian napięcia zmniejszono czas uśredniania mierzonych parametrów z 10 min do 10 s. Pomiar został przeprowadzony w dniach 12 października – 13 listopada 2018 roku, a urządzenie symetryzujące zostało podane pod napięcie 12 października 2018 roku o godz. 9.15. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów zawężone do chwili wystąpienia generacji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych i momentu załączenia urządzenia symetryzującego oraz z całego okresu pomiarowego.





Rys.7. Wykres napięć fazowych i współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia, zawężony do godz. 8.40–11.40 z 12 października 2018 roku, oraz napięć fazowych z całego okresu pomiarowego przed i po załączeniu urządzenia symetryzującego

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Wzrost zainteresowania 1-fazowymi, niskoemisyjnymi odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii elektrycznej sprawia, że przyłączanie dużej liczby tych urządzeń do sieci niskich napięć powoduje gwałtowny wzrost asymetrii prądowej i napięciowej, co często skutkuje przekraczaniem dopuszczalnych wartości dla napięć fazowych i nieprawidłową pracą urządzeń zasilanych z tych sieci

Urządzeniem kompensującym składową symetryczną kolejności zerowej prądu i napięcia jest transformator symetryzujący o układzie połączeń uzwojeń w zygzak. Wysoka skuteczność kompensacji składowych symetrycznych kolejności zerowej napięcia została pomiarowo potwierdzona w przeprowadzonych testach urządzenia, dla dwóch różnych sieci niskiego napięcia, bez udziału źródeł odnawialnych i z ich udziałem. W obu przypadkach po załączeniu urządzenia napięcia fazowe stały

się bardziej symetryczne, a w sieci z 1-fazowymi źródłami odnawialnymi dodatkowo zauważalny jest korzystny wpływ urządzenia na wzrosty napięcia w fazie, w której trwa generacja. Dużą zaletą urządzenia jest również kompensacja harmoniczných prądu i napięcia kolejności zerowej, czyli harmoniczných, które zazwyczaj w znacznych ilościach występują w sieciach niskich napięć. Urządzenie jest dobrym rozwiązaniem dla sieci mocno nasyconych 1-fazowymi źródłami odnawialnymi i niskoemisyjnymi odbiornikami.

Dalszych badań wymaga natomiast kompensacja składowych przeciwnych prądu i napięcia, które to nie są kompensowane przez to urządzenie, a mają negatywny wpływ na poprawną pracę urządzeń 3-fazowych.

Artykuł powstał w ramach projektu Gospostrateg1/385085/21/NCBR/2019 pt. „Rozwój energetyki rozproszonej w klastrach energii” w ramach I konkursu na projekty otwarte w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków”.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Kowalski Z.: Asymetria w układach elektroenergetycznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1987, s. 19-22.
2. Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B.: Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych, Przegląd Elektrotechniczny, R.90 Nr 7/2014, s.23-26.
3. Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej, zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013, s. 201-204, 210-230.
4. Beharrysingh Shiva. Doctoral thesis: Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancer. Loughborough University, 2014.
5. Strona internetowa firmy ENSTO, link: <https://www.ensto.com/pl/produkty/jako-energii/ensto-phase-balancer/pb50a-3p-200adv> [dostęp: 01.02.2019r.]
6. Strona internetowa Gminy Ochotnica Dolna, link: <http://www.ochotnica.pl/pl/211/1915/nabor-do-programu-budowy-mikroinstalacji-fotowoltaicznych.html>. [dostęp: 01.02.2019r.]

MITIGATION OF ASYMMETRY CAUSED BY LOW-CARBON TECHNOLOGIES ON LOW-VOLTAGE ELECTRICITY NETWORK

The rapid development of dispersed generation resulting from the progressive depletion of fossil fuel deposits, the need to limit the emission of harmful substance to the atmosphere and the rising prices of electricity cause that an increasing share of single phase photovoltaic (PV), heat pumps and micro-cogeneration (μ CHP) technologies are connected to the low-voltage electricity network. Connecting such low-carbon technologies significantly increase the current and voltage asymmetry, mainly due to large variations in production (depending on weather conditions) and demand for electricity at given time, which leads to exceeding statutory limits for phase-neutral voltages and often cause failures of these devices. The paper presents measurements of asymmetry mitigation efficiency using a balancing transformer in two different low-voltage network, supplying consumers and prosumers at one of the Distribution System Operators (DSO) in Poland.

Keywords: asymmetry, symmetrical components, balancing transformer, renewable energy sources.