

Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć

Streszczenie. Gwałtowny wzrost przyłączanych do sieci niskich napięć jednofazowych odbiorników i źródeł odnawialnych, takich jak: pompy ciepła, instalacje fotowoltaiczne oraz układy mikrokogeneracyjne znacząco wpływa na wzrost asymetrii prądów i napięć, co często prowadzi do przekraczania dopuszczalnych wartości dla napięć fazowych i nieprawidłowej pracy urządzeń zasilanych z tych sieci. W artykule omówiono zagadnienia związane ze zjawiskiem asymetrii prądów i napięć w sieci trójfazowej czteroprzewodowej oraz 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).

Abstract. The rapid development of single phase low-carbon technologies causes that an increasing share of photovoltaics (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, which leads to exceeding statutory limits for phase-neutral voltages and often cause failures of electrical devices. The paper discusses issues related to the phenomenon of current and voltage asymmetry in a typical three-phase four-wire low-voltage electricity network and presents measurements of asymmetry mitigation efficiency using the balancing transformer in two different low-voltage electricity network, supplying consumers and prosumers at one of the Distribution System Operators (DSO) in Poland. (Mitigation of current and voltage asymmetry caused by low-carbon technologies using the balancing transformer on low-voltage electricity network).

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

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

Wstęp

Intensywny rozwój energetyki rozproszonej wynikający z postępującego wyczerpywania się zasobów złóż paliw kopalnych, konieczności ograniczania emisji substancji szkodliwych do atmosfery oraz rosnące ceny energii elektrycznej powodują, że obserwowany jest coraz większy udział przyłączanych do sieci niskich napięć jednofazowych odbiorników i źródeł odnawialnych, takich jak: pompy ciepła, instalacje fotowoltaiczne oraz układy mikrokogeneracyjne. Niestety, przyłączanie tych urządzeń do sieci niskich napięć znacząco wpływa na wzrost asymetrii prądów i napięć, głównie poprzez duże zróżnicowanie w produkcji (zależnej od warunków atmosferycznych) i popycie (zależnym od funkcjonowania odbiorców) na energię elektryczną w danym przedziale czasu oraz poprzez nierównomierne rozłożenie i przypadkowe (losowe) załączanie tych urządzeń w tym samym czasie do poszczególnych faz układu trójfazowego [1].

Zwiększaniu obecnego poziomu asymetrii sprzyjają pośrednio obecne regulacje prawne zawarte m.in. w ustawie Prawo energetyczne [2], które stanowią, iż odbiorcy w ramach istniejącej mocy przyłączeniowej mogą przyłączać swoje instalacje odnawialne tylko na podstawie zgłoszenia przyłączenia (poinformowaniu OSD o fakcie zainstalowania mikroinstalacji), z pominięciem procedury określania warunków przyłączenia dla instalacji OZE.

Kolejnym aspektem mającym pośredni wpływ na zwiększanie poziomu asymetrii w sieciach niskich napięć jest niewystarczająca komunikacja pomiędzy gminami, które otrzymały dofinansowanie na montaż znacznej liczby instalacji OZE dla swoich mieszkańców, a OSD. Z reguły OSD dowiadują się o przyłączeniu instalacji OZE do ich sieci dopiero po dużej liczbie przesłanych zgłoszeń przyłączenia oraz reklamacjach od odbiorców, którzy zauważyli nieprawidłowe działanie swoich instalacji OZE lub odbiorników energii elektrycznej.

Wszystkie te aspekty powodują, że OSD często stawiani są przed faktem dokonanym i nie mają pełnej kontroli nad ilością przyłączanych instalacji odnawialnych, przez co możliwości podjęcia przez nie z wyprzedzeniem działań eksploatacyjnych bądź inwestycyjnych zmierzających do

poprawy stanu technicznego sieci i przystosowania ich do przyłączenia znacznej liczby OZE są ograniczone i spóźnione.

Zaimplementowanie skutecznych metod kompensacji asymetrii znacząco przyczyniłoby się do złagodzenia negatywnych jej skutków oraz stworzyłoby możliwość przyłączania większej liczby źródeł odnawialnych, przy zachowaniu poprawnych warunków dostawy energii elektrycznej określonych w Rozporządzeniu systemowym [3].

W niniejszym artykule omówiono zagadnienia dotyczące zjawiska asymetrii w sieciach trójfazowych czteroprzewodowych oraz 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.

Definicja asymetrii

W celu poprawnego zdefiniowania asymetrii napięć i prądów w trójfazowym układzie elektroenergetycznym, w pierwszej kolejności należy zdefiniować symetrię napięciową i prądową w tym układzie. Jeżeli w dowolnym punkcie układu trójfazowego prądy i napięcia są symetryczne, oznacza to, że spełnione są następujące związki [4]:

- w odniesieniu do prądów fazowych

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_A \\ \bar{I}_B &= a^2 \bar{I}_A \\ \bar{I}_C &= a \bar{I}_A\end{aligned}\quad (1)$$

- w odniesieniu do napięć fazowych

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_A \\ \bar{U}_B &= a^2 \bar{U}_A \\ \bar{U}_C &= a \bar{U}_A\end{aligned}\quad (2)$$

gdzie: $\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$ – wektory prądów fazowych [A], $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ – wektory napięć fazowych [V], a – operator obrotu o 120° , a^2 – operator obrotu o 240° .

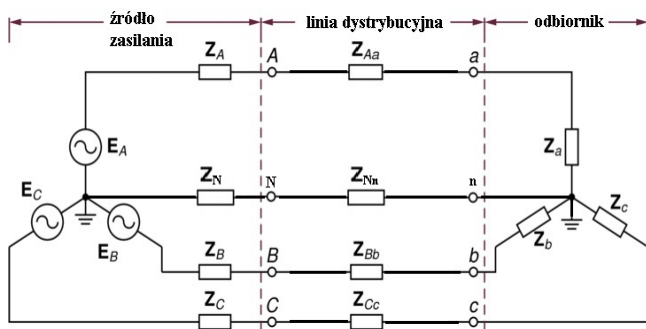
Z zależności (1) i (2) wynika, że układ trójfazowy jest symetryczny, jeżeli wartości skuteczne trzech napięć fazowych (prądów fazowych) są sobie równe, a ich wektory są przesunięte względem siebie o 120° . W układzie symetrycznym suma wektorów napięć fazowych (prądów fazowych) jest równa zero

$$(3) \quad \bar{U}(\bar{I})_A + \bar{U}(\bar{I})_B + \bar{U}(\bar{I})_C = 0$$

Na podstawie powyższych informacji można jednoznacznie stwierdzić, że układ trójfazowy nie jest symetryczny, jeżeli w dowolnym jego punkcie choćby jeden z warunków (1) – (3) nie jest spełniony. W rzeczywistych układach trójfazowych dopuszczalny jest pewien poziom asymetrii, co zostanie szerzej omówione w dalszej części artykułu.

Źródła asymetrii

Źródłami asymetrii w sieciach niskich napięć mogą być: źródło zasilania, linia dystrybucyjna oraz odbiorniki/źródła odnawialne.



Rys. 1. Układ trójfazowy czteroprzewodowy z podziałem na źródło zasilania, linię dystrybucyjną i odbiornik

Z reguły w normalnych warunkach pracy sieci źródło zasilania (E_A, E_B, E_C) jest symetryczne. Pewną asymetrią charakteryzują się linie dystrybucyjne (Z_{Aa}, Z_{Bb}, Z_{Cc}), co jest wynikiem rozmieszczenia przewodów fazowych w układzie różnym od trójkąta równobocznego [5]. Natomiast głównym źródłem asymetrii w sieciach niskich napięć są obecnie jednofazowe odbiorniki (Z_a, Z_b, Z_c), a w niedalekiej przyszłości będą również jednofazowe odnawialne źródła energii. Rozpatrując asymetrię powodowaną przez niesymetryczne odbiorniki i odnawialne źródła energii 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.

O ile asymetrię deterministyczną można ograniczyć poprzez równomierne przyłączenie odbiorców i prosumentów do poszczególnych faz układu trójfazowego, o tyle asymetria probabilistyczna zależy głównie od modelu funkcjonowania odbiorców i występujących w danych przedziałach czasu warunków atmosferycznych.

Skutki asymetrii

Skutków długotrwałego występowania asymetrii prądów i napięć jest wiele i mogą zostać one podzielone na skutki widziane z punktu widzenia OSD i odbiorców.

Z punktu widzenia OSD do najpoważniejszych z nich zalicza się [1][6][7]:

- problemy z ustawieniem przełącznika zaczeów transformatora w celu utrzymania napięcia w dopuszczalnych wartościach na obwodzie,
- ograniczenie liczby przyłączanych źródeł odnawialnych,
- obniżenie sprawności przesyłu energii elektrycznej spowodowane przepływem dodatkowych prądów składowej symetrycznej kolejności zerowej i przeciwnej przez linie elektroenergetyczne i transformatory, co skutkuje powstawaniem dodatkowych strat mocy i energii,
- skrócenie czasu życia linii elektroenergetycznych i transformatorów poprzez zwiększone obciążenie cieplne izolacji tych urządzeń,
- zwiększenie błędów pomiaru mocy i energii przez liczniki energii elektrycznej,
- zwiększenie ryzyka porażenia osób postronnych w miejscu spływu znacznego prądu do ziemi przez uziemienia robocze.

Z punktu widzenia odbiorców i użytkowanych przez nich odbiorników/odnawialnych źródeł energii elektrycznej, do najpoważniejszych skutków asymetrii można zaliczyć [1][6][7]:

- brak możliwości oddawania nadwyżek energii elektrycznej do sieci przez źródła OZE w przypadku wzrostu napięcia fazowego poza wartość dopuszczalną, co skutkuje wyłączeniem falownika celem jego ochrony przed uszkodzeniem,
- problemy z poprawną pracą trójfazowych maszyn elektrycznych (np. generatory, silniki, pompy, wentylatory), co objawia się nierównomierną pracą powodowaną drganiami i wibracjami układu, problemami z rozruchem, utykaniem w trakcie pracy,
- problemy z poprawną pracą urządzeń zasilanych poprzez trójfazowe prostowniki i falowniki (np. klimatyzatory, sprężarki, walcarki, sterowane napędy prądu przemiennego), co objawia się wzrostem wibracji i efektów akustycznych,
- nieprawidłowe działanie lub zniszczenie odbiorników RTV i AGD powodowane zasilaniem tych urządzeń małym, lub zbyt dużym napięciem fazowym.

Asymetria w teorii mocy dla podstawowej harmonicznej prądów i napięć

Powszechnie wykorzystywane równanie mocy w układach trójfazowych z przebiegami sinusoidalnymi

$$(4) \quad S_G = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

gdzie: S_G – geometryczna moc pozorna [VA], P – moc czynna [W], Q – moc bierna [VAR]

daje poprawne rezultaty tylko w przypadku pełnej symetrii prądów i napięć w układzie. W przypadku asymetrii prądów lub napięć, równanie to błędnie interpretuje zjawiska zachodzące w układzie, co prowadzi do błędnego wyznaczania współczynnika mocy λ , istotnego z punktu widzenia rozliczeń pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii elektrycznej [6][8].

Oprócz geometrycznej mocy pozornej, w elektrotechnice znane są jeszcze dwie inne zależności określające moc pozorną w układzie trójfazowym z przebiegami sinusoidalnymi. Tymi zależnościami są [6][8]:

- arytmetyczna moc pozorna zaproponowana w 1935 roku przez American Institute of Electrical Engineers

$$(5) \quad S_A = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$$

- zaproponowana w 1922 roku i niemal nieużywana moc pozorna Buchholtza

$$(6) \quad S_B = \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}$$

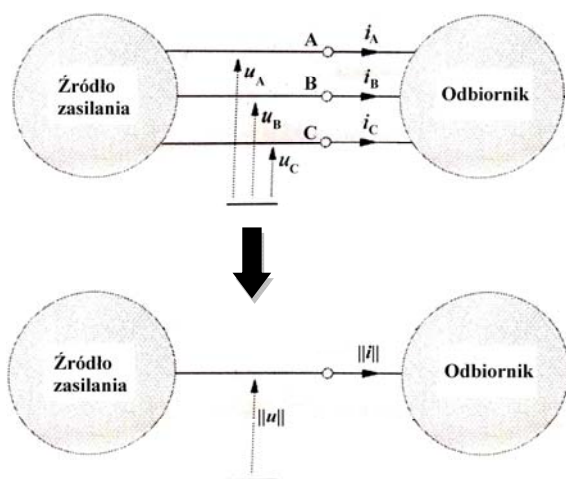
gdzie: U_A, U_B, U_C – wartości skuteczne napięć fazowych [V],
 I_A, I_B, I_C – wartości skuteczne prądów fazowych [A].

Zależności (4) – (6) dają takie same rezultaty tylko w przypadku, gdy układ trójfazowy jest symetryczny prądowo i napięciowo.

Asymetria według teorii mocy CPC

Leszek Czarnecki w swojej koncepcji składowych fizycznych prąd [8] (ang. *Current's Physical Components, CPC*), która jest obecnie uważana za najlepiej opisującą zjawiska fizyczne zachodzące w układach trójfazowych, dokonał wyboru poprawnej definicji mocy pozornej z punktu widzenia opisu stanu energetycznego układu z przebiegami sinusoidalnymi [8].

Według teorii mocy CPC układ trójfazowy można przedstawiać w przestrzeni wektorowej, w postaci równoważnego układu jednofazowego, tak jak zostało to pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Układ trójfazowy i równoważny mu w przestrzeni wektorowej układ jednofazowy według teorii mocy CPC [8]

W takim przypadku układ trójfazowy nie jest opisywany za pomocą poszczególnych wielkości fazowych, lecz za pomocą wektorów trójfazowych, o postaci [8]

$$(7) \quad \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = u(t) = u, \quad \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = i(t) = i$$

Wartość skuteczna napięcia trójfazowego jest równa [8]

$$(8) \quad \|u\| = \sqrt{\|u_A\|^2 + \|u_B\|^2 + \|u_C\|^2}$$

Podobnie można zapisać wartość skuteczną prądu trójfazowego [8]

$$(9) \quad \|i\| = \sqrt{\|i_A\|^2 + \|i_B\|^2 + \|i_C\|^2}$$

Moc pozorna tak definiowanych napięć i prądów w przestrzeni wektorowej jest równa [8]

$$(10) \quad S_C = \|u\| \|i\| = \sqrt{\|u_A\|^2 + \|u_B\|^2 + \|u_C\|^2} \sqrt{\|i_A\|^2 + \|i_B\|^2 + \|i_C\|^2}$$

gdzie: $\|u_A\|, \|u_B\|, \|u_C\|$ – norma wektorów napięć fazowych [V], $\|i_A\|, \|i_B\|, \|i_C\|$ – norma wektorów prądów fazowych [A].

Szczegółowy opis przeprowadzonego wnioskowania przez Leszka Czarneckiego można znaleźć w publikacji [8].

Teoria mocy CPC definiuje dla układów trójfazowych o sinusoidalnych przebiegach napięć i prądów nowe równanie mocy o postaci [8]

$$(11) \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D_u^2}$$

gdzie: D_u – moc niezrównoważenia odbiornika [VA].

Współczynnik mocy jest równy

$$(12) \quad \lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_u^2}}$$

Z wyrażenia (12) wynika, że moc niezrównoważenia odbiornika D_u tak samo wpływa i degraduje współczynnik mocy λ jak moc bierna Q . Oznacza to również, że nawet czysto rezystancyjny trójfazowy i niesymetryczny odbiornik powoduje większe straty mocy i energii w linii zasilającej niż gdyby ten odbiornik był symetryczny i pobierał taką samą moc jak odbiornik niesymetryczny.

Miary liczbowe asymetrii

Współczynniki asymetrii

Do ilościowego opisu asymetrii prądów i napięć wykorzystywane są współczynniki asymetrii. Wyznaczanie współczynników asymetrii jest ściśle związane z rozkładem napięć i prądów na składowe symetryczne kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej. Jeśli znane są wartości skuteczne napięć i prądów w układzie oraz ich kąty fazowe, to można je wyznaczyć korzystając z macierzy [1][4][5]

$$(13) \quad \begin{bmatrix} \bar{U}(\bar{I})_0 \\ \bar{U}(\bar{I})_1 \\ \bar{U}(\bar{I})_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}(\bar{I})_A \\ \bar{U}(\bar{I})_B \\ \bar{U}(\bar{I})_C \end{bmatrix}$$

gdzie: $\bar{U}(\bar{I})_0, \bar{U}(\bar{I})_1, \bar{U}(\bar{I})_2$ – wektor składowej symetrycznej kolejności zerowej, zgodnej i przeciwnej napięcia fazowego (prądu).

Znając wartości poszczególnych składowych symetrycznych, definiuje się następujące współczynniki asymetrii napięć (prądów) [1][6]

$$(14) \quad K_{2U(2I)} = \frac{|\bar{U}_2(\bar{I}_2)|}{|\bar{U}_1(\bar{I}_1)|} \cdot 100\%, \quad K_{0U(0I)} = \frac{|\bar{U}_0(\bar{I}_0)|}{|\bar{U}_1(\bar{I}_1)|} \cdot 100\%$$

gdzie: $K_{2U(2I)}, K_{0U(0I)}$ – współczynnik asymetrii składowej symetrycznej kolejności przeciwnej i zerowej napięcia fazowego (prądu) [%].

W sieciach trójfazowych czteroprzewodowych występują zarówno składowe symetryczne kolejności przeciwnej i zerowej napięcia i prądu. Natomiast w sieciach trójfazowych trójprzewodowych, składowe symetryczne kolejności zerowej prądu nie występują, co jest związane z brakiem przewodu neutralnego. Ponadto w sieciach zarówno z przewodem neutralnym, jak i bez niego, składowe symetryczne kolejności zerowej nie mają wpływu na odbiorniki zasilane międzyfazowo [6].

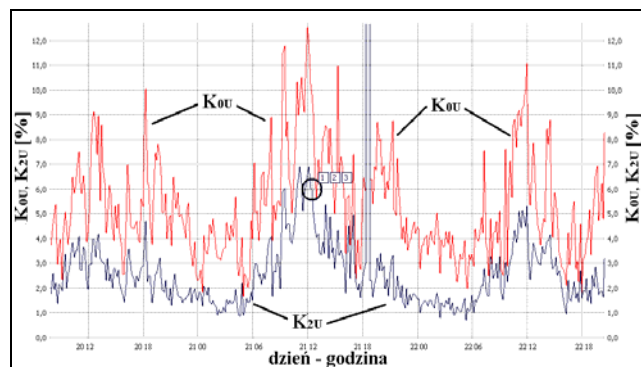
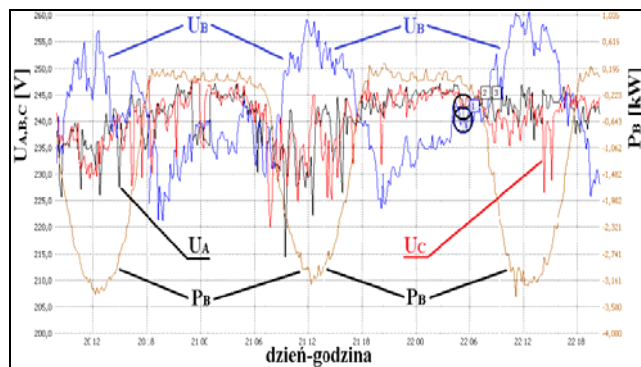
Dopuszczalne wartości współczynników asymetrii

Najważniejszym dokumentem obligującym OSD do utrzymania współczynnika asymetrii poniżej określonego poziomu jest tzw. Rozporządzenie systemowe [3]. Rozporządzenie to określa, że w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego nie powinno przekraczać 2% wartości składowej symetrycznej zgodnej. Warunek ten dotyczy sieci niskiego i średniego napięcia. Innym dokumentem określającym dopuszczalną wartość współczynnika asymetrii napięć jest norma PN-EN-50160:2010 [9]. Norma [9] ta podaje taką samą dopuszczalną wartość dla współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia, którą wyznacza się na takich samych zasadach jak w omówionym Rozporządzeniu systemowym.

Dopuszczalne współczynniki asymetrii napięć określone w wybranych międzynarodowych normach zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie dopuszczalnych współczynników asymetrii w wybranych normach międzynarodowych [11]

Dokument	Wartość współczynnika asymetrii
IEC 61000-2-5	Definiowane są dwa stopnie asymetrii: stopień 1 – $K_{2U} = 2\%$ stopień 2 – $K_{2U} = 3\%$
IEC 61000-2-12	$K_{2U} = 2\%$, w warunkach szczególnych do 3%
Gost 13109-97	$K_{2U} = 2\%$ - w odniesieniu do percentyla 95%, wartość maksymalna może wynosić 4%
ANSI	$K_{2U} = 2\%$
ER P29	$K_{2U} = 2\%$ - poziom planowany
UIE	$K_{2U} = 2\%$ - dla sieci niskich i średnich napięć
UNIPED	$K_{2U} = 2\%$, w pewnych sytuacjach do 3%



Rys. 3. Wykres obrazujący wpływ jednofazowej instalacji fotowoltaicznej na napięcia fazowe i współczynnik asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia

Z przeprowadzonej analizy dopuszczalnych współczynników asymetrii przedstawionych w dokumentach krajowych i międzynarodowych widać, że dokumenty te skupiają się głównie na współczynniku asymetrii składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia K_{2U} . Wyraźnie widoczny jest brak zdefiniowanych wartości dopuszczalnych dla współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} , a to głównie on odpowiada za przekroczenia wartości dopuszczalnych dla napięć fazowych w sieciach niskich napięć nasyconych jednofazowymi odbiornikami i źródłami odnawialnymi.

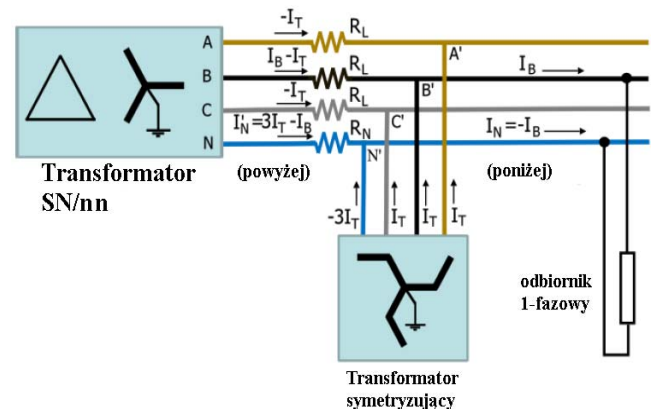
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych w przykładowej sieci niskiego napięcia obrazujące wpływ jednofazowej instalacji fotowoltaicznej na wartości skuteczne napięć fazowych i na współczynnik asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia podczas oddawania energii do sieci.

Jak można zauważyć z rysunku 3, w chwilach oddawania energii do sieci przez jednofazową instalację fotowoltaiczną rosną oba współczynniki asymetrii napięć, jednakże to współczynnik asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} jest dominujący i jest dużo większy (chwilami o ponad 2 punkty procentowe) od współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia K_{2U} .

Kompensacja asymetrii za pomocą transformatora symetryzującego

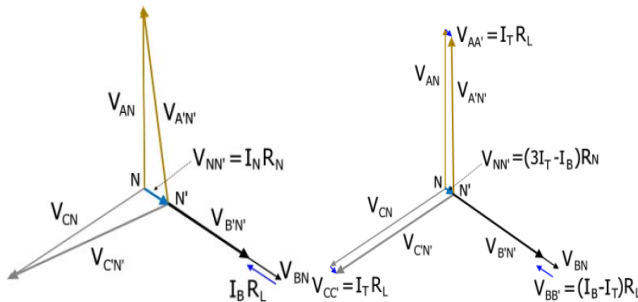
Jednym ze sposobów kompensacji asymetrii prądów i napięć w sieciach trójfazowych czteroprzewodowych zasilających jednofazowe odbiorniki i odnawialne źródła energii jest zainstalowanie na problematycznym obwodzie tzw. transformatora symetryzującego. Transformator symetryzujący jest to trójfazowy transformator o układzie połączeń uzwojeń w zygzak, który przyłącza się równolegle w wybranym miejscu sieci [7]. Urządzenie to konstrukcyjnie jest bardzo podobne do tradycyjnego transformatora dystrybucyjnego SN/nn i zasadniczo różni się tylko tym, że nie posiada uzwojenia wtórnego. Urządzenie to również nie jest nowością na rynku, ponieważ już w latach 1930 – 1950 było wykorzystywane do symetryzacji napięć i prądów w sieciach niskich napięć na terenie Wielkiej Brytanii [7]. Duża część wiedzy i doświadczenia w stosowaniu transformatorów symetryzujących została utracona w ciągu następnych dekad. Dopiero gwałtowny wzrost zainteresowania odbiornikami takimi jak np. pompy ciepła oraz źródłami odnawialnymi powoduje, że ponownie wzrasta zainteresowanie tymi urządzeniami [7].

Zasada symetryzacji prądów i napięć za pomocą transformatora symetryzującego została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Przykład obrazujący zasadę symetryzacji prądów i napięć za pomocą transformatora symetryzującego [7]

Przed podłączeniem transformatora symetryzującego, cały prąd odbiornika jednofazowego I_B płynie fazą B i wraca do transformatora dystrybucyjnego SN/nn przewodem neutralnym N . Przepływ prądu I_B powoduje spadek napięcia w fazie B , a jego powrót powoduje spadek napięcia w przewodzie neutralnym N . Skutkuje to tym, że wartości skuteczne napięć fazowych nie są sobie równe, a przesunięciu ulega środek ciężkości gwiazdy napięć (rysunek 5 – po lewej).



Rys. 5. Gwiazda napięć fazowych przed (po lewej) i po (po prawej) załączeniu transformatora symetryzującego [7]

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. Powoduje to, że zmniejsza się spadek napięcia w fazie B , ponieważ zmniejszeniu uległ prąd płynący tą fazą ($I_B - I_T$) oraz zmniejsza się spadek napięcia w przewodzie neutralnym N o wyrażenie $3I_T - I_B$ [7]. Dzięki temu napięcia fazowe stają się bardziej symetryczne (rysunek 5 – po prawej).

Skuteczność symetryzacji prądów i napięć za pomocą transformatora symetryzującego zależy od stosunku impedancji przewodu neutralnego i impedancji uzwojeń transformatora symetryzującego. Im większy będzie ten stosunek (im mniejsza będzie impedancja uzwojeń transformatora symetryzującego), tym większa część prądu wracająca przewodem neutralnym będzie płynęła przez transformator symetryzujący i będzie rozdzielana na poszczególne fazy przez to urządzenie [7].



Rys. 6. Widok transformatora symetryzującego zawieszonego na słupie sieci niskiego napięcia w miejscowości A (po lewej) i B (po prawej)

Inną równie dużą zaletą urządzenia jest jego zdolność do kompensacji harmonicznych prądu i napięcia składowych symetrycznych kolejności zerowej. Zdolność ta wynika z połączenia uzwojeń transformatora w zygzak [7].

Parametry znamionowe urządzenia wykorzystanego do testów zostały przedstawione w tablicy 2, a transformator symetryzujący przedstawiono na rysunku 6.

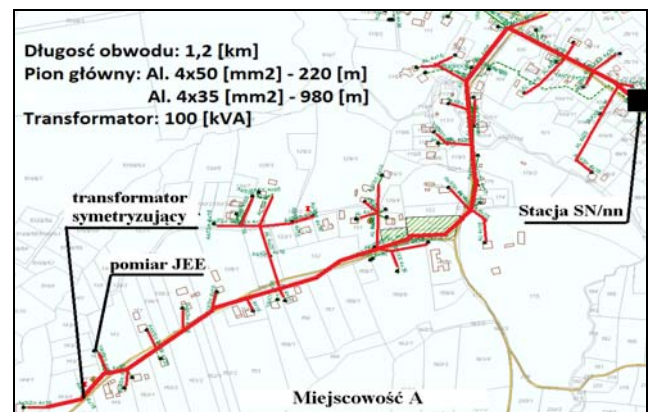
Tablica 2. Zestawienie podstawowych danych znamionowych transformatora symetryzującego wykorzystanego do testów [10]

znamionowa moc pozorna S_N	35 [kVA]
napięcie znamionowe U_N	400 [V]
układ sieci	3-fazowy TN/TT
stopień ochrony obudowy	IP55
wymiary	886 x 454 x 323 [mm ²]
masa	125 [kg]

Ocena skuteczności kompensacji asymetrii za pomocą transformatora symetryzującego

Kompensacja asymetrii w sieci niskiego napięcia bez udziału odnawialnych źródeł energii

Do przeprowadzenia pierwszego testu skuteczności kompensacji asymetrii za pomocą transformatora symetryzującego wybrano przykładową sieć niskiego napięcia zlokalizowaną w miejscowości A charakteryzującą się dużym udziałem składowej symetrycznej kolejności przeciwnej i zerowej napięcia. Mapa układu sieci została zaprezentowana na rysunku 7.

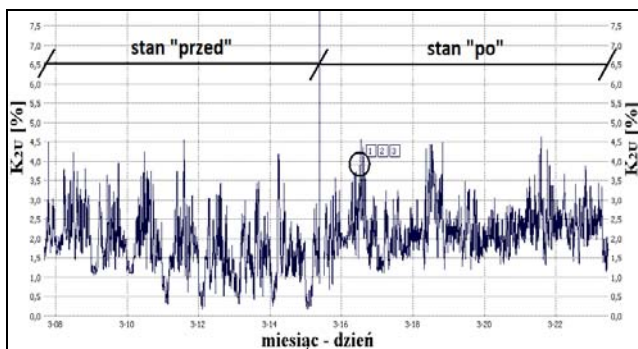
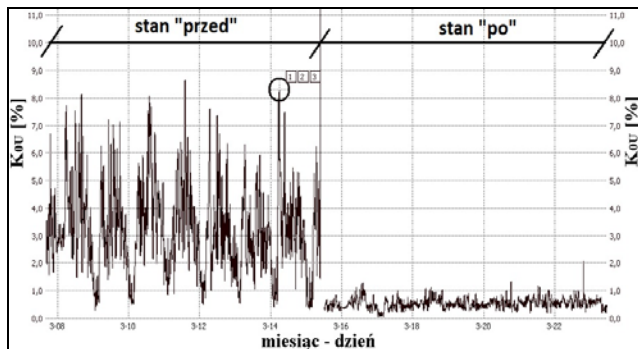
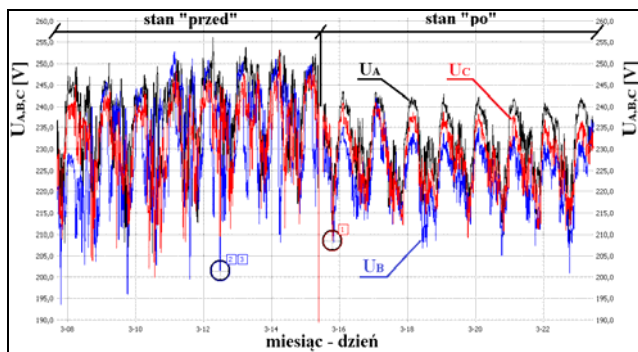


Rys. 7. Mapa układu sieci niskiego napięcia w miejscowości A

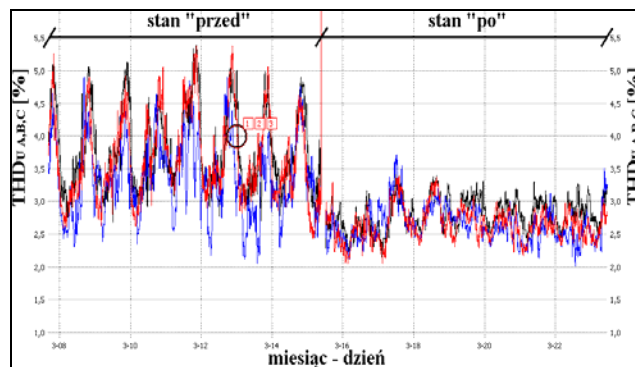
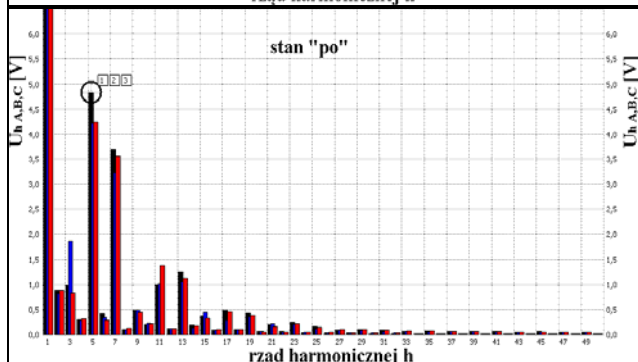
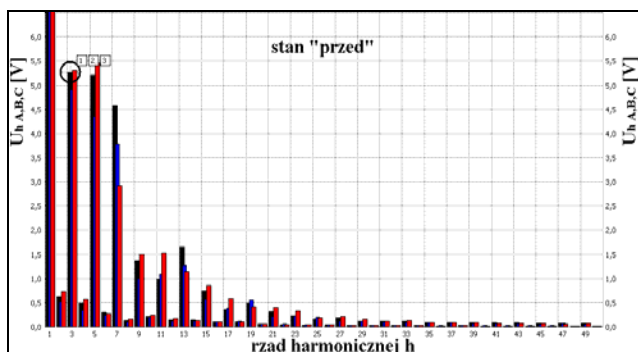
Wybrany do testów obwód jest zasilany poprzez napowietrzną stację transformatorową SN/nn, z transformatora o znamionowej mocy pozornej równej 100 kVA. Fragment obwodu od stacji transformatorowej SN/nn o długości 280 metrów jest wykonany przewodami aluminiowymi Al o przekroju równym 4x50 mm². Druga część obwodu o długości 980 metrów również jest wykonana przewodami aluminiowymi Al, ale o przekroju równym 4x35 mm². Obwód został wybudowany w latach 60. ubiegłego wieku i zasilą głównie odbiorców indywidualnych.

Na lokalizację transformatora symetryzującego wybrano przedostatni słup na obwodzie. Pomiar wskaźników jakości energii elektrycznej został przeprowadzony za pomocą analizatora w złączu kablowym zlokalizowanym powyżej urządzenia symetryzującego. Czas agregowania mierzonych parametrów ustawiono na 10 minut. Pomiar został przeprowadzony w dniach 07.03 – 23.03.2018 r., a transformator symetryzujący został załączony pod napięcie dnia 15.03.2018 r.

Na podstawie charakterystyk współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} (rysunek 8) można stwierdzić bardzo wysoką skuteczność kompensacji tej składowej przez transformator symetryzujący. Maksymalne wartości współczynnika K_{0U} przed załączeniem urządzenia sięgały 8%, natomiast po załączeniu urządzenia wartości tego współczynnika zmniejszyły się poniżej 1%.



Rys. 8. Wykres napięć fazowych i współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia przed i po załączeniu urządzenia symetryzującego



Rys. 9. Wykres widma harmonicznych i współczynnika THD napięć przed i po załączeniu urządzenia symetryzującego

Tego samego nie można powiedzieć o współczynniku asymetrii składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia K_{2U} , którego wartość średnia po załączeniu urządzenia nieznacznie wzrosła. Na podstawie wykresu współczynnika K_{2U} można by wyciągnąć pochopny wniosek, że urządzenie symetryzujące wpływa niekorzystnie na składową symetryczną kolejności przeciwnej napięcia. Z wyciągnięciem takiego wniosku trzeba być jednak ostrożnym, ponieważ należy pamiętać, że wzrost współczynnika K_{2U} może być również związany z innym schematem załączania odbiorników przez odbiorców zasilanych z tego obwodu.

Z kolei rysunek 9 potwierdza zdolność urządzenia symetryzującego do kompensacji harmonicznych napięcia kolejności zerowej tj. harmonicznych całkowicie podzielnych przez 3 (3, 9, 15, 21 itd.). Kompensacja tych harmonicznych spowodowała, że wartości współczynnika THD napięć fazowych uległy zmniejszeniu z maksymalnych wartości sięgających 5%, do wartości około 3% – 3,5%.

Kompensacja asymetrii w sieci niskiego napięcia z udziałem jednofazowych odnawialnych źródeł energii

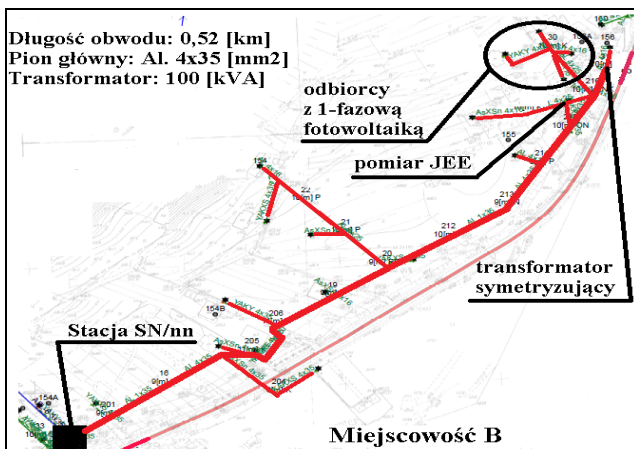
Po stwierdzeniu wysokiej skuteczności kompensacji składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia podjęto decyzję o kontynuowaniu dalszych testów urządzenia. Tym razem zdecydowano, aby sprawdzić skuteczność kompensacji asymetrii w sieci niskiego napięcia z udziałem jednofazowych odnawialnych źródeł energii, gdzie dodatkowo występują problemy związane z nadmiernymi wzrostami napięć fazowych.

Do eksperymentu wybrano sieć niskiego napięcia zlokalizowaną w miejscowości B. Miejscowość ta w 2016 roku w ramach Programu Priorytetowego Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej „Wspieranie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii” otrzymała dofinansowanie na budowę jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych do grzania wody z możliwością oddawania nadwyżek energii elektrycznej do sieci [12]. Układ sieci niskiego napięcia przedstawiono na rysunku 10.

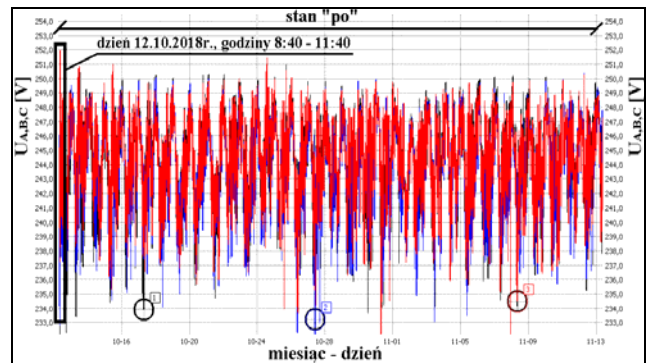
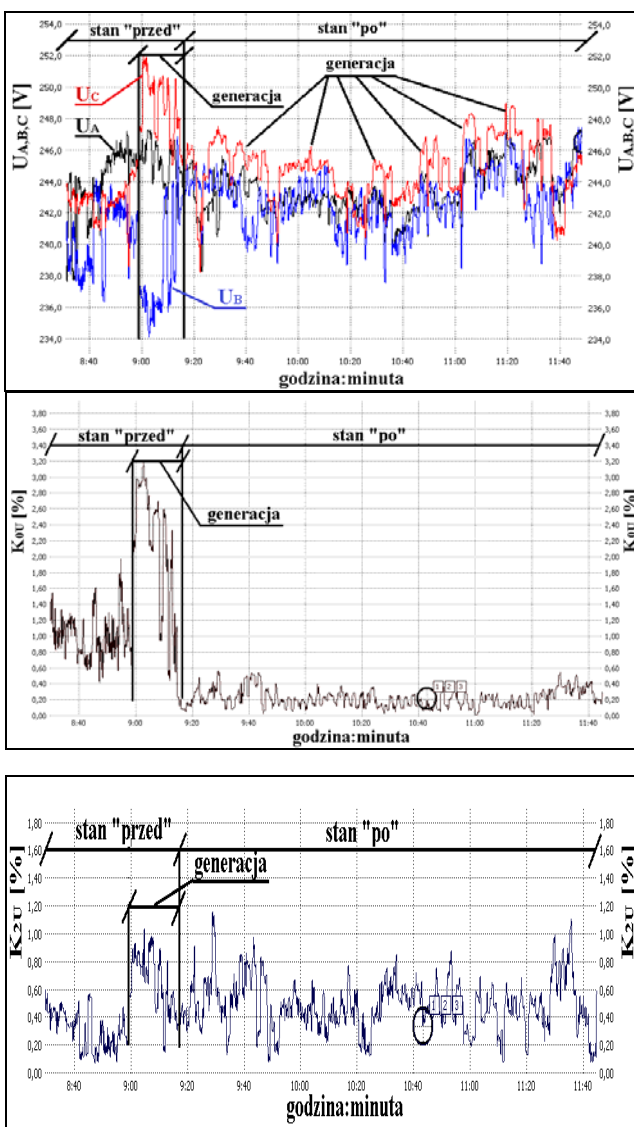
Przedstawiona na rysunku 10 sieć niskiego napięcia jest zasilana poprzez napowietrzną stację transformatorową SN/nn, z transformatora o znamionowej mocy pozornej równej 100 kVA. Obwód niskiego napięcia ma całkowitą długość równą 520 metrów i jest w całości wykonany przewodami aluminium AI o przekroju 4x35 mm². Obwód został wybudowany w latach 90. i zasilą odbiorców indywidualnych i kilku prosumentów.

Na lokalizację transformatora symetryzującego wybrano ostatni słup ciągu głównego obwodu. Pomiar wskaźników jakości energii elektrycznej wykonano za pomocą analizatora w jednym ze złączy kablowych,

zlokalizowanego powyżej urządzenia symetryzującego. W celu uwidocznienia krótkotrwałych zmian napięcia zmniejszono czas agregowania mierzonych parametrów z 10 minut do 10 sekund. Pomiar został przeprowadzony w dniach 12.10 – 13.11.2018 r., a urządzenie symetryzujące zostało podane pod napięcie dnia 12.10.2018 r. o godzinie 9:15.



Rys. 10. Mapa układu sieci niskiego napięcia w miejscowości B



Rys. 11. Wykres napięć fazowych i współczynnika asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia zawężony do godzin 8:40 – 11:40 z dnia 12.10.2018 r. oraz napięć fazowych z całego okresu pomiarowego przed i po załączeniu urządzenia symetryzującego

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki pomiarów zawężone do chwili rozpoczęcia generacji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych i momentu załączenia urządzenia symetryzującego pod napięcie oraz z całego okresu pomiarowego.

Na podstawie wyników przedstawionych na rysunku 11 można stwierdzić, że w chwili rozpoczęcia generacji energii elektrycznej przez jednofazowe instalacje fotowoltaiczne i załączeniu symetryzatora, napięcia fazowe stały się bardziej symetryczne, a współczynnik asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} uległ zmniejszeniu poniżej 0,4%. Z wykresu napięć fazowych zarejestrowanych w dniu 12.10.2018 r., po godzinie 9:15 (chwila załączenia symetryzatora pod napięcie) widoczna jest spora liczba przedziałów czasu, w których instalacje fotowoltaiczne oddawała energię elektryczną do sieci, ale nie powodowało to dużych wzrostów napięcia. Wyraźnie widać, że zakres zmienności napięcia w fazie, w której wystąpiła generacja został ograniczony przez urządzenie symetryzujące. Warto również zwrócić uwagę na wykres napięć fazowych obejmujący cały zakres pomiarowy tj. od dnia 12.10 do dnia 13.11.2018 r., gdzie widać, że w żadnym przedziale czasu napięcia fazowe nie wzrosły do poziomu zarejestrowanego przed załączeniem symetryzatora pod napięcie. Świadczy to o wysokiej skuteczności kompensacji składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} przez to urządzenie, co skutkuje również kompensacją wzrostów napięcia w fazie, w której wystąpiła generacja energii elektrycznej.

Podsumowanie

Wzrost zainteresowania odnawialnymi źródłami energii powoduje, 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. W artykule wykazano, że w przypadku oddawania energii do sieci przez jednofazowe źródła odnawialne, przeważający wpływ na asymetrię napięć fazowych i na wzrosty napięcia w fazie, w której zachodzi generacja ma składowa symetryczna kolejności zerowej napięcia, dla której nie ma określonych dopuszczalnych wartości w dokumentach krajowych i międzynarodowych.

Urządzeniem kompensującym składową symetryczną kolejności zerowej prądu i napięcia jest transformator symetryzujący o układzie połączeń uzwojeń w zygzak. Wysoka skuteczność kompensacji składowej symetrycznej 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 przypadku sieci z udziałem jednofazowych źródeł odnawialnych dodatkowo zauważalny jest korzystny wpływ urządzenia na wzrosty napięcia w fazie, w której występuje generacja. Dużą zaletą urządzenia jest również kompensacja harmonicznych prądu i napięcia kolejności zerowej, czyli harmonicznych, które zazwyczaj w znacznych ilościach występują w sieciach niskich napięć. Urządzenie to jest dobrym rozwiązaniem dla sieci mocno nasyconych jednofazowymi źródłami odnawialnymi.

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 trójfazowych.

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”.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Topolski, TAURON Dystrybucja S.A., ul. Podgórska 25A 31-035 Kraków, E-mail: lukas.topolski@gmail.com; mgr inż. Krzysztof Woźny, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: woznyk@agh.edu.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: hanzel@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kowalski Z.: Asymetria w układach elektroenergetycznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1987, s. 19-22
- [2] Prawo energetyczne, ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. (Dz.U. z dnia 10 kwietnia 1997, z późn.zm.)
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. z dnia 29 maja 2007 r.)
- [4] Bolkowski S.: Teoria obwodów elektrycznych, Wydanie piąte, WNT, Warszawa 1995, s. 210-214
- [5] Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B.: Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.90 Nr 7/2014, s.23-26
- [6] Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej, zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013, s. 201-204, 210-230
- [7] Beharrisingh Shiva. Doctoral thesis: Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancer. Loughborough University, 2014
- [8] Czarnecki L.S.: Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć, *Oficyna Wydawnicza PW*, Warszawa 2005, s. 135-137, 143-152
- [9] PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, PKN, 2010.
- [10] Strona internetowa firmy ENSTO, link: <https://www.ensto.com/pl/produkty/jako-energii/ensto-phase-balancer/pb50a-3p-200adv>
- [11] Polskie Partnerstwo Jakości Zasilania, *Seminarium nt. Zaburzenia w napięciu zasilającym*, Łódź, 2003.
- [12] Strona internetowa Gminy Ochotnica Dolna, link: <http://www.ochotnica.pl/pl/211/1915/nabor-do-programu-budowy-mikroinstalacji-fotowoltaicznych.html>