

Ograniczanie wzrostów i asymetrii napięć powodowanych jednofazowymi instalacjami fotowoltaicznymi za pomocą szeregowego transformatora dodawczego w sieci niskiego napięcia

Streszczenie. Duża koncentracja jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na obwodzie sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia często prowadzi do powstawania wzrostów oraz asymetrii napięć, co skutkuje ograniczeniami w produkcji energii elektrycznej (związanej z odstawianiem się falowników) oraz nieprawidłową pracą innych urządzeń zasilanych z takiego obwodu. W artykule omówiono zasadę działania szeregowego transformatora dodawczego z niezależną regulacją napięcia w poszczególnych fazach oraz przedstawiono wyniki symulacji i pomiarów skuteczności ograniczania wzrostów i asymetrii napięć przez to urządzenie, w pewnej sieci niskiego napięcia zlokalizowanej na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochotnica, w której udział prosumentów stanowi 45%.

Abstract. High concentration of single-phase photovoltaic installations on a low-voltage distribution feeder, significantly contributes to voltage swells and unbalance. This situation often leads to limiting of energy generation from microinstallations (due to automatic inverter shutdown) and failures of other consumer electrical equipment. The paper discusses the principle of operation of a series automatic voltage regulator with independent voltage regulation in each phase and presents results of simulations and measurements of voltage swells and unbalance mitigation effectiveness using that device in a certain low-voltage network located within the energy cluster Virtual Green Ochotnica Power Plant in Poland, with the share of prosumers of 45%. (**Limitation of voltage swells and unbalance caused by single-phase photovoltaic microinstallations using a series automatic voltage regulator in a low-voltage network**).

Słowa kluczowe: jednofazowe mikroinstalacje fotowoltaiczne, wzrosty i asymetria napięć, szeregowy transformator dodawczy.

Keywords: single-phase photovoltaic installations, voltage swells and unbalance, series automatic voltage regulator.

Wstęp

Coraz więcej gmin w celu ochrony środowiska naturalnego (m.in. poprzez ograniczenie niskiej emisji i smogu) oraz poprawy bezpieczeństwa energetycznego regionu (m.in. poprzez dywersyfikację źródeł energii) chętnie korzysta z licznych programów wsparcia dla rozwoju instalacji fotowoltaicznych, co często skutkuje dużą koncentracją mikroinstalacji w obrębie danej miejscowości lub stacji transformatorowej SN/nn. Sytuację pogarsza również częsty brak kontaktu przedstawicieli gminy z lokalnym Operatorem Systemu Dystrybucyjnego (OSD), który nie poinformowany o zamiarach gminy, nie ma możliwości podjęcia stosownych działań eksploatacyjnych lub modernizacyjnych, celem dostosowania istniejącej infrastruktury energetycznej do przyłączenia określonej liczby mikroinstalacji.

Jedną z gmin, która od 2015 roku sukcesywnie zwiększa udział odnawialnych źródeł energii w swoim bilansie energetycznym jest gmina Ochotnica Dolna. Gmina ta w ramach programu priorytetowego Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej „Wspieranie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii”, zabudowała w latach 2017 – 2018, 726 jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych o jednostkowej mocy znamionowej 2 kW. Tym sposobem niemal 1/3 budynków mieszkalnych na terenie całej gminy posiada własne źródło energii. Po zrealizowaniu tego programu, w 2018 roku gmina otrzymała od Ministerstwa Energii certyfikat pilotażowego klastra energii dla klastra „Wirtualna Zielona Elektrownia Ochotnica” [1].

Tak duża liczba przyłączonych mikroinstalacji na obszarze gminy spowodowała, że w obrębie kilku stacji transformatorowych SN/nn, udział prosumentów wynosi w granicach 40 – 50%. Prosumenci i odbiorcy zasilani z tych stacji transformatorowych często zgłaszają do OSD skargi na wyłączanie się falowników oraz nieprawidłową pracę odbiorników energii elektrycznej powodowaną nadmiernymi wzrostami oraz asymetrią napięcia zasilającego. W artykule omówiono jeden ze sposobów ograniczania wzrostów i

asymetrii napięć, polegający na zainstalowaniu w wybranym miejscu sieci dystrybucyjnej, szeregowego transformatora dodawczego, z niezależną regulacją napięcia w poszczególnych fazach. Skuteczność działania urządzenia sprawdzono poprzez wykonanie symulacji urządzenia w programie *Matlab Simulink* oraz pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej analizatorami klasy A, w pewnej sieci niskiego napięcia zlokalizowanej na terenie gminy Ochotnica Dolna, w której udział prosumentów stanowi 45%.

Ograniczanie wzrostów i asymetrii napięć poprzez sterowanie mocą czynną i bierną falownika mikroinstalacji

Zgodnie z normą [2], instalacja fotowoltaiczna przyłączana do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia powinna mieć możliwość pracy w trzech trybach:

- $Q = f(U)$ – tryb sterowania mocą bierną w zależności od wartości napięcia na zaciskach falownika,
- $\cos\varphi = \text{const.}$ – tryb pracy ze stałą wartością współczynnika mocy, niezależną od wartości napięcia i generowanej mocy czynnej,
- $\cos\varphi = f(P)$ – tryb sterowania współczynnikiem przesunięcia fazowego podstawowych harmonicznych napięcie i prądów w funkcji generowanej mocy czynnej.

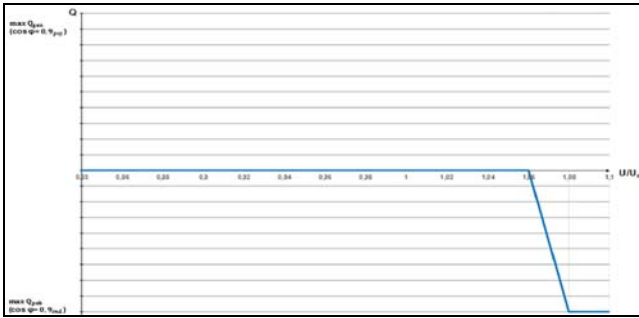
Ponadto, w celu ograniczenia wzrostów napięć, norma [2] dopuszcza również możliwość pracy mikroinstalacji w trybie $P = f(U)$, tj. sterowania mocą czynną w zależności od wartości napięcia na zaciskach falownika, zgodnie z logiką zaproponowaną przez producenta.

Szczegółowe wymagania w zakresie sterowania mocą bierną zostały podane również w dokumentach [3-4]. Zgodnie z zawartymi tam wymaganiami, każda mikroinstalacja, niezależnie od mocy osiągalnej powinna pracować w trybie:

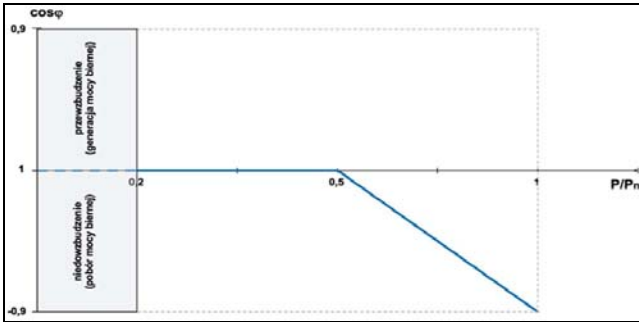
- $Q = f(U)$ – ustawionym jako tryb podstawowy,
- $\cos\varphi = f(P)$ – ustawionym jako tryb alternatywny,

c) $\cos\varphi = \text{const.}$ – ustawionym jak tryb dodatkowy (dopuszczalny zakres pracy od $\cos\varphi = 0,9_{\text{ind.}}$ do $\cos\varphi = 0,9_{\text{poj.}}$).

Konfiguracja trybów sterowania oraz ich aktywacja i dezaktywacja ma być możliwa do ustawienia w miejscu zainstalowania falownika, z zastrzeżeniem, że zmiana trybów pracy nie może być wykonana samodzielnie przez właściciela mikroinstalacji [3]. Wymagane przez OSD charakterystyki pracy mikroinstalacji przedstawiono na rysunkach 1 – 2.



Rys. 1. Wymagana przez IRIESD [3] charakterystyka sterowania mocą bierną w funkcji napięcia $Q = f(U)$ dla mikroinstalacji jednofazowych



Rys. 2. Wymagana przez dokumenty [3-4] charakterystyka sterowania współczynnikiem mocy $\cos\varphi = f(P)$ dla mikroinstalacji jedno i trójfazowych

Dodatkowo w dokumencie [3] podano zalecenie, które mówi, że w celu uniknięcia całkowitego wyłączenia mikroinstalacji na skutek zadziałania zabezpieczenia nadnapięciowego, mikroinstalacja powinna być zdolna do pracy w trybie regulacji mocy czynnej w funkcji napięcia $P = f(U)$, który powinien zostać aktywowany dopiero po wyczerpaniu możliwości regulacji napięcia mocą bierną $Q = f(U)$.

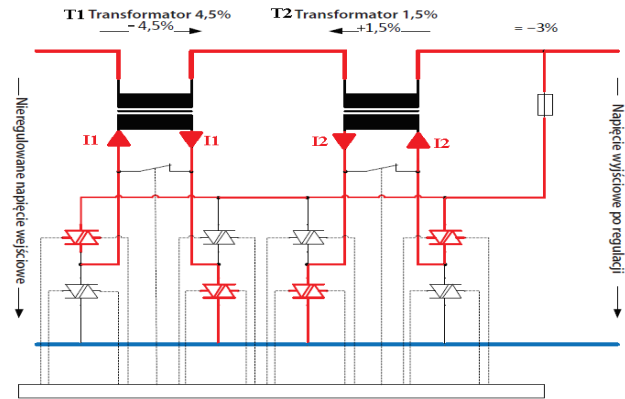
Niestety doświadczenia autorów pokazują, że w zdecydowanej większości przypadków mikroinstalacje pracują w trybie $\cos\varphi = 1$. Co więcej, OSD nie mają podstaw prawnych, aby po stwierdzeniu nieprawidłowo ustawionego falownika, mogli wymusić na prosumencie zmianę trybu jego pracy.

Ograniczanie wzrostów i asymetrii napięć za pomocą szeregowego transformatora dodatkowego

Jednym ze sposobów ograniczania wzrostów i asymetrii napięć jest zainstalowanie na obwodzie tzw. szeregowego transformatora dodatkowego. Na rynku są dostępne różne rozwiązania budowy tego urządzenia, w zależności od poziomu napięcia, na który został przeznaczony [5-6].

Na napięcie do 1 kV, urządzenie to zwykle składa się z trzech jednofazowych jednostek regulacyjnych (po jednym na fazę), które mogą pracować wspólnie (urządzenie ogranicza wzrosty lub zapady napięcia) lub osobno (urządzenie ogranicza wzrosty lub zapady napięcia oraz

kompensuje asymetrię napięć). Natomiast każda jednostka regulacyjna składa się, z co najmniej dwóch transformatorów połączonych szeregowo, których odpowiednie sprzężenie i odsprężenie daje możliwość regulacji napięcia wyjściowego w górę lub w dół. Pożądana konfiguracja załączania transformatorów jest ustalana przez regulator napięcia, który podejmuje decyzje na podstawie pomiaru trzech napięć fazowych. Sprzężenie i odsprężenie transformatorów odbywa się poprzez łączniki tyrystorowe, dzięki czemu podczas tego procesu nie pojawiają się przetężenia prądowe i przepięcia [7]. Jednofazowy schemat szeregowego transformatora dodatkowego przedstawiający przykład redukcji napięcia o 3% został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Jednofazowy schemat szeregowego transformatora dodatkowego przedstawiający zasadę redukcji napięcia o 3% [7]

Transformator T1 ($\pm 4,5\%$) jest załączony przez łączniki tyrystorowe w kierunku przeciwnym w związku, z czym odejmuje 10,35 V (- 4% z 230 V) od napięcia wyjściowego. Z kolei transformator T2 ($\pm 1,5\%$) jest załączony przez łączniki tyrystorowe w kierunku zgodnym i dodaje 3,45 V (1,5% z 230 V) do napięcia wyjściowego. Tym sposobem, napięcie wyjściowe zostało obniżone o 6,9 V (3% z 230 V) tj. do 223,1 V [7].

Zestawienie podstawowych danych znamionowych urządzenia wykorzystanego do pilotażu zestawiono w tabeli 1, a dostępne stopnie regulacji napięcia wyjściowego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych danych znamionowych szeregowego transformatora dodatkowego wykorzystanego do pilotażu [7]

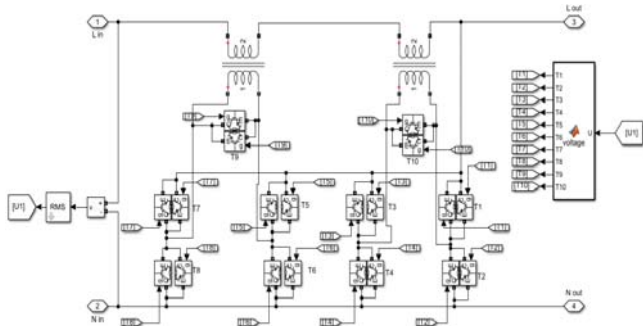
Moc znamionowa	22 kVA $\pm 10\%$
Napięcie znamionowe	3 x 230 V
Prąd znamionowy	3 x 32 A
Częstotliwość	50 Hz
Stopień ochrony	IP 55
Układ sieci	TN-C

Tabela 2. Stopnie regulacji napięcia wyjściowego szeregowego transformatora dodatkowego wykorzystanego do pilotażu [7]

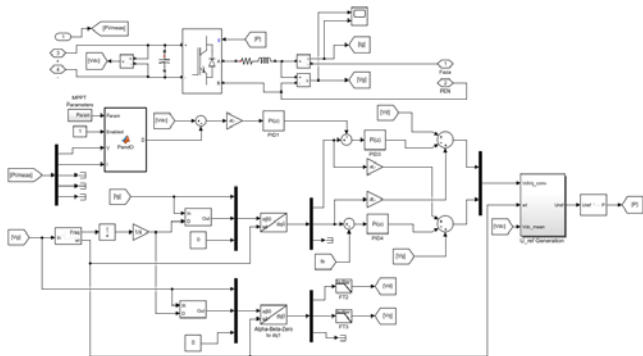
krok (pożądana zmiana napięcia)	T1 transformator ($\pm 4,5\%$)	T2 transformator ($\pm 1,5\%$)
+ 6 %	+4,5 %	+1,5 %
+ 4,5 %	+4,5 %	0 %
+ 3 %	+4,5 %	-1,5 %
+ 1,5 %	0 %	+1,5 %
0 %	0 %	0 %
-1,5 %	0 %	-1,5 %
-3 %	-4,5 %	+1,5 %
-4,5 %	-4,5 %	0 %
-6 %	-4,5 %	-1,5 %

Symulacja sieci niskiego napięcia z szeregowym transformatorem dodawczym

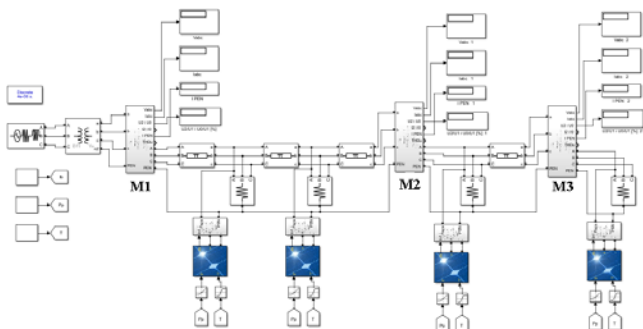
W celu zweryfikowania skuteczności ograniczania wzrostów i asymetrii napięć powodowanych jednofazowymi mikroinstalacjami, zbudowano w programie *Matlab Simulink* model testowej sieci niskiego napięcia z szeregowym transformatorem dodawczym z możliwością regulacji napięcia $\pm 6\% U_n$ oraz jednofazowymi mikroinstalacjami przyłączonymi do fazy A (rysunki 4 – 7).



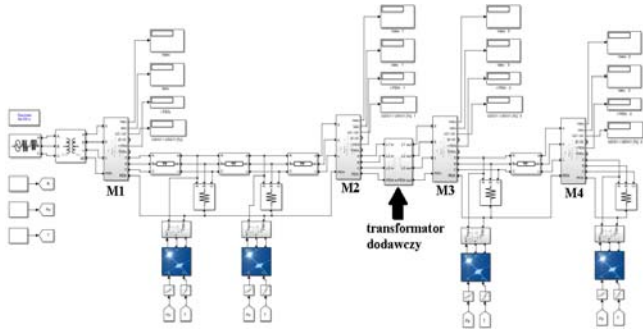
Rys. 4. Model jednofazowego szeregowego transformatora dodawczego wykonany w programie *Matlab Simulink*



Rys. 5. Model jednofazowego falownika wykonany w programie *Matlab Simulink*



Rys. 6. Model testowej sieci niskiego napięcia bez transformatora dodawczego wykonany w programie *Matlab Simulink*



Rys. 7. Model testowej sieci niskiego napięcia z transformatorem dodawczym wykonany w programie *Matlab Simulink*

W tabeli 3 zestawiono parametry elementów testowej sieci niskiego napięcia zamodelowanej w programie *Matlab Simulink*.

Tabela 3. Parametry elementów sieci niskiego napięcia zamodelowanej w programie *Matlab Simulink*

Trójfazowe źródło napięcia	
Napięcie nominalne U_n	15 kV
Moc zwarciova S_k	250 MVA
Stosunek X/R	7
Transformator SN/nn Dyn (D11)	
Moc znamionowa S_n	250 kVA
Napięcie zwarcia $u\%$	4,5%
Straty mocy czynnej ΔP_{Cu}	3,25 kW
Przekładnia k_T	15,75/0,42
Linia niskiego napięcia Al. 4x50mm ² – układ płaski	
Liczba odcinków d	4
Długość odcinka l	0,25 km
Rezystancja dla składowej zgodnej R_1	0,59 Ω /km
Rezystancja dla składowej zerowej R_0	1,01 Ω /km
Reaktancja dla składowej zgodnej X_1	0,32 Ω /km
Reaktancja dla składowej zerowej X_0	1,19 Ω /km
Odbiorniki trójfazowe	
Liczba odbiorników	4
Moc czynna odbiornika $P_{L,A,B,C}$	0,3 kW, 1 kW, 0,5 kW
Moc bierna odbiornika $Q_{L,A,B,C}$	0 kvar
Jednofazowe mikroinstalacje	
Liczba mikroinstalacji	4
Generowana moc czynna $P_{G,A}$	2 kW
Generowana moc bierna $Q_{G,A}$	0 kvar

Natomiast w tabeli 4 przedstawiono wyniki symulacji napięć fazowych oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia, w węzłach pomiarowych M1 – M3 dla modelu sieci bez transformatora dodawczego (rys. 6).

Tabela 4. Wyniki symulacji napięć fazowych $U_{A,B,C}$ oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia dla modelu sieci bez transformatora dodawczego

Punkt pomiarowy M1	
U_{A1}	240,7V < -29,7°
U_{B1}	240,0V < 209,8°
U_{C1}	240,0V < 89,9°
K_{2U1}	0,27%
K_{0U1}	0,27%
Punkt pomiarowy M2	
U_{A2}	255,9V < -26,6°
U_{B2}	225,6V < 208,7°
U_{C2}	242,7V < 88,0°
K_{2U2}	2,58%
K_{0U2}	5,86%
Punkt pomiarowy M3	
U_{A3}	257,6V < -26,3°
U_{B3}	224,1V < 208,6°
U_{C3}	243,0V < 87,8°
K_{2U3}	2,83%
K_{0U3}	6,42%

Z kolei w tabeli 5 zamieszczono wyniki symulacji napięć fazowych oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia, w węzłach pomiarowych M1 – M4 dla modelu sieci z transformatorem dodawczym (rys. 7).

Tabela 5. Wyniki symulacji napięć fazowych $U_{A,B,C}$ oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia dla modelu sieci z transformatorem dodatkowym

Punkt pomiarowy M1	
U_{A1}	240,5V<29,7°
U_{B1}	239,9V<209,8°
U_{C1}	240,0V<89,9°
K_{2U1}	0,25%
K_{0U1}	0,25%
Punkt pomiarowy M2	
U_{A2}	253,2V<-26,5°
U_{B2}	226,2V<208,5°
U_{C2}	243,2V<88,2°
K_{2U2}	2,41%
K_{0U2}	5,50%
Punkt pomiarowy M3	
U_{A3}	240,8V<-26,4°
U_{B3}	227,8V<208,5°
U_{C3}	231,1V<88,2°
K_{2U3}	2,79%
K_{0U3}	3,83%
Punkt pomiarowy M4	
U_{A4}	242,3V<-26,1°
U_{B4}	226,3V<208,3°
U_{C4}	231,5V<88,0°
K_{2U4}	3,00%
K_{0U4}	4,45%

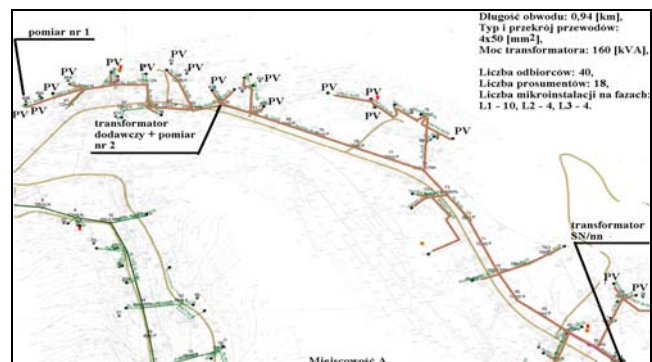
Porównując uzyskane rezultaty przedstawione w tabeli 4 i 5 można zauważyć, że szeregowy transformator dodatkowy skutecznie ogranicza wzrosty napięcie w fazie, w której zachodzi generacji energii oraz stabilizuje napięcia w pozostałych fazach, w okolicach 230 V. Niestety, pomimo znacznego wyrównania wartości skutecznych napięć fazowych, współczynnik składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia K_{2U} nie ulega redukcji, a nawet nieznacznie rośnie. Niewielkiej redukcji ulega jedynie współczynnik składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} . Z początku ta obserwacja może dziwić, jednakże po zwróceniu uwagi na kąty wektorów napięć fazowych zauważamy, że urządzenie to praktycznie nie wpływa na ich wartości. Przykładowo porównując kąty wektorów napięć fazowych z końcówki obwodu tj. z punktu pomiarowego M3 (tab. 4) i M4 (tab. 5) można zauważyć, że są one niemal identyczne zarówno przed jak i po załączeniu szeregowego transformatora dodatkowego. Symetryzacja wartości skutecznych napięć fazowych powoduje, że maleje współczynnik K_{0U} , a brak wpływu urządzenia na kąty wektorów napięć fazowych powoduje, że współczynnik K_{2U} nie ulega redukcji.

Ocena skuteczności ograniczania wzrostów i asymetrii napięć w rzeczywistej sieci niskiego napięcia

W celu przeprowadzenia pilotażu szeregowego transformatora dodatkowego, wybrano pewną sieć niskiego napięcia zlokalizowaną na terenie gminy Ochotnica Dolna, w której udział prosumentów wynosi 45%. Aby zweryfikować skuteczność ograniczania wzrostów i asymetrii napięć, wykonano dwa pomiary parametrów jakości energii elektrycznej analizatorami klasy A, na końcu obwodu i w miejscu zainstalowania urządzenia. Czas agregacji mierzonych parametrów został ustawiony na 10 minut. Pomiary wykonywano w okresie od 17 kwietnia do 1 września 2019 r., a transformator dodatkowy w całym okresie pomiarowym był załączony pod napięcie, poza dniami 21 – 22 kwietnia 2019 r., w godzinach 8:00 – 19:30.

Mapę układu sieci niskiego napięcia wybraną do pilotażu przedstawiono na rysunku 8. Z kolei na rysunku 9

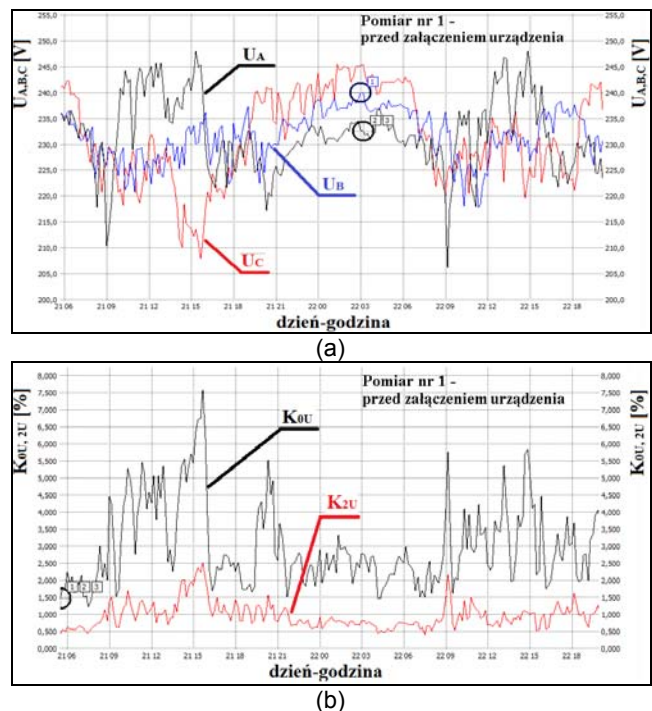
przedstawiono widok szeregowego transformatora dodatkowego, a pomiary napięć fazowych i współczynników składowych symetrycznych kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia przed i po załączeniu urządzenia przedstawiono na rysunkach 10 – 12.



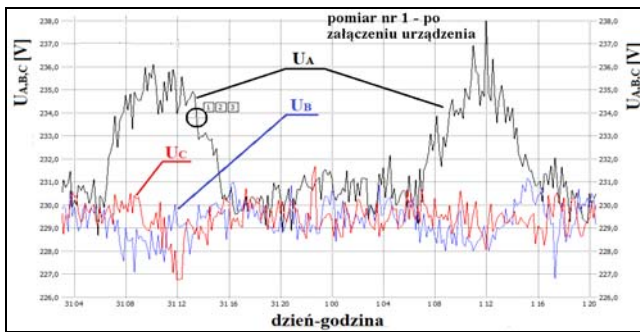
Rys. 8. Mapa układu sieci niskiego napięcia wybranej do przeprowadzenia pilotażu szeregowego transformatora dodatkowego w miejscowości A



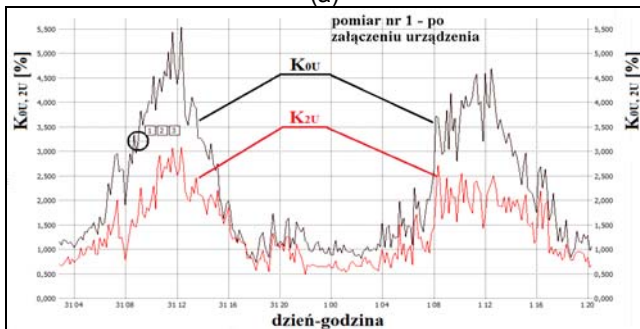
Rys. 9. Widok szafy szeregowego transformatora dodatkowego zlokalizowanej w miejscowości A



Rys. 10. Wykres wartości skutecznych napięć fazowych $U_{A,B,C}$ (a) oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia (b) przed załączeniem transformatora dodatkowego (21 – 22 kwiecień 2019 r.)

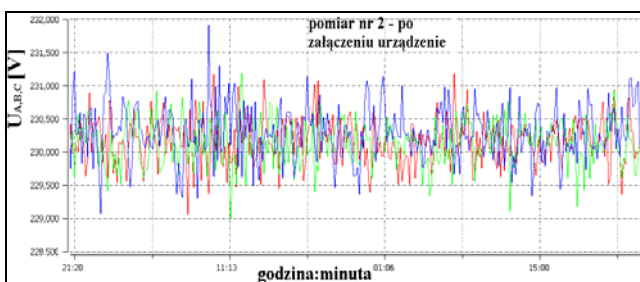


(a)



(b)

Rys. 11. Wykres wartości skutecznych napięć fazowych $U_{A,B,C}$ (a) oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia (b) po załączeniu transformatora dodatkowego (31 kwiecień – 01 maj 2019 r.)



(a)



(b)

Rys. 12. Wykres wartości skutecznych napięć fazowych $U_{A,B,C}$ (a) oraz współczynników składowej symetrycznej kolejności przeciwnej K_{2U} i zerowej K_{0U} napięcia (b) na wyjściu szeregowego transformatora dodatkowego, (30 sierpień – 01 wrzesień 2019 r.)

Podsumowanie

W artykule omówiono jeden ze sposobów ograniczania wzrostów i asymetrii napięć powodowanych dużą koncentracją jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na obwodzie sieci niskiego napięcia. Takim urządzeniem jest szeregowy transformator dodatkowy z niezależną regulacją napięcia w fazach, który włączony szeregowo w linię zasilającą ogranicza wzrosty napięcia w fazie, w której zachodzi generacja oraz symetryzuje

wartości skuteczne napięć fazowych. Przeprowadzone symulacje oraz wykonane pomiary w rzeczywistej sieci niskiego napięcia wykazały, że urządzenie to niestety nie wpływa na kąty wektorów napięć fazowych, przez co nawet pomimo znaczącej symetryzacji wartości skutecznych napięć fazowych, współczynnik składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia K_{2U} nie uległ redukcji. Nieznacznej redukcji uległa natomiast składowa symetryczna kolejności zerowej napięcia (spadek współczynnika K_{0U} z 7,5% do 5,5%), której wpływ na asymetrię i wzrosty napięć w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia ze znaczącym udziałem jednofazowych mikroinstalacji jest zdecydowanie większy niż składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia, a dla której w regulacjach i normach krajowych, i międzynarodowych [8-10] nie ma ustalonych dopuszczalnych limitów.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Topolski, dr inż. Andrzej Firlit, dr inż. Krzysztof Piątek, prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: topolski@agh.edu.pl, andrzej.firlit@keiaspe.agh.edu.pl, kpiatek@agh.edu.pl, hanzel@agh.edu.pl

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 pragną serdecznie podziękować firmie ASTAT sp. z o.o. za wypożyczenie na okres 5 miesięcy urządzenia o handlowej nazwie LVRsys do celów pilotażowych.

LITERATURA

- [1] Strona internetowa gminy Ochotnica Dolna, link: <http://www.ochotnica.pl/pl/211/1915/nabor-do-programu-budowy-mikroinstalacji-fotowoltaicznych.html>. [dostęp: 24.11.2019 r.]
- [2] Norma PN-EN 50438:2014-02 Wymagania dla instalacji mikrogeneracyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia
- [3] Karta aktualizacji nr 7/2018 Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej z dnia 18 kwietnia 2019 r., 15-18
- [4] Kryteria przyłączenia oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia TAURON Dystrybucja S.A. z 1 sierpnia 2018 r., 6-7
- [5] Beharrysingh S. Doctoral thesis: Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancer, Loughborough University, 2014, 52-57
- [6] Ayres W.E.M., The application of the induction voltage regulator, *Electrical Engineers Journal*, vol. 69, no. 418, 1208-1218, 1931
- [7] Strona internetowa A-Eberle, link: <https://www.a-berle.de/en/content/lvrsys-3-phase-plastic-cabinet> [dostęp: 24.11.2019 r.]
- [8] Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania system elektroenergetycznego z dnia 4 maja 2007 r., Dz. U. z 2007 r., poz. 623 z późniejszymi zmianami
- [9] Norma PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, PKN, 2010
- [10] Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B.: Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.90 Nr 7/2014, 26