

ANALIZA WYBRANYCH ASPEKTÓW JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECI NISKIEGO NAPIĘCIA ZE ZNACZĄCYM UDZIAŁEM GENERACJI ROZPROSZONEJ NA TERENIE KLASTRA WIRTUALNA ZIELONA ELEKTROWNIA OCHOTNICA

Łukasz TOPOLSKI¹, Wojciech SCHAB², Andrzej FIRLIT³, Krzysztof PIĄTEK⁴

1. TAURON Dystrybucja S.A., Oddział Kraków
tel.: 12 389 37 07 e-mail: lukasz.topolski@tauron-dystrybucja.pl
2. TAURON Dystrybucja S.A., Oddział Kraków
tel.: 516 114 310 e-mail: wojciech.schab@tauron-dystrybucja.pl
3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
e-mail: andrzej.firlit@keiaspe.agh.edu.pl
4. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
e-mail: kpiatek@.agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ 1-fazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na wybrane parametry jakości energii elektrycznej, w pewnej sieci niskiego napięcia, z udziałem mikroinstalacji wynoszącym 48%, zlokalizowanej na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochotnica.

Słowa kluczowe: 1-fazowe mikroinstalacje, asymetria napięć i prądów, wzrosty napięcia, prosument

1. WPROWADZENIE

Gmina Ochotnica Dolna od czterech lat prowadzi intensywne działania na rzecz ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa energetycznego regionu poprzez sukcesywny wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w swoim bilansie energetycznym. I tak, w 2015 roku na terenie gminy powstała farma fotowoltaiczna zasilająca jedną z oczyszczalni ścieków o mocy znamionowej 200 kW wraz z systemem magazynowania energii w technologii litowo-jonowej o pojemności 120 kWh. Tego samego roku powstała również instalacja fotowoltaiczna na budynku Zespołu Szkolno-Przedszkolnego o mocy znamionowej 22 kW oraz zabudowano na dachach domów jednorodzinnych 120 sztuk instalacji fotowoltaicznych o mocy znamionowej 2 kW, służących do grzania ciepłej wody użytkowej (bez możliwości oddawania nadwyżek energii do sieci dystrybucyjnej). Gmina nie poprzestała na dotychczasowych działaniach i w 2017 roku w ramach Programu Priorytetowego Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej „Wspieranie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii” zabudowano na dachach domów jednorodzinnych kolejne 726 1-fazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych o mocy znamionowej 2,08 kW, służących do grzania wody, tym razem z możliwością oddawania nadwyżek wyprodukowanej energii do sieci dystrybucyjnej. Tym sposobem niemal 1/3 budynków całej gminy posiada panele fotowoltaiczne, dzięki którym ich mieszkańcy zaspokajają część swoich potrzeb energetycznych [1].

Niestety, poza niewątpliwymi aspektami ekologicznymi, właściciele 1-fazowych instalacji fotowoltaicznych zabudowanych w 2017 roku zgłaszają do Operatora Systemu Dystrybucyjnego reklamacje dotyczące nieprawidłowej pracy ich mikroinstalacji. Prosumenci najczęściej skarżą się na wyłączanie falowników z powodu wysokiego napięcia w sieci oraz asymetrię napięcia zasilającego.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów wybranych parametrów jakości energii elektrycznej, w pewnej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z 48 % udziałem 1-fazowych mikroinstalacji prosumenckich.



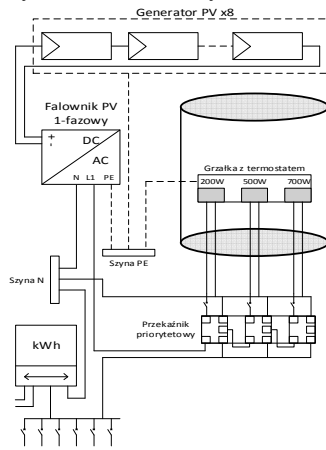
Rys. 1. Lokalizacja 726 1-fazowych mikroinstalacji (żółte punkty) na terenie gminy Ochotnica Dolna (opracowanie własne)

2. UKŁAD PRACY 1-FAZOWYCH INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH

W skład każdej z 726 instalacji fotowoltaicznych wchodzi [1]:

- 8 paneli polikrystalicznych, każdy o mocy 250 W,
- przełącznik priorytetowy,
- grzałka z termostatem z modułami 200 W, 500 W i 700 W,

- 1-fazowy falownik o mocy 2 kW.

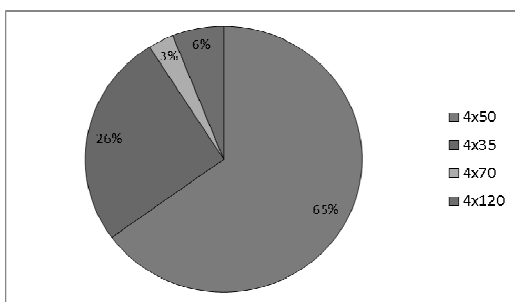


Rys. 2. Schemat podłączenia 1-fazowej mikroinstalacji fotowoltaicznej o mocy 2,08 kW z bojlerem oraz siecią dystrybucyjną (opracowanie własne)

Instalacja fotowoltaiczna została zaprojektowana w taki sposób, aby w pierwszej kolejności energia elektryczna dostarczana z paneli fotowoltaicznych poprzez falownik była wykorzystywana na potrzeby grzania wody w bojlerze. W tym celu tzw. przełącznik priorytetowy decyduje o załączeniu poszczególnych modułów grzałek na podstawie pomiaru temperatury wody w zbiorniku. W przypadku, gdy woda osiągnie zadaną temperaturę, przełącznik priorytetowy wyłącza grzałki i załącza falownik na sieć. Jeśli odbiorca ma do tej fazy przyłączone odbiorniki, to będą one zasilone z instalacji fotowoltaicznej, a nadwyżka energii zostanie oddana do sieci dystrybucyjnej [1].

3. SIEĆ NISKIEGO NAPIĘCIA NA TERENIE GMINY OCHOTNICA DOLNA

Obwody sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, do której zostały przyłączone 1-fazowe mikroinstalacje są w większości wykonane przewodami o przekroju 4x50 mm². Długości obwodów zawierają się w przedziale 200-950 metrów. Na rysunku 3 przedstawiono dane statystyczne dotyczące struktury sieci niskiego napięcia zlokalizowanej na terenie gminy.



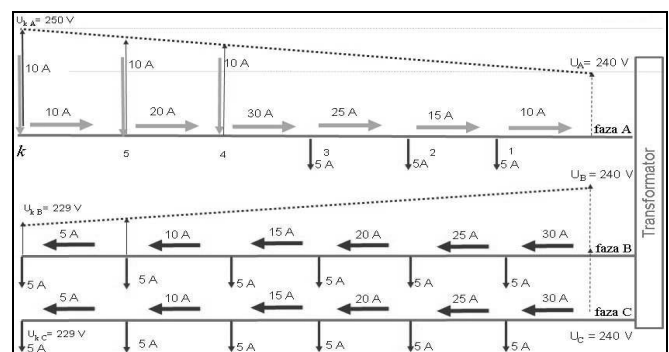
Rys. 3. Struktura sieci niskiego napięcia na terenie gminy Ochotnica Dolna (opracowanie własne)

4. WPŁYW 1-FAZOWYCH MIKROINSTALACJI NA WARTOŚĆ NAPIĘCIA W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

W typowej promieniowej sieci dystrybucyjnej, bez udziału źródeł odnawialnych, prąd płynie od stacji transformatorowej do odbiorników, stąd spadek napięcia ma znak ujemny, a wartości napięć w kolejnych węzłach sieci

od stacji transformatorowej ulegają zmniejszeniu. Z kolei w przypadku, gdy do sieci dystrybucyjnej zostaną przyłączone źródła odnawialne, to prąd pomiędzy poszczególnymi węzłami może płynąć zarówno w kierunku końca sieci, jak i w kierunku stacji transformatorowej, stąd spadek napięcia może przyjmować zarówno ujemny jak i dodatni znak. W konsekwencji, w momencie nadprodukcji (niezbilansowania energii oddawanej do sieci przez źródła odnawialne z energią pobieraną przez odbiorniki) może dojść do takiej sytuacji, w której spadki napięć pomiędzy wszystkimi węzłami sieci będą miały dodatni znak, co może doprowadzić do wzrostu napięcia ponad wartość dopuszczalną i skutkować zadziałaniem zabezpieczeń nadnapięciowych falownika i jego wyłączeniem [2][3][4].

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy rozptyw prądów w układzie 3-fazowym z 1-fazowymi odbiornikami i źródłami odnawialnymi, obrazujący typową sytuację spotykaną w okresach największego nasłonecznienia, w sieciach niskiego napięcia zlokalizowanych na terenie gminy Ochotnica Dolna.



Rys. 4. Rozptyw prądów w układzie 3-fazowy z 1-fazowymi odbiornikami (czerwony kolor strzałkowania) i źródłami odnawialnymi (zielony kolor strzałkowania) (opracowanie własne)

Zakładając, że napięcie U_n w stacji transformatorowej po stronie dolnego napięcia jest stałe, procentowy wzrost napięcia po załączeniu źródła odnawialnego w węzeł k można wyznaczyć z zależności [3]:

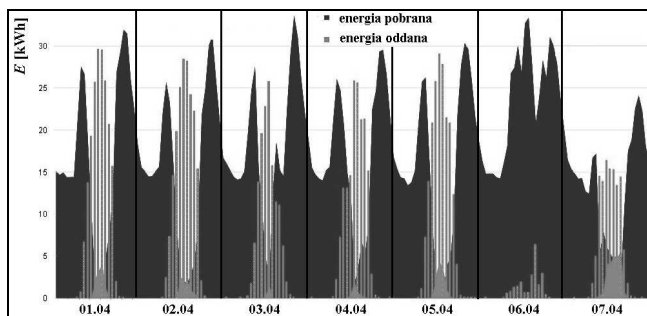
$$\Delta U_{k\%} = \frac{100}{U_n^2} (R_{0k} P_k \pm X_{0k} Q_k) \quad (1)$$

gdzie: U_n – napięcie w stacji transformatorowej V, R_{0k} , X_{0k} – rezystancja i reaktancja toru prądowego od stacji transformatorowej do węzła „k” Ω , P_k , Q_k – generowana moc czynna i bierna przez źródło odnawialne W, var.

5. PROFILE GENERACJI I POBORU ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ PROSUMENTÓW

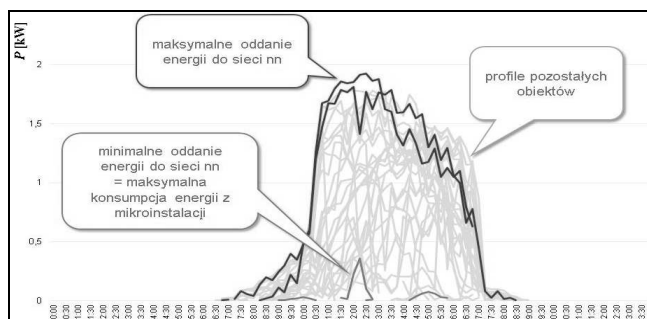
Dane odczytane z liczników bilansujących zlokalizowanych w stacjach transformatorowych SN/nn, dla których udział instalacji fotowoltaicznych wynosi powyżej 35 – 40 % pokazują, że w okresach największego nasłonecznienia występuje nadprodukcja energii elektrycznej. Przykładowy tygodniowy bilans energii czynnej pobranej i oddanej dla jednej ze stacji transformatorowych o 48 % udziale 1-fazowych mikroinstalacji został przedstawiony na rysunku 5. Bilanse energetyczne dla innych stacji transformatorowych SN/nn,

z przybliżonym lub większym udziałem instalacji fotowoltaicznych wyglądają bardzo podobnie.



Rys. 5. Godzinowy bilans energii czynnej E pobranej i oddanej dla stacji transformatorowej o 48 % udziale 1-fazowych mikroinstalacji za dni 1 – 7 kwietnia 2019 r. (opracowanie własne)

Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku, gdy porównamy ze sobą profile generacji mocy czynnej dla poszczególnych prosumentów, co zostało przedstawione na rysunku 6.

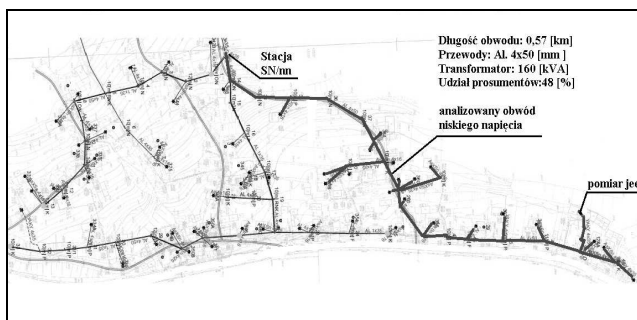


Rys. 6. Zbiorcze zestawienie profili generowanej mocy czynnej do sieci dystrybucyjnej przez prosumentów przyłączonych do sieci dystrybucyjnej o 48 % udziale mikroinstalacji (opracowanie własne)

Na podstawie rysunku 6 można zauważyć, że prosumenci w małym stopniu wykorzystują energię dostarczaną im przez 1-fazowe instalacje fotowoltaiczne, stąd znaczna jej część jest oddawana do sieci dystrybucyjnej.

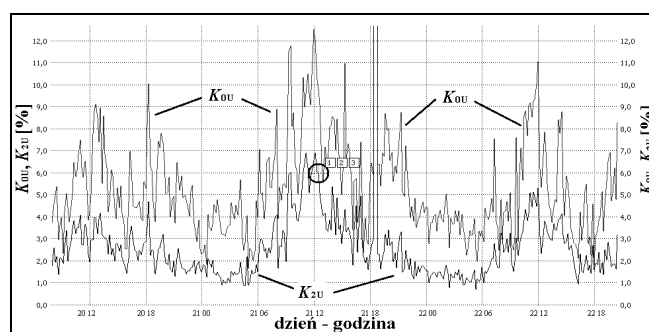
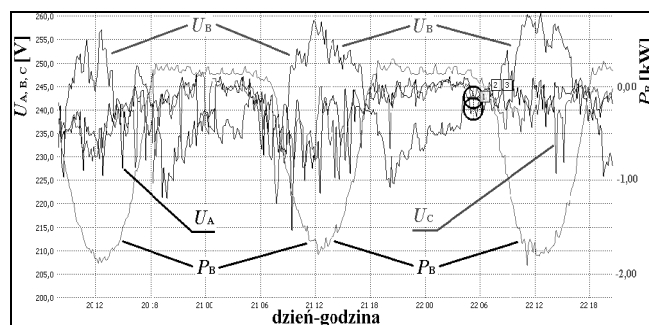
6. WPLYW 1-FAZOWYCH MIKROINSTALACJI NA WYBRANE PARAMETRY JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ – ANALIZA PRZYPADKU

W celu sprawdzenia wpływu 1-fazowych mikroinstalacji na parametry jakości energii elektrycznej wybrano pewną sieć niskiego napięcia, o udziale mikroinstalacji wynoszącym 48 %. Mapę układu sieci niskiego napięcia przedstawiono na rysunku 7.

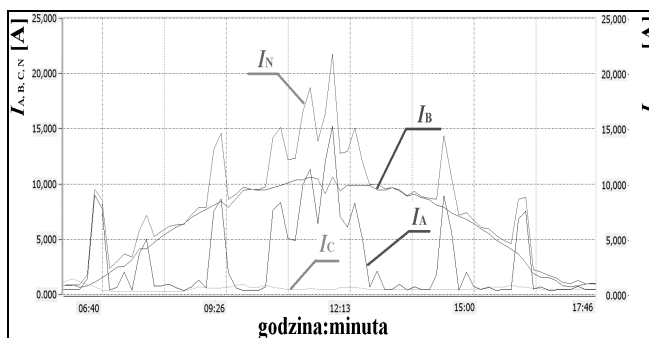


Rys. 7. Mapa wybranego do pomiarów układu sieci niskiego napięcia na terenie gminy Ochotnica Dolna (opracowanie własne)

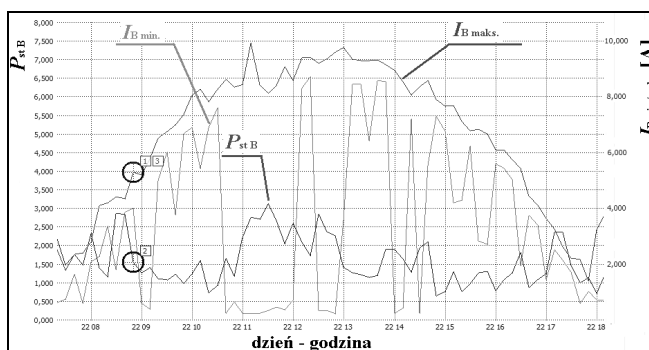
Pomiary parametrów jakości energii elektrycznej wykonano analizatorem klasy A, w złączu kablowym u jednego z ostatnich prosumentów na obwodzie. Na rysunkach 8 – 10 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów za okres 20-22 kwietnia 2019 r.



Rys. 8. Wykres maksymalnych (agregowanych 200 ms) napięć fazowych oraz współczynników asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia



Rys. 9. Wykres prądów fazowych składowej podstawowej $I_{A,B,C}$ i prądu w przewodzie neutralnym I_N (agregowanych 10 minutowo) zmierzonych na przyłączy prosumenta



Rys. 10. Wykres zmian współczynnika P_{st} dla fazy B i prądu składowej podstawowej maksymalnej i minimalnej (agregowanym 200 ms) dla fazy B

7. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono wpływ 48 % udziału 1-fazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych o mocy jednostkowej 2,08 kW, przyłączonych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia na wartości skuteczne napięć fazowych, współczynniki składowych symetrycznych kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia, prądy fazowe $I_{A,B,C}$ i prąd w przewodzie neutralnym I_N oraz współczynnik krótkookresowego migotania światła P_{st} na przyłączy do prosumenta.

Wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 8 pokazują, że duża liczba mikroinstalacji o małej mocy jednostkowej przyłączona do jednej fazy układu 3-fazowego powoduje wzrosty napięcia oraz wzrosty współczynników asymetrii ponad wartości dopuszczalne. Sytuacja ta występuje w przypadku niezbilansowania ilości energii oddawanej do sieci dystrybucyjnej z ilością energii pobieranej przez odbiorniki w danym przedziale czasu. Co ciekawe, szczególnie wysokie wartości przyjmuje współczynnik składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} napięcia, dla którego nie ma określonych limitów w dokumentach krajowych, ani międzynarodowych. Wysoki poziom składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} napięcia wynika z przepływu prądu w przewodzie neutralnym. Rysunek 9 przedstawia sytuację, w której podczas oddawania energii do sieci przez mikroinstalację przyłączoną do fazy B i poboru energii na fazach A i C , prąd w przewodzie neutralnym N jest w pewnych przedziałach czasu dużo większy od prądów fazowych. Duży prąd w przewodzie neutralnym powoduje spadek napięcia na impedancji tego przewodu, co prowadzi do przesunięcia środka ciężkości gwiazdy napięć fazowych i skutkuje wysokim udziałem składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} w napięciu zasilającym [5]. W związku

z dokonanymi obserwacjami, konieczne wydaje się opracowanie limitów udziału tej składowej w napięciu zasilającym, ponieważ jej wzrost jest związany z dużym udziałem 1-fazowych mikroinstalacji w sieci niskiego napięcia.

Mikroinstalacje mają również wpływ na wahania napięcia w sieci dystrybucyjnej, co zostało pokazane na rysunku 10. Wzrost współczynnika P_{st} zwłaszcza w godzinach 11 – 13 związany jest z dużą zmiennością prądu prosumenta, powodowaną dynamicznie zmieniającymi się warunkami nasłonecznienia. Należy również mieć na uwadze, że na wzrost współczynnika P_{st} mają także wpływ pozostałe 1-fazowe mikroinstalacje przyłączone do tej fazy obwodu niskiego napięcia.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Strona internetowa gminy Ochotnica Dolna, link: <http://www.ochotnica.pl> (dostęp: 19.09.2019 r.)
2. Demirok E., Sera D., Teodorescu R., et al.: Clustered PV Inverters in LV Networks: An Overview of Impacts and Comparison of Voltage Control Strategies, IEEE Electrical Power and Energy conference (EPEC), Montreal, March 2010,
3. Wasiak I., Hanzelka Z.: Integration of distributed energy sources with electrical power grid, Bulletin of The Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 57, No. 4, 2009,
4. Lucas A., Single-Phase PV Power Injection Limit due to Voltage Unbalances Applied to an Urban Reference Network Using Real-Time Simulation, MDPI AG, 2018,
5. Beharrysingh Shiva. Doctoral thesis: Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancer. Loughborough University, 2014.

ANALYSIS OF SELECTED ASPECTS OF POWER QUALITY IN A LOW-VOLTAGE ELECTRICITY NETWORK WITH A SIGNIFICANT SHARE OF DISTRIBUTED GENERATION IN VIRTUAL GREEN OCHOTNICA POWER PLANT CLUSTER

The article presents the impact of 2,08 kW single-phase PV microinstallations on selected power quality parameters, such as voltage swells, current and voltage unbalance and voltage fluctuations expressed as P_{st} indicator, in a certain low-voltage electricity network with the share of prosumers of 48 %, located within the cluster Virtual Green Ochotnica Power Plant in Poland. The article also presents power generation profiles for power station MV/LV and prosumers and explains the reasons of voltage swells and unbalance.

Keywords: voltage swells, current and voltage unbalance, single-phase PV microinstallations, prosumer.