

doi:10.15199/48.2025.03.67

Generacja rozproszona a jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia – studium przypadku

Streszczenie. W ostatnich kilku latach obserwuje się w Polsce znaczny wzrost liczby prosumentów. Na koniec 2023 roku do krajowych sieci dystrybucyjnych było przyłączonych około 1 mln 400 tys. mikroinstalacji prosumenckich o łącznej mocy blisko 10,5 GW. Są to przede wszystkim instalacje fotowoltaiczne. Wobec zgłaszania coraz częściej do Operatorów Systemów Dystrybucji OSD problemów m.in. z poziomem napięcia, ważne jest określenie charakteru tych zmian napięcia oraz badanie jakie jeszcze inne parametry jakości energii elektrycznej uległy lub mogą ulec pogorszeniu przy dalszym zwiększaniu liczby prosumentów. Wiedza uzyskana dzięki studium przypadku posłuży do lepszego zrozumienia zjawisk związanych z pogarszaniem się jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia z generacją rozproszoną.

Abstract. The last few years a significant increase in the number of prosumers in Poland has been observed. At the end of 2023, about 1.4 million of prosumer micro-installations with a total capacity of nearly 10,5 GW were connected to the national distribution grid. These are mainly photovoltaic installations. Since it has been reported an increasing number of problems with voltage levels to the Distribution System Operators of the DSOs, it is important to determine the nature of these changes related to voltage levels and to study what other parameters of power quality may deteriorate a further increase in the number of prosumers. The knowledge obtained thanks to this case study might be helpful for a better understanding of the problems with the quality of electricity in the low-voltage power grid with the distributed generation. **(The distributed generation versus the quality of electricity in the low-voltage power grid – a case study)**

Słowa kluczowe: Jakość energii elektrycznej, fotowoltaika, sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia

Keywords: Electricity quality, photovoltaic, low-voltage power grids

Wstęp

Problem jakości energii elektrycznej dotyczy każdego etapu użytkowania energii elektrycznej, począwszy od wytwarzania, poprzez przesył, rozdział, czyli dystrybucję, a skończywszy na odbiorcy.

W związku z rozwojem energetyki odnawialnej w Polsce, pojawiły się nowe problemy w zakresie jakości energii elektrycznej, a wynikające głównie ze zmian w obszarze produkcji energii elektrycznej i jej dystrybucji. O ile do niedawna w systemie elektroenergetycznym realizowany był tylko jednokierunkowy przepływ energii elektrycznej (od elektrowni do odbiorcy), obecnie nastąpiło przejście do dwukierunkowego – prosumenckiego. Wprowadzenie modelu prosumenckiego, głównie wskutek szybkiego rozwoju fotowoltaiki przyczyniło się do występowania różnego rodzaju zaburzeń elektromagnetycznych w systemie elektroenergetycznym, mających wpływ na jakość energii elektrycznej.

Problemy z jakością energii elektrycznej w zmieniającej się infrastrukturze sieci elektroenergetycznych wskutek dołączania instalacji PV, omawiane w wielu publikacjach [1–6], występują nie tylko w Polsce, ale pojawiły się znacznie wcześniej wszędzie tam, gdzie nastąpił gwałtowny wzrost liczby prosumentów użytkujących panele PV. Połączenie instalacji PV z siecią elektroenergetyczną rodzi szereg problemów technicznych, bardzo często mających ogromny wpływ na parametry jakościowe dostarczanej energii elektrycznej, głównie poprzez podnoszenie poziomu napięcia w sieciach elektroenergetycznych, które są przestarzałe i niedostosowane do pracy z tak wieloma prosumenckimi instalacjami fotowoltaicznymi [7].

Operatorzy Sieci Dystrybucyjnych (OSD) muszą zmagać się z coraz częściej pojawiającymi się zgłoszeniami otrzymanymi od odbiorców, dotyczącymi niedotrzymywania parametrów jakościowych energii elektrycznej, bowiem mają oni obowiązek dostarczenia energii elektrycznej charakteryzującej się odpowiednimi parametrami jakościowymi napięcia, określonymi w normie PN-EN 50160 [8].

OSD, po otrzymaniu zgłoszenia od prosumenta, jest zobowiązany do jego weryfikacji. Weryfikacja zgłoszenia

polega na montażu analizatora parametrów jakości energii elektrycznej w miejscu jej dostawy tzn. na granicy zarządu stron, na czas określony w w/w normie tj. 7 dni, tak aby możliwe było zarejestrowanie 1008 10-minutowych próbek. Jeżeli zgłaszany problem zostanie potwierdzony pomiarami, OSD jest zobowiązany do podjęcia kroków mających na celu jego usunięcie, bowiem to on jest odpowiedzialny za utrzymanie odpowiednich parametrów jakości energii elektrycznej.

Istnieje wiele technicznych sposobów na poprawę parametrów jakościowych energii elektrycznej. OSD wybiera sposób indywidualnie dla każdego przypadku biorąc pod uwagę stan techniczny sieci, urządzeń elektroenergetycznych oraz uwarunkowania ekonomiczne

Na podstawie zapisów zawartych w normie PN-EN 50160, w tabeli 1 zestawiono wybrane parametry jakości energii elektrycznej dla sieci nn wraz z dopuszczalnymi wartościami oraz wymaganiami w zakresie pomiarów i oceny wyników.

Tabela 1. Wybrane parametry jakości energii elektrycznej dla sieci nn według normy PN-EN 50160:2010 [8]

Parametry napięcia sieci nn	Wartości dopuszczalne dla sieci nn	Wymagania pomiarów i oceny wyników			
		Miara podstawowa	Przedział uśredniania	Czas pomiaru	Procent liczby pomiarów
Częstotliwość podstawowa	50 Hz ± 1%	Wartość średnia	10 s	rok	99,5
	50 Hz +4% / -6%			brak ustaleń	100
Odchylenia (zmiany) napięcia	230 V ± 10%	Wartość skuteczna (RMS)	10 min	tydzień	95
	230 V +10% / -15%				100
Szybkie zmiany napięcia	Wskaźnik długookresowej uciążliwości PLT ≤ 1	Wartość względna	2h	tydzień	95
Asymetria	Wskaźnik asymetrii ≤ 2%, na wydzielonych obszarach ≤ 3%	Wartość skuteczna (RMS)	10 min	tydzień	95
Wyższe harmoniczne	THD napięcia ≤ 8%	Wartość skuteczna (RMS)	10 min	tydzień	95
Interharmoniczne		Brak ustaleń			

Jednym z istotnych parametrów jakości energii elektrycznej, który przy rozwoju energetyki prosumenckiej uległ pogorszeniu jest poziom napięcia w sieci elektroenergetycznej, niegdyś praktycznie nie wymagający aż takiej uwagi i nie poruszany w analizach dotyczących

sieci niskiego napięcia. Praca instalacji PV może powodować wzrost napięcia, zarówno w sposób skokowy w krótkim, jak i w długim czasie i nawet, jeżeli jego wartość nie przekracza dopuszczalnego poziomu $U_{RMS} \pm 10\%$, ale jest znacznie podwyższona, może być przyczyną powstania szeregu negatywnych skutków, jak wzrost strat mocy, wzrost mocy bierniej, skrócenie czasu eksploatacji urządzeń i innych. Wzrosty i spadki wartości skutecznej napięcia wpływają negatywnie na niemal wszystkie odbiorniki energii elektrycznej, w tym na silniki elektryczne, urządzenia energoelektroniczne i elektrotermiczne, źródła światła, ale także na elementy sieci, jak transformatory i linie elektroenergetyczne. Inny parametr jakości energii elektrycznej związany z poziomem napięcia – wahania napięcia - zależy od mocy instalacji fotowoltaicznej, a w szczególności od jej zmienności, na którą mają wpływ warunki atmosferyczne. Kolejny parametr jakości energii elektrycznej ulegający często pogorszeniu dotyczy występowania asymetrii napięć, a związane jest z faktem dołączania do systemu elektroenergetycznego 1-fazowych instalacji PV.

Do najczęstszych problemów zgłaszanych do lokalnego Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD) przez odbiorców, u których zainstalowano panele fotowoltaiczne lub przez odbiorców, którzy nie posiadają PV, ale są zasilani z tej samej linii, co prosumenci, należą:

- podwyższony poziom napięcia w sieci,
- wahania napięcia, efektem których jest migotanie światła,
- asymetria napięcia,
- nieprawidłowa praca mikroinstalacji,
- czasowe wyłączenie/włączenie się falownika
- spadki napięć wieczorami, zaś w dzień – zbyt wysokie napięcie,
- spadki napięć u części odbiorców, zaś u pozostałych - za wysokie napięcie (stacja posiada kilka obwodów).

W artykule zaprezentowano studium przypadku - wyniki analizy wybranych parametrów jakości energii elektrycznej, w szczególności dotyczących poziomu napięcia u odbiorców – prosumentów z PV, zgłaszających problemy z jakością energii elektrycznej.

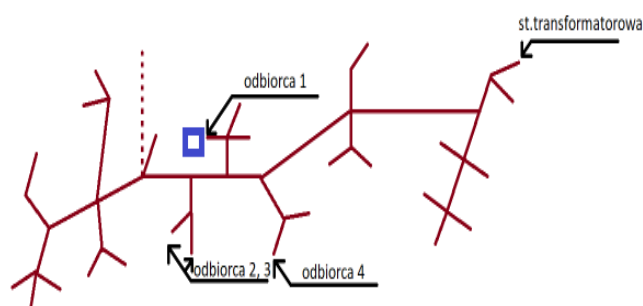
Wybrane wyniki pomiarów parametrów i analiza jakości energii elektrycznej u prosumentów dołączonych do sieci niskiego napięcia z panelami fotowoltaicznymi

Operator Sieci Dystrybucyjnej otrzymał pismo od prosumentów z prośbą o pomiar jakości dostarczanej energii elektrycznej, ponieważ w pogodne dni, kiedy warunki do produkcji energii elektrycznej przez panele fotowoltaiczne są najkorzystniejsze, ich instalacje przestawały oddawać energię elektryczną do sieci. Było to spowodowane częstymi wzrostami wartości napięcia powyżej 253 V. Ponadto w godzinach popołudniowych i wieczornych, gdy ilość produkowanej energii drastycznie spada, a pobór energii rośnie, wartość napięcia u odbiorców spadała poniżej wartości normatywnych tzn. 207 V. Należy zaznaczyć, że pierwsza rejestracja pomiarów była przeprowadzona w dni pochmurne w okresie zimowym w dniach 28.02 ÷ 6.03.2024, zatem w warunkach najmniej korzystnych dla produkcji energii elektrycznej przez PV. Każde zwiększenie produkcji wskutek poprawy pogody nasilało problemy zgłaszane przez prosumentów. Dla potwierdzenia problemów przeprowadzono po raz drugi pomiary w okresie wiosennym, tj. 16.04 ÷ 23.04.2024.

Analizy dokonano na podstawie pomiarów wykonanych analizatorami jakości energii elektrycznej. Odpowiednio dobrane analizatory jakości sieci są w stanie zarejestrować parametry pracy sieci i stworzyć przejrzysty raport w prosty

sposób, co powoduje, że są niezbędnym i bardzo przydatnym urządzeniem do oceny jakości energii elektrycznej.

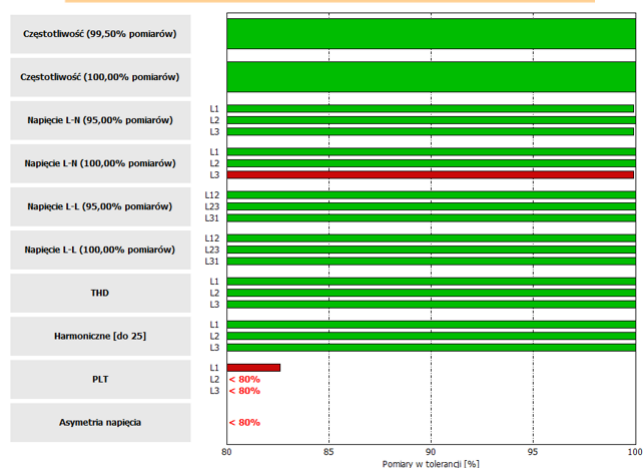
Na rysunku 1 pokazano wycinek sieci niskiego napięcia, gdzie dokonano pomiarów z zaznaczonymi prosumentami zgłaszającymi problemy. Rysunek 1 przedstawia jeden z trzech obwodów niskiego napięcia stacji transformatorowej, z którego zasilani są odbiorcy zgłaszający problemy oraz ich rozmieszczenie względem sieci. Pomiary zostały wykonane u jednego z prosumentów, który posiada mikroinstalację fotowoltaiczną o mocy 15,4 kW. Instalacje pozostałych, zaznaczonych odbiorców mają moc: 6,48 kW, 5,35 kW, 7,98 kW. Niebieskim prostokątem oznaczono lokalizację punktu pomiarowego. Długość obwodu linii nn wynosi ok. 2,4 km. Bezpośrednia odległość dzieląca miejsce pomiaru od stacji transformatorowej wynosi ok. 1 km. Trzon sieci elektroenergetycznej jest wykonany przewodem AL 4x35 mm², zaś odgałęzienie w kierunku odbiorcy oraz przyłącz napowietrzny są wykonane przewodem AL 4x25 mm². Transformator SN/nn posiada moc znamionową 100 kVA.



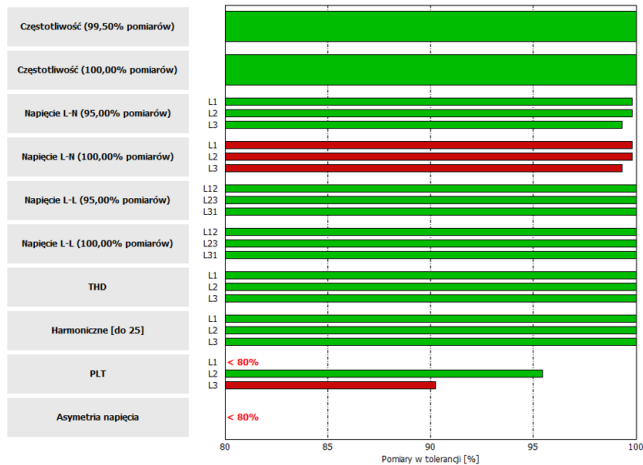
Rys. 1. Sieć niskiego napięcia, w której dokonano pomiaru z zaznaczonymi prosumentami zgłaszającymi problemy

Przedstawione na rysunkach 2 i 3 wykresy słupkowe statystyk pomiarowych, wygenerowane wraz z raportem zgodności z normą, pokazują, że nie wszystkie wartości parametrów jakościowych energii elektrycznej mieszczą się w tolerancji określonej przez normę PN-EN 50160. Wartości długookresowego wskaźnika migotania światła oraz asymetrii napięcia zasilającego znacząco odbiegają od założeń normatywnych, a poziom napięcia fazowego nie jest dotrzymany w jednej z faz, co widać na rysunku 2. Natomiast na rysunku 3 widać pogłębienie się problemów z jakością energii elektrycznej, bowiem doszły problemy z poziomem napięcia już wszystkich trzech fazach.

STATYSTYKI POMIAROWE 10 min (f = 10 s, Plt = 2 h)



Rys. 2. Statystyki pomiarowe w punkcie pomiaru u prosumenta – w I okresie pomiarowym 28.02÷6.03.2024



Rys. 3. Statystyki pomiarowe w punkcie pomiaru u prosumenta – w II okresie pomiarowym 16.04+23.04.2024

W tabelach 2 i 3 przedstawiono statystyki napięcia fazowego w odniesieniu do wartości normatywnych, zaś na rysunkach 4 i 5 pokazano w sposób graficzny wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach z zaznaczeniem dopuszczalnego przedziału zmian napięcia $\pm 10\%$ dla obu okresów pomiarowych.

Tab. 2 Zestawienie statystyk napięcia fazowego – pomiary 28.02+6.03.2024

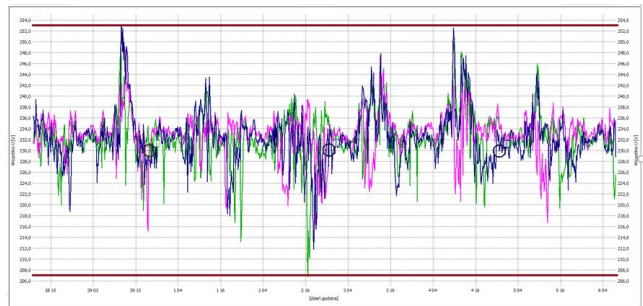
Parametr	Tolerancja V	L1	L2	L3
		%	%	%
Napięcie fazowe (95% pomiarów)	od 207,00 do 253,00	99,90	100,00	99,90
Napięcie fazowe (100% pomiarów)	od 195,00 do 253,00	100,00	100,00	99,90*
		V	V	V
Max dla napięcia fazowego (100% pomiarów)	od 207,00 do 253,00	249,89	248,54	253,13*
Min dla napięcia fazowego (100% pomiarów)	od 195,00 do 253,00	206,73	215,06	211,73

Tab. 3 Zestawienie statystyk napięcia fazowego – pomiary 16.04+23.04.2024

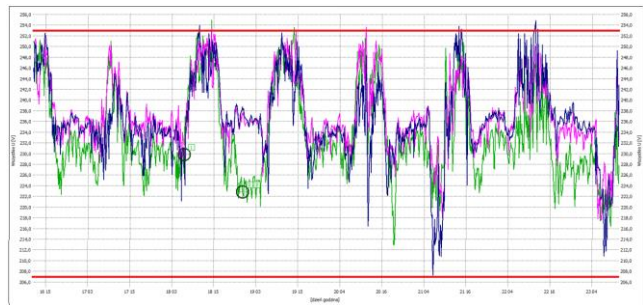
Parametr	Tolerancja V	L1	L2	L3
		%	%	%
Napięcie fazowe (95% pomiarów)	od 207,00 do 253,00	99,80	99,80	99,31
Napięcie fazowe (100% pomiarów)	od 195,00 do 253,00	99,80*	99,80*	99,31*
		V	V	V
Max dla napięcia fazowego (100% pomiarów)	od 207,00 do 253,00	254,84*	253,59*	254,79*
Min dla napięcia fazowego (100% pomiarów)	od 195,00 do 253,00	212,93	217,52	206,29

Symbol * oznacza, że wartość przekracza ograniczenia zdefiniowane w normie PN-EN 50160.

Analizując przedstawione dane można stwierdzić, że w obu okresach pomiarowych nie wszystkie wartości napięć fazowych ze zbioru 1008 zapisanych próbek mieszczą się w zakresie normatywnym określonym w normie. W I okresie pomiarowym zaobserwowano sporadyczne przekroczenia maksymalnej oraz minimalnej wartości skutecznej napięcia w fazie L3, natomiast w fazach L1 i L2 zmierzone wartości maksymalne były bliskie 250 V, co oznacza, że mieszczą się w przedziale tolerancji. W II okresie pomiarowym, kiedy warunki pogodowe były bardziej sprzyjające produkcji energii elektrycznej przez PV, przekroczenia napięcia dopuszczalnego występowały już w każdej z faz i częściej.

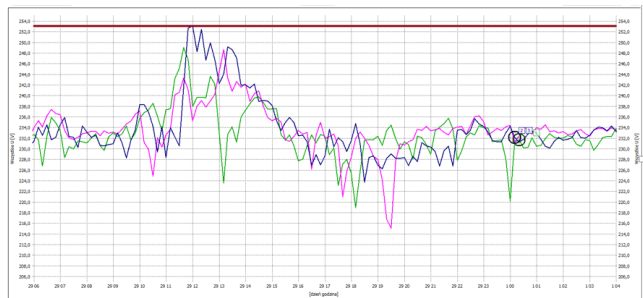


Rys. 4. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach w I okresie pomiarowym w dniach 28.02+6.03.2024

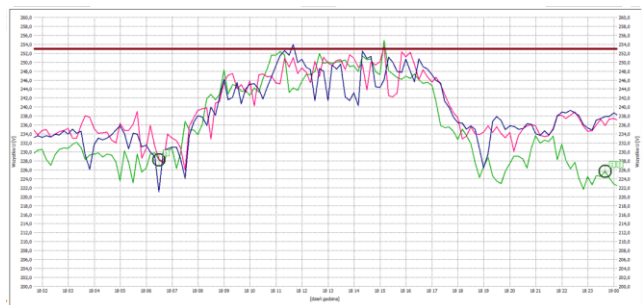


Rys. 5. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach w II okresie pomiarowym w dniach 16.04+23.04.2024

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono zmiany poziomu napięcia w jednym z dni pomiarowych w obu okresach pomiarowych.



Rys. 6. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach w I okresie pomiarowym – pomiar dnia 29.02.2024 od godz. 6:00 do godz. 3:00 dnia 1.03.2024



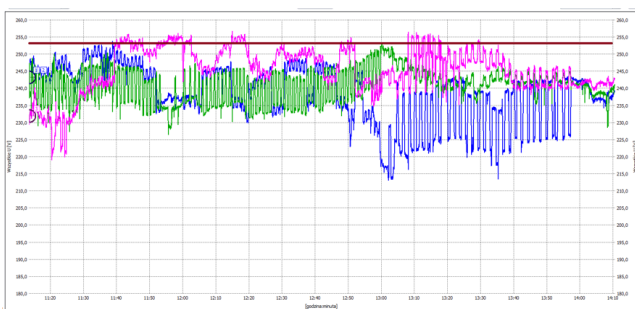
Rys. 7. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach w II okresie pomiarowym – pomiar dnia 18.04.2024, od godz. 2:00 do godz. 0:00 dnia 19.04.2024

Pomimo tego, że warunki do produkcji energii elektrycznej w I okresie pomiarowym nie były bardzo korzystne, to od godziny 10:00 do 13:00 występowały skoki wartości napięcia dochodzące maksymalnej dopuszczalnej wartości określonej w normie, a także przekraczające ją. Podczas całkowitego zachmurzenia, bądź w godzinach rannych lub

wieczornych wartości napięć w poszczególnych fazach mieszczą się w normie w zakresie od ok. 228 V do ok. 240 V, nie uwzględniając spadków napięcia wywołanych wzrostem obciążenia. W warunkach korzystniejszych pogodowo dla PV (II pomiar) skoki wartości napięcia przekraczające maksymalną dopuszczalną wartość określoną w normie występowały od godziny 11:00 do 17:00 i pojawiały się znacznie częściej, co powodowało wyłączenie instalacji PV.

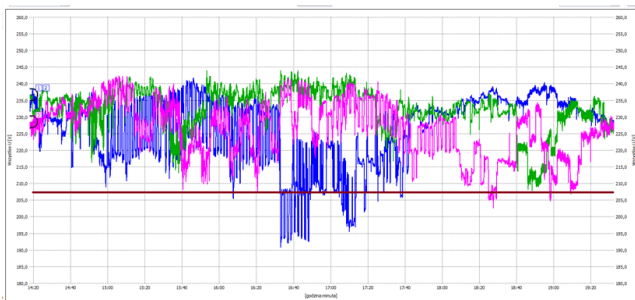
Wykres wartości skutecznych napięć fazowych poszczególnych faz przedstawiony na rysunku 8 obrazuje wyniki pomiarów o próbkowaniu jedno-sekundowym w tym samym dniu pomiarowym jak na rysunku 6. W przedziale czasu od godziny 11:40 do godziny 13:30 wartości napięcia w fazie L3 często przekraczają wartość graniczną.

W przedziale czasowym podanym na rysunku 8 zaobserwowano, mimo okresu zimowego, przejścia pogodowe, co spowodowało prawie natychmiastowy wzrost poziomu napięcia poza dopuszczalny jego poziom powyżej 253 V.



Rys. 8. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach, przy próbkowaniu jedno-sekundowym – pomiar w dniu 29.02.2024 od godz. 11:20 do 14:00

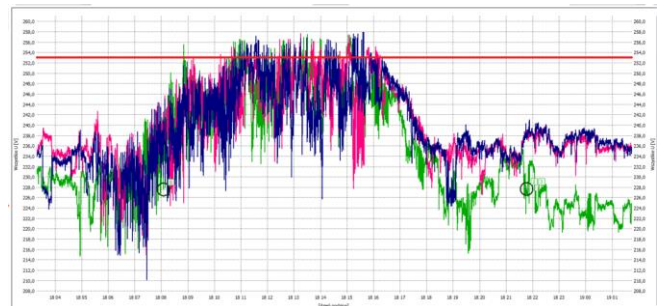
Z kolei wykres wartości skutecznych napięć fazowych poszczególnych faz przedstawiony na rysunku 9, wskazuje, że w czasie kiedy produkcja energii elektrycznej przez instalacje fotowoltaiczne jest niska, a dodatkowo istnieje duże prawdopodobieństwo zwiększonego poboru energii elektrycznej przez urządzenia zlokalizowane w gospodarstwach domowych przyłączonych do danego obwodu sieci elektroenergetycznej, wartości napięć w fazach L1 oraz L3 przekraczają minimalną wartość graniczną.



Rys. 9. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach, przy próbkowaniu jedno-sekundowym – pomiar w dniu 02.03.2024 od godz. 14:20 do 19:20

Dane na wykresach na rysunkach od 4 do 9 pokazują, że wartość napięcia w ciągu tygodnia w okresie zimowym (I okres pomiarowy), a ponadto pochmurnym jest bardzo niestabilna i zróżnicowana. Występują przekroczenia, zarówno górnej, jak i dolnej wartości granicznej, co świadczy o pogorszonej jakości energii elektrycznej.

Poprawa warunków pogodowych jeszcze bardziej potęguje te problemy – co pokazały powtórnie wykonane pomiary. Na rysunku 10 pokazano wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach, przy próbkowaniu jedno-sekundowym – pomiar w jednym dniu od 18.04.2024, od godz. 4:00 do godz.1:00 dnia 19.04.2024. Z analizy uzyskanych wyników, w szczególności w przedziale czasu od godziny 9:00 do godziny 16:00, tj. kiedy promienie słoneczne w najbardziej efektywny sposób padają na panele fotowoltaiczne, zauważa się, że przez większość wyżej wymienionego przedziału czasu w sieci elektroenergetycznej panuje napięcie przekraczające próg normatywny, a maksymalne wartości jakie zmierzono dochodzą nawet do 258 V, co rzeczywiście może powodować wyłączenie instalacji PV i frustracje właścicieli instalacji.

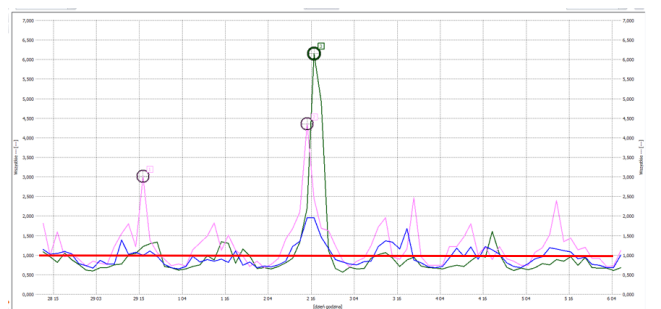


Rys. 10. Wartości skuteczne napięcia fazowego w poszczególnych fazach, przy próbkowaniu jedno-sekundowym – pomiar dnia 18.04.2024, od godz. 4:00 do godz.1:00 dnia 19.04.2024

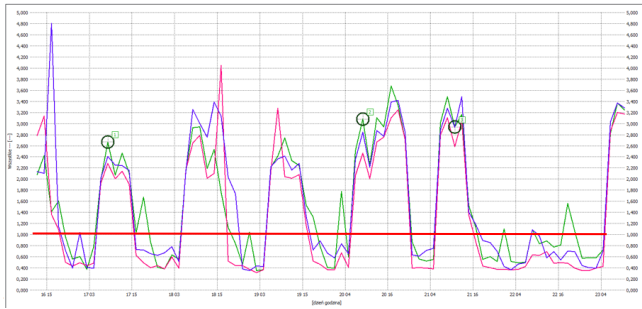
Statystyki pomiarowe pokazane na rysunkach 2 i 3, oprócz problemów z poziomem napięcia, wskazują również na niedotrzymanie normatywnych poziomów długookresowego wskaźnika migotania światła Plt, co związane jest z występowaniem zjawiska migotania światła, będącego skutkiem wahań napięcia zasilania oraz na problemy z symetrią napięć.

Wartości współczynnika Plt wykraczają poza zakres normatywny we wszystkich fazach (wartość powyżej 1). Wartości tych współczynników pokazano, kolejno dla I i II okresu pomiarowego, na rysunkach 11 i 12.

Współczynnik migotania światła przyjmuje duże wartości każdego słonecznego dnia w godzinach, w których powinna następować największa generacja energii przez instalację PV, co jest widoczne na wykresie 12. Spowodowane jest to częstymi wahaniami napięcia, ze względu na zmienne warunki nasłonecznienia, zmienność mocy generowanej w instalacjach PV, a także przerwami w generowaniu energii związanymi z przekraczaniem wartości dopuszczalnych napięć i wyłączeniem się falowników, będących częścią instalacji PV.



Rys. 11. Wartości długookresowego wskaźnika migotania światła Plt w poszczególnych fazach w I okresie pomiarowym (linią prostą zaznaczono Plt = 1)



Rys. 12. Wartości długookresowego wskaźnika migotania światła Plt w poszczególnych fazach w II okresie pomiarowym (linią prostą zaznaczono $Plt = 1$)

Asymetria napięć w badanym punkcie sieci elektroenergetycznej wykracza znacząco poza dopuszczalne granice tolerancji. Rysunek 13 przedstawia zestawienie danych statystycznych asymetrii. Dopuszczalny próg współczynnika asymetrii składowej przeciwnej $U2/U1$ wynosi 2%. Z zarejestrowanych danych wynika, że dopuszczalna wartość została znacznie przekroczona i osiągnęła w trakcie pomiarów nawet 325,67%. W obu okresach pomiarowych sytuacja była bardzo podobna.

ASYMETRIA 10 min		
Statystyka		
Co najmniej 95,00% wartości musi mieścić się w przedziale 0,00 - 2,00		
* wartość przekracza ograniczenia określone w EN 50160:2022 (maks. napięcia 1 kV)		
Parametr	Tolerancja	Wartości w tolerancji
Jednostka	[%]	[%]
$U2/U1$ (95,00% percentyl)	0,00 - 2,00	325,67*
Pomiary		
Parametr	Próg	Wartość
Jednostka	[%]	[%]
Wartość 95,00%	2,00	325,67*

Rys. 13. Zestawienie statystyk dla współczynnika asymetrii składowej przeciwnej odniesionej do składowej zgodnej

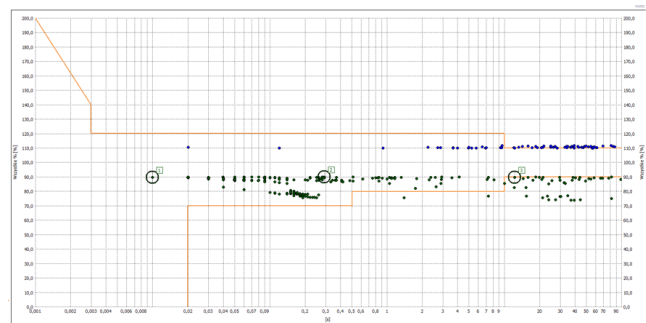
Istotną nowością w pomiarach i analizie jakości energii elektrycznej jest wprowadzenie wykresu ANSI/CBEMA, dzięki któremu można w prosty sposób zobaczyć, które ze zdarzeń napięciowych mogły wyrządzić szkody w urządzeniach.

U analizowanego prosumenta wykonano taką analizę, a jej wyniki zamieszczono na rysunku 14 i 15. Wykres ANSI/CBEMA jest ograniczony dwiema krzywymi. Pole wykresu między krzywymi wyznacza obszar poprawnej pracy urządzeń. Obszar powyżej górnej krzywej wyznacza stany podwyższonego napięcia niebezpieczne dla urządzeń, zaś obszar poniżej dolnej krawędzi odnosi się do sytuacji obniżonego napięcia w sieci elektroenergetycznej, który może prowadzić do nieprawidłowego działania urządzeń.

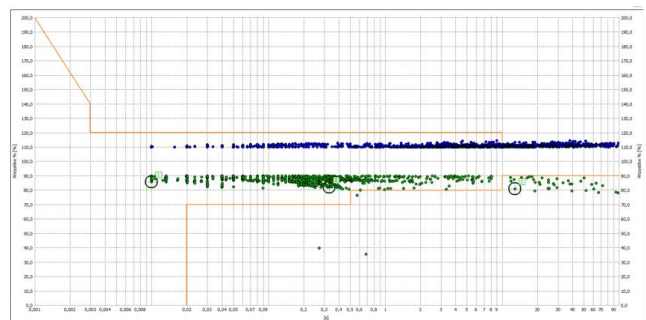
Z wykresu ANSI/CBEMA, który przedstawiony jest na rysunku 14 można odczytać, że liczba wzrostów napięcia, które mogą być niebezpieczne dla urządzeń elektrycznych odbiorców energii elektrycznej występują w niewielkiej ilości, co spowodowane jest niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi podczas przeprowadzonej rejestracji parametrów jakościowych energii elektrycznej. Dodatkowo są to w większości wzrosty znajdujące się w pobliżu granicy tolerancji. Zapady powodujące niewłaściwą pracę urządzeń elektrycznych o wartości wykraczającej poza dolną krzywą w badanym punkcie sieci występują kilkadziesiąt razy w czasie trwania rejestracji.

Znacznie gorsza sytuacja występuje dla II okresu pomiarowego, co pokazuje wykres ANSI/CBEMA na rysunku 15. W II okresie pomiarowym w badanym punkcie sieci elektroenergetycznej występuje wiele wzrostów przekraczających wartość znamionową napięcia o 10% i czasie trwania 10 s, co może być powodem awarii urządzeń elektrycznych. Zapady powodujące niewłaściwą

pracę urządzeń elektrycznych o wartości wykraczającej poza dolną krzywą w badanym punkcie sieci występują relatywnie rzadko.



Rys. 14. Wykres ANSI/CBEMA dla I okresu pomiarowego



Rys. 15. Wykres ANSI/CBEMA dla II okresu pomiarowego

Rozwiązanie zgłaszanego problemu u prosumentów

Rejestracja parametrów jakościowych energii elektrycznej została wykonana przy warunkach pogodowych niekorzystnych dla wyników analizy. Operator Sieci Dystrybucyjnej w ramach potwierdzenia zlecił odpowiednim służbom ponownie pomiar wartości napięcia w badanym punkcie sieci w dzień pogodny. Pomiar ten wykazał wartość napięcia ok. 255 V. Po uwzględnieniu w/w pomiarów, przeprowadzonej analizie oraz ilości skarg napływających od prosumentów zasilanych z danej sieci elektroenergetycznej, OSD zdecydował się na podjęcie kroków mających na celu poprawę parametrów zasilania. Biorąc pod uwagę stan sieci elektroenergetycznej (zły stan konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznych, małe przekroje przewodów), rosnące obciążenie sieci elektroenergetycznej związane z przyłączaniem nowych odbiorców oraz nieustannie zwiększającą się liczbę mikroinstalacji fotowoltaicznych, OSD podjął decyzję o zleceniu zaprojektowania oraz wykonania w warunkach rzeczywistych nowej stacji transformatorowej SN/nn wraz z nawiązaniami kablowymi do części obecnej sieci nn oraz o zmodernizowaniu istniejącej sieci. Ze względu na długi czas oczekiwania na wykonanie w/w zadań, OSD postanowił doraźnie wymienić istniejący transformator o mocy 100 kVA na 160 kVA, aby nadmiar energii elektrycznej wytworzonej przez prosumentów, a przez nich nie zużytkowany został w większym stopniu przesyłany do sieci SN, a także w celu zmniejszenia spadków napięcia związanych częściowo ze zbyt małą mocą transformatora w odniesieniu do zapotrzebowania odbiorców.

Podsumowanie

Badanie wpływu dołączania paneli fotowoltaicznych na system sieci dystrybucyjnych jest bardzo ważne dla rozwoju energetyki odnawialnej. Pomiar napięcia, analiza zmian jego poziomu oraz analiza i zapobieganie innym zjawiskom związanym z dołączaniem coraz większej liczby

prosumentów może przyczynić się do bezpieczeństwa energetycznego, niezawodności i lepszej wydajności systemu elektroenergetycznego w obszarze dystrybucji.

Aby ograniczyć zmiany napięcia, w szczególności jego wzrost, ograniczenie zjawiska migotania światła i zmniejszenie współczynnika asymetrii proponuje się różne działania, zarówno ze strony prosumenta, jak i OSD, m.in.:

- montaż magazynów energii elektrycznej, zarówno przez prosumenta, jak i OSD,
- projektowanie instalacji PV w taki sposób, aby zwiększać autokonsumpcję, np. w pierwszej kolejności zalecać wykorzystywać energię elektryczną z PV na potrzeby grzania ciepłej wody użytkowej w bojlerze, montaż klimatyzacji, pomp ciepła,
- prawidłowy dobór standardów napięciowych obowiązujących w Polsce dla instalacji fotowoltaicznej (w innych krajach niż Polska dopuszcza się wyższy poziom napięcia w standardach napięciowych i wykonawcy lub właściciele PV niekiedy to stosują, niezgodnie z przepisami),
- modernizacja wybranych fragmentów linii/systemu elektroenergetycznego poprzez dobranie odpowiednich przekrojów przewodów i dostosowanie do dwukierunkowego przepływu energii, z uwzględnieniem odpowiednich współczynników jednoczesności,
- stosowanie transformatorów symetryzujących,
- wymiana transformatora na transformator o większej mocy i remont kapitalny obwodu nn połączony ze zwiększeniem przekroju przewodów na obwodach nn, ewentualnie budowa nowej stacji transformatorowej,
- stosowanie inteligentnych falowników z możliwością regulacji napięcia np. metodą $Q = f(U)$ lub ograniczającymi produkcję energii w zależności od wartości napięcia [6],
- uwzględnienie przy warunkach podłączenia instalacji jednofazowych fazy, do której może zostać włączona, co pozwoli zbilansować poziom energii wprowadzonej przez te instalacje w sieci trójfazowej [3],
- zakaz montażu jednofazowych mikroinstalacji PV lub brak dofinansowania dla takich instalacji,
- stosowanie liniowych regulatorów napięcia w szczególnie narażonych obwodach [9,10].

Ponadto Operatorzy systemów dystrybucji OSD doraźnie stosują inne rozwiązania, jak np. regulację napięcia poprzez zmianę zaczepów na transformatorach SN/nn lub zabudowę w sieci energoelektronicznych regulatorów napięcia, bądź zabudowę nastupowego zasobnika energii wraz z niezbędnymi osprzętem.

Niestety OSD niekiedy stosują jeszcze inne, drastyczne działania, a mianowicie odmowę wydania warunków przyłączenia do sieci dla instalacji PV, podając za powód „brak warunków technicznych”, przy istniejącym stanie sieci elektroenergetycznej, a niekiedy z powodu zbyt dużego zagęszczenia instalacji PV, jak to ma miejsce w niektórych gminach. Przyłączenie byłoby możliwe po dokonaniu pewnych nakładów na sieć, co jednakże pociąga za sobą określony koszt, a z tym wiąże się kwestia ekonomicznych warunków przyłączenia, co również jest niekiedy przyczyną odmowy.

Niewątpliwie utrzymanie odpowiedniej jakości energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym, a w szczególności odpowiedniego poziomu napięcia jest ogromnym wyzwaniem dla wszystkich OSD wynikającym z gwałtownego rozwoju energetyki prosumentckiej i nic nie wskazuje, aby ten przyrost, zarówno liczby prosumentów, jak i ilości produkowanej energii elektrycznej przez instalacje prosumentckie, a także zmiany w sposobie rozliczania dla prosumentów, ten proces zatrzymały.

Autor: dr inż. Małgorzata Łatka, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: mlatka@prz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Topolski Ł., Schab W., Firlit K., Piątek K., Analiza wpływu generacji rozproszonej na wybrane parametry jakości energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochotnica, *Przegląd Elektrotechniczny* No. 3/2020, DOI:10.15199/48.2020.03.05
- [2] Łatka M., Analiza wybranych parametrów jakości energii elektrycznej w miejskich i rejonowych sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia z udziałem generacji rozproszonej na wybranym obszarze. Ochotnica, *Przegląd Elektrotechniczny* No. 2/2024, DOI: 10.15199/48.2024.02.06
- [3] L. Beña, M. Nowak and M. Kusiński, "Analysis of the Impact of Micro Photovoltaic Installations on the Voltage in the Low Voltage Distribution Network," 2021 Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Rzeszow, Poland, 2021, pp. 1-6.
- [3] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, H. R. Pota, Voltage Variation on Distribution Networks With Distributed Generation: Worst Case Scenario. Article in IEEE Systems Journal · June 2013, DOI: 10.1109/JSYST.2013.2265176
- [4] Wei Song, Xinghua Zhou, Xiaolong Liu, Hongting Zhou, A Study on Impacts of Distributed Generation Voltage in Distribution Network System, Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference (AP3ER 2015)
- [5] Kowalak R., Zmiany poziomów napięć w sieci niskiego napięcia z przyłączonymi źródłami generacji rozproszonej. *Zeszyty Naukowe Wydziału elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 53/2017*. XVIII Konferencja Naukowa Aktualne problemy w Elektroenergetyce APE'17
- [6] S. Ghosh, S. Rahman and M. Pipattanasomporn, "Local distribution voltage control by reactive power injection from PV inverters enhanced with active power curtailment," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, 2014, pp. 1-5, DOI: 10.1109/PESGM.2014.6939358.
- [7] Hanzelka Z., Piątek K., Instalacje fotowoltaiczne w systemie elektroenergetycznym. PWN, Warszawa 2024.
- [8] Norma PN-EN 50160: 2010/A2:2022 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych”
- [9] A. Książkiewicz, M. Karczewski, "Systemy regulacji napięcia w liniach niskiego napięcia wyposażonych w instalacje PV", *Wiadomości Elektrotechniczne*, ISSN 0043-5112, LXXXVIII, 2020, nr 5, pp 26-28.
- [10] Ł., Topolski, A Firlit, K. Piątek, Z. Hanzelka, "Ograniczanie wzrostów i asymetrii napięć powodowanych jednofazowymi instalacjami fotowoltaicznymi za pomocą szeregowego transformatora dodatkowego w sieci niskiego napięcia", *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 96, March 2020, pp. 37-41.