



Rafał KURDYŁA¹

WPLYW INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH NA STAN PRACY SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów związane z wpływem instalacji fotowoltaicznych na pracę sieci dystrybucyjnej nN. Na wstępie artykuł omawia zagadnienia związane ze skokami oraz zapadami napięć generowanymi przez rozpoczęcie procedury oddawania wyprodukowanej przez instalacje fotowoltaiczne energii elektrycznej do sieci. W punktach tych ukazano rzędy wartości skoków oraz napięć w sieci dystrybucyjnej. Kolejno przedstawione zostały wskaźniki P_{ST} (z ang. wskaźnik krótkiego migotania światła) oraz P_{LT} (z ang. wskaźnik długiego migotania światła), które negatywnie wpływają na komfort odbiorcy. W kolejnej części zaprezentowane zostało RVC (z ang. szybkie zmiany napięcia) wielofazowe, czyli szybkie zmiany wartości napięcia zasilania. W punkcie tym przedstawiono częstotliwość występowania oraz wartości napięć przy gwałtownych jego zmianach. W ostatniej części poruszono kwestię przerw wielofazowych, przy tym przedstawiono i omówiono, jak niekorzystnie wpływają one na urządzenia użytku domowego. W celu zbierania danych z analizatorów wykorzystany został zainstalowany na obiekcie analizator sieci SONEL PQM-702, który pozwolił na zebranie dużej liczby wartości pomiarowych. Dzięki zebranych danym, możliwe było określenie wielu wartości napięć oraz prądów, zachowania sieci w czasie rzeczywistym, a także ilość zdarzeń, jakie wystąpiły zarówno po stronie odbiorcy jak i sieci dystrybucyjnej. Pozwoliło to na ukazanie realnego oddziaływania instalacji fotowoltaicznych na sieć dystrybucyjną. Analiza ta pozwoliła również na określenie częstotliwości występowania anomalii przy produkcji energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną i jednoczesnym pobieraniu energii elektrycznej z sieci. Dzięki uzyskanym wynikom pomiarów możliwe było określenie wpływu mikroinstalacji

¹ Autor do korespondencji: Rafał Kurdyła, Zboiska 85, 38-450 Dukla,
adres e-mail: rafal.kurdyla@gmail.com

na sieć. Artykuł kończy się zebraniem wniosków z przeprowadzonej analizy oraz podsumowaniem.

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna, mikroinstalacja, stan pracy sieci dystrybucyjnej nN, skoki napięć, zapady napięć, produkcja energii elektrycznej, PLT, PST, RVC

1. Wprowadzenie

Instalacje fotowoltaiczne to powszechnie znane źródło OZE, które może być zastosowane na mniejszą lub większą skalę. Przekształcają energię słoneczną na energię elektryczną dzięki reakcji płytki krzemowej, z których zbudowane jest ogniwo, z fotonem, który na nią pada. Ogniwo pochłania foton i wybija elektron z jego pozycji, zmuszając go do ruchu. Z kolei ruch elektronów równa się przepływowi prądu elektrycznego.

Wielu odbiorców nie wie, jaki wpływ faktycznie na sieć dystrybucyjną ma instalacja fotowoltaiczna. Największym problemem dla odbiorcy jest wyłączenie się falownika, gdy napięcie jest za wysokie, a falownik nie wprowadza wyprodukowanej energii do sieci [1]. Odbiorca, inwestując w taką instalację kilkanaście lub kilkadziesiąt tysięcy złotych, nie wyobraża sobie, żeby miała ona nie działać prawidłowo. Stąd źródło skarg i pism do Operatora Systemu Dystrybucyjnego dotyczące braku wprowadzania energii do sieci dystrybucyjnej.

Problemów po stronie dystrybucji jest znacznie więcej. Przeszarżałe sieci napowietrzne, stare stacje transformatorowe, za mały przekrój przewodów zasilających generują szereg problemów, z którymi Operator Systemu Dystrybucyjnego musi mierzyć się nieustannie [2]. W tym kierunku podejmowane są działania, takie jak wymiana starych transformatorów na transformatory większej mocy oraz nowszego typu, czy zmiana sieci napowietrznej na sieć kablową o większym przekroju kabli. Takie działania są kosztowne i choć pozwalają zmniejszyć skalę problemów, nie są w stanie całkowicie ich wyeliminować.

Załóżmy, że na jednym torze zasilania, u 5 odbiorców zainstalowane są instalacje fotowoltaiczne o podobnych mocach rzędu 4-5 kW. Podczas słonecznego dnia instalacja pierwszego odbiorcy produkuje energię elektryczną, podczas gdy napięcie w sieci wynosi 238 V, a falownik wprowadza wyprodukowaną energię, podnosząc napięcie do 242 V. Drugi wprowadza energię już przy 245 V. Trzeci przy 248 V, a czwarty przy 251 V. Instalacja fotowoltaiczna piątego prosumenta, chcąc wprowadzać napięcie do sieci, musi podnieść je do poziomu 254 V, lecz norma ustawiona na falowniku nie pozwala przekroczyć mu 253 V, co skutkuje jego odcięciem i brakiem wprowadzania wyprodukowanej energii elektrycznej do sieci. To wywołuje złość odbiorcy, który dzwoni do lokalnego Operatora Systemu Dystrybucyjnego, aby rozwiązał ten problem. Dystrybucja wysyła brygadę monterów, która obniża napięcie na stacji, aż piąta instalacja zacznie wprowadzać

energię do sieci. Nadchodzi noc, w trakcie której ogniwa nie produkują energii elektrycznej, napięcie sieci spada poniżej 220 V, a urządzenia domowe nie działają prawidłowo. Odbiorca ponownie skarży się do Operatora Systemu Dystrybucyjnego, brygada znów zostaje wysłana, aby tym razem zwiększyć wartość napięcia na torze.

Sytuacja powtarza się co kilka słonecznych dni, odbiorca jest poirytowany faktem, że za każdym razem musi dzwonić do Operatora Systemu Dystrybucyjnego, więc pisze skargę na działanie sieci dystrybucyjnej. Takich sytuacji jest wiele i póki co, nic nie wskazuje na to, aby było ich mniej.

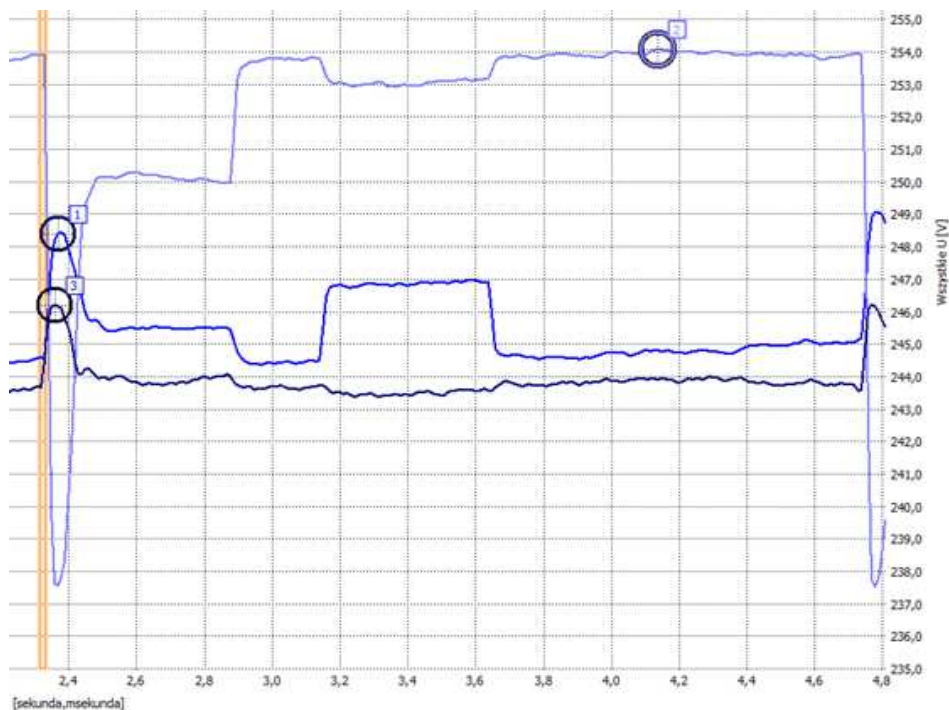
2. Skoki napięć

Jednym z problemów związanych z instalacjami PV są skoki napięć spowodowane nierównomiernym obciążeniem faz przez falownik w okresie dużego nasłonecznienia. Na podstawie przeprowadzonych badań z wykorzystaniem analizatora sieci SONEL PQM-702 oraz oprogramowania firmy SONEL Analysis, na poniższych wykresach zostały przedstawione zaburzenia pracy sieci u odbiorcy, który posiada zainstalowaną 3-fazową instalację fotowoltaiczną.

Rysunek 1 przedstawia skoki napięć generowane przez falownik. W momencie, w którym instalacja zaczyna wprowadzać wyprodukowaną energię do sieci, można dokładnie zaobserwować nierównomierne obciążenie faz. Wartość napięcia fazy L2 rośnie w krótkim czasie, lecz po chwili następuje tzw. odcięcie, czyli wyłączenie się falownika z powodu zbyt wysokiego napięcia. Po chwili falownik znów próbuje oddawać wyprodukowaną energię do sieci, lecz po upływie kilku sekund ponownie następuje moment odcięcia. Sytuacja powtarza się przez cały okres produkcji przy podwyższonym napięciu w sieci.

W chwili skoku napięcia na fazie L2 można zaobserwować jego spadek na pozostałych fazach. Analogicznie w momencie odcięcia, wartość napięcia na fazie L2 drastycznie spada, co skutkuje chwilowym, nagłym wzrostem napięcia na dwóch pozostałych fazach. Wzrost napięć na fazach L1 oraz L3 wynosi tyle samo w obu przypadkach.

Jak możemy zaobserwować, momenty odcięcia i załączeń w celu ponownego oddawania do sieci powodują znaczne zakłócenia pracy oraz działają na niekorzyść stabilności sieci.



Rys. 1. Skoki napięć generowane przez falownik. Punkt 1 oznacza najwyższą wartość napięcia na fazie L1, punkt 2 oznacza najwyższą wartość napięcia na fazie L2, punkt 3 oznacza najwyższą wartość napięcia na fazie L3

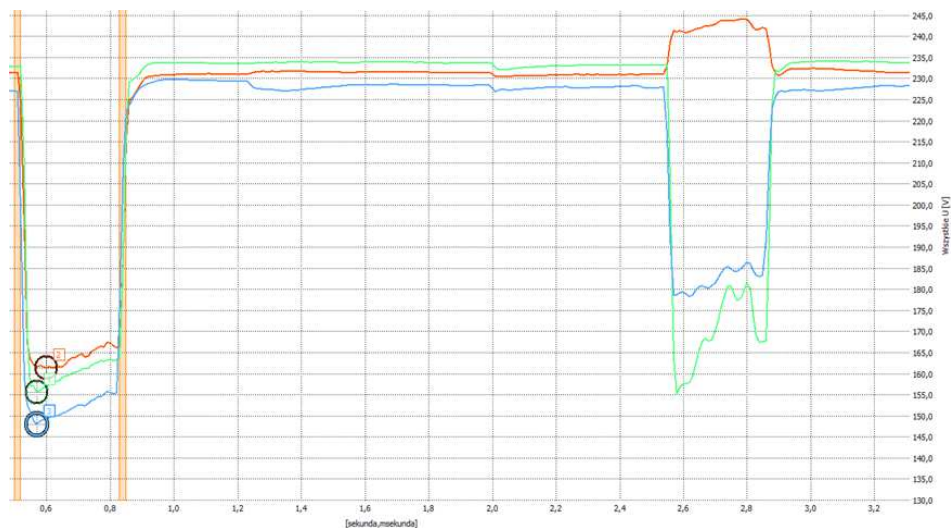
Fig. 1. Voltage peaks generated by the inverter. Point 1 indicates the highest voltage value on phase L1, point 2 indicates the highest voltage value on phase L2, point 3 indicates the highest voltage value on phase L3

3. Zapady napięć

Kolejnym negatywnym wpływem są zapady napięć. Rysunek 2 przedstawia moment, w którym załączane są odbiorniki, a instalacja fotowoltaiczna oddaje wyprodukowaną energię do sieci, lecz nie produkuje jej na wystarczającym poziomie. Zapad miał miejsce około godziny 5:30.

Wykres przedstawia nam drastyczny spadek wartości napięcia na wszystkich fazach w odniesieniu do deklarowanych przez Operatora Systemu Dystrybucyjnego $230\text{ V} \pm 10\%$. Powodem takiego zachowania sieci jest uprzednie obniżenie napięcia na torze zasilającym wraz z załączeniem odbiornika o większej mocy, lub kilku odbiorników mniejszej mocy. Czas zapadu jest krótki lecz znaczący. Po chwili pojawia się podobna sytuacja, lecz dotyczy ona jedynie dwóch faz, w czasie której napięcie na fazie L2 wzrasta. Zapad napięcia w tym przypadku definiuje słaby stan sieci elektroenergetycznej oraz za mały przekrój przewodu odnośnie planowanego zapotrzebowania na moc. Aby poprawić stan sieci

oraz zredukować zapady napięć, należałoby wymienić istniejące przewody zasilające na przewody o grubszym przekroju. W efekcie uzyskalibyśmy poprawę pracy sieci przy możliwym załączeniu kilku odbiorników w jednej chwili.



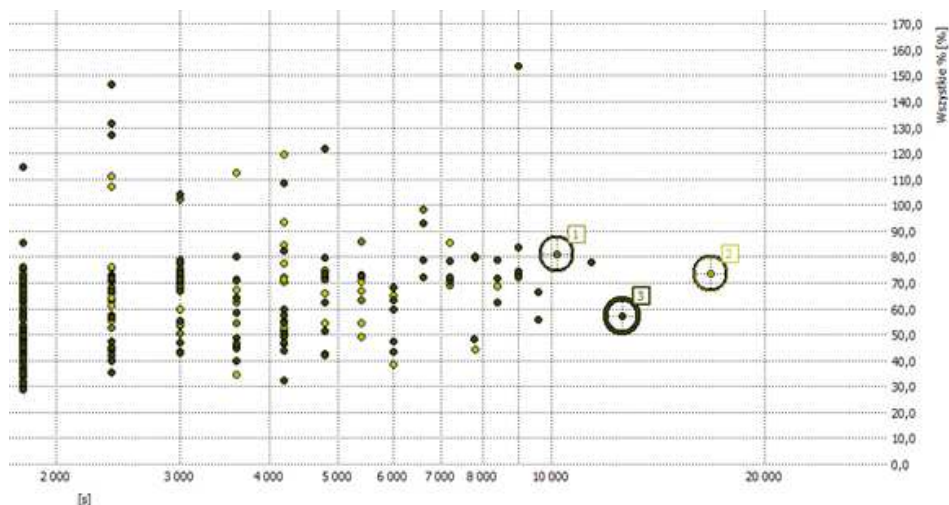
Rys. 2. Zapady napięcia w sieci. Punkt 1 oznacza najniższą wartość napięcia na fazie L1, punkt 2 oznacza najniższą wartość napięcia na fazie L2, punkt 3 oznacza najniższą wartość napięcia na fazie L3

Fig. 2. Voltage collapses in the network. Point 1 means the lowest voltage value on phase L1, point 2 means the lowest voltage value on phase L2, point 3 means the lowest voltage value on phase L3

4. Wskaźnik P_{ST}

W następnym etapie badań zwrócono uwagę na wskaźnik P_{ST} (ang. *short-term flicker severity value*), czyli wskaźnik krótkiego migotania światła. Jego norma wynosi 1 i nie powinna być przekroczona, aby odbiorca nie czuł dyskomfortu psychicznego związanego z szybkim migotaniem światła. Jako przykład można przedstawić sieć, w której zainstalowany jest transformator starego typu. Ilość odbiorców i ich moc przyłączeniowa niemalże równa się z limitem tego transformatora, a jeden z odbiorców używa spawarki transformatorowej starego typu. W momencie dużego zapotrzebowania na energię elektryczną, wspomniany odbiorca, uruchamiając urządzenie, generuje znaczne zakłócenia sieci, co powoduje migotanie oświetlenia u innych odbiorców. W przypadku instalacji fotowoltaicznych takie zachowanie generowane jest przez falownik, który próbuje wprowadzać wyprodukowaną energię elektryczną do sieci, lecz po chwili przekracza

dozwołoną w ustawionej normie wartość napięcia i następuje odcięcie, czyli brak oddawania energii do sieci.



Rys. 3. Wartości P_{ST} . Punkt 1 oznacza wartość P_{ST} na fazie L1, punkt 2 oznacza wartość P_{ST} na fazie L2, punkt 3 oznacza wartość P_{ST} na fazie L3

Fig. 3. P_{ST} values. Point 1 indicates the P_{ST} value on phase L1, point 2 indicates the P_{ST} value on phase L2, point 3 means P_{ST} value on phase L3

Na rysunku 3 maksymalne czasy krótkiego migotania światła znacznie przekraczają minimalne wartości, co poniżej zostało ujęte bardziej szczegółowo w rysunku 4.

Typ	Źródło	Flagi	Początek	Koniec	Czas trwania	Ekstremum	Średnia	Próg	Oscylogram
$P_{ST} > \text{maks.}$	L1		2021-05-18 11:19:59.997	2021-05-18 14:09:59.806	2g 49m 59.808s	2,698	2,022	1,00	
$P_{ST} > \text{maks.}$	L2	⏏	2021-05-08 08:29:59.801	2021-05-08 13:09:59.801	4g 39m 59.999s	2,694	1,324	1,00	
$P_{ST} > \text{maks.}$	L3	⏏	2021-05-16 07:29:59.801	2021-05-16 10:59:59.998	3g 30m 0.196s	2,098	1,420	1,00	

Rys. 4. Wartości P_{ST} dla poszczególnych faz

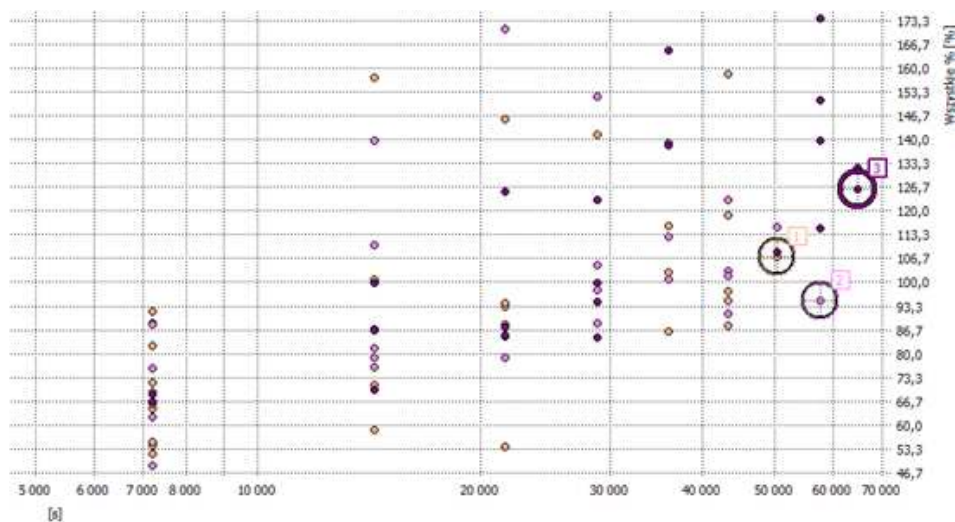
Fig. 4. P_{ST} values for each phase

Warto zwrócić uwagę na czas trwania zjawisk szybkiego migotania światła na poszczególnych fazach. W przypadku fazy L2 czas trwania przekroczenia progu wskaźnika P_{ST} wynosi prawie 4 godziny 40 minut. Ewidentnie można za-

obserwować okres, w którym napięcie w sieci nie pozwala falownikowi wprowadzać wyprodukowanej energii elektrycznej, mimo prób jej wprowadzenia. Przekroczenie progu wartości wskaźnika P_{ST} skutkuje negatywnym wpływem na działanie sprzętów gospodarstwa domowego, co prowadzi do ich uszkodzenia. Warto pamiętać, że sprzęt, który nie działa poprawnie wprowadza kolejne zakłócenia do sieci elektroenergetycznej.

5. Wskaźnik P_{LT}




Wartości wskaźnika P_{LT} , czyli wskaźnika długiego migotania światła (ang. *long-term flicker severity value*), które wynoszą 1, przedstawione zostały na rysunku 5. W tym przypadku normy, choć nie tak znacznie jak w przypadku wskaźnika P_{ST} , także zostały przekroczone i również wiąże się to z możliwością uszkodzenia sprzętów gospodarstwa domowego.



Rys. 5. Wartości P_{LT} . Punkt 1 oznacza wartość P_{LT} na fazie L1, punkt 2 oznacza wartość P_{LT} na fazie L2, punkt 3 oznacza wartość P_{LT} na fazie L3

Fig. 5. P_{LT} Values. Point 1 indicates the P_{LT} value at phase L1, point 2 indicates the P_{LT} value at phase L2, Point 3 is the P_{LT} value on phase L3

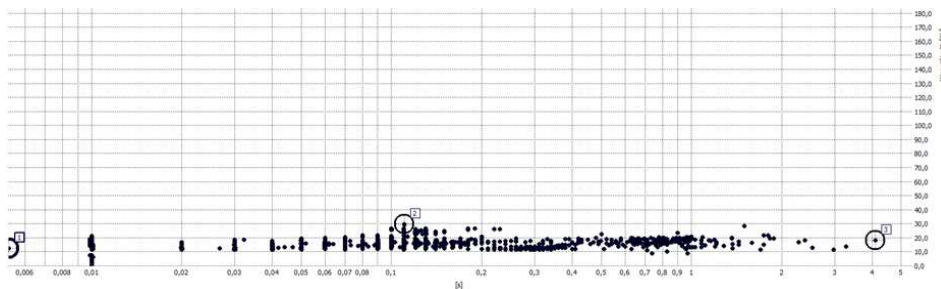
Powyższe wartości przedstawiają czas trwania długiego migotania światła. W tym przypadku warto zwrócić uwagę na czas trwania P_{LT} na fazie L3, bowiem wynosi on aż 18 godzin. Jest to bardzo długi czas wystąpienia zakłóceń, który niesie za sobą negatywne skutki oddziaływania na pracę urządzeń podłączonych do sieci elektroenergetycznej. Bardziej szczegółowe wartości przekroczeń P_{LT} możemy zaobserwować na rysunku 6.

$P_{LT} > \text{maks.}$	L1		2021-05-15 07:59:59.999	2021-05-15 21:59:59.997	13g 59m 59.997s	1,572	1,316	1,00
$P_{LT} > \text{maks.}$	L2		2021-05-12 07:59:59.996	2021-05-12 23:59:59.998	16g 0m 0.001s	1,568	1,356	1,00
$P_{LT} > \text{maks.}$	L3		2021-05-19 07:59:59.994	2021-05-20 01:59:59.996	18g 0m 0.002s	1,762	1,398	1,00

Rys. 6. Wartości P_{LT} dla poszczególnych fazFig. 6. P_{LT} values for each phase

6. RVC wielofazowe

Następnym ważnym aspektem, który negatywnie wpływa na sieć elektroenergetyczną domowych, jest RVC wielofazowe. RVC (ang. *Rapid Voltage Change*), to w rozwinięciu szybkie zmiany wartości napięcia zasilania. Większość z nich trwa nie dłużej niż 1 sekundę, lecz możemy zaobserwować również zmiany trwające ponad tę wartość. Rysunek 7 przedstawia szybkie zmiany wartości napięcia zasilania dla wszystkich 3 faz.



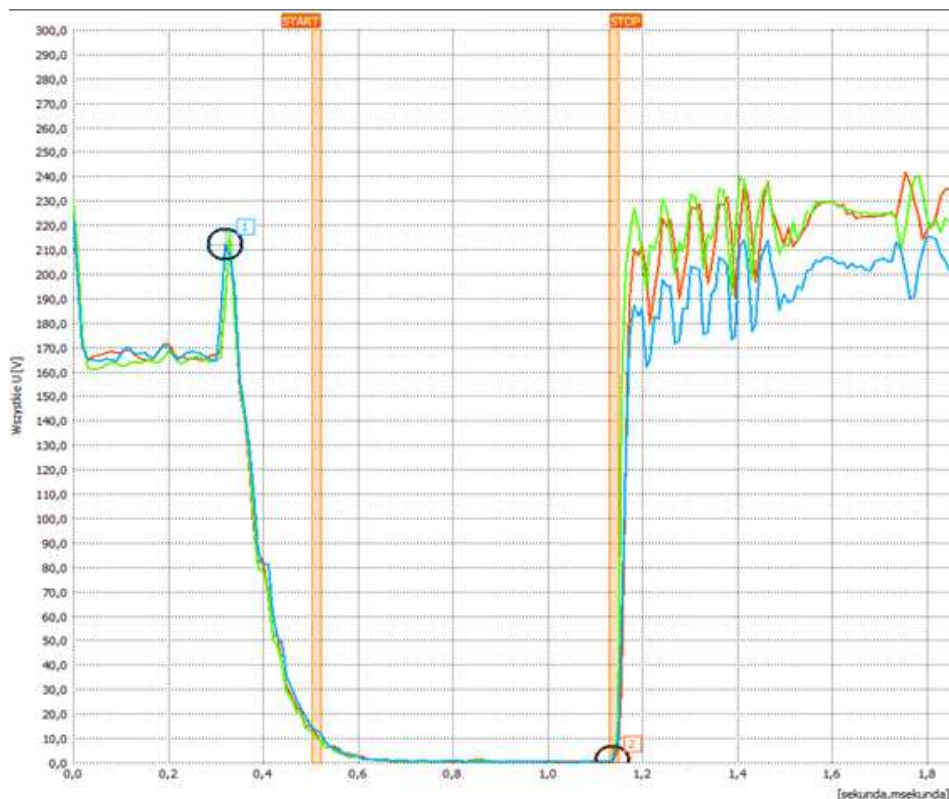
Rys. 7 Wartości RVC wielofazowe. Punkt 1 oznacza najkrótszy czas trwania RVC, punkt 2 oznacza najwyższą wartość RVC, punkt 3 oznacza najdłuższy czas trwania RVC

Fig. 7 Multiphase RVC values. Point 1 indicates the shortest duration of RVC, point 2 indicates the highest RVC value, point 3 indicates the longest duration of RVC

Punkt 1 dotyczy RVC trwającego zaledwie 5 ms przy wartości zmiany napięcia na poziomie 12,29 V. Jest to najkrótszy okres trwania RVC w okresie badania analizatora sieci elektroenergetycznej. Punkt 2 przedstawia najwyższą z zarejestrowanych przez urządzenie wartości szybkiej zmiany napięcia. Dotyczy ona momentu, w którym zmiana napięcia została zarejestrowana na poziomie 29,58 V, a czas tego zdarzenia wynosił 110 ms. Punkt 3 ukazuje najdłuższy z zarejestrowanych przez analizator czas trwania szybkiej zmiany napięcia. W tym przypadku czas zdarzenia wynosił 4105 ms przy wartości napięcia na poziomie 18,39 V. Przy takich wartościach zdarzeń można być niemal pewnym, że negatywnie wpłynie to na stan pracy urządzeń podłączonych do sieci dystrybucyjnej oraz stabilność pracy sieci dystrybucyjnej.

7. Przerwa wielofazowa

Ostatnim z zarejestrowanych zdarzeń jest przerwa wielofazowa. Polega ona na przerwie w dostawie energii elektrycznej na pewien czas, po czym następuje wznowienie dostarczania energii elektrycznej do odbiorcy. Na rysunku 8 ujęte zostały momenty, w których wystąpiła przerwa wielofazowa, wartości napięć przed i po przerwie oraz czas trwania zdarzenia.



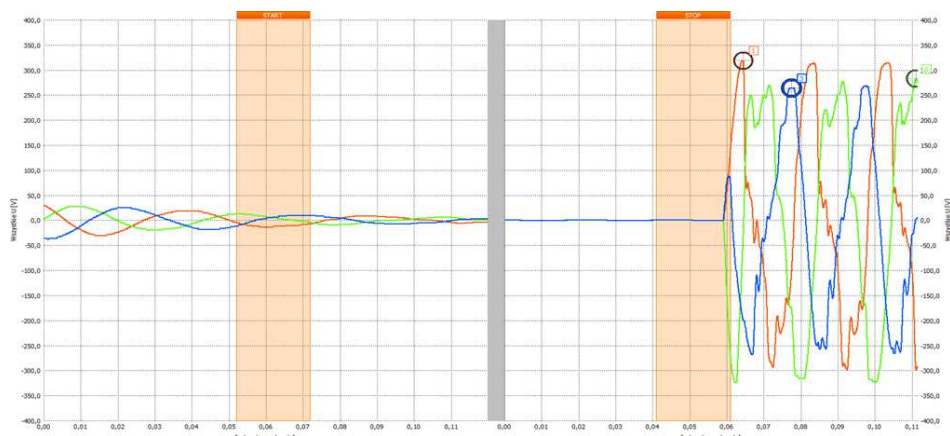
Rys. 8. Przerwa wielofazowa. Punkt 1 oznacza wartość napięcia przed przerwą wielofazową, punkt 2 oznacza przerwę wielofazową ułamek sekundy przed powrotem zasilania, punkt 3 oznacza stabilizację po wznowieniu dostarczania energii elektrycznej do odbiorcy

Fig. 8. Multiphase break. Point 1 means the voltage value before the multiphase interruption, point 2 means multiphase interruption a fraction of a second before the power returns, point 3 means stabilization after the resumption of the supply of electricity to the customer

Punkt pierwszy ukazuje ostatni moment przed przerwą wielofazową. Wyraźnie widać, że napięcie utrzymuje się na poziomie 212,1 V, a następnie zbliża

się do wartości zerowej. Punkt drugi przedstawia ułamek sekundy przed wznowieniem dostarczania napięcia. Można zaobserwować, że napięcie wzrasta do poziomu deklarowanych przez Operator Sieci Dystrybucyjnej 230 V $\pm 10\%$. Punkt 3 ukazuje fazę, w której napięcie stabilizuje się na poziomie zgodnym z warunkami zawartymi w umowie. Czas trwania przerwy wielofazowej, lub innymi słowy zaniku napięcia, jest stosunkowo krótki, lecz urządzenia niewyposażone w zasilacze UPS nie będą w stanie podtrzymać swojej pracy i wyłączą się w momencie przerwy.

Na rysunku 9 możemy zaobserwować zachowanie przebiegów napięć na poszczególnych fazach.



Rys. 9. Przerwa wielofazowa. Punkt 1 oznacza wartość szczytową napięcia w momencie powrotu na fazie L1, punkt 2 oznacza wartość szczytową napięcia w momencie powrotu na fazie L2, punkt 3 oznacza wartość szczytową napięcia w momencie powrotu na fazie L3

Fig. 9. Multiphase break. Point 1 represents the peak voltage value at the time of return on phase L1, Point 2 is the peak voltage at the return on phase L2, Point 3 is the peak voltage at the return on L3 phase

Na rysunku 9 można zauważyć, że napięcie nie jest odcinane natychmiastowo, lecz stopniowo zbliża się do wartości zerowych. Po wznowieniu, przebieg napięć na poszczególnych fazach jest nieregularny, co spowodowane jest ciągłym podpięciem urządzeń do sieci. Moment, w którym napięcie wraca do deklarowanych 230 V jest momentem mocnego obciążenia, ponieważ poprzednio wyłączone odbiorniki w jednej chwili pobierają moc potrzebną do ich uruchomienia. W późniejszym czasie przebieg stabilizuje się, co można zaobserwować w momencie przed zanikiem napięcia.

8. Podsumowanie

Zapady i wzrosty napięć, RVC wielofazowe, skoki napięć, przekroczenia wskaźników P_{ST} i P_{LT} oraz skoki napięć powodują, że praca sieci elektroenergetycznej przechodzi w stan pracy niestabilnej. Falowniki próbujące oddawać energię elektryczną do sieci tworzą szereg anomalii, które negatywnie wpływają na pracę sieci dystrybucyjnej, a co za tym idzie, na pracę wszelkich urządzeń podpiętych to tej sieci.

Decydując się na instalację fotowoltaiczną, powinno się wziąć pod uwagę wiele aspektów odnośnie sieci zasilania jak i typu instalacji, które chciałoby się założyć. Dobór falowników jest równie istotną kwestią, ponieważ tanie urządzenia nie są wyposażone w układy stabilizujące pracę instalacji oraz procedurę oddawania wyprodukowanej energii elektrycznej do sieci.

Literatura

- [1] Grzegorz Marciniak, Wpływ prosumentów na jakość zasilania po stronie niskiego napięcia, Enea Operator, 2021.
- [2] Dongsheng Yang, Xiongfei Wang, Fangcheng Liu, Kai Xin, Yunfeng Liu, and Frede Blaabjerg, Adaptive Reactive Power Control of PV Power Plants for Improved Power Transfer Capability Under Ultra-Weak Grid Conditions, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2019.

INFLUENCE OF PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS ON THE OPERATION OF THE LV DISTRIBUTION NETWORK

Summary

The article presents the results of measurements related to the impact of photovoltaic installations on the operation of the LV distribution network. At the beginning, the article discusses the issues related to spikes and dips in voltage generated by the beginning of the procedure of feeding electricity produced by photovoltaic installations into the network. It presents the orders of values of spikes and voltages in the distribution network. Next, the PST and PLT indicators that negatively affect the comfort of the consumer are presented. In the next section, multiphase RVC, that is, rapid changes in supply voltage values, is presented. In this section, the frequency of occurrence and the values of voltages at rapid changes of the voltage are presented. The last section deals with the issue of multiphase interruptions. In doing so, it is presented and discussed how they adversely affect household appliances. In order to collect data from the analyzers, the SONEL PQM-702 network analyzer installed on the object was used, which allowed to collect a large number of measurement values. Thanks to the collected data, it was possible to determine many values of voltages and currents, real-time behavior of the network, as well as the number of events that occurred both on the consumer side and on the distribution network. This allowed to show the real impact of photovoltaic installations on the distribution network. This analysis also allowed us to determine the frequency of anomalies in the production of electricity by the photovoltaic installation and the simultaneous extraction of electricity from the grid. With the measurement results obtained, it was

possible to determine the impact of the micro-installation on the grid. The paper ends with a collection of conclusions from the analysis and a summary.

Keywords: photovoltaic installation, micro installation, LV distribution network operation status, voltage peaks, voltage collapses, power generation, PLT, PST, RVC

DOI: 10.7862/re.2022.2

Submitted/Tekst złożono w redakcji: xxx

Accepted / Przyjęto do druku: styczeń 2022 r.

Published/Tekst opublikowano: grudzień 2022 r.