

jakość energii elektrycznej, generacja rozproszona

Tomasz SIKORSKI*
Grzegorz KOSOBUDZKI**

JAKOŚĆ ENERGII W UKŁADACH GENERACJI ROZPROSZONEJ

Praca dotyczy zagadnień współpracy generacji rozproszonej z siecią elektroenergetyczną. Omówiono elementy nowych standardyzacji w zakresie przyłączania do sieci małych źródeł energii oraz zaprezentowano długoterminowe rejestracje wybranych parametrów jakościowych instalacji fotowoltaicznej oraz małej elektrowni wodnej. Dodatkowym aspektem pracy jest omówienie zachowania się badanych jednostek generacji rozproszonej w stanach przejściowych. Zarejestrowane zdarzenia dotyczą załączenia i odłączania generatorów asynchronicznych czy zachowania się jednostki wytwórczej podczas zwarć od strony sieci. Intencją pracy jest zilustrowanie zmienności i różnic w charakterze pracy wybranych źródeł z punktu widzenia wprowadzanej obecnie idei interoperacyjności elementów sieci.

1. WPROWADZENIE

Generacja rozproszona (ang. *Distributed Generation*, *Dispersed Generation* DG lub *Distributed Resources* DR) stanowi obecnie jedną z najbardziej aktywnie rozwijanych gałęzi energetyki, głównie za przyczyną ekologicznych technologii wytwarzania energii oraz idei inteligentnych sieci elektroenergetycznych. Choć nie jest to pojęcie nowe, brak jest wciąż usystematyzowanej definicji pozwalającej w jednoznaczny sposób dokonać klasyfikacji źródeł wytwarzania według określenia generacja rozproszona. Głównym problemem jest tu przyjęcie kryterium, którym może być zarówno wielkość mocy zainstalowanej, jak i przyłączenie do sieci przesyłowej bądź dystrybucyjnej, podleganie centralnej dyspozycji mocy czy wreszcie rodzaj zastosowanych technologii. Jedną z najczęściej cytowanych definicji oparta jest na raporcie Grupy Roboczej 37.23 CIGRE, która za źródła rozproszone proponuje traktować jednostki nie podle-

* Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław; e-mail: tomasz.sikorski@pwr.wroc.pl

** Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław; e-mail: grzegorz.kosobudzki@pwr.wroc.pl

gające centralnemu dysponowaniu mocą oraz niezależne od scentralizowanego planowania rozwoju systemu, jednocześnie wprowadzając ograniczenie mocy do wartości 50–100 MW. Dla porównania graniczna moc źródeł rozproszonych w Wielkiej Brytanii ustalona została na poziomie 100 MW, w Stanach Zjednoczonych 50 MW, w Nowej Zelandii 5 MW, w Szwecji 1.5 MW. Polskie Prawo Energetyczne wprowadza wartość 5 MW jako moc źródła, które nie wymaga uzyskania koncesji, w przypadku źródeł nie zaliczanych do odnawialnych źródeł energii, oraz w przypadku odnawialnych źródeł energii jako jednostek zwolnionych z opłat koncesyjnych. Warto jednak podkreślić, że wspomnianą wartość 5MW nie należy traktować jako granicznej mocy dedykowanej generacji rozproszonej. Ostatnie prace CIGRE nad generacją rozproszoną prowadzone przez Komitet Studiów SC6 Distribution Systems & Dispersed Generation zaproponowały minimalizację definicji jednostek rozproszonych jako elementów wytwórczych przyłączonych do sieci dystrybucyjnej bądź zasilających bezpośrednio odbiorcę.

Podejmując próbę unifikacji generacji rozproszonej w krajowym systemie elektroenergetycznym w pracach [5], [6], [7] podkreślono ograniczenie mocy zainstalowanej do 150W, usytuowanie w sieci dystrybucyjnej bądź sieci rozdzielczej odbiorcy oraz wyłączenie z centralnej dyspozycji mocy. Zaproponowano podział generacji rozproszonej ze względu na kryterium mocy na: mikrogenerację (1 W–5 kW), małą generację (5 kW–5 MW), średnią generację (5 MW–50 MW) oraz dużą generację (50 MW–150 MW).

Dyskusja nad oceną współpracy układów generacji rozproszonej z siecią toczy się od kilku lat i wydaje się wciąż otwarta ze względu na rosnący udział źródeł odnawialnych w systemie oraz nowoczesne technologie dedykowane małej generacji. Prace o tej tematyce, między innymi [1]–[5] oraz [8], [9], podkreślają potrzebę badań oraz wyszukania rozwiązań w zakresie regulacji napięcia, udziału harmonicznym, zdarzeń napięciowych, konfliktów w sekwencji operacji łączeniowych oraz układów zabezpieczeń i wreszcie wznawiania pracy systemu po tzw. „black-out” oraz możliwościach pracy wyspowej. Nasilenie dyskusji przypada wraz z pojawieniem się terminologii inteligentnych sieci elektroenergetycznych. We wrześniu 2011 roku Komitet Standaryzujący IEEE, odpowiedzialny za prace integrujące w zakresie generacji rozproszonej oraz inteligentnych sieci, wydał projekt standardu 2030 dedykowanego inteligentnym sieciom elektroenergetycznym: 2030 Smart Grid Interoperability Series of Standards [10]. Głównym celem prac nad tymi standardami jest wprowadzenie ujednoliconych protokołów komunikacyjnych dla podmiotów będących elementami inteligentnej sieci elektroenergetycznej, zwiększających możliwości ich wzajemnej interoperacyjności. Inne prace tego Komitetu zaowocowały serią norm oraz rekomendacji związanych bezpośrednio z problematyką współpracy generacji rozproszonej z siecią. Standardy z serii IEEE 1547 [11] dotyczą między innymi testów jednostek wytwórczych, wpływu źródeł na lokalną oraz obszarową pracę sieci, monitoringu oraz standaryzacji formatu wymiany danych czy organizacji pracy wyspowej. Ujednoliceniu ule-

ga również format danych jakości energii stosowany w systemach monitoringu, zaproponowany w standardzie IEEE 1159 [12], znany jako PQDIF. Przykładowe zestawienie wybranych standardów zawiera tabela 1.

Tabela 1. Zestawienie wybranych norm IEEE związanych z układami generacji rozproszonej
Table 1. List of selected IEEE standards related to distributed generation systems

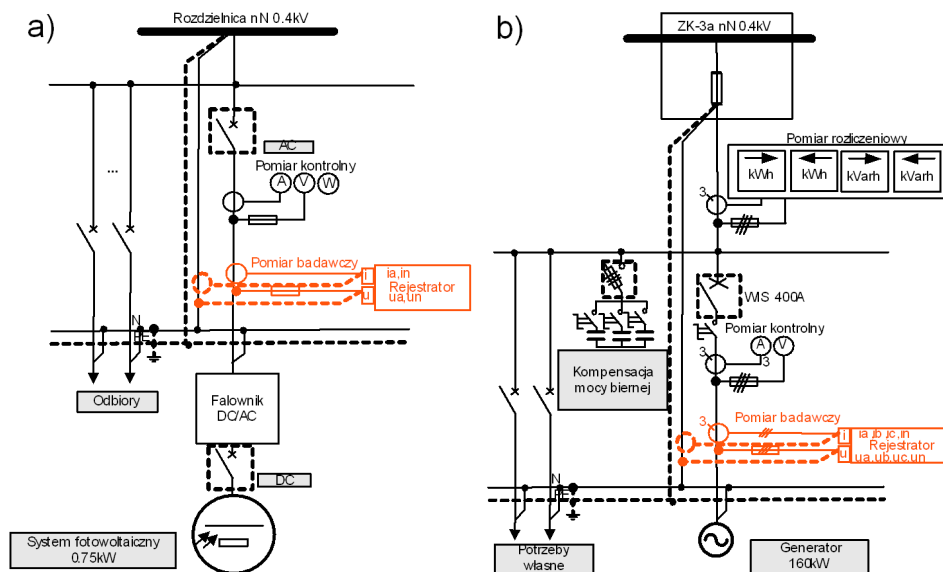
IEEE Std 1547 (2003) Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
IEEE Std 1547.1 (2005) Standard for Conformance Tests Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
IEEE Std 1547.2 (2008) Application Guide for IEEE1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
IEEE Std 1547.3 (2007) Guide for Monitoring Information Exchange, end Control of Distributed Resources with Electric Power Systems
IEEE Std 1547.4 (2011) Draft Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resources Island Systems with Electric Power Systems
IEEE Std 1547.5 Draft Technical Guidelines for Interconnection of Electrical Power Sources Greater then 10MVA to the Power Transmission
IEEE Std 1547.6 (2011) Draft Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks
IEEE Std 1547.7 Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resources Interconnection
IEEE Std 2030 (2011) Draft Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), and End-Use Applications and Loads
IEEE Std 2030.1 Draft Guide for Electric Sourced Transportation Infrastructure
IEEE Std 2030.2 Draft Guide for the Interoperability of Energy Storage Systems Integrated with the Electric Power Infrastructure
IEEE Std 2030.3 Draft Standard for Test Procedures for Electric Energy Storage Equipment and Systems for Electric Power System Application
Inne normy
IEEE Std 519 (1992) IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electric Power Systems
IEEE Std 1159 (2009) IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
IEEE Std 1159.3 (2003) IEEE Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data
IEEE Std 1250 (2011) IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances
IEEE Std 1453 (2011) IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems

Równoległe prace prowadzi komitet IEC wprowadzając unormowany protokół komunikacyjny dla elementów teleinformatyki stacyjnej IEC 61850 [13]. Na szczególną uwagę zasługują starania opracowywane w standardzie IEC 61970 [14] służące wprowadzeniu wspólnego systemu CIM (Common Information Model) i jego aplikacji na poziomach dystrybucyjnych, w tym układach generacji rozproszonej.

W świetle przedstawionych aktywności dedykowanych interoperacyjności elementów sieci elektroenergetycznych, w tym generacji rozproszonej, niniejsza praca stawia za zadanie próbę charakterystyki rzeczywistych aspektów współdziałania z siecią małych źródeł energii, zwłaszcza pod względem pracy w warunkach statycznych i dynamicznych. Przedstawione zostają przykładowe charakterystyki wytwarzania instalacji fotowoltaicznej oraz elektrowni wodnej, a także wybrane aspekty stanów przejściowych, związanych z operacjami łączeniowymi i zakłóceniovymi. Intencją pracy jest zilustrowanie zmienności i różnic w charakterze pracy wybranych źródeł na podstawie pomiarów rzeczywistych.

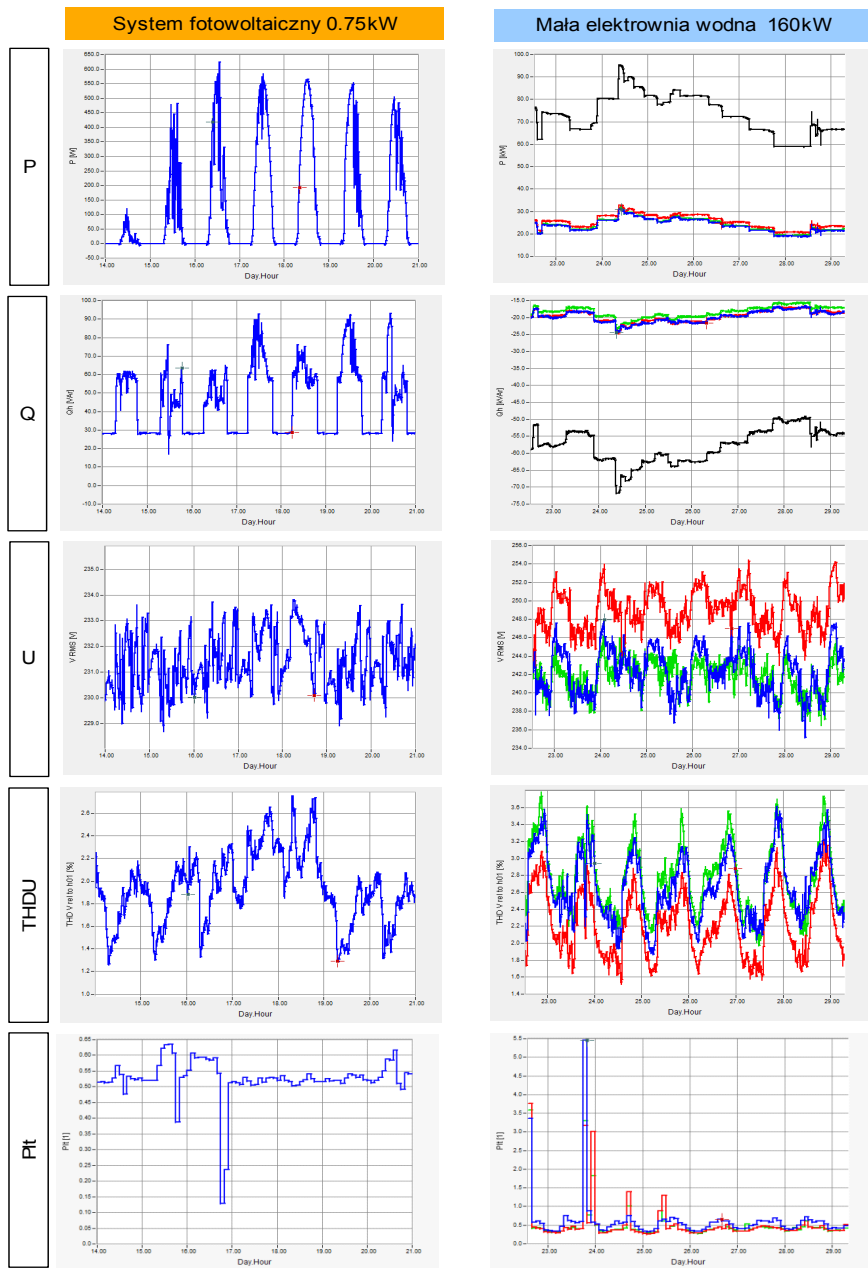
2. CHARAKTERYSTYKA MONITOROWANEJ INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ I ELEKTROWNI WODNEJ

W pracy wykorzystano rejestrację monitoringu dwóch różnych źródeł małej generacji: instalacji fotowoltaicznej włączonej bezpośrednio do sieci nN oraz małej elektrowni wodnej włączonej bezpośrednio do sieci nN. Uprozczone schematy wyprowadzenia mocy monitorowanych obiektów z zaznaczeniem punktu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uprozczone schematy układów wyprowadzenia mocy monitorowanych instalacji:
a) fotowoltaicznej, b) małej elektrowni wodnej

Fig. 1. Simplified diagrams of power system of monitored installation:
a) photovoltaic b) small hydropower plant



Rys. 2. Porównanie tygodniowych trendów podstawowych parametrów monitorowanej instalacji fotowoltaicznej (lewa kolumna) oraz małej elektrowni wodnej (prawa kolumna)
 Fig. 2. Comparison of weekly trends in the basic parameters of the monitored installation of photovoltaic (left column) and small hydropower plant (right column)

Badany system fotowoltaiczny składa się z 10 modułów SP75 tworzących układ o łącznej mocy 750 W. Moc pojedynczego modułu 75 W, prąd zwarcia 4,8 A, prąd w punkcie mocy 4,4 A, napięcie otwartego obwodu 21,7 V, napięcie w punkcie mocy 17,0 V. Współpracę z siecią zapewnia falownik, którego zadaniem jest zamiana napięcia stałego uzyskanego poprzez ogniwa na zmienne oraz zapewnienie wysokiego użytku energii. Falownik wyposażony jest w układ śledzenia maksymalnego punktu mocy (ang. Maximum Power Point Tracking), którego zadaniem jest wyznaczanie prądu wyjściowego, dla którego sprawność falownika dla danego nasłonecznienia będzie najwyższa. Parametry falownika: napięcie solarne 120–300 V, moc 1500 W, moc słoneczna generowana max. 2200 W, napięcie wyjściowe $230\text{ V} \pm 10/15\%$, częstotliwość $50\text{ Hz} \pm 0,6\text{ Hz}$, sprawność max. 93%.

Elektrownia wodna wyposażona jest w generator asynchroniczny o mocy 160 kW pracujący na napięciu 0,4 kV, napędzany przez turbinę Peltona. Doprowadzenie wody do turbin odbywa się rurociągiem stalowym. Wyprowadzenie mocy do systemu elektroenergetycznego odbywa się bezpośrednio na poziomie nN poprzez złącze kablowe z przejściem na linię napowietrzną. Układ wyposażony jest w kompensację mocy biernej. Najbliższa stacja 20/0,4 kV znajduje się odległości około 0,5 km od złącza. Stacja położona jest wewnątrz rozległej górskiej sieci średniego napięcia w odległości 8 km od GPZ. Metodyka badań objęła monitoring parametrów statycznych jak również rejestrację zdarzeń dynamicznych. Rejestratory zainstalowano po stronie niskiego napięcia. W trybie pracy ciągłej rejestrowano parametry z uśrednianiem 200 ms oraz 10 min. Dodatkowo kanały prądowe i napięciowe wyzwalano dobranymi do obiektu poziomami napięć i prądów z częstotliwością próbkowania 10,24 kHz.

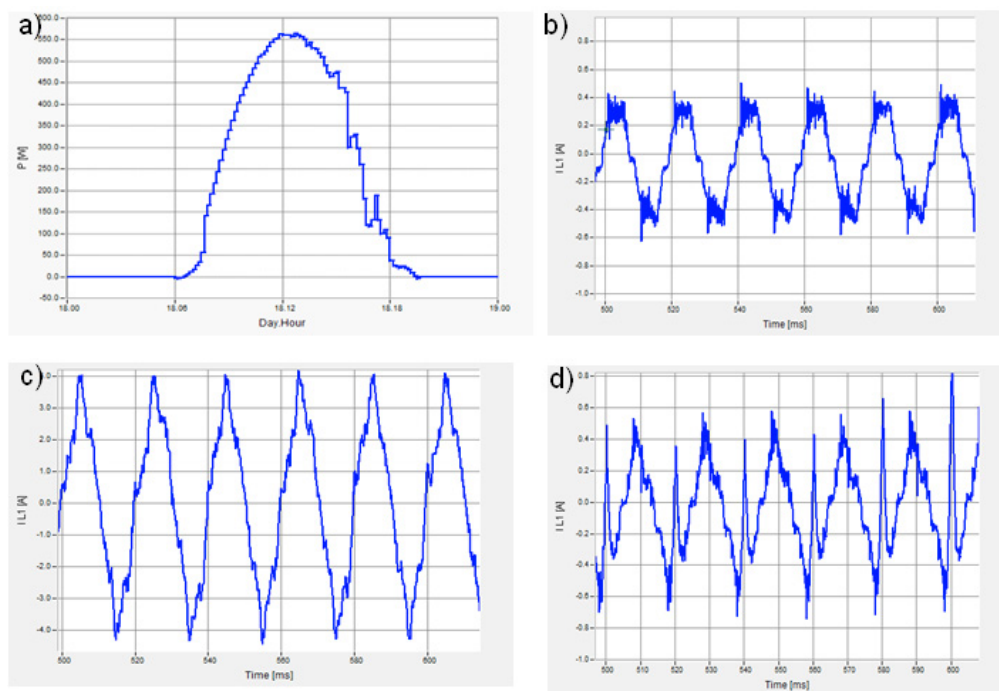
Na rysunku 2 zestawiono trendy zmienności podstawowych parametrów monitorowanych obiektów. Z punktu widzenia możliwości wykorzystania małych źródeł energii do współpracy w ramach celów interoperacyjności inteligentnych systemów elektroenergetycznych najbardziej elastycznym rozwiązaniem wśród badanych konfiguracji jest instalacja fotowoltaiczna ze skojarzeniem z siecią za pomocą falownika. Świadczyć o tym może możliwość konfiguracji relacji produkcji mocy biernej i czynnej, choć badany przypadek charakteryzowała mała moc. W przypadku małych hydrogeneratorów asynchronicznych stajemy przed problemem ścisłego związku poboru mocy biernej potrzebnej do produkcji mocy czynnej, co w znacznym stopniu ogranicza możliwości rozważenia udziału tych jednostek do podtrzymania pracy sieci. Z drugiej strony zmienność nasłonecznienia w większy sposób przekłada się na dostępność wytwarzanej energii w porównaniu z dobrze zaprojektowaną pod względem przepływów wody lokalizacją małej elektrowni wodnej.

Podczas przeprowadzania pomiarów w małej elektrowni wodnej wystąpiły burzowe warunki środowiskowe, które wpłynęły na znaczną ilość zakłóceń napięciowych. Ponadto załączanie generatora synchronicznego, bezpośrednio przyłączonego do sieci nN, związane jest z krótkimi zapadami napięcia od poboru prądu biernego. Stąd widoczne są przekroczenia długoterminowego współczynnika migotania światła (Plt), na który wpływ miały napięciowe zjawiska przejściowe. Pod względem migotania świa-

tła mała elektrownia wodna jest źródłem bardziej niespokojnym niż instalacja fotowoltaiczna.

3. DYNAMIKA ZMIENNOŚCI PRACY BADANYCH OBIEKTÓW

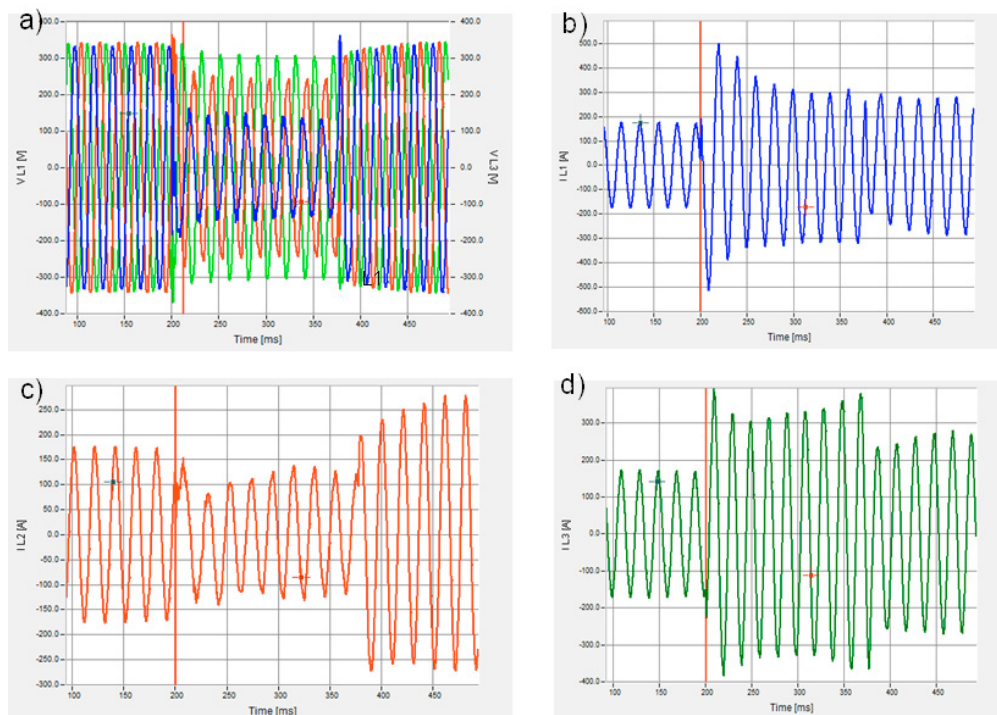
Zagadnieniem szczegółowym jest praca układów generacji rozproszonej w warunkach stanów przejściowych. Spośród zarejestrowanych zdarzeń wybrano między innymi: zmienność udziału harmoniczných w prądzie w zależności od poziomu mocy wyjściowej falownika w układzie fotowoltaicznym oraz pracę elektrowni wodnej podczas zakłóceń od strony sieci.



Rys. 3. Zmiana udziału harmoniczných w prądzie wyjściowym instalacji fotowoltaicznej w zależności od pory dnia. a) moc generowana w ciągu dnia, b) kształt prądu o godzinie 6, THD = 25%, c) kształt prądu o godzinie 12, THD = 14%, d) kształt prądu o godzinie 18, THD = 26%
 Fig. 3. The current harmonics changes of photovoltaic during a day. a) power generating during the day, b) current wave shape at 6 AM, THD = 25%, c) current wave shape at midday, THD = 14%
 c) current wave shape at 6 PM, THD = 26%

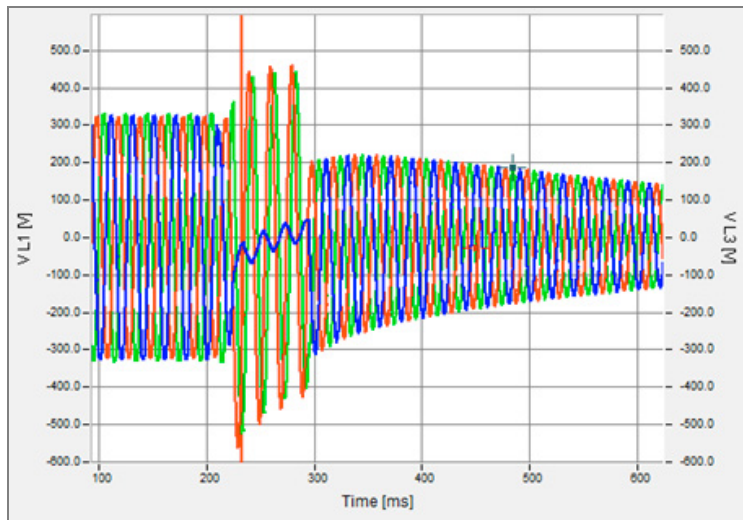
Kontroler falownika realizujący proces śledzenia maksymalnego punktu mocy ma wpływ na kształt przebiegu prądu wyjściowego. Rysunek 3 przedstawia moc czynną

generowaną przez układ w ciągu wybranej doby oraz przebiegi prądu dla różnych mocy nasłonecznienia. Udział harmonicznych w prądzie maleje przy nominalnych parametrach wytwarzania (godzina 12:00, THD = 14%), co skorelowane jest silnie z nasłonecznieniem. Wartość THD prądu przy małym nasłonecznieniu wynosi 25% o godz. 6:00 i 26% o 18:00. Badane źródło przyłączone jest bezpośrednio do rozdzielni nN obsługującej odbiorniki biurowe.



Rys. 4. Zapad napięcia (a) i towarzyszące mu zmiany prądu generatora w fazach L1, L2, L3 (b, c, d)
 Fig. 4. Voltage dip (a) and the accompanying changes in phase current L1, L2, L3 (b, c, d)

Innym zarejestrowanym przykładem jest zachowanie się badanej małej elektrowni wodnej z generatorem asynchronicznym o mocy 160 kW podczas zakłóceń od strony sieci. Przedstawiony na rysunku 4 zapad napięcia oraz związane z nim zachwiania prądu ilustrują bezpośrednie związki elektromechaniczne układu. Odłączenie generatora asynchronicznego od sieci jest procesem, który może nieść zagrożenia związane z możliwością samowzbudzenia jednostki przy nieodpowiedniej koordynacji wyłączenia układów kompensacji mocy biernej [4], [9]. Kondensatory kompensujące mogą wtedy przejąć rolę kondensatorów wzbudzających. Na rysunku 5 widoczne jest krótkie samowzbudzenie generatora i związany z tym wzrost napięcia na zaciskach generatora, przerwane przez wyłączenie baterii kondensatorów.



Rys. 5. Odłączania od sieci generatora asynchronicznego w małej elektrowni wodnej – rejestracja napięcia na zaciskach generatora – krótkie samowzbudzenie do wyłączenia baterii kondensatorów

Fig. 5. Switching OFF the asynchronous generator of small hydropower plant from a network – registration voltage at the generator terminals – the short self induction in time to switch off the capacitors bank

4. PODSUMOWANIE

W pracy porównano podstawowe właściwości dwóch małych źródeł generacji: instalacji fotowoltaicznej oraz małej elektrowni wodnej. Zaprezentowano rzeczywiste rejestracje związane z wytwarzaniem energii i jej jakością, jak również problematykę stanów przejściowych wywołanych czynnościami łączeniowymi lub zakłóceniami. Intensyfikacja działań w zakresie teleinformatyzacji i wzajemnej komunikacji elementów sieci czy rozwój algorytmów służących utrzymaniu i ocenie stabilności obszarowej, są działaniami niezbędnymi. Jednakże nie należy zapominać o szczególnych cechach poszczególnych technologii małej generacji i ograniczeń lub korzyści z nich wynikających. Przykładem są podkreślone w pracy zależności wytwarzania energii od warunków atmosferycznych, a także właściwości dynamiczne poszczególnych rozwiązań. Zaprezentowane rejestracje zagrożenia samowzbudzeniem czy zapadów napięcia podczas poboru prądu biernego przy załączeniu, wskazują na aspekty związane z trudnościami w realizacji podtrzymania pracy na sieć z wykorzystaniem generatora asynchronicznego. Za rozwiązania najbardziej obiecujące z punktu widzenia integracji z systemem oraz udziału w rozwoju inteligentnych sieci elektroenergetycznych można uznać obecnie układy wykorzystujące konwersję AC-DC-AC bądź DC-AC. Przykładem jest omawiany w pracy przykład systemu fotowoltaicznego bądź rozwiązania

stosowane w dużych siłowniach wiatrowych z generatorem synchronicznym FCI (*Full Converter Interface*).

LITERATURA

- [1] DUGAN R.C., MCDERMONTT E. et al., *Distributed Generation*, IEEE Industry Application Magazine, 2002, 19–25.
- [2] DUGAN R.C., MCDERMONTT E. et al., *PQ, Reliability and DG*, IEEE Industry Application Magazine, 2003, 1639–1644.
- [3] DUGAN R.C., WALLING R.A. et al., *Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems*, IEEE Transactions on power delivery, 2008, Vol. 23, No. 3, 17–23.
- [4] HICKIEWICZ J., MOCH J., *Zagrożenia przy pracy generatorów w małych elektrowniach wodnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2008, No. 79, 133–137.
- [5] KACEJKO P., *Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004.
- [6] MALKO J., *Generacja rozproszona w europejskiej polityce energetycznej*, Materiały konferencyjne Sieci Elektroenergetyczne w Przemysle i Energetyce, Szklarska Poręba 2004.
- [7] PASKA J., *Generacja rozproszona*, Elektroenergetyka, 2002, No. 4.
- [8] ROJEWSKI W., SOBIERAJSKI M., *Warunki pracy małej elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym w sieci średniego napięcia*, V Konferencja Naukowo-Techniczna Elektroenergetyczne Sieci Rozdzielcze, Sieci, 2004, 105–112.
- [9] ROZLUCKI W., *Kompensacja mocy biernej w małych elektrowniach wodnych*, Biuletyn Elma Energia.
- [10] IEEE Std. 2030 – *Smart Grid Interoperability Series of Standards*, IEEE SCC21 Standards Coordinating Committee on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage, 2011.
- [11] IEEE Std. 1547 – *Series of Interconnection Standards*, IEEE SCC21 Standards Coordinating Committee on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage, 2005–2011.
- [12] IEEE Std. 1159 – *Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Working Group on Monitoring Electric Power Quality reports to the Power Quality Subcommittee of the IEEE Power Engineering Society, 2003–2009.
- [13] IEC 61850 *Communication networks and systems in substations*, International Electrotechnical Commission.
- [14] IEC 61970 *Energy management system application program interface (EMS-API)*, International Electrotechnical Commission.

POWER QUALITY IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

The paper concerns the issues of distributed generation cooperation with power network. New standards in field of connection small energy sources to grid are discussed, Long-term registered values of power quality indicator of photovoltaic system and small hydropower plant are presented. Behaviour of distributed generation units in transient states are discussed additionally. The recorded events concern switching and disconnecting asynchronous generators and behaviour of a generating unit during the short circuit from the power network. The intention of the paper is to illustrate the variability and differences in the nature of selected sources work from the perspective of today introduced the idea of network elements interoperability.