Aleksander BODORA[1], Tomasz BISKUP[2], Andrzej NIEDWOROK[3], Arkadiusz DOMORACKI[4], Łukasz ORZECH[5]

[1,4]Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki;
[2]ENEL-PC, Przyszowice;
[3,5]Instytut Techniki Górniczej KOMAG.
ORCID: 1. 0000-0002-7850-2233; 2. 0009-0002-8336-8806 3. 0000-0001-5234-0531; 4. 0000-0002-3963-0822; 5. 0000-0002-9949-9977

doi:10.15199/48.2024.06.36

Obciążenie RLC przeznaczone do badania odporności falowników fotowoltaicznych na zanik napięcia sieci energetycznej

Streszczenie. *W artykule omówiono wyniki prac, których celem było przygotowanie zautomatyzowanej stacji prób, służącej do oceny skuteczności działania zabezpieczenia falowników fotowoltaicznych na zanik napięcia sieci. W falownikach fotowoltaicznych przeznaczonych wyłącznie do pracy w trybie on-grid zabezpieczenie to jest niezwykle istotne, a sposób jego badania opisuje szczegółowo norma PN-EN 62116. Wobec rosnących potrzeb na kompleksową ocenę jakości falowników fotowoltaicznych dostępnych na rynku, system testowy powinien zapewniać możliwie wysoki poziom zautomatyzowania przy jak najmniejszym zaangażowaniu ze strony obsługi.*

Abstract*. This article presents the results of work aimed at preparing an automated test station, used to assess the effectiveness of the protection of photovoltaic inverters against grid voltage decay. In photovoltaic inverters designed only for on-grid operation, this protection is extremely important, and the method of testing is described in details in the PN-EN 62116 standard. In view of the growing need for a comprehensive quality assessment of photovoltaic inverters available on the market, the test system should be automated with as little involvement as possible on the part of the staff.* ***(The RLC load designed to test the resistance of photovoltaic inverters to voltage decay in the power grid).***

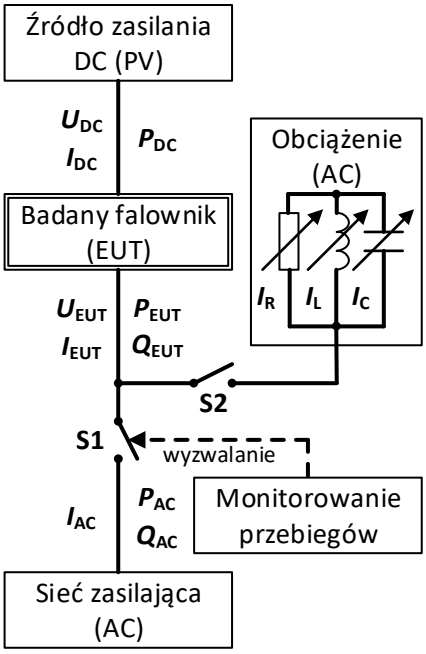
Słowa kluczowe: falowniki fotowoltaiczne, zanik napięcia sieci zasilającej, zautomatyzowany system testowy.
Keywords: photovoltaic inverters, power failure, automated test system.

Wstęp

Na obecnym etapie rozwoju elektroprosumeryzmu [1] falowniki fotowoltaiczne niskiego napięcia stanowią istotną część przekształtników energoelektronicznych, które współpracują z siecią elektroenergetyczną [2]. Producenci falowników fotowoltaicznych mają w swojej ofercie zazwyczaj kilka wersji tych urządzeń, w zależności od potrzeb oraz możliwości finansowych i technicznych prosumentów. Najbardziej zaawansowane rozwiązania umożliwiają pracę w trybach *on-grid* (współpraca z siecią) oraz *off-grid* (praca wyspowa) [3]. Wymagają one jednak stosowania lokalnych zasobników energii, co znacząco podnosi koszt inwestycji i zwiększa gabaryty całej instalacji. Z tego też względu użytkownicy falowników fotowoltaicznych wybierają najczęściej wersje, które oferują jedynie pracę w trybie *on-grid* [4]. Jednym z kluczowych warunków poprawnej pracy tych falowników jest ciągła obecność napięcia w sieci elektroenergetycznej. Z jego częstotliwością falowniki synchronizują swoją pracę. Zanik napięcia w sieci może być skutkiem awarii lub celowego wyłączenia (np. na potrzeby przeprowadzenia prac). Bez względu jednak na to, co jest przyczyną zaniku napięcia w sieci przepisy techniczne nie dopuszczają możliwości pracy wyspowej OZE w publicznej sieci rozdzielczej. Z tego też względu wszystkie falowniki fotowoltaiczne muszą być wyposażone w zabezpieczenie typu LOM (ang. *Loss Of Mains*), które wykryje taki stan i spowoduje samoczynne wyłączenie falownika.

Wymagania normy PN-EN 62116

Ocena skuteczności działania zabezpieczenia przeciw pracy wyspowej falowników fotowoltaicznych (LOM) powinna być prowadzona zgodnie z zapisami normy PN-EN 62116 [5]. W normie zdefiniowano między innymi schemat blokowy układu testowego, wielkości fizyczne, które muszą być mierzone podczas prób oraz niepewność ich pomiaru. Wskazany w normie schemat blokowy stanowiska testowego zamieszczono na rysunku1. Badany falownik fotowoltaiczny (EUT z rys. 1, skrót z ang. *Equipment Under Test*) zasilany jest ze źródła napięcia stałego (które symuluje moduł fotowoltaiczny) i poprzez stycznik S1 połączony z siecią zasilającą napięcia przemiennego. Ze względu na potrzebę badania układów we wzorcowych warunkach zasilania sieci 3x400V (stabilność RMS napięcia i częstotliwości zasilania, THD napięcia) funkcję tę podczas prób pełni zwykle energoelektroniczny zasilacz AC o odpowiedniej mocy. Równolegle do falownika podłączone jest regulowane obciążenie RLC.



Rys.1. Schemat blokowy układu do badania zabezpieczenia falowników fotowoltaicznych przeciw pracy wyspowej LOM (opracowano na podstawie [5])

Test przebiega według następującego podstawowego scenariusza. W pierwszym etapie falownik pracuje z zadaną mocą na sieć elektroenergetyczną (stycznik S1 jest zamknięty, stycznik S2 jest otwarty). Następnie zamyka się stycznik S2 i ustawia wartość obciążenia w taki sposób, aby cała moc falownika była pobierana tylko przez obciążenie (prąd I_{AC} równy 0A). Dodatkowo w układzie obciążenia załączana jest część kondensatorów i dławików w taki sposób, aby moc bierna pojemnościowa była równa indukcyjnej i co do wartości bezwzględnej odpowiadała mocy czynnej wymuszanej z badanego falownika fotowoltaicznego. W kolejnym kroku odłączana jest sieć zasilająca (otwarcie stycznika S1), co prowadzi do wyspowej pracy falownika fotowoltaicznego. Urządzenie powinno wykryć ten stan i samoczynnie się wyłączyć (napięcie U_{EUT} równe 0V). Testy powinny być przeprowadzone dla trzech zakresów mocy falownika: 100% P_{EUTn}, 50%÷66% P_{EUTn} oraz 25%÷33% P_{EUTn}. Dla każdego zakresu mocy należy przeprowadzić serię prób, w których zmienia się moc czynną (P_{EUT}) oraz bierną (Q_{EUT}) w przedziale od -10% do +10% z gradacją co 5%. Te odchylenia wartości mocy biernej w stosunku do czynnej falownika powodują, że w chwili wyłączania stycznika S1 płynie przez niego niezerowy prąd. Zmienia to warunki w jakich znajduje się falownik fotowoltaiczny w chwili wyłączenia S1 i w jakich wykrywany jest stan pracy wyspowej. Należy przebadać skuteczność zadziałania zabezpieczenia LOM dla wszystkich możliwych kombinacji tych zmian. Jeśli w każdym przypadku falownik wykryje pracę wyspową i zdoła się wyłączyć (napięcie U_{EUT} równe 0V) w czasie krótszym niż 2 sekundy, wówczas działanie zabezpieczenia LOM uznaje się za skuteczne [5].

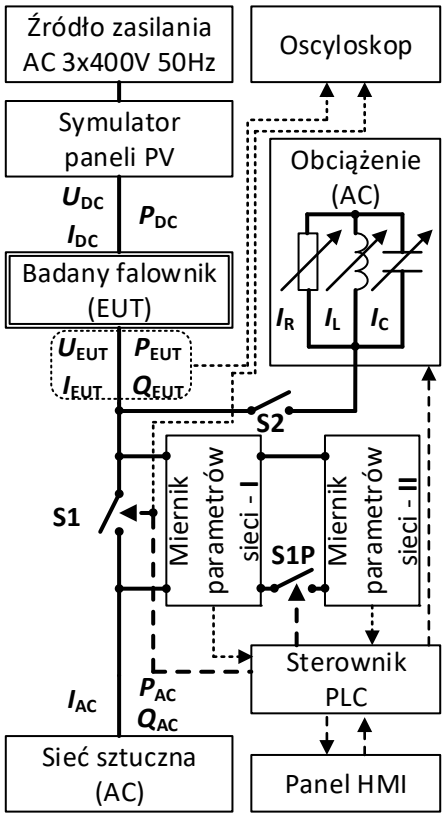
Stanowisko laboratoryjne

Z zamieszczonego powyżej opisu jasno wynika, że w celu określenia skuteczności działania zabezpieczenia LOM konieczne jest przeprowadzenie znaczącej liczby prób. Ponadto norma wymaga dokumentowania wartości skutecznych napięcia, prądu, mocy czynnej oraz biernej falownika dla częstotliwości podstawowej z zachowaniem niepewności pomiarów nie wiekszej od 1% przy każdej próbie. Zatem czas trwania pełnego testu jednego urządzenia oraz ilość danych pomiarowych gromadzonych w jego trakcie są znaczące.

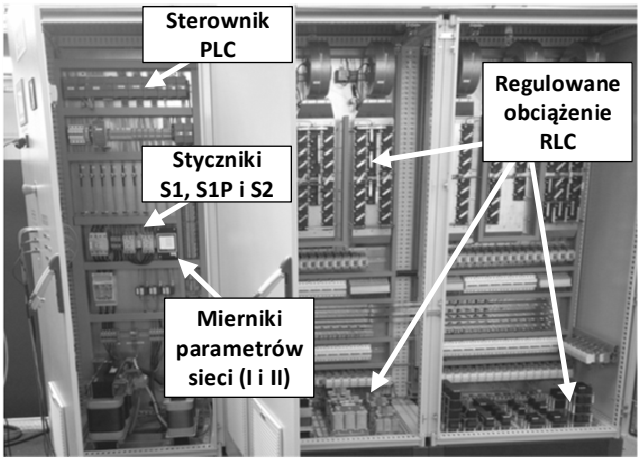
W calu zautomatyzowania oraz skrócenia czasu trwania całego procesu pomiarowego firma ENEL-PC we współpracy z ITG KOMAG opracowała stanowisko testowe. Stanowisko to umożliwia badanie przekształtników fotowoltaicznych jednofazowych oraz trójfazowych o mocach do 30 kW. Schemat blokowy stanowiska zamieszczono na rysunku 2. Składa się ono z dwóch zasadniczych części: układu sterowania procesem i obciążenia pasywnego.

Centralnym elementem układu sterowania jest sterownik PLC z rodziny Simatic S7-1200 z modułami wejść/wyjść cyfrowych, modułem wejść analogowych, modułami komunikacyjnymi oraz panel operatorski HMI firmy Siemens.

Za jego pośrednictwem możliwe jest wprowadzenie podstawowych parametrów badanego falownika, a także wybór parametrów próby. W stanowisku zastosowano dwa mierniki LUMEL ND-25 w celu uzyskania większej dokładności pomiaru w całym zakresie prądów/mocy przepływających przez stycznik S1. Miernik I pokazany na rys. 2 jest skonfigurowany do pomiaru wielkości elektrycznych w pełnym zakresie stanowiska (czyli do mocy 30 kW). Natomiast miernik II jest wykorzystywany tylko wówczas, gdy prądy płynące do sieci sztucznej są mniejsze od 2,5 A. Jest to istotny aspekt konstrukcyjny ze względu na fakt, że warunkiem poprawnie zakończonego przygotowania do testu podstawowego jest osiągnięcie wartości 0 A prądu 1-harmonicznej płynącego przez stycznik S1, z niepewnością pomiaru rzędu 1% (odniesioną do prądu płynącego z falownika). Autorzy normy PN-EN 62116 wskazali, że wartość tego prądu może być uśredniona, bowiem z istoty pracy falowników fotowoltaicznych wynika proces generacji dodatkowej składowej biernej wtłaczanej do sieci. Jest to typowa metoda, za pomocą której układ sterowania falownika wykrywa przejście do pracy wyspowej.



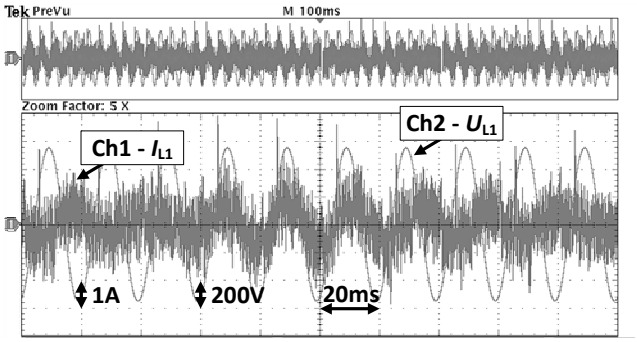
Rys. 2. Schemat blokowy przygotowanego stanowiska testowego



Rys. 3. Widok najważniejszych elementów stanowiska testowego

Powoduje to, że w układzie pomiarowym pokazanym na rys. 2 nie jest możliwe całkowite wyzerowanie prądu płynącego przez stycznik S1 do sieci sztucznej. Dodatkowo należy zauważyć, że proces dynamicznych zmian amplitudy prądu nie jest zawsze taki sam. Zależy on bowiem od zastosowanego w konkretnym modelu algorytmu wykrywania pracy wyspowej, a ten z kolei jest różny

u poszczególnych producentów tych urządzeń. Ilustracją tego zjawiska może być przebieg oscyloskopowy pokazany na rys. 4, gdzie przedstawiono prąd jednej z faz na tle napięcia fazowego po przeprowadzeniu procedury opisanej w normie, a polegającej na wyzerowaniu prądu płynącego przez stycznik S1 do sieci sztucznej. Jak można zauważyć prąd jest nie tylko odkształcony, bo pochodzi z falownika fotowoltaicznego, ale także jego amplituda i przesunięcie fazowe względem napięcia fazowego jest zmienne w czasie, przy czym cykl ten w tym przypadku wynosił 200÷300 ms.



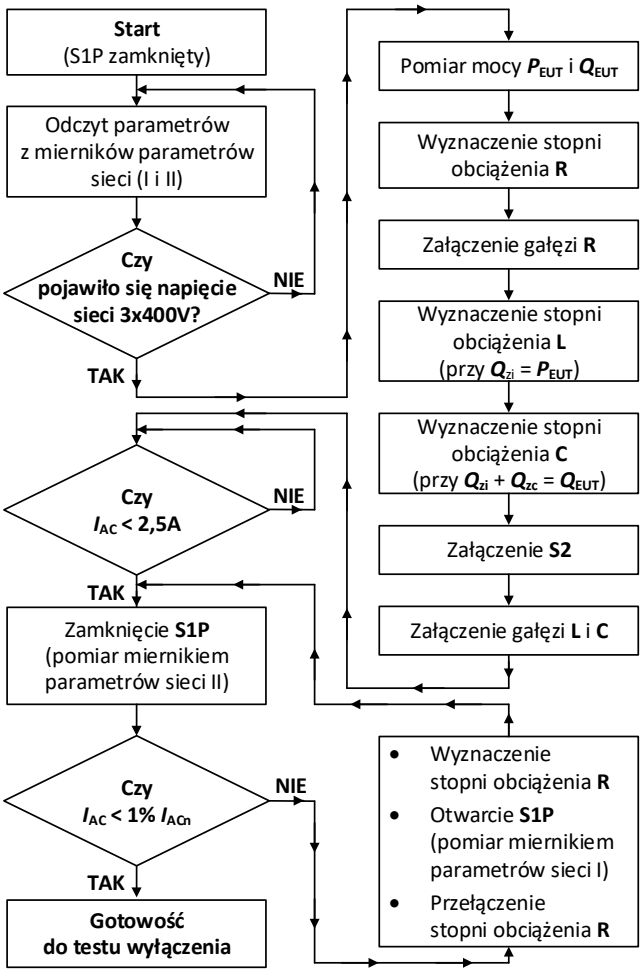
Rys. 4. Przebiegi napięcia (U_{L1}) i prądu (I_{L1}) fazy 1 po zakończonej procedurze wyzerowania prądu płynącego do sieci sztucznej

Druga część systemu, czyli obciążenie pasywne, składa się z 3-fazowego układu R, L, C. Zastosowano rezystory bezindukcyjne umieszczone na radiatorze chłodzonym powietrzem w sposób wymuszony oraz kondensatory polipropylenowe Cornell Dubilier z serii ALH i BLH o zminimalizowanej indukcyjności i rezystancji pasożytniczej. W celu uzyskania odpowiednich wartości rezystancji i pojemności elementy łączono w sposób szeregowo-równoległy z symetryzacją wartości fazowych. Obciążenie typu L jest sterowane symetrycznie 3-fazowo, natomiast dwa pozostałe (R oraz C) mają możliwości sterowania stopniami w każdej fazie niezależnie. Pozwala to na skompensowanie rozrzutu technologicznego parametrów zastosowanych elementów pasywnych jak i na opanowanie zróżnicowania w prądzie płynącym z badanego falownika. Każda gałąź obciążenia R, L, C składa się z 11 stopni o reaktancji zwiększającej się dwukrotnie pomiędzy kolejnymi stopniami. W ten sposób uzyskano możliwość quasi-płynnej regulacji prądu obciążenia czynnego i biernego w pełnym wymaganym zakresie. Taki sposób rozwiązania wymagał znacznej liczby wyjść sterujących (i jednocześnie styczników pomocniczych) oraz wejść cyfrowych sterownika PLC, służących jako kontrola poprawności działania układu stycznikowego.

Integralnym elementem stanowiska jest analizator energii elektrycznej Hioki PW 3198, który pozwala na pomiar niezbędnych wielkości elektrycznych przed chwilą wyłączenia stycznika S1 określonych w normie PN-EN 62116. Drugim zewnętrznym elementem wykorzystywanym w czasie badań jest oscyloskop, który pozwala na określenie czasu reakcji na zjawisko pracy wyspowej. W celu ułatwienia pomiaru na stanowisku udostępniono cyfrowy sygnał pochodzący ze styku pomocniczego stycznika S1. Dodatkowo obserwowane są napięcie fazowe z badanego falownika oraz prąd jednej z faz falownika płynący do sieci sztucznej. Czas reakcji falownika na stan pracy wyspowej jest mierzony oscyloskopowo, kursorami ustawionymi pomiędzy chwilą wyłączenia stycznika (z równoczesną kontrolą stanu prądu płynącego do sieci sztucznej) a zanikiem obserwowanego napięcia fazowego.

Algorytm sterowania

Ze względu na konieczność wykonania serii prób dla trzech zakresów mocy falownika oraz przy odchyleniu zarówno mocą czynną jak i bierną układ sterowania umożliwia automatyczne przełączanie kolejnych prób lub definiowanie wybranej próby przez operatora. Podstawowym zadaniem układu sterowania jest realizacja algorytmu przełączania odpowiednich stopni gałęzi RLC w celu doprowadzenia prądu I_{AC} do wartości równej 0 A. Dodatkowo, w zależności od warunków narzuconych przez odpowiednią próbę, przełączenia mają na celu uzyskanie wymaganego odchylenia mocą czynną i mocą bierną. Algorytm sterowania zaimplementowany w sterowniku PLC przedstawiono na rysunku 5. Po detekcji napięcia w sieci, mierzone są wartości mocy czynnej i biernej i na ich podstawie wyznaczane i załączane są odpowiednie stopnie gałęzi obciążenia rezystancyjnego R. W kolejnym kroku wyznaczane i załączane są odpowiednie stopnie gałęzi L i C. Na tym etapie pomiary realizowane są z wykorzystaniem miernika parametrów sieci I i przy zamkniętym styczniku S1. W kolejnym kroku system sterowania w odstępach czasu rozwiera stycznik S1P, co umożliwia wykonywanie dokładnych pomiarów z wykorzystaniem miernika parametrów sieci - II. W każdym kroku przełączane są odpowiednie stopnie obciążenia rezystancyjnego w taki sposób, aby sprowadzić prąd czynny płynący do sieci do wartości mniejszej niż 1% wartości prądu znamionowego. Po osiągnięciu wymaganej wartości prądu sygnalizowana jest gotowość układu do wykonania testu.

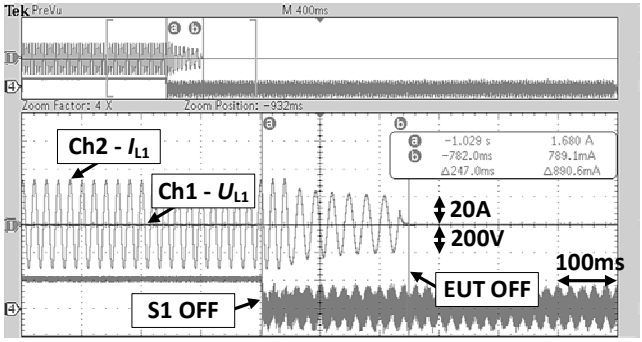


Rys. 5. Algorytm sterowania w czasie przygotowania do pomiaru

Badania laboratoryjne

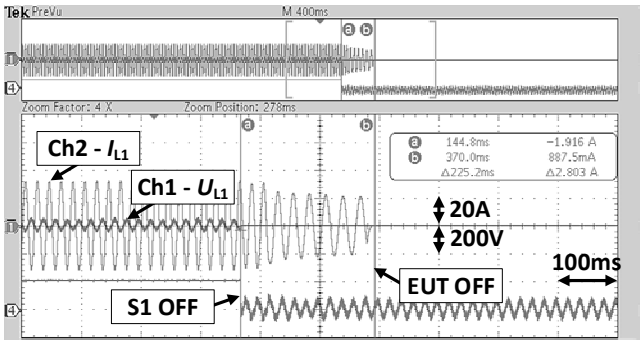
Testy układu przeprowadzono przy wykorzystaniu jako obiektu badanego falownika fotowoltaicznego Fronius o mocy 20 kW. Falownik był zasilany napięciem DC z zasilacza Itech, serii IT6108C-1500-240. Sieć sztuczną w stanowisku reprezentował układ EMTEST PowerWave 250, przy czym testy były wykonywane przy generowanym przez ten układ napięciu zasilania 230 V i częstotliwości 50 Hz. Zgodnie z wymaganiami normy falownik był badany dla mocy znamionowej 20 kW oraz mocy mniejszych, czyli 66% i 33% mocy znamionowej. Komplet badań to ponad 40 testów, przy czym część jest wykonywana opcjonalnie w przypadku zbyt długiego czasu reakcji układu sterowania w jednym z podstawowych testów. Zawsze wartością referencyjną czasu reakcji falownika na zanik napięcia sieciowego są dwie sekundy. Na rysunkach 6÷8 zamieszczono wybrane oscylogramy uzyskane podczas badań. W opisie pod każdym rysunkiem podano także informacje, jakie były warunki obciążenia w każdej z prób.

Oscylogram z rysunku 6 prezentuje próbę w pełni zbalansowaną, gdzie w chwili wyłączenia stycznika S1 prąd płynący do sieci sztucznej jest zerowy. Od chwili wyłączenia stycznika (skokowa zmiana w sygnale styku pomocniczego stycznika S1 z 5 V na ok. 0 V) po krótkim czasie napięcie generowane przez falownik obniża się o ok. 25%, a po czasie 247 ms napięcie zanika do 0 V. Czas ten jest znacząco krótszy od wartości wymaganej przez normę.

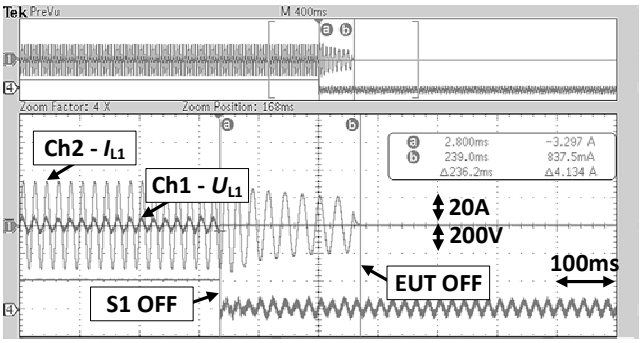


Rys. 6. Przebiegi napięcia fazy 1 (Ch2), prądu fazowego sieci sztucznej (Ch1) oraz sygnału ze stycznika (Ch4) w czasie testu przy mocy czynnej z falownika 20kW i mocach obciążenia RLC: P = 20 kW, Q_C = -20 kvar, Q_L = 20 kvar.

Podobne wyniki uzyskano również przy innych warunkach obciążenia (rys. 7 oraz rys. 8). W żadnej z przeprowadzonych prób czas reakcji nie przekroczył wartości 300 ms. Dla prób, kiedy układ nie jest zbalansowany, można zauważyć niewielką wartość prądu płynącego do sieci sztucznej. Oczywiście jego przesunięcie fazowe wynika ze sposobu rozstrojenia parametrami R, L, C.



Rys. 7. Przebiegi napięcia fazy 1 (Ch2), prądu fazowego sieci sztucznej (Ch1) oraz sygnału ze stycznika (Ch4) w czasie testu przy mocy czynnej z falownika 20kW i mocach obciążenia RLC: P = 22 kW, Q_C = -20 kvar, Q_L = 20kvar



Rys. 8. Przebiegi napięcia fazy 1 (Ch2), prądu fazowego sieci sztucznej (Ch1) oraz sygnału ze stycznika (Ch4) w czasie testu przy mocy czynnej z falownika 20kW i mocach obciążenia RLC: P = 18 kW, Q_C = -22 kvar, Q_L = 20kvar.

Podsumowanie

Opracowane przez firmę ENEL-PC (we współpracy z ITG KOMAG) stanowisko badawcze umożliwia przeprowadzenie w zautomatyzowany sposób badań skuteczności zabezpieczenia przed pracą wyspową jedno i trójfazowych falowników fotowoltaicznych. Maksymalny zakres mocy badanych na stanowisku falowników wynosi 30 kW. Badania prowadzone na stanowisku są w pełni zgodnie z normą PN-EN 62116. Opracowany algorytm sterownia zapewnia automatyczną kompensację prądu płynącego do sieci elektroenergetycznej z możliwymi wartościami odchyleń mocy biernej indukcyjnej pojemnościowej. W trakcie badań uruchomieniowych zwrócono uwagę na trudności związane z wyznaczaniem wartości kompensujących. Problemy te są wynikiem działania zaimplementowanego w falowniku PV algorytmu detekcji pracy wyspowej. Jednak największym problemem była kwestia niepewności pomiaru wyznaczania przez mierniki LUMEL wartości 1-harmonicznej prądu i brak informacji o sposobie/algorytmie uśredniania wartości pomiarowych udostępnianych w rejestrach MODBUS w tych miernikach.

***Autorzy**:*
dr inż. Aleksander Bodora, dr inż. Arkadiusz Domoracki
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny,
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki,
ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice,
e-mail: aleksander.bodora@polsl.pl, arkadiusz.domoracki@polsl.pl
dr inż. Tomasz Biskup
ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice
e-mail: t.biskup@enel-pc.pl
dr inż. Andrzej Niedworok, dr inż. Łukasz Orzech
Instytut Techniki Górniczej KOMAG,
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice
e-mail: aniedworok@komag.eu, lorzech@komag.eu

LITERATURA

[1] Bodzek K. „Rozwiązania dla rynków prosumeryzmu. Na dziś (kryzysowe), na jutro (budujące odporność elektroprosumencką), na rok 2050”, Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej, 2022, nr 11.
[2] Praca zbiorowa: “Raport - Rynek fotowoltaiki w Polsce” Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa, maj 2023.
[3] M. Kampik, M. Fice, A. Pilśniak, K. Bodzek, A. Piaskowy, „An analysis of energy consumption in small- and medium-sized buildings”, Energies, t. 16, Art. nr 3, 2023.
[4] Miller P., Wancerz M., „Praca źródeł fotowoltaicznych przy zmianach i zanikach napięcia w sieci nn”, Rynek Energii, nr 1/2017, ISSN 1425-5960.
[5] Norma IEC 62116:2014-11 IEC.