

Stanowisko laboratoryjne do badań pracy inwerterów fotowoltaicznych

Streszczenie. W artykule zostało opisane stanowisko laboratoryjne do badań pracy inwerterów fotowoltaicznych. Najpierw została przedstawiona budowa stanowiska laboratoryjnego, w tym jego elementy składowe i możliwe konfiguracje pracy. Następnie dokonano prezentacji wybranych badanych przypadków działania zabezpieczeń na tym stanowisku. W dalszej kolejności zostały opisane plany rozbudowy stanowiska o nowe funkcjonalności. W ostatniej części artykułu zostało zaprezentowane podsumowanie i wnioski końcowe.

Abstract. Laboratory stand for studies of photovoltaic inverters work has been described in the paper. First laboratory stand design has been presented, including its components and possible work configurations. Then selected studied cases of protections operation in this stand have been shown. In the further sequence extension plans of the stand concerning its new functionalities have been described. In the last part of the paper summary and final conclusions have been presented. (**Laboratory stand for studies of photovoltaic inverters work**).

Słowa kluczowe: inwertery fotowoltaiczne, badanie pracy inwerterów, praca wyspowa, stanowisko laboratoryjne.

Keywords: photovoltaic inverters, study of inverters work, island operation, laboratory stand.

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się coraz większą liczbę instalowanych rozproszonych źródeł energii, w tym źródeł odnawialnych, przyłączanych do sieci dystrybucyjnych średnich i niskich napięć [1, 2], jak również do mikrosieci niskich napięć [3]. Znaczna część tych źródeł jest przyłączana do sieci za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych. W przypadku źródeł wytwarzających energię elektryczną prądu stałego, przekształtnikami tymi są falowniki (inwertery). Tak się dzieje np. w przypadku przyłączenia do sieci dystrybucyjnych prądu przemiennego paneli fotowoltaicznych (PV). Bardzo istotnym zagadnieniem staje się wówczas prawidłowe działanie zabezpieczeń tych paneli, zainstalowanych we wspomnianych inwerterach PV. Jednym z ważniejszych zabezpieczeń zaimplementowanych w inwerterach PV jest zabezpieczenie od pracy wyspowej.

Generalnie zabezpieczenia od pracy wyspowej źródeł wytwórczych dzielą się na [4, 5, 6, 7]: zabezpieczenia pasywne, zabezpieczenia aktywne oraz metody wykorzystujące systemy telekomunikacyjne. Wśród metod pasywnych najbardziej popularne są:

- zabezpieczenia pod/nadnapięciowe,
- zabezpieczenia pod/nadczęstotliwościowe,
- zabezpieczenie VVS (Voltage Vector Shift),
- zabezpieczenie RoCoF (Rate of Change of Frequency).

Jeśli chodzi o zabezpieczenia od pracy wyspowej mikrosieci niskiego napięcia, to zagadnienie to zostało szczegółowo omówione w [8].

Należy podkreślić, że niezamierzona (nieintencjonalna) praca wyspowa jednostek wytwórczych przyłączonych do sieci dystrybucyjnych w Polsce jest niedopuszczalna [9] (nie dotyczy to mikrosieci). Głównie jest to podyktowane bezpieczeństwem personelu eksploatującego sieci elektroenergetyczne.

Dlatego tak ważną sprawą jest prowadzenie odpowiednich badań dotyczących prawidłowości funkcjonowania zabezpieczeń rozproszonych źródeł energii, w tym źródeł odnawialnych, przyłączanych do sieci dystrybucyjnych. Badania te mogą być prowadzone zarówno w trybie symulacyjnym (komputerowym) [10], jak i na obiektach fizycznych.

Zagadnienie to było jednym z zadań międzynarodowego projektu badawczego RIGRID (Rural Intelligent Grid - Inteligentne Sieci Elektroenergetyczne na obszarach

wiejskich) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) [11]. Prowadzone w ramach projektu RIGRID badania, odnośnie do rozważanej w artykule tematyki, dotyczyły sprawdzania prawidłowości funkcjonowania zabezpieczeń odnawialnych źródeł energii, przyłączanych do sieci dystrybucyjnych SN i nn. Celem prowadzonych prac badawczych była m.in. budowa stanowiska laboratoryjnego i przeprowadzenie odpowiednich badań na tym stanowisku, odnośnie do prawidłowości działania wspomnianych zabezpieczeń. W szczególności koncentrowano się na zabezpieczeniach instalowanych w, stosowanych w praktyce, inwerterach PV.

W niniejszym artykule zostaną omówione zagadnienia dotyczące budowy stanowiska laboratoryjnego, a w szczególności jego elementów składowych i możliwych konfiguracji jego pracy. Zostaną także zaprezentowane wybrane wyniki badań dotyczących działania zabezpieczeń na stanowisku laboratoryjnym. Ponadto, zostaną krótko opisane plany dotyczące rozbudowy stanowiska o nowe funkcjonalności.

Artykuł zakończono podsumowaniem i przedstawieniem wniosków końcowych.

Budowa stanowiska laboratoryjnego

Celem budowy stanowiska laboratoryjnego było sprawdzenie zadziałania zabezpieczeń implementowanych w inwerterach PV pracujących w sieciach dystrybucyjnych różnych napięć, w szczególności pod kątem poprawności wykrywania pracy wyspowej.

Do realizacji tak postawionego celu zaprojektowano i wykonano układ elektryczny, w którym programowalne zasilacze napięcia przemiennego (AC) symulują wybrane zaburzenia we wspomnianych sieciach dystrybucyjnych, takie jak zapady napięcia oraz przejście z pracy synchronicznej do pracy wyspowej. Zasilacze te są zasilaczami liniowymi, dzięki czemu charakteryzują się dobrą jakością napięcia generowanego sinusoidalnego. Istnieje też możliwość wykonania celowego zaburzenia w nich parametru THDu. Na stanowisku mogą pracować jednocześnie dwa falowniki PV, które od strony DC są zasilone z zasilaczy prądu stałego wyposażonych w interfejsy PV, symulujących pracę paneli fotowoltaicznych. Ponadto, został zainstalowany inwerter wyspowy, wyposażony w baterię akumulatorów, który w przypadku wykrycia braku zasilania ze strony sieci dystrybucyjnej podaje napięcie sieciowe po stronie odbiorów. Inwerter wyspowy jest przystosowany do współpracy z inwerterami

fotowoltaicznymi; urządzenie pracuje czterokwadrantowo. Zainstalowane na stanowisku odbiory to rezystory, z których część pozwala na płynną regulację mocy odbieranej. Listę urządzeń zainstalowanych na stanowisku laboratoryjnym zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Elementy składowe stanowiska laboratoryjnego [11]

L.p.	Nazwa elementu	Liczba zainstalowanych elementów
1	Programowalny zasilacz AC, $S = 1500 \text{ VA}$	3
2	Zasilacz napięcia stałego $P = 3000 \text{ W}$	2
3	Inwerter PV, $P = 3000 \text{ W}$	3
4	Inwerter wyspowy	1
5	Akumulatory	4
6	Szafa typu Rack	2
7	Rezystancyjne odbiorniki mocy	4

Dwa z trzech zainstalowanych na stanowisku inwerterów ma możliwość zmiany nastaw zabezpieczeń. Możliwe jest wprowadzenie zmiany nastaw progów wyzwolenia i czasu zadziałania zabezpieczeń pod/nadnapięciowych, pod/nadczęstotliwościowych oraz aktywacja lub dezaktywacja zabezpieczeń anty-wyspowych. Dzięki temu możliwe jest sprawdzenie wpływu zmiany nastaw zabezpieczenia na szybkość wykrywania pracy wyspowej.

Konfiguracja, w której może pracować stanowisko może być zmieniana. Na rysunkach 1-3 zaprezentowano trzy podstawowe konfiguracje pracujących urządzeń na stanowisku.

Konfiguracja przedstawiona na rys. 1 jest układem, w którym zasilacze AC symulują pracę sieci dystrybucyjnej. Umożliwia ona m.in. symulowanie zapadów napięć o dowolnej głębokości i dowolnym czasie ich trwania.

Z kolei, konfiguracja przedstawiona na rys. 2 reprezentuje układ zbliżony do sposobu pracy mikro sieci, która ze swej natury może pracować w wariacie pracy wyspowej. Układ inwertera wyspowego powinien zapewnić po stronie wyspowej napięcie o poprawnych dla pracy falowników parametrach.

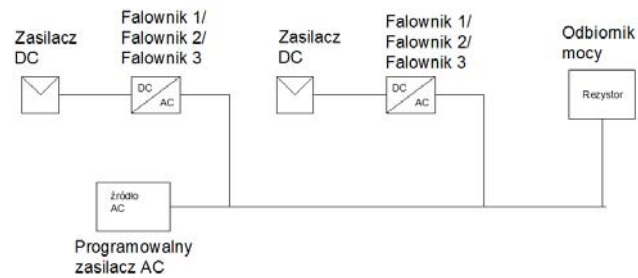
Przedstawiony na rys. 3 układ w zamierzeniu stabilizuje energię elektryczną pobieraną przez jej odbiorniki. W przypadku przejścia do pracy wyspowej falowników 1÷3 „generowana” w nich moc zostałaby przesłana przez inwerter wyspowy do odbioru.

Prezentacja wybranych badanych przypadków działania zabezpieczeń na stanowisku laboratoryjnym

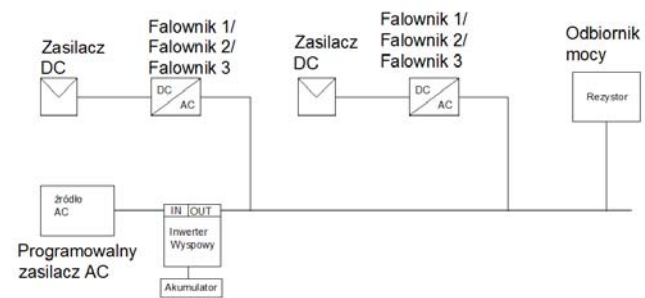
Na przedstawianym stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono liczne badania inwerterów fotowoltaicznych, w ramach projektu RIGRID. Wykonywano badania falowników indywidualnie oraz parami. Sprawdzano wpływ zbilansowania mocy odbieranej i generowanej oraz jednoczesnej pracy dwóch inwerterów zainstalowanych na stanowisku na szybkość detekcji pracy wyspowej. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki dwu z wielu analizowanych przypadków. Pierwszy przypadek (rys. 4) odpowiada konfiguracji z rys.1, w której pracują dwa falowniki jednocześnie. Suma mocy generowanej wynosi 1500 W i jest równa mocy odbieranej przez rezystory.

Stanowi to potencjalnie najtrudniejszy przypadek pod kątem wykrycia pracy wyspowej. Jak można zauważyć, w drugiej sekundzie badania następuje odłączenie zasilacza programowalnego AC od falowników i odbiorów, jednak praca wyspowa nie zostaje wykryta przez zaimplementowane w falownikach PV zabezpieczenia anty-wyspowe. Nastąpiło zwiększenie napięcia na zaciskach

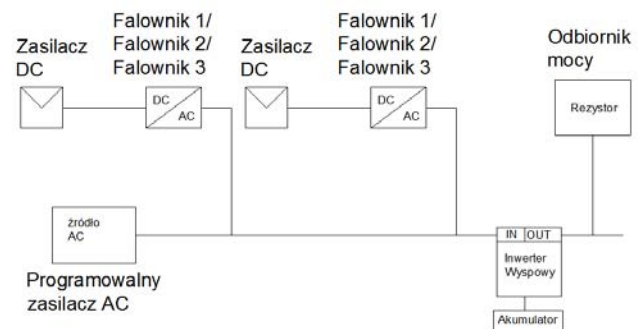
falowników oraz ciągła praca wyspowa trwająca do zakończenia eksperymentu (26s).



Rys. 1. Konfiguracja pracy falowników fotowoltaicznych dla układu symulującego pracę źródeł wytwórczych przyłączonych do sieci dystrybucyjnej [11]



Rys. 2. Konfiguracja pracy falowników fotowoltaicznych dla układu symulującego pracę źródeł wytwórczych w mikro sieci [11]



Rys. 3. Konfiguracja pracy falowników fotowoltaicznych z układem podtrzymania zasilania u odbiorców [11]

Kolejny z zaprezentowanych przebiegów prądów i napięć został wykonany w układzie przedstawionym na rys. 3. Można zaobserwować, że w przypadku przejścia do pracy wyspowej zabezpieczenia falowników, podobnie jak w poprzednim przypadku, nie wykryły pracy wyspowej. Jednak inwerter wyspowy z powodu zakłóceń napięcia odłączył odbiory od zasilania. Po odłączeniu odbiorów falowniki pracowały około 5s i zostały odłączone przez zaimplementowane zabezpieczenia (rys. 5).

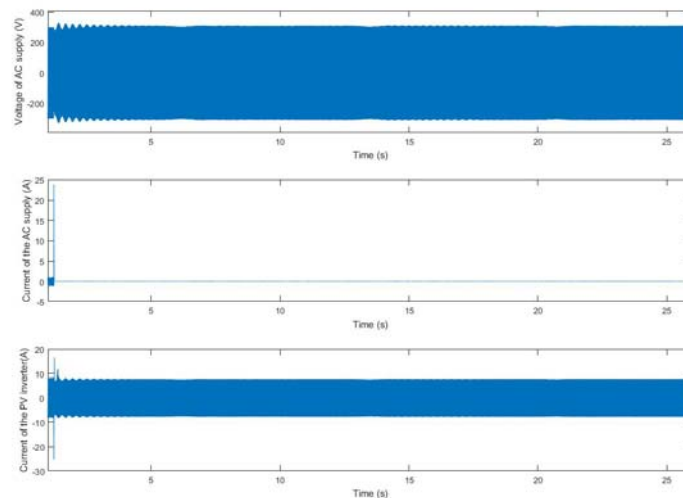
Należy zaznaczyć, że w większości analizowanych na stanowisku laboratoryjnym przypadków inwertery i ich zabezpieczenia zadziałały w sposób prawidłowy i w skuteczny sposób przeprowadziły proces detekcji pracy wyspowej, bądź stwierdziły jej brak.

Przedstawienie planów rozbudowy stanowiska o nowe funkcjonalności

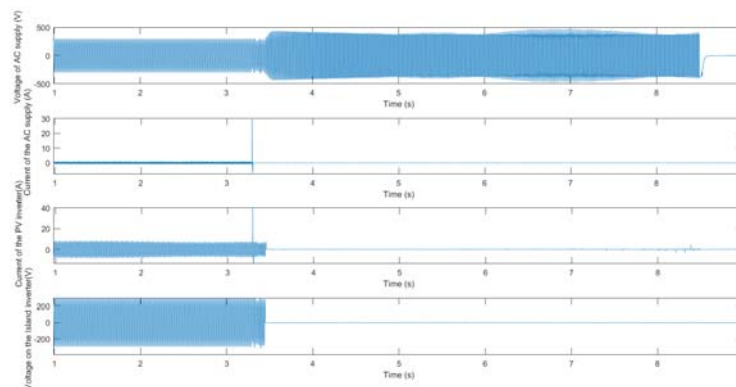
Aktualnie badania na stanowisku laboratoryjnym polegają na manualnym „ustawianiu” zakłóceń w programowalnych zasilaczach AC i obserwowaniu odpowiedzi ze strony elementów układu. Planowane jest wykorzystanie w przyszłości karty przetwornikowej cyfrowo-

analogowej, łączącej komputer z symulacją stanów sieci dystrybucyjnej z analogowym wejściem zasilacza AC. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe byłoby praktyczne sprawdzenie działania zabezpieczeń bazujących na zmiennych w czasie parametrach np. RoCoF lub VVS. Przy zastosowaniu rozwiązania, które również rejestrowałoby

odpowiedzi na zaburzenia z falowników PV, możliwa byłaby tzw. symulacja działania zabezpieczeń falowników w czasie rzeczywistym, czyli wpływanie obiektu fizycznego na symulację komputerową.



Rys. 4. Zapis napięć i prądów na stanowisku laboratoryjnym jednego z eksperymentów w konfiguracji 1 przy zachowaniu bilansu mocy generowanej i odbieranej [11]



Rys. 5. Zapis napięć i prądów na stanowisku laboratoryjnym jednego z eksperymentów w konfiguracji 3 przy zachowaniu bilansu mocy generowanej i odbieranej oraz zastosowaniu układu podtrzymania zasilania [11]

W chwili obecnej zainstalowane na stanowisku odbiory mają charakter rezystancyjny. Plany rozbudowy stanowiska obejmują zmianę, tj. wprowadzenie odbioru RLC o częstotliwości rezonansowej równej 50 Hz. Odbiór rezonansowy o częstotliwości sieciowej umożliwiłby wystąpienie sytuacji, w której zaburzenie ma charakter tłumionego sygnału sinusoidalnego. W przypadku wystąpienia pracy wyspowej taki odbiór, zdaniem autorów artykułu, znacznie utrudniałby detekcję wystąpienia takiego zdarzenia, ponieważ nie powodowałby najprawdopodobniej zadziałania zabezpieczeń pod- i nadczęstotliwościowych. Kolejnym rozszerzeniem stanowiska może być zainstalowanie na nim silnika indukcyjnego. W przypadku zaburzeń częstotliwości mogłoby wystąpić zjawisko przejścia z pracy silnikowej do generacyjnej, a tym samym stabilizowanie się warunków pracy w symulowanej mikrosieci. Jeszcze inną, rozważaną opcją rozbudowy stanowiska laboratoryjnego jest możliwość zainstalowania odbioru nieliniowego.

Podsumowania i wnioski

W artykule zostały omówione zagadnienia dotyczące budowy stanowiska laboratoryjnego, a w szczególności

jego elementów składowych i możliwych konfiguracji jego pracy, a także zaprezentowane wybrane badane przypadki działania zabezpieczeń na tym stanowisku.

Realizacja stanowiska do badań inwerterów fotowoltaicznych wykonana w Instytucie Elektroenergetyki PW w ramach projektu RIGRID jest istotnym krokiem w kierunku przejścia z badań czysto symulacyjnych do badań hardwarowo-symulacyjnych. Wyniki interakcji zachodzących pomiędzy instalowanymi w SEE urządzeniami energoelektronicznymi są trudne do uzyskania w drodze symulacji komputerowej i często są obarczone dużymi błędami.

Rozwój badań laboratoryjnych jest właściwym podejściem w przypadku analizy pracy jednostek generacji rozproszonej. Opisany sposób badań nabiera szczególnego znaczenia w przypadku małych – lokalnych systemów (sieci dystrybucyjnych) i mikrosieci, w których sposób zachowania się nawet niewielkich jednostek wytwórczych ma duże znaczenie dla parametrów jakościowych energii elektrycznej oraz bezpieczeństwa pracy w tych systemach.

Przeprowadzone badania na stanowisku laboratoryjnym pokazały, że w przypadku przejścia do pracy wyspowej zabezpieczenia falowników PV nie zawsze były w stanie

prawidłowo wykryć pracę wyspowa zasilaczy symulujących pracę paneli fotowoltaicznych. Przyczyny tego stanu rzeczy będą przedmiotem dalszych, szczegółowych badań.

Podziękowania

Niniejszy artykuł jest finansowany ze środków przewidzianych na realizację projektu RIGRID (Rural Intelligent Grid). Projekt ten jest realizowany w ramach inicjatywy ERA-Net Smart Grids Plus, przy wsparciu Programu Horyzont 2020 Unii Europejskiej.

Autorzy chcieliby też podziękować firmie Sunsol Sp. z o. o. za pomoc w uruchomieniu inwertera wyspowego.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Mirosław Parol, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: miroslaw.parol@ien.pw.edu.pl, mgr inż. Michał Polecki, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: michal.polecki@ien.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Parol M., Praca i przyłączenie źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnych średnich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 88 (2012), nr 6, 205-210
- [2] Parol M., Aspekty techniczne i prawne dotyczące pracy i przyłączenia źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnych niskich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 89 (2013), nr 5, 326-330
- [3] *Mikrosieci niskiego napięcia. Praca zbiorowa pod redakcją Mirosława Parola.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [4] Bower W., Ropp M., *Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems*, Sandia Corp., 2002
- [5] Trujillo C., Velasco D., Figueres E., Garcera G., *Local and Remote Techniques for Islanding Detection in Distributed Generators*, February 2010, [Online]. Available: www.intechopen.com/source/Intech-Local_and_remote...
- [6] Merino J., Mendoza-Araya P., Venkataramanan G., Baysal M., Islanding Detection in Microgrids Using Harmonic Signatures, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2015), no. 5, 2102-2109
- [7] Burek A., Rosołowski E., Zabezpieczenia układów generacji rozproszonej przed pracą wyspowa, *V Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze - Sieci'2004”*, 15-17 września 2004, Wrocław, 97-104
- [8] Parol M., Połeckii M., Parol R., Protection systems in low voltage AC microgrids w „*Możliwości i Horyzonty Ekoinnowacyjności. Samowystarczalność energetyczna i poprawa jakości powietrza*”. Praca zbiorowa pod redakcją D. Całusa, J. Flaszy i innych, Instytut Ochrony środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2017, 122-131
- [9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. Nr 93, poz. 623 z późniejszymi zmianami)
- [10] Bugdał R., Dyśko A., Burt G.M., Mc. Donald J.R., Performance analysis of the ROCOF and Vector Shift methods using a dynamic protection modelling approach, *Proc. 15th International Conference on Power System Protection “PSP’2006”*, Bled, Slovenia, September 6-8, 2006, 139-144
- [11] Raporty merytoryczne z realizacji międzynarodowego projektu badawczego RIGRID (Inteligentne Sieci Elektroenergetyczne na obszarach wiejskich) w latach 2016-2018. Prace niepublikowane.