

Marcin JARNUT¹, Paweł SZCZEŚNIAK¹,
Jacek KANIEWSKI¹, Grzegorz BENYSEK¹

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej (1)

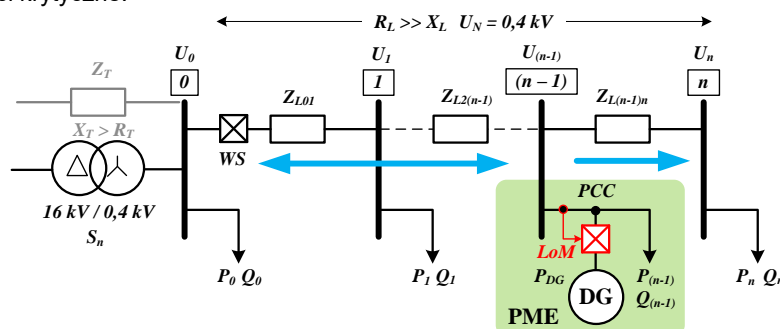
Zabezpieczenia przed pracą wyspową w mikroinstalacjach prosumenckich

Streszczenie. W artykule przedstawiono właściwości oraz wymagania stawiane układom zabezpieczeń przed pracą wyspową do stosowania w mikroinstalacjach prosumenckich. Omówiono także układy detekcji pracy wyspowej pracujące jako moduły rezydentne w przekształtnikach energoelektronicznych sprzęgających mikro źródła OZE. Przedstawiono charakterystykę rozwiązań aparaturowych. Przedstawiono rozwiązanie dedykowane dla mikroinstalacji prosumenckiej pracującej w trybie semi off-grid oparte na układzie SOGI FLL.

Słowa kluczowe: zabezpieczenie przed pracą wyspową, odnawialne źródła energii, mikroinstalacje prosumenckie

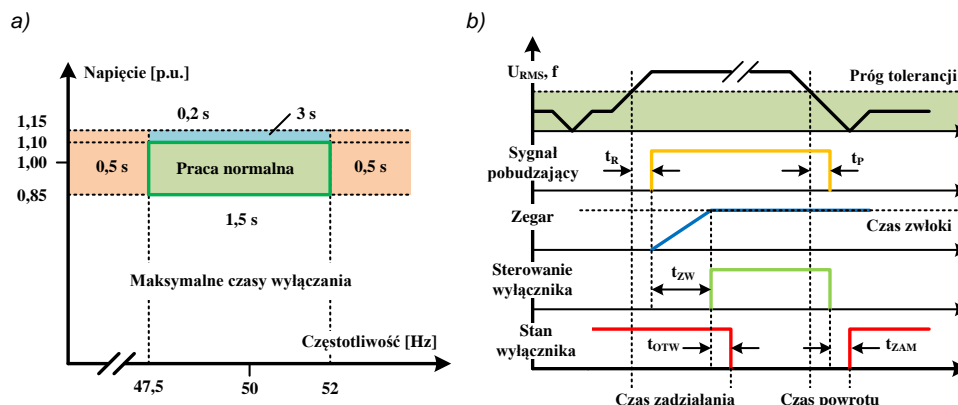
Wprowadzenie

Zmieniająca się struktura wytwarzania energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych, a szczególnie coraz powszechniejsze wykorzystanie źródeł rozproszonych, wymaga stosowania nie tylko nowych technik regulacji w stosunku do istniejących elementów systemu, a także stosowania nowych rozwiązań technicznych w zakresie np. technik zabezpieczeń. W tradycyjnych promieniowych sieciach dystrybucyjnych występuje jedno źródło energii (napięcia) i znajduje się ono na początku układu promieniowego, w węźle stacyjnym (węzeł „0” na rys.1). W nowoczesnych systemach ze źródłami rozproszonymi (DG), w głębi układu promieniowego przyłączane są mikro źródła odnawialne (OZE) lub kogeneracyjne (CHP) współpracujące z siecią. W ten sposób sieć dystrybucyjna na odcinku pomiędzy węzłem stacyjnym a węzłem przyłączeniowym (PCC) np. Posumenckiej Mikroinstalacji Energoelektrycznej (PME) staje się linią dwustronnie zasilaną [1]. Ze względu na możliwość wtórnego zasilania sieci oraz ograniczoną możliwość stabilizacji napięcia w miejscu przyłączenia systemu sprzęgające mikro źródła rozproszone z siecią dystrybucyjną wyposażone muszą być w układy zabezpieczeń zdolne do odłączenia tych źródeł w przypadku, gdy parametry napięcia (wartość skuteczna lub częstotliwość) w miejscu przyłączenia przekroczą wartości krytyczne.



Rys. 1. Schemat uproszczonej sieci promieniowej z źródłem rozproszonym.

Przy braku teleinformatycznej koordynacji mikro źródeł rozproszonych z poziomu SCADA operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) zabezpieczenia te muszą interaktywnie reagować nie tylko na awaryjne zaniki (lub znaczące pogorszenie parametrów) napięcia w PCC ale także na wyłączenia serwisowe w węzle stacyjnym, minimalizując zagrożenia dla służb serwisowych przy pracach bez napięcia. Zgodnie z wymaganiami formalnymi i technicznymi zawartymi w Instrukcjach Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnych (IRIESD) źródła rozproszone nie mogą formować układów wyspowych obejmujących infrastrukturę OSD i dlatego wymagają stosowania zabezpieczeń przed nieintencjonalną pracą wyspową (z ang. Anti-Islanding Protection lub Loss of Mains – LoM). Detekcja pracy wyspowej oraz funkcje ewentualnego intencjonalnego wydzielenia wyspy w ramach infrastruktury należącej do odbiorcy – prosumenta realizowane są w układach zabezpieczeń typu LoM (Loss of Mains). Szczegółowe warunki współpracy mikro źródeł z siecią dystrybucyjną, w tym nastawy tych zabezpieczeń, określone są w IRiESD oraz normach przedmiotowych: IEEE-929, IEEE 1547, IEC61727, PN EN 50438, VDE 0126, VDE-AR-N 4105. W zależności od wymagań krajowych poszczególne wartości nastawa progów wyzwolenia zabezpieczenia jak i wymagane czasy zadziałania oraz czasy opóźnienia zadziałania (rys.2b) w przypadku realizacji funkcji podtrzymujących typu Low Voltage Fault Ride-Through (LVFRT) mogą się różnić. Na rys.2 przedstawiono graniczne czasy wyłączenia oraz uproszczoną zasadę działania podczas wystąpienia zaburzenia w napięciu sieci dystrybucyjnej w miejscu przyłączenia mikro generatora do sieci dystrybucyjnej.



Rys. 2. Wymagania stawiane zabezpieczeniom LoM wg PN EN 50438: a) wymagane czasy wyłączenia; b) czasy zwłoki przy powrocie do współpracy z siecią.

Podstawą bezpiecznej instalacji mikro źródeł rozproszonych współpracujących z siecią dystrybucyjną jest posiadanie przez nie zabezpieczeń antywyspowych, których skuteczność działania jest potwierdzona odpowiednim certyfikatem stwierdzających zgodność ze standardami [2].

Zabezpieczenie antywyspowe typu LoM w mikroinstalacjach prosumenckich

Zabezpieczenia LoM, ze względu na miejsce instalacji, występują w dwóch wariantach funkcjonalnych:

- zabezpieczenie rezydentne w interfejsie energoelektronicznym PEI mikro źródła;
- zewnętrzne zabezpieczenie aparatuowe.

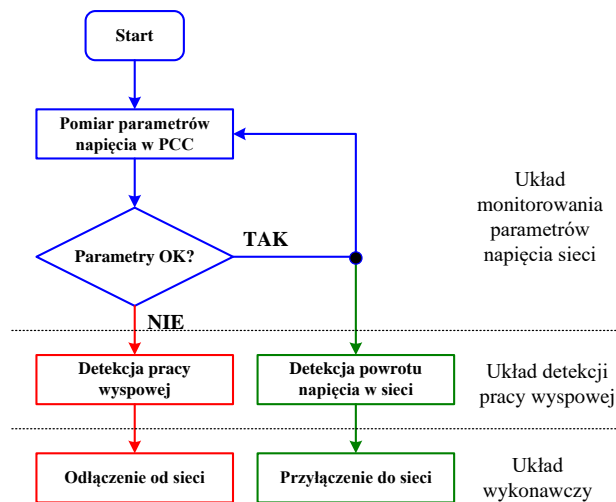
Pierwsze z nich stosowane są w układach przekształtnikowych zarówno małej jak i dużej mocy, drugie, ze względu na koszt, w układach przekształtnikowych o mocach powyżej 30 kVA i w układach z generatorami wirującymi bezpośrednio sprzęganych z siecią (bez

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

przekształtników energoelektronicznych). Zabezpieczenia LoM składają się z trzech podstawowych bloków funkcjonalnych:

- układu monitorowania parametrów sieci dokonujących pomiaru wartości chwilowych napięcia (w układach aktywnych także prądu) w miejscu przyłączenia a następnie wyznaczających parametry charakterystyczne sygnału napięcia takich jak wartość skuteczna U_{RMS} , częstotliwość f i faza θ ,
- układu detekcji pracy wyspowej reagującego: w układach pasywnych na spadek lub wzrost wartości skutecznej ΔU_{RMS} , częstotliwości Δf lub fazy $\Delta \theta$ napięcia w miejscu przyłączenia; w układach aktywnych na zmianę impedancji sieci ΔZ_S ; w układach z transmisją sygnału testowego na zanik sygnału testowego. Układ ten jest także odpowiedzialny za realizację wymaganych czasów opóźnień przy przechodzeniu i powrocie z pracy wyspowej.
- układu wykonawczego – łącznika wyspowego składającego się, zgodnie z wymaganiami, z jednego lub dwóch szeregowo połączonych i niezależnie sterowanych łączników, z których przynajmniej jeden musi być łącznikiem stwarzającym przerwę izolacyjną.

Uproszczony graf działania zabezpieczenia LoM przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Uproszczony graf działania zabezpieczenia LoM.

Aparatowe zabezpieczenia LoM.

Zabezpieczenia aparatuowe LoM, w odróżnieniu od zabezpieczeń rezydentnych, nie mają możliwości wykorzystania aktywnych metod detekcji pracy wyspowej. Spowodowane jest to brakiem możliwości generowania zaburzeń testowych o energii wystarczającej na określenie odpowiedzi ze strony sieci dystrybucyjnej. W zabezpieczeniach aparatuowych stosuje się zatem metody pasywne oparte na detektorach nad- i podnapięciowych – OVP/UVP (w każdej fazie), nad- i podczęstotliwościowych – OFP/UFP, a także implementuje się metody przyrostowe takie jak Rate of Change of Frequency (ROCOF), czy Voltage Vector Shift (VVS) [3].

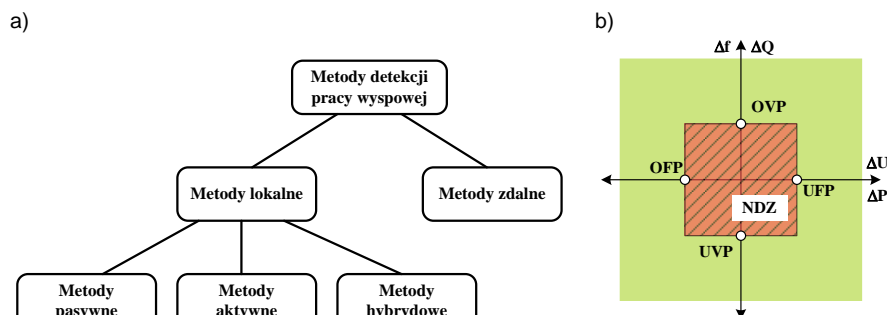
Tabela 1. Charakterystyka wybranych zabezpieczeń aparatów LoM.

Parametr	Zabezpieczenie aparatuowe LoM				
	SMA Grid Gate	Bender VMD460-NA	Ziehl UFR1001E	ABB CM-UFD.M31	Lovato PMVF10
Metody detekcji	ROCOF, VVS	ROCOF, VVS	ROCOF, VVS	ROCOF, VVS	ROCOF
Zakres napięć	46 V ... 300 V	50...260 V	40...520 V	0 ... 312 V	$0,825 U_n$ $1,13 U_n$
Zakres częstotliwości	44 Hz ... 65 Hz	45 Hz ... 65 Hz	45 ... 65 Hz	40 ... 70 Hz	$\pm 0,3$ Hz ± 1 Hz
Czasy	0.04 s ... 300 s	40 ms...60 min	0.05 ... 130.0 s	0.06 ... 600 s	≤ 100 ms
Zgodność z normami	CEI 0-21, VDE-AR-N 4105	CEI 0-21, VDE-AR-N 4105	VDE-AR-N 4105	VDE-AR-N 4105	b.d.
Cena [PLN]	2 190	2 250	2 155	3 500	3 900

Zabezpieczenia aparatuowe nie są urządzeniami tanimi (patrz ceny w tabeli 1) i ich stosowanie w przypadku układów przekształtnikowych małej mocy (do 4,6 kVA) nie jest uzasadnione, ze względu na koszt porównywalny z kosztem samego przekształtnika (3 – 5 tys. PLN).

Metody detekcji pracy wyspowej

W literaturze przedmiotu [3] spotkać można wiele metod detekcji pracy wyspowej, które podzielić można na kilka podstawowych grup jak to pokazano na rys.3a.



Rys. 4. Detekcja pracy wyspowej: a) uogólniony podział metod; b) ilustracja strefy nieczułości NDZ.

- **Metody zdalne** wymagają zastosowania systemów transmisji sygnałów testowych (w trybie ciągłym lub sporadycznie – na wyłączenie) pomiędzy Operatorem a wyłącznikiem wyspowych i stosowane są obecnie zazwyczaj w układach dużych mocy (powyżej 100 kW). W niektórych krajach gdzie wdrożono systemy inteligentnego pomiaru np. Włochy, wymaga się także aby wyłączniki wyspowe w układach mikro generacyjnych powyżej 6 kVA wyposażane były w wejście komunikacyjne (w standardzie IEC 61850) umożliwiające zdalne odłączenie od sieci sygnałem od Operatora. Konieczność stosowania i utrzymywania infrastruktury komunikacyjnej powoduje, że metody te są metodami drogimi w implementacji rzadko stosowanymi.
- **Metody pasywne** wykorzystują pomiar parametrów statycznych napięcia tj. wartość skuteczna – Under Voltage Protection (UVP) i Over Voltage Protection (OVP), częstotliwość – Under Frequency Protection (UFP) i Over Frequency Protection (OFFP), odkształceń napięcia – Harmonic Distortion (HD) lub dynamicznych napięcia tj. skoku fazy napięcia – Phase Jump Detection (PJD), skoku przesunięcia fazowego napięcia i prądu – Voltage Vector Shift (VS), przyrostu częstotliwości – Rate of

$$(1) \quad G_1(s) = \frac{u'(s)}{u(s)} = \frac{k \cdot \omega \cdot s}{s^2 + k \cdot \omega \cdot s + \omega^2}$$

$$(2) \quad G_2(s) = \frac{qu'(s)}{u(s)} = \frac{k \cdot \omega^2}{s^2 + k \cdot \omega \cdot s + \omega^2}$$

Układy SOGI stanowią bardzo uniwersalne rozwiązanie pozwalające na generowanie sygnałów ortogonalnych (Orthogonal Signal Generator – OSG) z wykorzystaniem jednego napięcia pomiarowego, co w odróżnieniu od układów opartych na przekształceniu Clarka, pozwala na ich stosowanie zarówno w układach trój- jak i jednofazowych. Układ SOGI FLL jest modyfikacją układu SOGI PLL powstałym przez wprowadzenie dodatkowej pętli sprzężenia zwrotnego, co pozwala na osiągnięcie w takim układzie funkcji filtracji adaptacyjnej. Uproszczony schemat układu SOGI FLL przedstawiono na rys.5. W układzie z tego rysunku do wyznaczenia kąta fazowego θ zastosowano metodę „arcus tangens” (\tan^{-1}).

$$(3) \quad \theta = \arctan\left(\frac{qu'}{u'}\right); \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$(4) \quad U_m = \sqrt{(u')^2 + (qu')^2}$$

Oprócz tej metody w aplikacjach często stosuje się także metodę przekształcenia Parka. Wyznaczone z zależności (3) oraz (4) sygnały f oraz U_m mogą być wykorzystywane w zabezpieczeniach LoM do detekcji pracy wyspowej odpowiednio w członach nad- i podczęstotliwościowych OFP/UFP oraz nad- i podnapięciowych OVP/UVP, a w przypadku zastosowania dodatkowych filtrów SOGI zestrojonych na wyższe harmoniczne napięcia ($5 \cdot \omega_{REF}$ lub $7 \cdot \omega_{REF}$) także w członach detekcji HD harmonicznych napięcia.

Detekcja pracy wyspowej w LoM z SOGI FLL i hybrydowym układem detekcji.

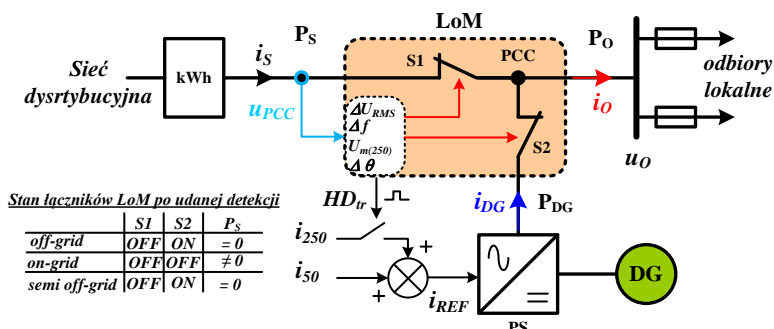
Przekształtniki sprzęgające źródła rozproszone DG działają w trybie prądowym, dlatego w przypadku zaniku napięcia sieci zasilającej w miejscu przyłączenia zazwyczaj następuje skokowa zmiana bilansu mocy czynnej i biernej co prowadzi do wzrostu lub spadku napięcia w PCC oraz/lub skokowej zmiany fazy. Skokowej zmianie ulega także pulsacja napięcia w pierwszym okresie po wystąpieniu zaburzenia. Ze względu na stosowanie w tych przekształtnikach układów synchronizacji typu FLL pulsacja napięcia stabilizuje się zazwyczaj w kilku następnych okresach co utrudnia detekcję pracy wyspowej takich układów przy pomocy pasywnych układów typu OFP/UFP. Pozostają one natomiast skuteczne w przypadku bardziej złożonych awarii systemowych wynikających z utraty stabilności systemu objawiającej się długookresowymi i znacznymi zmianami częstotliwości napięcia lub w przypadku mikro źródeł z generatorami wirującymi, sprzęganych z siecią bez udziału przekształtników. Najtrudniejszym do detekcji przypadkiem zaniku napięcia w sieci dystrybucyjnej jest sytuacja gdy w miejscu przyłączenia generatora rozproszonego występuje pełne zbilansowanie mocy lub niewielka różnica pomiędzy mocą generowaną P_{DG} i mocą P_o w obwodach odbiorczych.

$$(5) \quad P_s = P_L - P_{DG} \approx 0$$

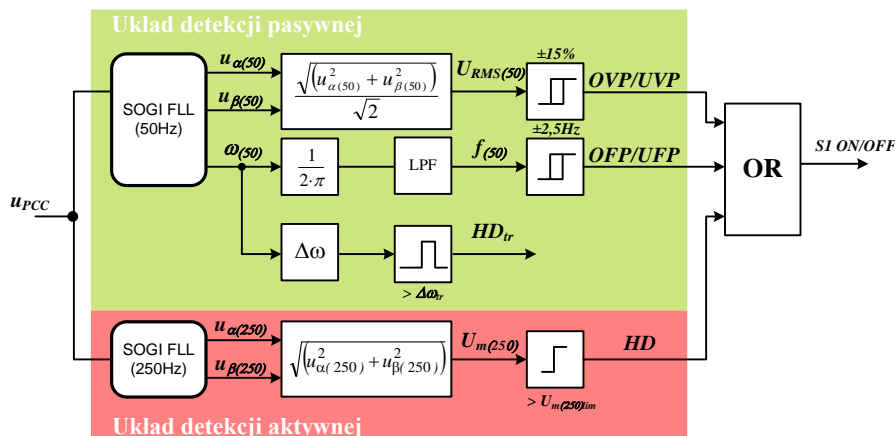
W tradycyjnych mikroinstalacjach prosumenckich (PME) bez magazynów energii pracujących w trybie grid-connected stan ten jest nietrwały i zachodzi kilka razy na dobę. Inaczej jest w przypadku PME działających w trybie semi off-grid, które w stanie zbilansowania mocy mogą pracować przez dłuższy czas [5]. Znaczący to, że PME pracują w strefie nieczułości (w obszarze NDZ z rys. 4b) pasywnych układów detekcji, a zanik napięcia sieci może nie zostać przez nie wykryty przez dłuższy czas. Przykład braku zadziałania zabezpieczenia LoM w takim przypadku na rys.7.

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

a)



b)

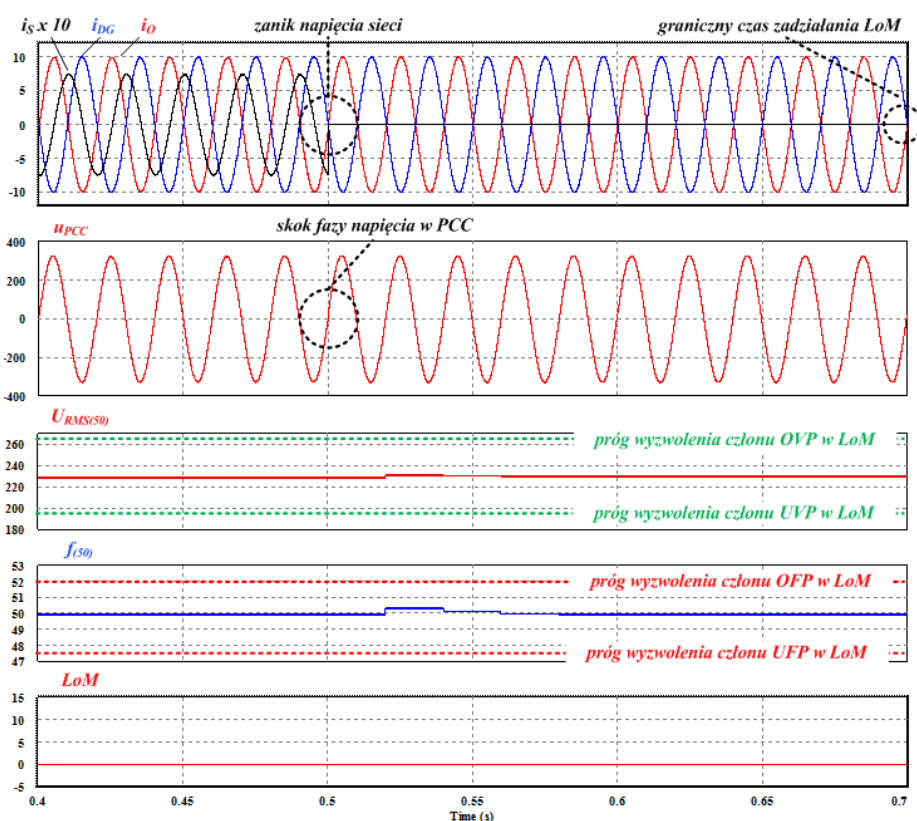


Rys. 6. Zabezpieczenie LoM z układem SOGI FLL w mikroinstalacji prosumenckiej: a) schemat ogólny mikroinstalacji; b) schemat blokowy układu detekcji pracy wyspowej.

W proponowanej przez autorów metodzie hybrydowej, układ detekcji pracy wyspowej zawiera dwa człony: pasywny oparty na układach OVP/UDP i OFP/UFP oraz człon aktywny oparty na układzie HD (rys.6b). Metoda wykorzystuje intencjonalne generowanie 5-tej harmonicznej w prądzie falownika sprzęgającego generator rozproszony DG z punktem PCC mikroinstalacji prosumenckiej PME, a następnie detekcję odpowiedzi systemu w postaci pomiaru amplitudy 5-tej harmonicznej napięcia w PCC. W odróżnieniu od metod aktywnych zaburzenie to nie jest generowane w sposób ciągły, a jedynie służy potwierdzeniu awarii sieci dystrybucyjnej po uprzedniej detekcji skokowej zmiany pulsacji harmonicznej podstawowej napięcia w PCC. Po stwierdzeniu zmiany pulsacji $\Delta\omega$ przekraczającej 2 rad/s, z pewnym opóźnieniem (60 ms) następuje krótkotrwała (40 ms) aktywacja członu aktywnego sygnałem HD_{tr} i dodanie do sygnału referencyjnego prądu wyjściowego falownika zaburzenia o częstotliwości 250 Hz (5-ta harmoniczna) i amplitudzie 100 mA.

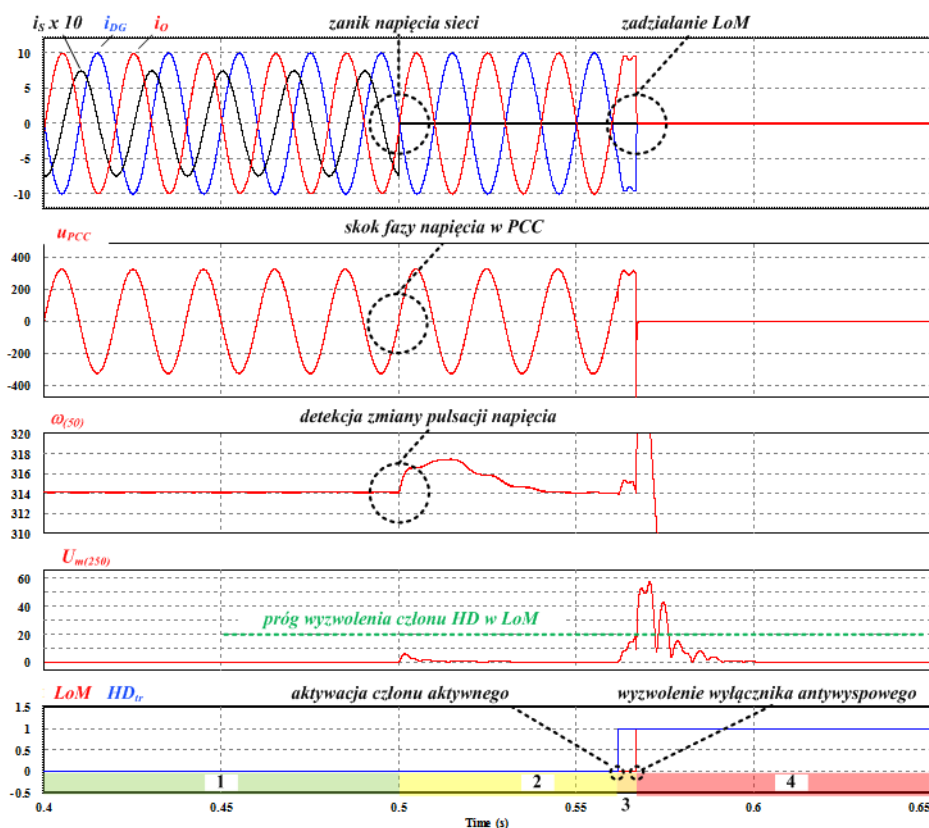
$$(6) \quad i_{REF} = \begin{cases} i_{50} & \text{gdy } HD_{tr} = 0 \\ i_{50} + i_{250} & \text{gdy } HD_{tr} = 1 \end{cases}$$

W normalnym stanie sieci dystrybucyjnej zaburzenie to nie powoduje odkształcenia napięcia w PCC. Kiedy jednak sieć jest odłączona impedancja w PCC jest dużo większa i prąd harmoniczny wywołuje proporcjonalny do przyrostu impedancji przyrost amplitudy 5-tej harmonicznej napięcia. Amplituda tej harmonicznej $U_{m(250)}$ jest wyznaczana w układzie monitorowania 5-tej harmonicznej napięcia członu aktywnego HD opartym na układzie SOGI FLL nastrojonym na pulsację $5 \cdot \omega_{REF}$. Po przekroczeniu przez wyznaczony sygnał wartości $U_{m(250)} > 6\% U_{m(50)}$ (limit z normy PN EN 50160) następuje wyzwolenie wyłącznika wyspowego. W zależności od wybranego trybu pracy interfejsu jest to odłączenie od sieci łącznikiem S1 i przejście do pracy zasilania odbiorów lokalnych lub całkowite odstawienie mikro źródła poprzez wyłączenie także łącznika S2. Przykład skutecznego działania LoM z hybrydowym układem detekcji w sytuacji zbilansowania mocy w PME podczas zaniku napięcia w sieci dystrybucyjnej przedstawiono na rys.8.



Rys. 7. Przebiegi czasowe prądów, napięć i sygnałów w układzie z LoM opartym na pasywnych układach detekcji pracy wyspowej typu OVP/UVP i OFP/UFP podczas zaniku napięcia w sieci dystrybucyjnej.

IX Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 8. Przebiegi czasowe prądów, napięć i sygnałów w układzie z LoM opartym na hybrydowym układzie detekcji pracy wyspowej z członem HD podczas zaniku napięcia w sieci dystrybucyjnej (obszar „1” – normalny stan sieci dystrybucyjnej, „2” – opóźnienie aktywacji członu aktywnego, „3” – testowanie stanu sieci w proponowanej metodzie hybrydowej, „4” – praca wyspowa).

Uzyskany w badaniach czas detekcji pracy wyspowej w przypadku metody hybrydowej HD nie przekroczył 70 ms, a jego wartość zależy głównie od czasu zwłoki aktywacji członu ciągłego. Metoda ta pozwala na uniknięcie sytuacji z rys. 7, gdzie w stanie prawie pełnego zbilansowania mocy w mikroinstalacji i przy braku członu aktywnego LoM, po zaniku napięcia sieci (w chwili 0,5 s), nie nastąpiło skuteczne odłączenie od sieci w dopuszczalnym czasie granicznym 0,2 s.

Podsumowanie

Zagadnienia skutecznego zabezpieczenia przed pracą wyspową sieci dystrybucyjnych zawierających mikroinstalacje prosumenckie jest bardzo istotne z punktu widzenia bezpiecznej współpracy PME z resztą systemu elektroenergetycznego. Pojawiające się nowe rozwiązania układów sprzęgających mikro źródła pozwalają na zwiększenie konsumpcji własnej energii w nich generowanych, powodują jednak, że tradycyjne układy detekcji pracy wyspowej, w określonych przypadkach nie są w stanie wykryć zaniku napięcia w sieci. Zaproponowane w artykule rozwiązanie pozwala

zwiększyć pewność detekcji takiego stanu sieci nawet w warunkach zbilansowania mocy w punkcie przyłączenia (tryb semi off-grid) mikroinstalacji. Ponadto w odróżnieniu od innych metod aktywnych nie powoduje trwałego pogorszenia parametrów jakości energii w PME. Może być stosowane w układach jedno- i trójfazowych. Wstępne testy rozwiązania wykazały jego skuteczność w zastosowaniach do mikroinstalacji zbilansowanych mocowo, gdzie przekształtnik sieciowy interfejsu OZE pracuje w trybie prądowym. Kolejnym krokiem autorów będzie adaptacja metody do układów sprzęgających z przekształtnikami zdolnymi do płynnego przejścia z trybu pracy prądowej do napięciowej (z trybu grid-connected do islanded).

Podziękowania

Badania wykonane w ramach projektu badawczego GEKON o akronimie REWIPROMIEN finansowanego ze środków NCBiR i NFOŚiGW na podstawie umowy nr GEKON1/02/213877/31/2015

Literatura

1. Jamut M., Benysek G., *Mikroinstalacje OZE w systemie dystrybucyjnym nN*, Innowacyjne materiały i technologie w elektrotechnice : innowacje kierunkiem rozwoju elektrotechniki XXI w., i-MITEL 2014, VIII konferencja naukowo-techniczna. Lubniewice, Polska, 2014
2. PN-EN 50438: 2014, *Wymagania dla instalacji mikrogeneracyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia*.
3. Ku Nurul Edhura Ku Ahmad, Jeyraj Selvaraj, Nasrudin Abd Rahim, *A review of the islanding detection methods in grid-connected PV inverters*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21 (2013), pp. 756–766
4. Ciobotaru, M., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., *A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator*, IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '06, pp.1-6, 18-22 June 2006
5. Jamut M., Benysek G., Kaniewski J., *Mikroinstalacja prosumencka w trybie semi off-grid*, Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym - SENE 2015, XII konferencja naukowa. Łódź, Polska, 2015

Autorzy: dr inż. Marcin Jamut, dr inż. Paweł Szcześniak, dr inż. Jacek Kaniewski, prof. dr hab. inż. Grzegorz Benysek, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, E-mail: m.jamut@iee.uz.zgora.pl, p.szczeniak@iee.uz.zgora.pl, j.kaniewski@iee.uz.zgora.pl, g.benysek@iee.uz.zgora.pl,