

doi:10.15199/48.2024.07.38

Ocena skuteczności wykrywania niepożądanego pracy przekształtnika na wydzieloną grupę odbiorników

Streszczenie. Artykuł zawiera prezentację i analizę wyników badań dotyczących wpływu parametrów definiujących kształt prądu realizujący proces aktywnego dryftu częstotliwości metodą sinus-hyperboliczną na współczynnik zniekształceń harmonicznych generowanego prądu oraz na czas detekcji skutecznego przejścia przekształtnika do pracy wyspowej.

Abstract. The article contains a presentation and analysis research results on the influence of parameters defining the shape of the current implementing the process of active frequency drift using the sine-hyperbolic function on the total harmonic distortion factor of the generated current and on the detection time of transition of the converter to island operation. (Assessment of the effectiveness of detecting unintentional islanding operation of the power converter).

Słowa kluczowe: wykrywanie pracy wyspowej, przekształtnik, odnawialne źródła energii, zabezpieczenie.

Keywords: detection of unintentional islanding operation, power converter, renewable energy sources, circuit protection.

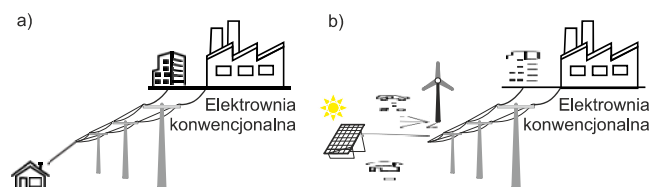
Wstęp

Światowe trendy ekologiczne powodują dynamiczny rozwój branży związanej z pozyskiwaniem energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE). W różnych częściach świata zauważalne są zmiany najbliższego otoczenia, w którym pojawia się coraz to więcej turbin wiatrowych czy też paneli fotowoltaicznych. Rosnące zainteresowanie tematyką pozyskiwania tzw. zielonej energii dodatkowo napędzane jest uwarunkowaniami politycznymi i ekonomicznymi. W wielu krajach świata, nie tylko w tych wysoce rozwiniętych, zachęca się konsumentów energii elektrycznej do bycia jednocześnie producentami tejże energii. Służą ku temu między innymi programy finansowe polegające na współfinansowaniu budów przydomowych mikroelektrowni. Nie brakuje także powstawania inwestycji na średnią i dużą skalę (elektrowni większych mocy) ze względu na ich dochodowość. Tak szybki i dynamiczny rozwój rynku produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych wiąże się z wieloma korzyściami w strukturze elektroenergetycznej. Rozproszenie produkcji energii elektrycznej przede wszystkim zmniejsza straty przesyłowe w sieciach elektroenergetycznych ze względu na skrócenie drogi pomiędzy producentami a odbiorcami energii elektrycznej. Zwiększa się przez to ilość mocy zainstalowanej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE), zaś prosumenci odczuwają korzyści ekonomiczne związane z obniżeniem rachunków za energię elektryczną oraz zyskują pewnego rodzaju niezależność od dostawcy energii. Zgodnie z danymi opublikowanymi w raportach rocznych operatora polskiego KSE (Polskie Sieci Elektroenergetyczne) [1], w latach 2020, 2021 oraz 2022 udział mocy zainstalowanej w KSE wyniósł odpowiednio 20,69%, 28,12% oraz 35,90%.

Pozyskiwanie energii z niewyczerpywalnych źródeł oprócz wymienionych wcześniej zalet, wprowadza pewne zagrożenia. Włączanie do sieci elektroenergetycznej wielu drobnych wytwórców energii elektrycznej stawia przed nami, użytkownikami tejże sieci, nowe wyzwania. Pierwszym, głównym „globalnym” problemem jest zapewnienie możliwości bilansowania energii w całym systemie elektroenergetycznym. Brak zbilansowania popytu i podaży energii elektrycznej prowadzi do destabilizacji częstotliwości w sieci zasilającej. W krytycznych przypadkach, może prowadzić to do tzw. blackoutów – całkowitego zaprzestania działania sieci

elektroenergetycznej. Jest to problem, który monitorują i regulują dyspozytorzy nadzorujący KSE.

Lokalne sieci zasilające, niskiego napięcia, zmagają się jeszcze z innymi problemami. Zbyt duża ilość wprowadzanej energii elektrycznej do sieci często powoduje nadmierowe wzrosty napięć. Przez to, dodatkowo wzrasta ryzyko destabilizacji parametrów elektrycznych sieci zasilającej w wyniku przeciążeń termicznych i/lub zakłóceń w napięciu sieci zasilającej. Rozchwianie parametrów lokalnej sieci zasilającej może skutkować odłączeniem pewnego fragmentu tejże sieci od całości systemu elektroenergetycznego. To co wydarzy się w wydzielonym fragmencie sieci zasilającej w chwili tuż po odłączeniu się zależy od struktury powstałej mikro sieci. Dlatego też przeanalizowano dwie struktury systemów elektroenergetycznych przedstawione na rysunku niżej.



Rys. 1. Uprozczone modele sieci elektroenergetycznych w ujęciu klasycznym (a) oraz w ujęciu rozproszonym (b)

Struktura klasyczna odwzorowuje sieć zasilającą przed nastaniem „zielonej transformacji”. W tej strukturze sieci, nie ma prosumentów i małych wytwórców energii elektrycznej. Znajdują się w niej jedynie znaczący wytwórcy energii elektrycznej w postaci konwencjonalnych elektrowni dużych mocy oraz odbiorcy tejże energii. Droga przepływu prądu elektrycznego w tego rodzaju sieci zasilającej jest prosta – od wytwórcy trafia ona do odbiorcy. W przypadku, gdy któryś z obszarów sieci zostaje odłączony od systemu, wiadome jest, że w tym obszarze występuje całkowity zanik napięcia. Operatorzy sieci, najczęściej eliminują uszkodzony fragment linii zasilającej z systemu przesyłowego i zasilają pozbawionych energii elektrycznej odbiorców za pomocą przełączy w sieci zasilającej. Dzięki temu prąd może popłynąć inną drogą. W przypadku, gdy nie jest możliwe zasilanie danych odbiorców z wykorzystaniem innych linii, pozostają oni bez dostępu do energii elektrycznej do czasu naprawy infrastruktury sieci.

Nowoczesna topologia sieci zasilającej, ma dodatkowo zagrożenia wynikające z obecności w niej rozproszonej

produkcji energii elektrycznej, co może prowadzić do niecelowego zasilania wydzielonego fragmentu sieci zasilającej, tzw. pracy wyspowej. W akcie prawnym obowiązującym w Polsce, tj. Polskiej Normie PN-EN-62116 „Falowniki fotowoltaiczne włączone do publicznej sieci energetycznej” [2], znajduje się dokładna definicja pracy wyspowej. Została ona sformułowana następująco: „Stan nieintencjonalnej pracy wyspowej występuje, kiedy jedno lub więcej źródeł rozproszonych po odłączeniu systemu elektroenergetycznego pozostaje w trybie pracy”. Istnieje wiele możliwych przyczyn wydzielenia się fragmentu sieci zasilającej, a wśród nich można wymienić:

- otworzenie się wyłącznika sieciowego na skutek stanów awaryjnych w sieci zasilającej (np. zwarcie),
- przypadkowe zadziałanie urządzeń zabezpieczających sieć zasilającą przy normalnym stanie pracy sieci zasilającej,
- w wyniku celowego wyłączenia sieci na czas przeprowadzania prac serwisowych na liniach zasilających,
- w wyniku błędu ludzkiego,
- czy też w wyniku działania sił natury.

Biorąc pod uwagę powyższe, powstanie wydzielonego obszaru sieci zasilającej nie jest stanem o bardzo niskim prawdopodobieństwie wystąpienia, ze względu na dużą liczbę czynników, które mogą ją wywołać. W polskim prawie energetycznym, ale i nie tylko, niepożądana praca na wydzieloną grupę odbiorników jest zabronionym stanem pracy. Oznacza to jednoznacznie, że w przypadku wydzielenia się fragmentu sieci od całości systemu elektroenergetycznego, powinno nastąpić automatyczne wyłączenie wszelkich źródeł wytwórczych znajdujących się w wydzielonym obszarze sieci.

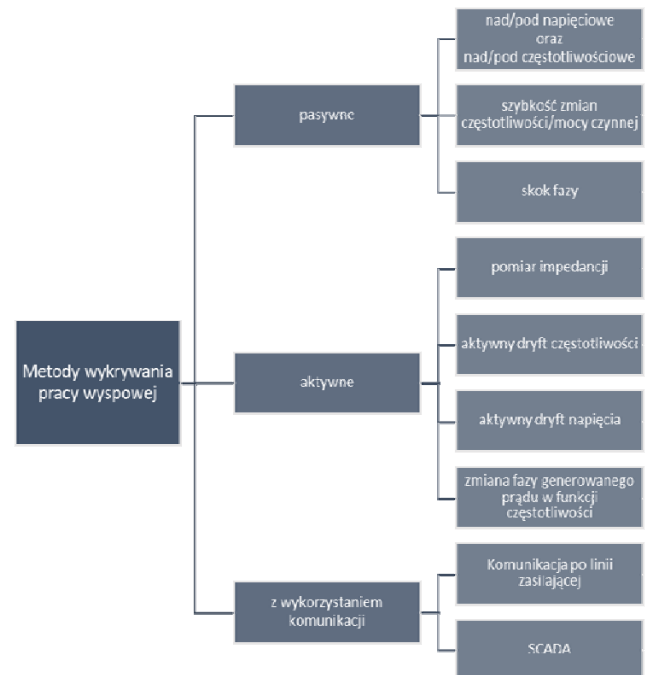
W przypadku powstania odseparowanego fragmentu sieci, nie można mieć pewności o braku napięcia w tym fragmencie sieci. Bez względu na przyczynę wydzielenia się fragmentu sieci energetycznej zawierającej jednocześnie źródło/a oraz odbiorniki energii elektrycznej występują poważne zagrożenia związane ze stanem niepożądanego trybu pracy wyspowej, których nie można lekceważyć. Między innymi:

- wystąpienie poważnego zagrożenia zdrowia i/lub życia pracowników serwisujących linie zasilające,
- powstanie uszkodzeń aparatury i obiektów infrastruktury sieciowej w wyniku niewystarczającej mocy zwarciowej źródła energii,
- uszkodzenie urządzeń elektrycznych w obszarze wydzielonej sieci,
- uszkodzenie infrastruktury sieciowej i/lub przekształtnika sprężającego OZE z siecią zasilającą na skutek ponownego przyłączenia wydzielonego fragmentu sieci do całości systemu elektroenergetycznego bez wcześniejszej synchronizacji napięć w obu systemach.

Metody wykrywania niepożądanego trybu pracy wyspowej

Wśród pozycji literaturowych zawierających przeglądy wraz z porównaniem cech poszczególnych rodzajów algorytmów detekcji niepożądanego trybu pracy wyspowej znajdują się [3]-[7]. Grafika uwzględniająca podstawowy podział metod wykrywania niepożądanego trybu pracy przekształtnika na wydzieloną grupę odbiorników przedstawia rys. 2. Do porównywanych właściwości podmiotowych algorytmów najczęściej zalicza się: szybkość wykrywania wyspowego stanu pracy, zakres strefy nieczułości, koszt obliczeniowy oraz wpływ na jakość energii. Według wskazanych powyżej odnośników do literatury, wśród metod często implementowanych w algorytmach sterowania przekształtnikami są metody wykorzystujące aktywny drift

częstotliwości [8]-[10] (AFD – *ang. Active Frequency Drift*). Wymagają one zaimplementowania w przekształtniku algorytmów, które nieznacznie odkształcają prąd generowany do sieci od czystej sinusoidy. Odkształcenie to w większości znanych aplikacji polega na zwiększaniu częstotliwości pierwszej harmonicznej generowanego prądu, co ma prowadzić do destabilizacji częstotliwości w wydzielonym obrębie sieci elektrycznej.

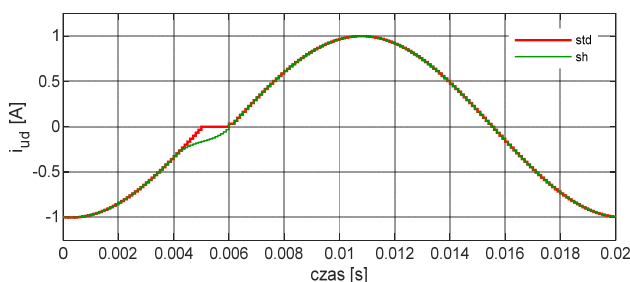


Rys. 2. Klasyfikacja metod wykrywania pracy wyspowej

W czasie pracy przekształtnika na sieć zasilającą, parametry sieci takie jak napięcie i częstotliwość są stabilne ze względu na sztywny charakter sieci elektroenergetycznej. W tym trybie pracy, wprowadzone zakłócenie nie powoduje zmiany częstotliwości napięcia, co utrzymuje algorytm wykrywania pracy wyspowej w trybie gotowości. Natomiast w momencie zaniku sieci zasilającej wprowadzone zakłócenie powoduje, że zauważalna jest różnica częstotliwości napięcia w wspólnym punkcie przyłączenia (WPP) w stosunku do częstotliwości znamionowej tego napięcia w sieci zasilającej. W podstawowym wariancie metody skutkuje to zwiększeniem częstotliwości pierwszej harmonicznej. Przebiegi napięć i prądów fazowych zaczynają swój przebieg sinusoidalny w tej samej chwili, bez przesunięcia fazowego. Ze względu na nieznaczne zwiększenie częstotliwości prądu osiąga on nieco szybciej wartość zerową związaną z końcem pełnego okresu sinusoidy w porównaniu do sinusoidy napięcia. Przez ten czas, zanim napięcie ponownie osiągnie zerową wartość na koniec okresu, wartość generowanego prądu utrzymywana jest na stałej wartości równej zero (czerwony przebieg na rys. 3). W momencie przejścia napięcia przez zero na koniec okresu, przebieg prądu również zaczyna odzwierciedlać sinusoidę o częstotliwości większej od znamionowej, przy czym zwiększenie częstotliwości prądu jest zależne od tzw. współczynnika dynamicznego (*ang. dco – dynamic coefficient*) [11]. Współczynnik ten, to wartość liczbowa przez którą wymnaża jest różnica aktualnej częstotliwości napięcia od częstotliwości znamionowej. Takie działanie powoduje w krótkim czasie destabilizację częstotliwości w obrębie wydzielonego fragmentu sieci zasilającej co jest jednoznaczne z wykryciem wyspowego stanu pracy. Główną wadą metody jest konieczność wprowadzenia zakłócenia już w stanie gotowości zabezpieczenia przed pracą wyspową co

powoduje obniżenie jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej.

Metody z grupy aktywnego dryftu częstotliwości uznawane są za najefektywniejsze w detekcji skutecznego przejść przekształtników do niepożądanego trybu na wydzielonej grupie odbiorników [12],[13]. Wspomniane podejście doczekało się licznych modyfikacji, opisanych m.in. w [11],[14]. Modyfikacja zaprezentowana w publikacji [11], wykorzystująca funkcję sinusa hiperbolicznego do wykrywania niepożądanego trybu pracy, charakteryzuje się korzystniejszym widmem prądu sieci zasilającej przy jednoczesnym niewielkim wpływie na efektywność algorytmu, którego głównym wyznacznikiem jest czas detekcji niepożądanego trybu pracy [15],[16]. Przykładowe przebiegi odkształconych prądów i_{ud} kształtowanych przez przekształtnik przy realizacji funkcji zabezpieczenia przed niepożądaną pracą wyspową za pomocą metody aktywnego dryftu częstotliwości w wariancie standardowym (STD) i sinus-hyperbolicznym (SH) przedstawia rysunek niżej.



Rys. 3. Przykładowe przebiegi prądów przy realizacji zabezpieczenia przed niepożądaną pracą wyspową w wariancie standardowym (STD) i sinus-hyperbolicznym (SH) metody aktywnego dryftu częstotliwości

Strefa nieczułości zabezpieczeń przed niepożądaną pracą wyspową

Pasywne metody wykrywania wystąpienia stanu niepożądanego trybu pracy na wydzielonej grupie odbiorników bazują na wartościach granicznych parametrów elektrycznych z jakimi może funkcjonować sieć elektroenergetyczna w normalnym stanie pracy. W naszym kraju, zgodnie z Polską Normą PN-EN-60038 [17] dopuszczalne odchylenia napięcia w sieciach niskiego napięcia wynoszą $\pm 10\%$, czyli od 207 do 253 V dla 95% średnich wartości 10-minutowych okresów ze zbioru tygodniowego. Natomiast zgodnie z PN-EN-50160 [18] „w normalnych warunkach pracy wartość średnia częstotliwości, mierzonej przez 10 s dla sieci pracujących synchronicznie z systemem elektroenergetycznym powinna być zawarta w przedziale 50Hz $\pm 1\%$ (tj. 49,5...50,5Hz) przez 95% roku oraz 50Hz $+4\%/-6\%$ (tj. 47...52Hz) przez 100% czasu, ...”.

W przypadku badania skuteczności pracy algorytmów zabezpieczających przed niecelową pracą wyspową konieczne jest spełnienie kilku dodatkowych wymagań dotyczących lokalnego odbiornika energii (LOE). Zgodnie z obecnie obowiązującą w Europie normą IEC-62116 [19], znormalizowany lokalny odbiornik energii elektrycznej musi posiadać następujące parametry:

$$(1) \quad P_{LOE} = \frac{U_{rms}^2}{R_{LOE}} = P$$

$$(2) \quad Q_{LLOE} = Q_{CLOE}$$

$$(3) \quad f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{LOE}C_{LOE}}} = 50 \text{ [Hz]}$$

$$(4) \quad Q_f = R_{LOE}\sqrt{\frac{C_{LOE}}{L_{LOE}}} = 1$$

gdzie: P – moc czynna generowana przez badane źródło wytwórcze, P_{LOE} – moc czynna pobierana przez LOE, f_{rez} – częstotliwość rezonansowa LOE, Q_f – dobroć LOE, Q_{LLOE} , Q_{CLOE} – odpowiednio moc bierna indukcyjna oraz pojemnościowa LOE, Q_{LOE} – moc bierna pobierana przez LOE, R_{LOE} , L_{LOE} , C_{LOE} – odpowiednio rezystancja, indukcyjność oraz pojemność zastępcza LOE, U_{rms} – napięcie w badanym obszarze sieci elektrycznej.

W przypadku powstania wydzielonego fragmentu sieci elektrycznej, gdy występuje pełne zbilansowanie mocy biernej w układzie i parametry LOE spełniają warunek opisany równaniem (3), częstotliwość w tym fragmencie sieci nie ulegnie zmianie i będzie równa częstotliwości rezonansowej f_{rez} związanej z parametrami zastępczymi LOE. Natomiast, gdy powstaje wydzielony fragment sieci elektrycznej i parametry LOE nie spełniają wymagań stawianych temu odbiornikowi opisanych w normie IEC-62116, częstotliwość w wydzielonym obszarze sieci zasilającej zmieni się i będzie wynosić:

$$(5) \quad f_w = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{LOE} + \Delta L)(C_{LOE} + \Delta C)}}$$

gdzie: f_w – częstotliwość w obrębie wydzielonego fragmentu sieci elektrycznej, ΔL oraz ΔC – odpowiednio różnice w wartości indukcyjności oraz pojemności zastępczej lokalnego odbiornika energii od wartości indukcyjności wynikającej z wymagań parametrów tego odbiornika opisanych w normie IEC-62116.

Względna zmiana częstotliwości w wydzielonym fragmencie sieci elektrycznej, w przypadku, gdy lokalny odbiornik energii nie spełnia wymagań opisanych w normie IEC-62116 została opisana poniższymi zależnościami:

$$(6) \quad \frac{f_w}{f_{rez}} - 1 = \frac{\sqrt{L_{LOE}C_{LOE}}}{\sqrt{L_{LOE}C_{LOE} + L_{LOE}\Delta C + C_{LOE}\Delta L + \Delta C\Delta L}} - 1$$

W powyższym równaniu składnik $\Delta C\Delta L$, potraktowano jako pomijalnie mały i otrzymano poniższe:

$$(7) \quad \left(\frac{f_{rez}}{f_w}\right)^2 - 1 = \frac{\Delta C}{C_{LOE}} + \frac{\Delta L}{L_{LOE}}$$

Gdy w równaniu (7), zamiast wartości f_w zostaną zastosowane graniczne wartości częstotliwości maksymalnej f_{max} oraz minimalnej f_{min} obowiązujące w sieci elektroenergetycznej, to można to równanie przedstawić jako następującą nierówność:

$$(8) \quad \left(\frac{f_{rez}}{f_{max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta C}{C_{LOE}} + \frac{\Delta L}{L_{LOE}} \leq \left(\frac{f_{rez}}{f_{min}}\right)^2 - 1$$

Nierówność (8) wskazuje zakres zmian parametrów indukcyjności i pojemności zastępczej lokalnego odbiornika energii, które w momencie wydzielenia się fragmentu sieci zasilającej nie powodują zmiany częstotliwości w obrębie tego fragmentu poza normatywne granice częstotliwości. Skutkuje to brakiem zadziałania zabezpieczeń częstotliwościowych w wydzielonym fragmencie sieci, przez co nie nastąpi wyłączenie wszystkich źródeł wytwórczych.

Rozpatrzono również sytuację, w której przekształtnik nie pracuje z jednostkowym współczynnikiem mocy, tj. generuje niewielką ilość energii biernej, a lokalny odbiornik energii spełnia warunki opisane równaniami (1)-(4). Normatywna moc bierna pojemnościowa lokalnego odbiornika energii (Q_{Crez}) została zdefiniowana następująco:

$$(9) \quad Q_{C_{rez}} = U_{rms}^2 2\pi f_{rez} C_{LOE}$$

Generowanie przez przekształtnik mocy biernej $Q \neq 0$, spowoduje w momencie powstania wydzielonego fragmentu sieci elektrycznej, zmianę wartości częstotliwości w jej obrębie do wartości f_w . Przy częstotliwości w wydzielonym fragmencie sieci równej f_w , moc bierna pojemnościowa lokalnego odbiornika energii (Q_{Cw}) wynosi:

$$(10) \quad Q_{Cw} = U_{rms}^2 2\pi f_w C_{LOE}$$

Zatem różnica mocy biernej ΔQ jest równa:

$$(11) \quad \Delta Q_C = Q_{C_{rez}} - Q_{Cw} = U_{rms}^2 2\pi C_{LOE} (f_{rez} - f_w)$$

Przekształcona zależność na dobroć Q_f do parametrów zastępczych lokalnego odbiornika energii:

$$(12) \quad C_{LOE} = \frac{Q_f}{2\pi f_{rez} R_{LOE}}$$

Po uwzględnieniu zależności (1) oraz (12) w równaniu (11) oraz po przekształceniach otrzymano:

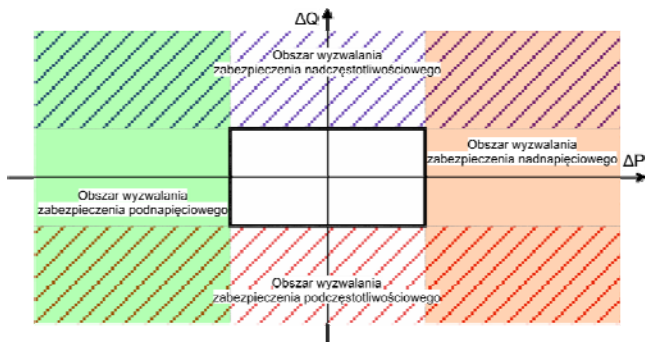
$$(13) \quad \frac{\Delta Q_C}{P} = -Q_f \left(\frac{f_w - f_{rez}}{f_{rez}} \right)$$

Stosując powyższe w nierówności (8), która została otrzymana na podstawie przekształcania zależności (6), uzyskano następującą nierówność:

$$(14) \quad Q_f \left(1 - \left(\frac{f_{rez}}{f_{min}} \right)^2 \right) \leq \frac{\Delta Q}{P_{LOE}} \leq Q_f \left(1 - \left(\frac{f_{rez}}{f_{max}} \right)^2 \right)$$

Powyższa nierówność określa wpływ wartości dobroci lokalnego odbiornika energii, a przede wszystkim wpływ generowania przez przekształtnik mocy biernej na wartość częstotliwości w powstałym wydzielonym fragmencie sieci elektrycznej. Wynika z niej, że czym większą ilość mocy biernej generuje przekształtnik, tym zwiększamy prawdopodobieństwo osiągnięcia przez częstotliwość w wydzielonym fragmencie sieci elektrycznej wartości mieszczących się poza granicami normatywnymi.

Natomiast brak zbilansowania mocy czynnej generowanej przez przekształtnik i pobieranej przez lokalny odbiornik energii w momencie powstania wydzielonego fragmentu sieci elektrycznej wywiera wpływ na wartość napięcia w tym fragmencie sieci.



Rys. 4. Graficzna interpretacja strefy nieczułości pasywnych metod wykrywania stanu wyspowego

$$(15) \quad \frac{\Delta P}{P_{LOE}} = \frac{P_{LOE} - P}{P} = \frac{U_{rez}^2 - U_w^2}{R_{LOE} R_{LOE}} = \frac{U_{rez}^2}{U_w^2} - 1$$

Jeżeli w równaniu (15), zamiast wartości U_w zostaną zastosowane graniczne wartości napięcia maksymalnego

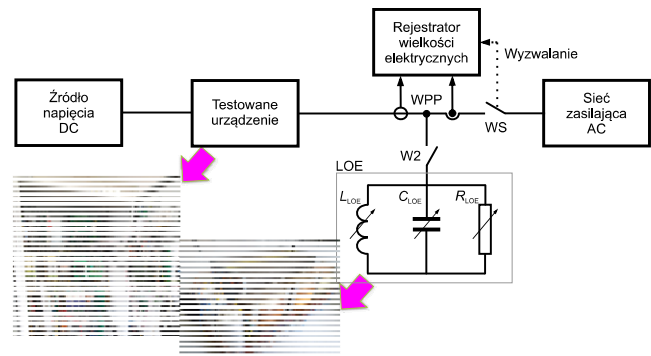
U_{max} oraz minimalnego U_{min} obowiązujące w sieci elektroenergetycznej, to można to równanie przedstawić w postaci następującej nierówności:

$$(16) \quad \left(\frac{U}{U_{max}} \right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P_{LOE}} \leq \left(\frac{U}{U_{min}} \right)^2 - 1$$

Opisane zależnościami (14) oraz (16) zakresy niezbilansowania mocy czynnej i biernej w powstałym wydzielonym fragmencie sieci elektrycznej można przedstawić w formie graficznej, tak jak zrobiono to na rysunku rys. 4.

Wymagania dotyczące badań algorytmów zabezpieczających przed niecelową pracą wyspową

Głównym celem stawianym w normie IEC-62116 „jest zapewnienie procedury badawczej mającej na celu ocenę jakości środków przeznaczonych do ochrony przed zanikiem napięcia w sieci dla systemów PV włączonych do publicznej sieci energetycznej”. Przedstawiona w normie procedura, także może być stosowana do badania przekształtników sprzęgających inne źródła energii aniżeli systemy fotowoltaiczne, np. ogniwa paliwowe czy mikroturebiny. Podstawowy schemat układu badawczego, w którym dokonuje się pomiarów określających zdolność przekształtnika do wykrywania niepożądanego stanu wyspowego, został przedstawiony na rysunku poniżej.



Rys. 5. Schemat układu badawczego w celu stwierdzenia zgodności urządzenia z wymogami normy IEC-62116

Przedstawiona na rys. 5 ogólna struktura układu badawczego, stosowana jest do badania zarówno przekształtników jedno- jak i trójfazowych (po powieleniu jednofazowych obwodów LOE). W układzie pomiarowym stosuje się źródła napięcia DC sprzężone z siecią na pomocą przekształtnika (testowane urządzenie), które jest równolegle dołączone do sieci zasilającej AC (lub symulatora sieci zasilającej) i lokalnego odbiornika energii składającego się z trzech regulowanych elementów – indukcyjności L_{LOE} , pojemności C_{LOE} oraz rezystancji R_{LOE} . Regulowany odbiornik, ma na celu zapewnić możliwość dopasowania pobieranej mocy czynnej i biernej, tak, aby odpowiadały one wartościom generowanym przez testowane urządzenie.

W stanie ustalonym układu badawczego z rys. 5, styczniki WS oraz W2 są zamknięte. Pomiędzy LOE a testowanym urządzeniem zachodzi całkowite zbilansowanie mocy biernej i czynnej. Test wykrywania niepożądanego stanu wyspowego rozpoczyna się w momencie otwarcia się styków stycznika WS. Od tej chwili mierzony jest czas, po którym nastąpi (lub nie) samoczynne wyłączenie testowanego urządzenia. Zanim nastąpi samoczynne wyłączenie testowanego urządzenia po odłączeniu sieci zasilającej, przekształtnik kontynuuje zasilanie LOE, które to symuluje rzeczywisty fragment sieci zasilającej, do którego docelowo ma być włączone testowane urządzenie. Jeżeli wykrycie niepożądanego stanu wyspowego nastąpi

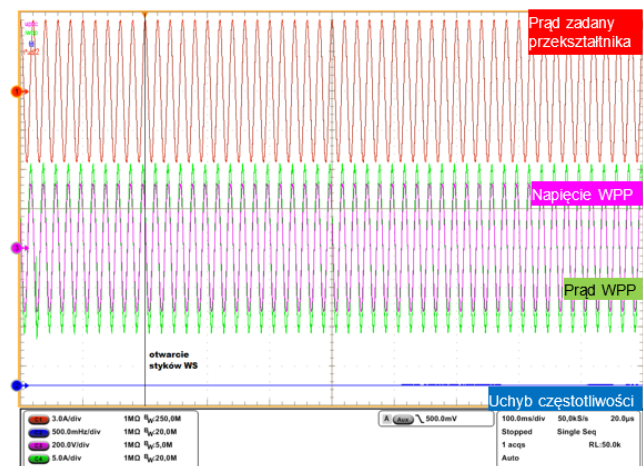
w czasie krótszym niż 2 sekundy, testowane urządzenie dostaje pozytywny wynik badania.

Badania oceny skuteczności działania algorytmów zabezpieczających przed niepożądaną pracą wyspową

Badania algorytmów zabezpieczających przed niepożądaną pracą wyspową przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Do badań zastosowano dwupoziomowy, trójfazowy przekształtnik napięcia. Przekształtnik został wysterowany tak, aby pracował z jednostkowym współczynnikiem mocy i bilansował moc czynną pobieraną przez rezystor zastosowany w lokalnym odbiorniku energii. Rejestracji przebiegów sygnałów elektrycznych w obwodzie laboratoryjnym za pomocą oscyloskopu Tektronix DPO7054C, którego wyzwalanie odbywało się w momencie otwierania się styków stycznika pełniącego rolę wyłącznika sieciowego. W pierwszym eksperymencie wyłączono zabezpieczenie przed niepożądaną pracą wyspową, aby sprawdzić poprawność doboru wartości parametrów LOE, tak aby spełniały wymagania opisane zależnościami (1)-(4). Generowany przez przekształtnik prąd był sinusoidalny. Wynik eksperymentu przedstawia rys. 6.

Tabela 1. Wybrane parametry układu badawczego do przeprowadzenia testów wykrywania niepożądanego stanu pracy wyspowej zgodnie z normą IEC-62116 oraz PN-IEC-60038

Parametr	Wartość
Dopuszczalny zakres napięcia sieci zasilającej U_{rms}	$207 < U_{rms} < 253 \text{ V}$
Dopuszczalny zakres częstotliwości sieci zasilającej f	$49.5 < f < 50.5 \text{ Hz}$
Parametry lokalnego odbiornika energii (wartości na jedną fazę)	$R_{LOE} = 32 \Omega$ $L_{LOE} = 100 \text{ mH}$ $C_{LOE} = 100 \mu\text{F}$ $Q_T = 1$

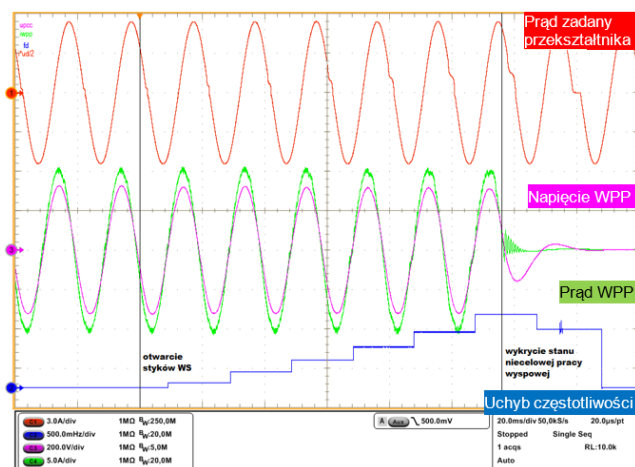


Rys. 6. Przebiegi czasowe zarejestrowane w układzie do badania zabezpieczeń przed niepożądaną pracą wyspową przy nieaktywnym algorytmie zabezpieczającym, gdzie: C1 (czerwony) – sygnał zadany prądu przekształtnika w fazie U (skala 5 A/dz.), C2 (niebieski) – sygnał uchybu częstotliwości f_d (skala 0,5 Hz/dz.), C3 (różowy) – napięcie fazy W w WPP (skala 200 V/dz.), C4 (zielony) – prąd przekształtnika fazy W (skala 5 A/dz.).

W pierwszym etapie badań zweryfikowano poprawność określenia parametrów lokalnego odbiornika energii. Poprawność parametrów LOE została sprawdzona w układzie, w którym zapewniono pełne zbilansowanie mocy czynnej i biernej pomiędzy przekształtnikiem a LOE. Po chwili otwarcia styków WS, przekształtnik powinien działać nieprzerwanie, dostarczając energię elektryczną do lokalnego odbiornika energii. Dopuszczalny zakres zmian parametrów sieci w WPP nie powinien zostać

przekroczony. Oscylogram przedstawiony na rys. 6, przedstawia sytuację, w której pomimo odłączenia się sieci zasilającej, przekształtnik pracujący w wydzielonym fragmencie sieci zasilającej nie wyłącza się samodzielnie. W badanym obwodzie energia cały czas jest dostarczana do lokalnego odbiornika energii. Parametry napięcia i częstotliwości nie zmieniły się w momencie utworzenia się wydzielonego fragmentu sieci elektrycznej. Wartość częstotliwości i napięcia w WPP pozostała bez zmian. Wartość uchybu częstotliwości f_d , definiowana jako różnica pomiędzy aktualną a znamionową częstotliwością sieci, w całym okresie rejestracji jest bliska zeru.

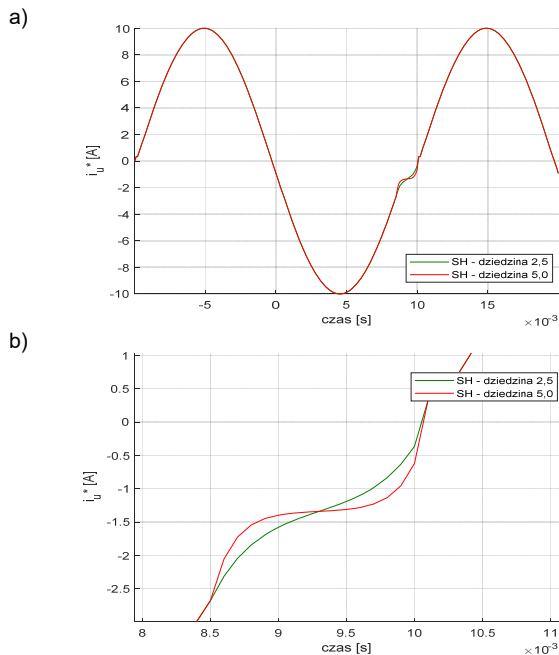
Kolejny eksperyment został przeprowadzony przy aktywnym zabezpieczeniu przed niecelową pracą wyspową. Sprawdzono w ten sposób działanie metody aktywnego dryftu częstotliwości przy realizacji sinus-hiperbolicznej. W przeprowadzonej próbie parametr dco wynosił 3. Przebiegi sygnałów w badanym obwodzie przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Przebiegi czasowe zarejestrowane w układzie do badania zabezpieczeń przed niepożądaną pracą wyspową przy aktywnym algorytmie zabezpieczającym w wersji sinus-hiperbolicznej, gdzie: C1 (czerwony) – sygnał zadany prądu przekształtnika w fazie U (skala 5 A/dz.), C2 (niebieski) – sygnał uchybu częstotliwości f_d (skala 0,5 Hz/dz.), C3 (różowy) – napięcie fazy W w WPP (skala 200 V/dz.), C4 (zielony) – prąd przekształtnika fazy W (skala 5 A/dz.).

Zarejestrowany oscylogram przedstawia na przebiegu uchybu częstotliwości destabilizacyjne działanie pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego. Wartość uchybu częstotliwości narasta coraz to szybciej im większy jest uchyb częstotliwości napięcia w wydzielonym obwodzie sieci zasilającej. W momencie, gdy wartość uchybu częstotliwości f_d osiąga wartość 0,5 Hz następuje detekcja niepożądanego stanu pracy wyspowej oraz wyłączenie przekształtnika. Tym samym, wydzielony fragment sieci zasilającej przestaje być pod napięciem. Algorytm zabezpieczający wykrył niepożądany stan pracy w około 116 ms, co jest wartością spełniającą wymagania stawiane testowanemu urządzeniu w normie IEC-62116. Ponadto, na analizowanym oscylogramie warto zwrócić uwagę na kształt napięcia w WPP – przebieg C3. Pomimo odkształcenia prądu generowanego przez przekształtnik (sygnał C4), napięcie w WPP jest cały czas sinusoidalne.

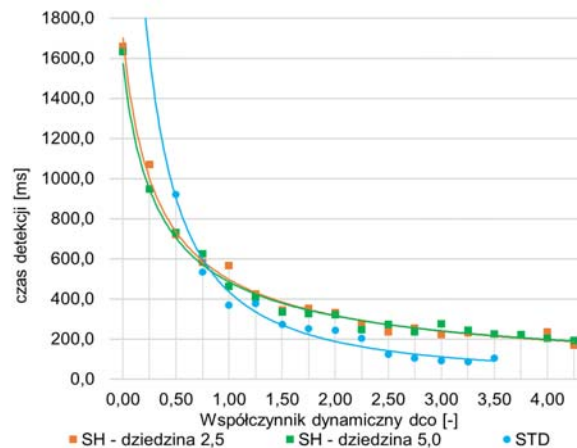
Dodatkowy parametr, który nie występuje w realizacji wykrywania niepożądanego stanu pracy wyspowej metodą standardową, a występuje w metodzie sinus-hiperbolicznej jest zakres dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego. Kształty przebiegów prądów zadanych i_{ud}^* realizujących zabezpieczenie detekcji niepożądanego stanu pracy wyspowej dla różnych wartości dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Kształty przebiegów prądów zadanych realizujących zabezpieczenie detekcji niepożądanego trybu pracy wyciągu dla różnych wartości dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego, gdzie a) widok 1,5 okresu generowanego prądu, b) powiększenie odkształconej części przebiegów prądu zadanego przekształtnika.

Różnica w odkształconej części przebiegów przedstawionych na rys. 8 jest nieznaczna. To odkształcenie ma największy wpływ na sieć zasilającą w czasie normalnej pracy przekształtnika, ponieważ kształtowany przez niego prąd musi być w sposób ciągły odkształcony. Aby ocenić wpływ parametrów kształtowanego przebiegu w zależności od ustawionego parametru dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego należy posłużyć się widmem tych sygnałów. Analizy harmonicznej dokonano za pomocą narzędzi dostępnych w oprogramowaniu Matlab. Wynik porównania widm przedmiotowych przebiegów przedstawia rys. 9. Porównano 40 pierwszych harmonicznych, których amplitudy przedstawiono procentowo w odniesieniu do wartości amplitudy pierwszej harmonicznej. Omawiany rysunek również zawiera informację o całkowitym współczynniku zniekształceń harmonicznych THD. Jak można zauważyć, metoda sinus-hyperboliczna z zakresem argumentów równym 5,0 charakteryzuje się poziomem zniekształceń harmonicznych wyższym niż przebieg w standardowej realizacji metody. Praktycznie w całym zakresie analizowanego widma, poszczególne harmoniczne przyjmują większe wartości. Odmienne przedstawia się sytuacja dla przebiegu z mniejszym zakresem zmian argumentu (2,5). Przebieg ten względem metody standardowej charakteryzuje się korzystniejszym rozkładem widmowym oraz niższą wartością THD. Największy wpływ na napięcie sieci zasilającej mają amplitudy wyższych harmonicznych niższego rzędu, które w omawianym przypadku również zostały ograniczone.

Najważniejszym celem stosowania zabezpieczeń przed niepożądaną pracą wyciągu jest skuteczne wykrycie przejścia przekształtnika do wyspowego trybu pracy. Obecne prawo stanowi, że czas ten powinien być krótszy od 2 sekund. Na rys. 10 przedstawiono czasy detekcji skutecznego przejścia przekształtnika do wyspowego trybu pracy. Przedstawiony wykres reprezentuje skuteczność oraz pracę algorytmów w stanach przejściowych po zaniku połączenia przekształtnika z siecią elektroenergetyczną.

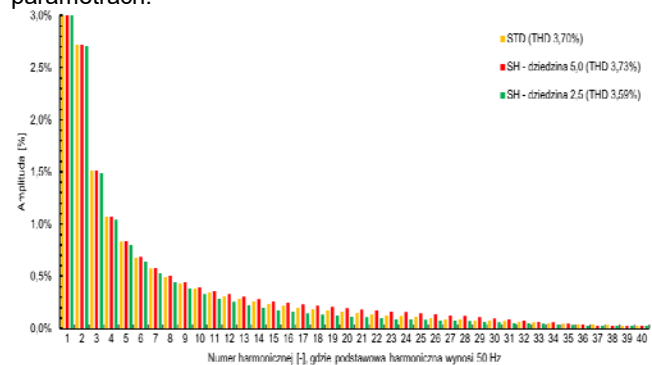


Rys. 10. Czas detekcji niepożądanego trybu pracy wyciągu w badanym układzie przy różnych algorytmach i ich parametrach.

Kolorem niebieskim na rys. 10 przedstawiono czas detekcji przy realizacji metody standardowej. Przy bardzo niskich wartościach współczynnika dco, może nie nastąpić detekcja niepożądanego trybu pracy w wymaganym przez normę czasie. Przy stosowaniu przebiegów prądu z wykorzystaniem sinusa-hyperbolicznego, czas detekcji jest

ograniczony i nie przekracza 1,7 sekundy. Zmiana wartości zakresu argumentów jaki przyjmuje funkcja sinusa hiperbolicznego wpływa nieznacznie na czas detekcji skutecznego przejścia przekształtnika do wyspowego trybu pracy. Korzystanie z wartości współczynników dynamicznych większych od 0,75 jest korzystniejsze ze względu na krótszy czas detekcji dla metody w wersji standardowej. Zmiana zakresu dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego w nieznacznym stopniu wpływa na czas detekcji przejścia do wyspowego trybu pracy.

Natomiast, należy mieć na uwadze, że wyższe wartości współczynnika dynamicznego dco, pozwalają na szybsze wprowadzenie większego zakłócenia do prądu, co może mieć niekorzystny wpływ w czasie pracy przekształtnika na sieć zasilającą - szczególnie na sieć o niestabilnych parametrach.



Rys. 10. Analiza harmoniczna przebiegów prądów zadanych przekształtnika przy realizacji zabezpieczenia przed niepożądaną pracą wyciągu w wariantach standardowym i sinus-hyperbolicznym z różnymi wartościami dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego.

Podsumowanie

Skuteczne przejście przekształtnika sprzęgającego odnawialne źródło energii z siecią zasilającą ze stanu pracy na sieć zasilającą do stanu niepożądanego trybu pracy jest potencjalnie możliwe w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej. Taka zmiana trybu pracy przekształtnika jest relatywnie prosta do odtworzenia w warunkach laboratoryjnych, co dodatkowo skłania do

przewodzenia badań nad algorytmami zabezpieczającymi przed niezamierzonym przejściem w wyspowy stan pracy. Stosowanie metody sinus-hiperbolicznej o niższych wartościach dziedziny funkcji sinusa hiperbolicznego, skutkuje ograniczeniem amplitud wyższych harmonicznych kształtowanego przez przekształtnik prądu podczas pracy na sieć zasilającą, co poprawia jakość energii elektrycznej w sieci elektroenergetycznej. Warto podkreślić, że zabezpieczenie to wpływa na generowany prąd nawet podczas normalnej pracy przekształtnika na sieć zasilającą, co czyni korzystne widmo odtwarzanego prądu jeszcze bardziej wartościowym. Oba warianty metody wykrywania niepożądanego stanu wyspowej za pomocą aktywnego dryftu częstotliwości w wariancie standardowym i sinus-hiperbolicznym pozwalają na spełnienie wymagań normatywnych z zakresie maksymalnego czasu detekcji skutecznego przejścia przekształtnika do wyspowego trybu pracy. Niemniej jednak, stosowanie niższych wartości współczynników dynamicznych jest korzystniejsze w metodach detekcji w wariancie sinus-hiperbolicznym.

Autor artykułu przewiduje przyszłe prace w zakresie detekcji niepożądanego stanu wyspowej, które poprzez dodatkowe modyfikacje wprowadzone w odkształconym prądzie, poskutkują uzyskaniem jeszcze korzystniejszego widma prądu kształtowanego przez przekształtnik w czasie jego pracy na sieć zasilającą.

Niniejsza praca została wykonana dzięki finansowaniu ze środków z pracy zespołowej Politechniki Białostockiej zarejestrowanej pod numerem WZ/WE-IA/6/2023.

Autor: dr inż. Krzysztof Dmitruk, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Zakład Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: k.dmitruk@pb.edu.pl.

LITERATURA

- [1] www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok (dostęp 24.02.2024)
- [2] PN-EN 62116:2014-11 - Falowniki fotowoltaiczne włączane do publicznej sieci energetycznej -- Procedura badania ochrony przed zanikiem napięcia
- [3] Kahrobaee M., „Analysis of Local Anti-Islanding Detection Methods for Photovoltaic Generators in Distribution Systems”, *Theses, Dissertations, and Student Research from Electrical & Computer Engineering*, (2019)
- [4] Kim, M.-S.; Haider, R.; Cho, G.-J.; Kim, C.-H.; Won, C.-Y.; Chai, J.-S. Comprehensive Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation Systems. *Energies*, (2019), 12, 837. <https://doi.org/10.3390/en12050837>
- [5] Li, C.; Cao, C.; Cao, Y.; Kuang, Y.; Zeng, L.; Fang, B. A Review of Islanding Detection Methods for Microgrid, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (2014), 35, 211–220, doi:10.1016/j.rser.2014.04.026
- [6] Worku, M.Y.; Hassan, M.A.; Maraaba, L.S.; Abido, M.A. Islanding Detection Methods for Microgrids: A Comprehensive Review, *Mathematics*, (2021), 9, 3174. doi:10.3390/math9243174
- [7] Das, P.; Ghore, S.; Biswal, M. Comparative Assessment of Various Islanding Detection Methods for AC and DC Microgrid, *1st Int. Conf. Power, Control Comput. Technol. ICPC2T*, (2020), 396–400, doi:10.1109/ICPC2T48082.2020.9071520
- [8] Yu, B. An Improved Active Frequency Drift Anti-Islanding Method for Multiple PV Micro-Inverter Systems, *IEICE Electron. Express*, (2014), 11, doi:10.1587/ELEX.11.20140143.
- [9] Wang, S.; Zhang, S.; Liu, L.; Jia, Y.; Qie, C., An Improved Active Frequency Drift Anti-Islanding Detection Method. *Proc. 2016, IEEE 11th Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2016*, (2016), 2170–2173, doi:10.1109/ICIEA.2016.7603948
- [10] Oshiro, M.R.; Barros Godoy, R.; De Brito, M.A.G.; Galotto, L. Performance Analysis of Active Anti-Islanding Techniques for Photovoltaic Application, *IEEE 15th Brazilian Power Electron. Conf. 5th IEEE South. Power Electron. Conf. COBEP/SPEC 2019*, (2019), doi:10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065606.
- [11] Dmitruk, K.; Sikorski, A. Implementation of the Improved Active Frequency Drift Anti-Islanding Method into the Three-Phase AC/DC Converter with the LCL Grid Filter, *Energies*, (2022), 15, 1323. doi:10.3390/en15041323
- [12] Desarden-Carrero, E.; Darbali-Zamora, R.; Aponte-Bezares, E.E. Analysis of Commonly Used Local Anti-Islanding Protection Methods in Photovoltaic Systems in Light of the New IEEE 1547-2018 Standard Requirements, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, (2019), 2962–2969, doi:10.1109/PVSC40753.2019.8980916
- [13] Kim, M.-S.; Haider, R.; Cho, G.-J.; Kim, C.-H.; Won, C.-Y.; Chai, J.-S. Comprehensive Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation Systems, *Energies*, (2019), 12, 837. doi:10.3390/en12050837
- [14] Zheng, X.; Zhang, R.; Chen, X.; Sun, N. Improved Three-Phase AFD Islanding Detection Based on Digital Control and Non-Detection Zone Elimination, *Energies*, (2018), 11, 2421, doi:10.3390/en11092421
- [15] Yan, L.; Yongning, C.; Haiyan, T.; Xinshou, T.; Zhankui, Z.; Jianqing, J. Common Focus and New Requirement on Technical Standards of Renewable Energy Grid Integration, *Proc. - 2019 Chinese Autom. Congr. CAC 2019*, (2019), 3719–3723, doi:10.1109/CAC48633.2019.8996943
- [16] Fan, Y.G.; Li, C. Analysis on Non-Detection Zone of the Islanding Detection in Photovoltaic Grid-Connected Power System, *APAP 2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, (2011), 1, 275–279, doi:10.1109/APAP.2011.6180527
- [17] PN-EN 60038:2012 - Napięcia znormalizowane CENELEC
- [18] PN-EN 50160:2023-10 - Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [19] IEC 62116:2014 - Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures