

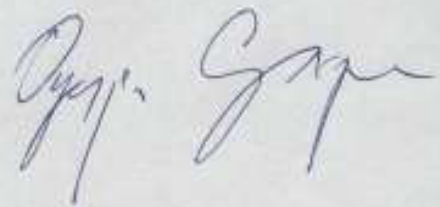
IMPROVED GRID INTERACTION OF PHOTOVOLTAICS USING SMART  
MICRO-INVERTERS

A dissertation submitted  
to AGH University of Science and Technology,  
Faculty of Robotics and Mechanical Engineering, Department of Robotics and Mechatronics  
for obtaining the  
degree of Doctor of Technical Sciences

by  
Ognjen Gagrica

Supervisors  
prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl  
prof. dr. ir. Joseph Franciscus Gerardus Cobben

24.03.2017



## Streszczenie pracy w języku polskim

Małe systemy fotowoltaiczne (PV) stają się coraz bardziej popularne jako generatory energii odnawialnych (OZE) dla domów mieszkalnych i małych firm. Ich integracja z systemem dachów lub ścian budynków jest stosunkowo łatwa. Instalacje fotowoltaiczne są bardzo trudnymi w sterowaniu źródłami energii odnawialnej ponieważ pracują w sposób przerywany, wtedy gdy pada na nie bezpośrednie światło słoneczne. Z drugiej strony, w praktyce, jednym z najważniejszych czynników decydujących o wyborze źródła energii odnawialnej jest możliwość utrzymywania maksymalnego poziomu mocy źródła (Maximum power point tracking – MPPT) w najdłuższym możliwym czasie. W zastosowaniach sieciowych wymagane jest dla tego typu źródeł wykorzystanie inwertera, którego zadaniem jest przekształcanie (w przypadku PV) prądu stałego na prąd przemienny synchronizowany z siecią. Poprawa efektywności działania MPPT, pewność (niezawodność) działania oraz łatwość serwisowania są przesłanką do zmniejszenia wielkości (przetwarzanej mocy) inwertera oraz zwiększenia jego modułowości. Wraz z doskonaleniem konstrukcji i redukcją kosztów modułowe – zintegrowane inwertery lub mikro-inwertery są coraz częściej rozwiązaniem preferowanym dla instalacji domowych. Generalnie praca dotyczy nowego sposobu sterowania instalacjami domowymi PV i powstała w wyniku realizacji projektu „Positive energy house” w ramach programu SELECT+, którego celem było wykonanie wspólnych (realizowanych w kilku uczelniach jednocześnie) prac doktorskich w obszarze energii odnawialnych. Projekt był sponsorowany przez Unię Europejską. "Positive energy house" jest nazwą projektu, w którym wykonano szereg badań dotyczących generowania i wykorzystania energii odnawialnych, między innymi związany z zagadnieniami sterowania źródłami energii odnawialnej przedstawionymi w niniejszej pracy. Wkład tej pracy w realizację projektu “positive energy building” jest ukierunkowany na rozwój i praktyczną implementację. Jako przedmiot pracy, ze względów praktycznych wybrano sterowanie instalacją PV podłączoną do sieci. Podstawowym

problemem badanym w pracy jest duza penetracja systemow PV w sieciach niskiego napiecia (LV) w obszarach zabudowy mieszkaniowej.

Celem badan jest dostarczenie rozwiazan dla zwiekszenia zdolnosci do efektywnego wykorzystania PV z maksymalnym ograniczeniem koniecznych zmian w infrastrukturze sieci. Dokladniej mowiac, celem pracy jest opracowanie i implementacja nowej metody sterowania inwerterami dedykowanymi dla instalacji PV, w celu zapobiegania lokalnemu wzrostowi napiecia w sieci.

Do realizacji zadania sterowania wybrano rozwiazanie oparte na mikro-inwerterach poniewaz; sa one najbardziej dedykowane (ze wszystkich znanych autorowi rozwiazan) do rozwiazania problemu zapobiegania wzrostowi napiecia w sieci LV oraz speiniaja wymagania system pasywnego energetycznie domu mieszkalnego oraz moga byc zintegrowane z rozproszonym systemem sterowanie sieciami energetycznymi. Proponowane rozwiazanie moze byc zastosowane nie tylko w nowych budowanych oraz instalacjach, ale rowniez w instalacjach juz pracujacych poprzez wymiane jedynie inwertera. Zaproponowane rozwiazanie pozwala operatorom sieci (DSO) na wdrozenie zdalnego monitorowania jakosci energii elektrycznej oraz zdalnego sterowania siecia LV, jak rowniez to rozwiazanie zwieksza dostepnosc inwertera. Sieci LV nie sa projektowane przy zalozeniu instalacji PV, szczegolnie gdy ich penetracja jest wysoka. Jednak rozwój rozproszonych systemow generowania energii wymagaja przystosowania sieci do podlaczenia lokalnych zrodel na poziomie sieci sredniego napiecia (MV) oraz niskiego napiecia (LV). Liberalizacja rynku energetycznego powoduje, ze producentem energii moze byc kazdy, zarowno osoba fizyczna jak i firma, co jest powodem, ze system energii staje sie coraz bardziej rozproszony. W takim systemie konsument staje sie producentem, taki system nazywa sie systemem prosumenckim.

Rozproszone generowanie energii elektrycznej zmienilo przeplyw energii w sieciach z jednokierunkowego na dwukierunkowe, w sieciach ktore byly projektowane i budowane jako

jednokierunkowe. Zwiększając udział wiatru i PV w generowaniu energii oznacza zwiększenie okresowej obecności niesterowalnych wahań mocy w produkcji energii elektrycznej. Redukcja zastosowania w energetyce, jako podstawowe źródła energii, paliw stałych oraz paliwa nuklearnego, oznacza w praktyce zmniejszenie sterowalność system i zmniejszenie liczby synchronicznych generatorów z masami wirującymi, co jest bardzo pożądane, dla stabilizacji sieci. Sterowanie częstotliwością i napięciem jest w tym przypadku bardziej zależne od niesterowalnych wahań mocy, w szczególności po stronie produkcji. Źródła energii odnawialnej nie mogą być synchronicznie włączone do sieci tak jak konwencjonalne źródła. Wymagają one elektronicznych konwerterów, jako sprzężenie oraz interfejs synchronizujący. Dwukierunkowy przepływ prądu wraz z powszechną obecnością w sieci elektroniki wysoko prądowej, w tym konwerterów, stwarza dla operatorów nowe wyzwania dotyczące jakości prądu, sterowania i zabezpieczenia, który wymagają przed wdrożeniem na wielką skalę jeszcze wielu badań.

Atrakcyjne zachęty finansowe oraz powszechne wprowadzanie budynków pasywnych energetycznie zachęca do wdrażania paradygmatu “zero sieci”, co z kolei jest powodem szybkiej ekspansji PV w sieciach LV. Jest to z kolei przyczyną suboptymalnej interakcji pomiędzy inwerterem i siecią oraz spadek jakości dostarczanej do odbiorców energii. Wzrost napięcia w sieci ponad ustaloną przepisami wartość (ang. overvoltage) na skutek nadprodukcji energii jest jednym z podstawowych problemów występujących w sieciach z dużą liczbą zintegrowanych PV. Losowe rozmieszczenie jednofazowych paneli fotowoltaicznych w trzyfazowej sieci niskiego napięcia jest przyczyną niebilansowania i zwiększa prawdopodobieństwo przekroczenia napięcia w sieci powyżej dopuszczalnego poziomu. Ponieważ inwertery mają wbudowane systemy zabezpieczeń przez wzrostem napięcia w przypadku jego wzrostu odłączają źródła co powoduje straty energii, ponieważ jest ona produkowana, natomiast nie jest dostarczana do zasilania sieci. Większość inwerterów

stosowanych obecnie w instalacjach fotowoltaicznych mają tylko podstawowe funkcje, takie jak maksymalizacja produkcji energii i systemy zabezpieczeń w przypadku zaburzeń w sieci.

Pojęcie “inteligentnego inwertera” oznacza wprowadzenie nowych możliwości w jego układzie sterowania, które wychodzą poza standardy i umożliwiają zrealizowanie nowych schematów, których celem jest zoptymalizowanie współpracy PV z siecią oraz maksymalizacja produkcji energii. Bardzo istotne jest w tym przypadku podtrzymanie mocy biernej i ograniczenie mocy czynnej. W celu zmiany stosowanych inwerterów na inwertery inteligentne muszą one być wymienione lub przebudowane. Przebudowanie inwerterów jest opcją bardziej zrównoważoną, w szczególności gdy może być ono wykonane jedynie poprzez zmianę oprogramowania. W większości przypadków jest to możliwe, przez co unika się wymianie sprzętu, która zawsze jest droższa. Natomiast wymiana oprogramowania jest wyzwaniem z punktu widzenia niezawodności i dostępności, w szczególności gdy przebudowie musi być poddany mikroinwerter, który eksploatowany jest w warunkach terenowych. Dostępność do inwertera zdalnie ułatwia realizację przebudowy, przede wszystkim z punktu widzenia kosztów.

Ograniczenie mocy czynnej jest metodą sterowania napięciowego dla mikroinwerterów w sieciach niskiego napięcia. Przebudowa mikroinwerterów poprzez zmianę oprogramowania jest ważnym aspektem implementacji inteligentnych sieci LV i jest jednym z podstawowych zagadnień rozważanych w pracy. Podstawowe kryteria dla zrównoważonej modernizacji inwerterów przedstawiono w rozdziale 5 pracy, a mianowicie przedstawiono strategię sterowania, niezawodność i dostępność, możliwość zdalnego dostępu oraz współpracę zmodernizowanych i starych inwerterów. Sterowanie mocą czynną ma dużo większy wpływ na sterowanie napięciem w sieciach LV i ten sposób sterowania jest łatwiejszy w implementacji niż sterowanie mocą bierną. W rozdziale 6 przedstawiono metodologię, opracowaną przez Autora, wdrażania modyfikacji modułowych mikroinwerterów na bazie technik ICT w celu

uzyskania lepszego wykorzystania PV przy zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa sieci oraz uzyskania lepszej dostępności inwerterów. Metodologię tą Autor nazwał „Sekwencyjną na poziomie modułu” metodologią małych kroków (ang. *Sequential Module-level Tripping* (SMT)) i jej opracowanie jest oryginalnym osiągnięciem Autora. Metodologia ta jest zmodyfikowanym podejściem do ochrony przed nadmiernym wzrostem napięcia, w której uzyskuje się ograniczenie na poziomie system, bez modyfikacji funkcjonalności poszczególnych mikro-inwerterów, co powoduje, że metodologia jest bardziej przyjazna i łatwiejsza do wdrożenia niż metodologie alternatywne polegające głównie na aktywnym wyłączaniu źródeł. Podstawowym założeniem przy opracowywaniu tej nowej metodologii było uzyskanie jak najbardziej niezawodnego rozwiązania, poprzez zastosowanie techniki projektowania znanej jako “design for reliability”. W ten sposób uzyskano rozwiązanie, w którym na skutek wyłączenia uzyskuje się efekt chłodzenia układów MOSFET i kondensatorów, gdzie w metodzie konwencjonalnej układy te pozostają pod napięciem i efekt ich chłodzenia jest mniejszy. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia ograniczenie zmiany w cyklach pracy dla układów MOSFET i pozwala na wykorzystanie ich tylko do śledzenia punktów maksymalnej produkcji energii (MPPT - Maximum Power Point Tracking). W przypadku, gdy możliwe jest wyłączanie poszczególnych źródeł i wszystkich typów inwerterów zastosowanie proponowanej metodologii jest uzasadnione tylko do inwerterów o mocy (250W – 500W) co pokrywa zakresem mikro-inwertery. Parametry opracowanego algorytmu mogą być konfigurowane lokalnie (dla jednego punktu przyłączenia) lub w pewnym obszarze (dla wielu punktów przyłączenia wzdłuż kabla zasilającego). Lokalne konfigurowanie parametrów algorytmu oznacza branie pod uwagę wzrost napięcia z punktu widzenia pojedynczego układu PV, gdy konfigurowanie odbywa się dla obszaru, pozwala to na bilansowanie pomiędzy wymaganiami co do napięcia i produkcji energii elektrycznej na

poziomie linii energetycznej i synchronizacje z zabezpieczeniami, transformatorami OLTC (ang. on load tap changers) lub innymi urządzeniami systemowymi.

W pracy zaproponowano dwu krokową parametryzację w celu osiągnięcia zarówno poziomu wymaganego napięcia oraz maksymalizacji produkcji energii elektrycznej, które realizuje się w pierwszym kroku przez zarządzanie szerokością zakresu zmian napięcia, w drugim przez zarządzanie czasem opóźnienia odpowiedzi inwertera.

Metodologia oparta o SMT jest w pracy przedyskutowana dla dwóch różnych scenariuszy; dla modyfikacji programowej i modyfikacji sprzętowej. Proponowana modyfikacja programowa jest preferowana, przede wszystkim z punktu widzenia ekonomicznego, gdyż w praktyce nie generuje żadnych kosztów zmiany sprzętu, co jest szczególnie istotne, gdy planuje się zmianę w dużej liczbie inwerterów. Większość dostępnych na rynku mikro-inwerterów jest wyposażona w koncentrator danych, którą z punktu widzenia informatyki nazywa się bramką. Poprzez bramkę, mikro-inwerter, używając linii radiowej lub poprzez linię energetyczną oraz protokołu TCP/IP może komunikować się z innymi urządzeniami komputerowymi. W metodologii SMT modyfikacji mikro-inwerterów czas odpowiedzi oraz parametry sterowanego napięcia mogą być ustawiane poprzez łącze (TCP/IP), natomiast bieżące monitorowanie napięcia oraz pętla sterowania napięciem pozostają niezmienniane wewnątrz urządzenia.

Rynek mikro-inwerterów jest rynkiem bardzo konkurencyjny, co z jednej strony pozwala na upowszechnienie w ich stosowaniu, z drugiej zaś ogranicza możliwości ingerencji w oprogramowanie mikro-inwertera, ponieważ firmy nie udostępniają ich niskopoziomowego oprogramowania (ang. firmware) integratorom. Jak wynika z doświadczeń przemysłowych autora pracy, brak jest również standardów w protokole komunikacyjnym zaimplementowanym w urządzeniach. Komplikuje to zastosowanie metodologii SMT modyfikacji mikro-inwerterów poprzez zmianę tylko oprogramowania wysokiego poziomu i

powoduje konieczność modyfikacji sprzętowej, co jednak podnosi koszty tych zmian. Uniezależnienie się od technologii implementowanych przez firmy w mikro-inwerterach jest w pracy osiągnięte przez dobudowanie do instalacji zewnętrznych przełączników, zamiast wykorzystania wewnętrznych wbudowanych w urządzeniu przełączników zabezpieczających. Natomiast wymaga to nieznacznych inwestycji w sprzęt, to jest czujnika napięcia montowanego na przyłączy instalacji PV oraz kontrolera typu master. Koszty tych inwestycji będą, niestety, rosły w przypadku większych farm PV i instalacji wielu mikro-inwerterów.

Metodologia SMT oraz zewnętrzny sterownik master były w ramach pracy zaimplementowane w 14 – szynowym modelu przyłącza zaopatrującego instalację domową w Holandii (badania wykonano w czasie rocznego pobytu autora w Enidhoven Institute of Technology). Na modelu tym symulowano efekty wzrostu i spadku napięcia oraz braku zasilania. Przebieg modelowania i wyniki symulacji opisane są w rozdziale 7 pracy. Dla przeprowadzenia badań opracowanej metodologii w zakresie POC (ang. proof-of-concept) rozważono najbardziej niekorzystny scenariusz to jest przypadek sterowania napięciem przy stałym prądzie. W tych symulacjach zaproponowano i przetestowano dwie metody sterowania; metodę BD (ang. Branch trip Delay) oraz metodę BBD (ang. Branch and Bus trip Delay). Jak widać z wyników (Rozdział 7) po zastosowaniu metodologii SMT ograniczono wzrost napięcia poza dopuszczalne granice, które były często przekraczane w systemie realizowany w innej niż metodologia SMT. Obie metody sterowania BD i BBD dawały identyczne wyniki w zakresie wyrównywania amplitudy przebiegów napięcia i utrzymywania go w określonych granicach oraz w ograniczaniu strat na skutek wyłączenia PV. Jakkolwiek w przypadku zastosowania metody BBD było więcej poziomów dyskretyzacji napięcia co dawało lepsze, bardziej gładkie przebiegi amplitudy napięcia oraz mniejsze straty mocy. Po zastosowaniu sterowania BD zachowano zakres generowania mocy od 25% do 63% natomiast przy sterowaniu BBD zachowano zakres od 38% do 75%.



Metodę sterowania BBD jako sterowanie o lepszej efektywności zastosowano do symulacji całorocznego zachowania sieci niskiego napięcia z PV dla przypadków ze zmiennym obciążeniem oraz zmiennym profilem generowania energii z zastosowaniem PV. W obu przypadkach stałego i zmiennego obciążenia celem symulacji jest pokazanie różnic w produkcji energii w sieci z zastosowaniem SMT oraz bez stosowania SMT. W przypadku zastosowania SMT część energii została zachowana, natomiast bez stosowania SMT całość energii przy wyłączeniu PV ze względu na przekroczenie napięcia została stracona. W czasie symulowanego roku efektywność wykorzystania produkowanej energii była bardzo wysoka i tylko w kilku przypadkach (515) w ciągu roku nie było możliwości zastosowania takiego sterowania, które umożliwiłoby zachowanie części wyprodukowanej przez PV energii, ponieważ nie udało się zsynchronizować sterowania napięciem dla wielu szyn jednocześnie. W ten sposób jak wynika z symulacji uzyskano większy udział energii z PV, który wzrósł z 5A do 8A dla jednego domu w warunkach Holandii, bez zmiany infrastruktury sieci. Zastosowanie tego podejścia do pewnego obszaru (nie tylko do pojedynczego domu) pozwala dystrybutorom energii elektrycznej na optymalizację regulacji wybierając różne kryteria, na przykład, poziom napięcia w funkcji efektywności produkcji energii zapewniając ten sam efekt ekonomiczny dla wszystkich podłączonych użytkowników.

Brak zbilansowania napięcia razem z nadprodukcją energii może spowodować dodatkowo jeszcze większe przekroczenie ograniczenia napięcia. Sieci niskonapięciowe są z zasady gorzej zbilansowane ponieważ w sposób losowy wykorzystywane są nich poszczególne fazy lub losowo rozłożone generatory energii elektrycznej. Mikro-inwertery są w prawie zawsze jednofazowe, a więc ich zastosowanie zwiększa ryzyko pojawienia się braku zbilansowania napięcia. Dla sterowania bilansowaniem napięcia w sieci LV należałoby zainstalować bardzo wiele czujników napięcia, ponieważ taki czujnik musiałby być zainstalowany we wszystkich węzłach sieci, co w konsekwencji byłoby niemożliwe ze

względów ekonomicznych. Dlatego też autor pracy w rozdziale 7 rozważył możliwość zastosowania bramek mikro-inwerterów, a przede wszystkim pobierania zagregowanych danych z mikro-inwerterów, do monitorowania braku bilansowania napięcia w sieci LV. Rozwiązanie zaproponowane przez autora pozwala na wypełnienie tej luki w przypadku gdy w sieci pracują urządzenia jednofazowe i nie ma możliwości analizy parametrów trzech faz, takich jak na przykład brak zbilansowania napięcia innej fazy. Dla tego celu autor zastosował metodę Monte Carlo do symulacji zjawisk losowych w niezbilansowanych sieciach niskiego napięcia.

W rozdziale 7, mniej wymagające obliczeniowo podejście jest przez autora zaproponowane dla monitorowania współczynnika zbilansowania napięcia, jako rozwiązanie alternatywne. Rozwiązanie dowodzi, że sformułowane podejście w zastosowaniach, nie może być wykorzystane, ponieważ posiada zagregowane próbkowanie w całym systemie, w szczególności do bardziej ekstremalnych sytuacji niezbilansowania napięcia. Biorąc pod uwagę brak monitorowania jakości energii elektrycznej, dużą skłonność do braku bilansowania wysokiego napięcia oraz obecność dużej liczby odbiorników jednofazowych w sieciach niskiego napięcia, może być opłacalnym, zainstalowanie rozwiązania monitorowania pośredniego, które mogłoby uzyskać wartość dodaną w istniejących już instalacjach z mikro-inwerterami.

Rozdział 8 jest poświęcony jest analizom techniczno – ekonomicznym. Te analizy, po pierwsze rozważają dynamiczne ograniczanie mocy czynnej jako ogólną kategorię w klasie wszystkich rozwiązań dotyczących ograniczeniem napięcia w sieci LV i rozważa pięć różnych trendów w krajach EU. Dwa trendy, rozróżniane na podstawie kryteriów opartych na impedancji sieci mierzonej od strony dostawcy. Jeden z nich rozważa tylko część rzeczywistą impedancji, drugi zaś impedancję zespoloną wyrażoną jako współczynnik X/R. Biorąc pod uwagę pierwsze kryterium, Polska zajmuje pierwsze miejsce w Europie, natomiast rozważając

drugie kryterium, pierwsze miejsce zajmuje Holandia, a Polska jest na drugim miejscu. Sieci o takich charakterystykach nie są podatne na wzrosty napięcia. Taki trend dla Polski może być wytłumaczony poprzez bardzo wysoką impedancją sieci od strony dostawcy w większości osiedlowych sieci niskiego napięcia oraz duża zmiennością wysokiego napięcia.

W drugiej części analiz techniczno – ekonomicznych, autor udowodnił ekonomiczną przewagę metodologii SMT nad konwencjonalnymi metodami zapobiegania wzrostom napięcia, porównując dla różnych metod straty w produkcji energii elektrycznej. Takie analizy rozważają dwa typy przypadków ograniczeń w oparciu o ich relacje z przypadkami wzrostu napięcia; ograniczenia prewencyjne (ang. preventive) i ograniczenia rozrzutne (ang. wasteful), które ograniczają moc, bez badania przekroczenia granicy chwilowego wzrostu napięcia.

Takie dwutorowe podejście do ograniczanie przekroczenia wartości maksymalnej napięcia, wdrożone w Holandii dało efekty ekonomiczne dla jednego domu, w przypadku podejścia prewencyjnego 96,8% skuteczności w ograniczeniu napięcia oraz w przypadku podejścia rozrzutnego tylko 0.8 kWh więcej energii na rok. Natomiast po zastosowaniu metodologii SMT dało dodatkowo 550 kWh energii w roku, co jest typowym zużyciem miesięcznym dla domu jednorodzinnego w Holandii. Z tego punktu widzenia metodologia SMT dała bardzo pozytywne rezultaty ekonomiczne.

Ostatnią, trzecią częścią analiz techniczno – ekonomicznych zawartych pracy, były analizy związane z wpływem metodologii SMT na niezawodność i trwałość poszczególnych komponentów mikroinwertera. Zagadnienie to jest szczególnie ważne, gdyż w praktyce mikroinwertery projektowane są dla innych warunków pracy, niż ich użytkowanie w warunkach ciągłego przełączania, jakie są charakterystyczne dla metodologii SMT.

W rozdziale tym przeanalizowano niezawodność i dostępność mikroinwertera stosując metodologię, znaną jako 217plus<sup>TM</sup>, powszechnie stosowaną dla analiz niezawodnościowych układów elektronicznych. Analizy te doprowadziły do wniosku, że wprowadzenie metodologii

SMT ograniczy o 50% awarie elektrolitycznych kondensatorów, natomiast zwiększy znacznie liczbę awarii zabezpieczających przekaźników elektromechanicznych. Jako wnioski z tych analiz przedstawiono wytyczne do projektowania dedykowanych do wdrożenia metodologii SMT mikro-inwerterów. W przypadku stosowania aktywnej metody ograniczania mocy, SMT powinno być bardziej preferowane ponieważ prowadzi do mniejszego wzrostu awaryjności kondensatorów na szynie DC, natomiast rekomenduje się zamianę bardzo awaryjnych przekaźników elektromechanicznych na przekaźniki elektroniczne (SSR).

Na zakończenie pracy wykonano symulacje z zastosowaniem techniki hardware-in-the-loop (HIL) dla trzech różnych scenariuszy modyfikacji mikro-inwertera; ograniczanie napięcia przez wyłączanie, sterowanie mocą bierną oraz opracowaną przez autora metodologią SMT. Wymienione powyżej modyfikacje programowe mikro-inwertera badano poprzez symulacje HIL w aspektach wpływu na amplitudę i zawartość harmonicznego napięcia w sieci oraz na wewnętrzne zjawiska zachodzące w mikro-inwerterze, jak elektryczne naprężenia i zachowanie termiczne podstawowych komponentów urządzenia.

Zbudowane modele były symulowane z użyciem symulatora czasu rzeczywistego Typhoon HIL402, za pomocą którego symulowano część wysokoprądową mikro-inwertera z krokiem  $1\mu\text{s}$  na dedykowanym do modelowania elektroniki wysokoprądowej układzie FPGA, natomiast sterownik symulowano na dedykowanym procesorze ARM.

Implementacja metodologii SMT może prowadzić do największego i natychmiastowego obniżenia napięcia w sieci, natomiast przy implementacji tej metodologii należy pamiętać, że powrotne włączenie inwertera do sieci nie powinno następować na niskim poziomie zakresu sterowania, aby uniknąć problem zbyt niskiego napięcia w sprzężeniu DC w układzie regulacji.

Opracowana metodologia SMT zabezpiecza najwyższy pozytywny wpływ na temperaturę wewnętrzną mikro-inwertera, jednak też najbardziej negatywny wpływ na

naprężenia elektryczne w sprzężeniu DC. SMT jest lepszą opcją jeśli konieczna jest eliminacja harmonicznych w inwerterze, w szczególności, gdy ten nie ma wbudowanego aktywnego filtra harmonicznych. Zmiana referencyjnej mocy biernej w inwerterze bez rozprzęgającego moc czynną i bierną sterowania jest niemożliwa do realizacji bez osiągnięcia niezawodności i parametrów pracy przewidzianych normami. Również ta metoda daje trzy razy mniejszy efekt w zmniejszaniu napięcia w sieci niż zaproponowana metodologia SMT i może być w zasadzie zastosowana do ograniczania mocy czynnej. Ponieważ takie podejście jest oparte na sterowaniu PI, jego charakterystyki powinny być szczegółowo zbadane ponieważ zmiana parametrów inwertera może doprowadzić do utraty stabilności.

Jednym z wniosków pracy jest również zwrócenie uwagi fakt, że modyfikacja inwertera może być zrealizowana zdalnie, ale wymaga to wcześniejszego gruntownego zbadania jego zachowania off-line. Biorą pod uwagę występowanie harmonicznych, modyfikacja mocy biernej jest znacznie trudniejsza i należy zwrócić uwagę, że w przypadku ryzyka obniżania prądu nie będzie efektu obniżenia napięcia pochodzącego od zmiany mocy biernej.

Realizacja metodologii SMT w modyfikacji inwerterów jest najprostszą z możliwych i bardzo obiecującą w przypadku modyfikacji zdalnych. Jednak ze względu na dużą liczbę różnych konstrukcji inwerterów i strategii ich sterowania metodologia SMT nie daje możliwości powielania w różnych instalacjach bez konsultacji z producentami poszczególnych typów inwerterów. Z punktu widzenia zjawisk termicznych w inwerterze oraz redukcji harmonicznych prądu, jak udowodniono w pracy, opracowana metodologia SMT daje najlepsze rezultaty. Mikro-inwertery jakie były przeanalizowane w ramach pracy, były najbardziej przystosowane do implementacji jej wyników i pozwalały na osiągnięcie założonych celów pracy, ponieważ umożliwiały zdalną modyfikację oprogramowania i podniesienie niezawodności działania. Powyższe udowodniono przeprowadzając eksperymenty na rzeczywistych przemysłowych inwerterach.

