

Michał KRYSZKOWIAK
Adam GULCZYŃSKI

MODEL SYMULACYJNY I EKSPERYMENTALNY PRZEKSZTAŁTNIKA SOLARNEGO WSPÓŁPRACUJĄCEGO Z SIECIĄ ENERGETYCZNĄ

STRESZCZENIE *W artykule zaprezentowano strukturę przekształtnika pełniącego funkcję sprzęgu między siecią energetyczną prądu przemiennego a źródłem energii odnawialnej – panelami fotowoltaicznymi (PV). Opisywane rozwiązanie odznacza się wysokim współczynnikiem sprawności, przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dobrych parametrów jakościowych przekształcanej energii. W wyniku zastosowania falownika sieciowego pracującego w regulacji nadążnej prądu osiągnięto prąd sieciowy o małej zawartości niepożądanych harmonicznych i teoretycznie zerowej mocy biernej. Ze względu na sposób funkcjonowania ogniw fotowoltaicznych, których wydajność zależy nie tylko od panujących warunków atmosferycznych, ale również i od sposobu obciążenia, szczególną uwagę zwrócono na zaimplementowany algorytm MPPT. Jego zadaniem jest zapewnienie takiego punktu pracy ogniw PV, aby podążać za punktem mocy maksymalnej zależnie od warunków pracy systemu. Przedstawiono również wybrane wyniki badań.*

Słowa kluczowe: ogniwa PV, falownik, BOOST, algorytm MPPT

DOI: 10.5604/00326216.1210755

1. WSTĘP

W artykule zaprezentowano część silnoprądową oraz sterującą opracowanej struktury przekształtnika energoelektronicznego pełniącego funkcję sprzęgu między siecią energetyczną prądu przemiennego a źródłem energii odnawialnej (OZE). W analizowanym przypadku źródłem tym jest zespół paneli fotowoltaicznych (PV). Przedstawiono m.in. zaimplementowany algorytm MPPT (Maximum Power Point Tracking), umożliwiający osiągnięcie maksymalnej efektywności całego systemu.

dr inż. Michał KRYSZKOWIAK, mgr inż. Adam GULCZYŃSKI
e-mail: mikrystek@poczta.onet.pl, Adam.Gulczynski@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska, ul Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

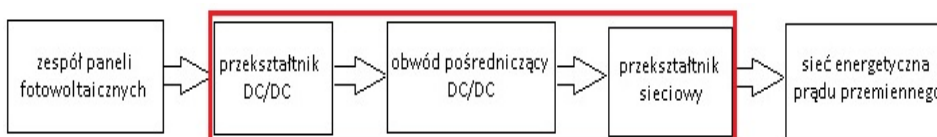
PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, ISSN-0032-6216, LXIII, zeszyt 273, 2016

Ponadto, w celu zapewnienia wysokiej jakości parametrów energii oddawanej do sieci, zastosowano falownik tranzystorowy o sinusoidalnym prądzie wyjściowym, który umożliwia jednocześnie stabilizację napięcia na szynie stałoprądowej DC systemu.

W artykule zaprezentowano także zbudowany na bazie przeprowadzonych wcześniej badań symulacyjnych model eksperymentalny opisywanego przekształtnika z uwzględnieniem sposobu emulacji pracy ogniwa fotowoltaicznego, która umożliwiła wstępną ocenę poprawności funkcjonowania zaimplementowanego algorytmu MPPT.

2. SCHEMAT BLOKOWY I OGÓLNA IDEA DZIAŁANIA SYSEMU PRZETWARZANIA ENERGII SOLARNEJ

Schemat blokowy opracowanego systemu umożliwiającego przekazywanie (i przekształcanie) energii z zespołu paneli fotowoltaicznych do sieci energetycznej prądu przemiennego zaprezentowano na rysunku 1.

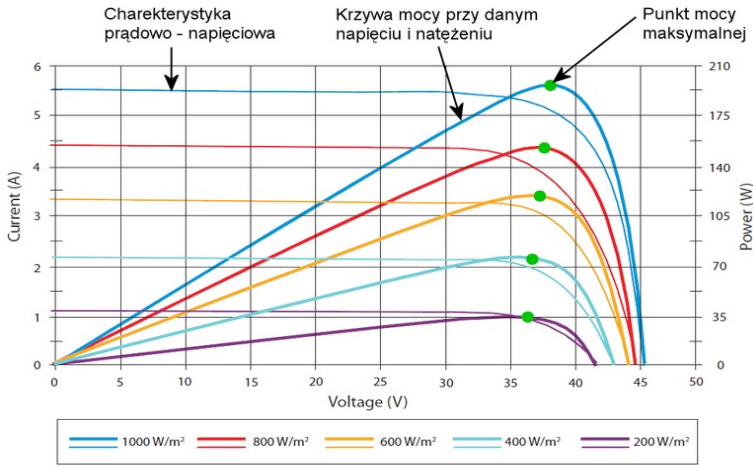


Rys. 1. Schemat blokowy systemu przekształcania i przesyłu energii solarnej

Możemy wyróżnić w tym przypadku następujące bloki, a mianowicie:

- zespół paneli fotowoltaicznych PV,
- sieć energetyczną prądu przemiennego,
- bloki przekształtnika energoelektronicznego pełniące funkcję sprzęgu DC/AC, w skład którego wchodzi:
 - przekształtnik DC/DC typu BOOST,
 - obwód pośredniczący DC/DC,
 - blok przekształtnika sieciowego DC/AC (falownik sieciowy).

W rozważanym przypadku założono wykorzystanie zespołu paneli fotowoltaicznych o zakresie zmienności napięcia wyjściowego (zależnego m.in. od temperatury, stopnia obciążenia oraz natężenia padającego światła słonecznego) od 150 do 450 V. Przykładową rodzinę charakterystyk prądowo-napięciowych zespołu ogniw fotowoltaicznych PV przedstawiono na rysunku 2 [1]. Jak z nich wynika, moc uzyskiwana z baterii słonecznej jest zależna w dużym stopniu od sposobu obciążenia. W konsekwencji istnieje taka wartość napięcia i prądu, dla których moc uzyskiwana ze źródła energii odnawialnej jest maksymalna (tzw. punkt mocy maksymalnej – rys. 2). Z tego też powodu, w celu zapewnienia optymalnych warunków pracy całego systemu, w układzie sterowania przekształtnikiem DC/DC należało zaimplementować algorytm MPPT. Jego zadaniem jest zapewnienie takiego punktu pracy ogniwa, aby podążać za punktem mocy maksymalnej zależnie od aktualnych warunków pracy systemu (m.in. temperatury otoczenia, natężenia padającego światła słonecznego). Opracowany i zaimplementowany algorytm MPPT [2, 3] przedstawiono w dalszej części artykułu.

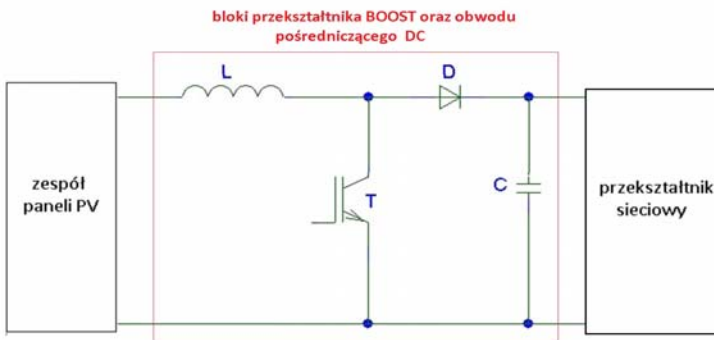


Rys. 2. Rodzina charakterystyk prądowo-napięciowych zespołu ogni fotowoltaicznych [1]

3. OBWÓD STAŁOPRĄDOWY DC/DC SYSTEMU SOLARNEGO

3.1. Część silnoprądowa

Ze względu na przyjęty zakres napięć wyjściowych ogni fotowoltaicznych PV (150 V – 450 V) oraz wymaganą minimalną wartość napięcia na szynie DC, która powinna być w rozważanym przypadku większa od amplitudy napięcia sieciowego, część silnoprądowa przekształtnika DC/DC bazuje na układzie impulsowym typu BOOST (rys. 3).

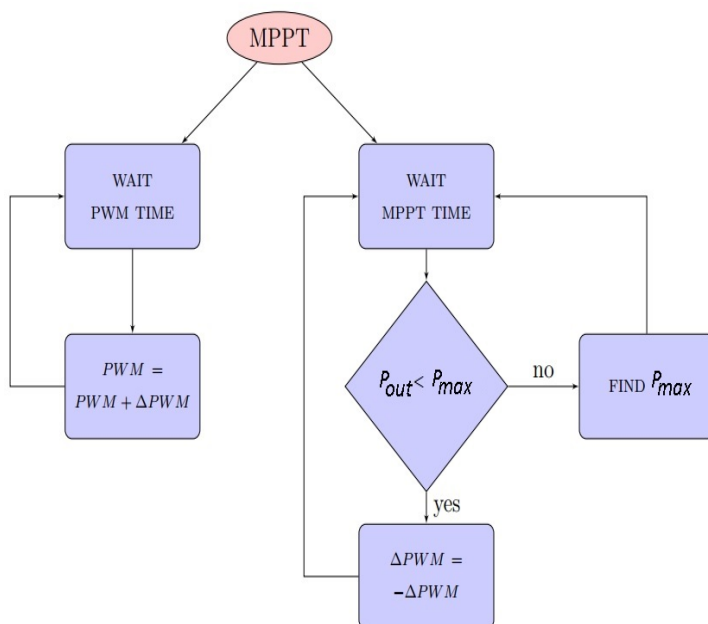


Rys. 3. Schemat ideowy przekształtnika DC/DC typu BOOST

Zadaniem tego przekształtnika jest podwyższanie wartości napięcia wyjściowego zespołu paneli fotowoltaicznych i dostarczanie (doładowywanie) zespołu kondensatorów wchodzących w skład obwodu pośredniczący DC/DC. Na rysunku 3 pominięto zaimplementowaną w układzie docelowym tzw. diodę bypass. Umożliwia ona przekazywanie energii z ogniw PV do kondensatorów wejściowych falownika sieciowego z pominięciem układu typu BOOST. Sytuacja ta jest jednak możliwa tylko wtedy, kiedy wartość chwilowa napięcia wyjściowego ogniw PV jest wyższa od wymaganej wartości napięcia na kondensatorach wejściowych przekształtnika sieciowego (falownika o sinusoidalnym prądzie sieci).

3.2. Algorytm sterowania przekształtnikiem BOOST systemu solarnego – algorytm MPPT

Zadaniem przekształtnika DC/DC typu BOOST jest podwyższenie wartości napięcia wejściowego i dostarczanie (doładowywanie) zespołu kondensatorów stanowiących obwód pośredniczący DC/DC, z którego zasilany jest prostownik (falownik) sieciowy. W celu uzyskania możliwie wysokiej efektywności wykorzystania zasobów energetycznych paneli fotowoltaicznych PV opracowano, a następnie zaimplementowano w układzie sterowania przekształtnikiem BOOST algorytm MPPT [2, 3]. Jego schemat blokowy zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy opracowanego algorytmu MPPT (Maximum Power Point Tracking)

W opracowanym algorytmie wydzielono dwie główne pętle. Pierwsza pętla odpowiedzialna jest za modyfikację współczynnika wypełnienia impulsów (PWM) załączających klucz (T) części silnoprądowej przekształtnika BOOST (rys. 3). Proces ten odbywa się w określonych odstępach czasu oznaczonych jako ($PWM\ TIME$) i jest zależny od drugiej pętli, która decyduje o kierunku zmian współczynnika wypełnienia o pewną stałą wartość zdefiniowaną jako (ΔPWM).

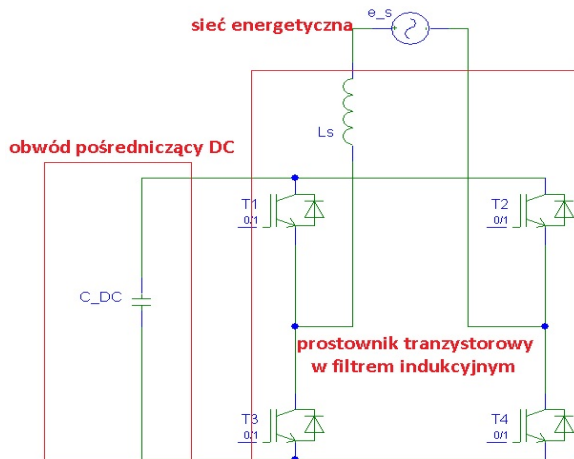
Zadaniem drugiej pętli algorytmu jest poszukiwanie maksymalnej mocy, jaką można uzyskać w określonym punkcie pracy systemu. W zależności od wyniku porównania wartości mocy wyjściowej (P_{out}) dla bieżącego punktu pracy ogniwa PV z wcześniej wyznaczoną wartością maksymalną, układ sterowania decyduje o kierunku zmian współczynnika wypełnienia impulsów oraz poszukuje nowego maksimum mocy. Porównanie to jest przeprowadzane z okresem określonym, jako ($MPPT\ TIME$).

Należy zaznaczyć, że zadaniem układu sterowania przekształtnikiem DC/DC nie jest stabilizacja napięcia w obwodzie pośredniczącym. Zadanie to spełnia regulator, który został zaimplementowany w układzie sterowania przekształtnikiem (falownikiem) sieciowym.

4. STRUKTURA ORAZ ALGORYTM STEROWANIA FALOWNIKIEM SIECIOWYM

4.1. Obwód części silnoprądowej

Falownik sieciowy (prostownik w trybie pracy falownikowej) – odpowiedzialny bezpośrednio za przekazywanie energii do sieci energetycznej – bazuje na tranzystorowym mostku H z indukcyjnym filtrem wyjściowym. Schemat ideowy układu zaprezentowano na rysunku 5.



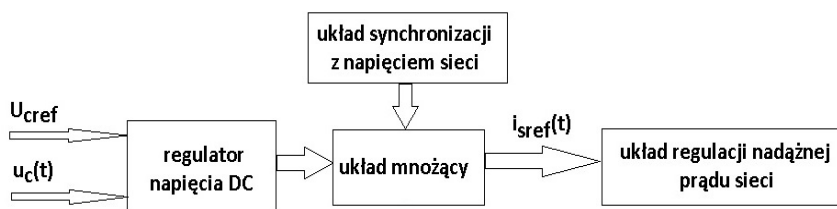
Rys. 5. Schemat ideowy falownika sieciowego

Układ ten przekazuje energię z baterii kondensatorów obwodu pośredniczącego (ładowanych za pośrednictwem przekształtnika typu BOOST) do sieci, przy jednoczesnym zapewnieniu prądu sieci o przebiegu możliwie dobrze zbliżonym do sygnału sinusoidalnego oraz braku generacji mocy biernej.

Należy zaznaczyć, że poprawna praca tego układu możliwa jest tylko pod warunkiem, że wartość chwilowa napięcia w obwodzie pośredniczącym DC jest większa od wartości amplitudy napięcia sieci. Bazując na definicji prądów aktywnych [4] opracowano układ sterowania falownikiem sieciowym pracującym w regulacji nadążnej prądu umożliwiającym regulację oraz stabilizację napięcia na kondensatorach stałoprądowego obwodu pośredniczącego [5]. Należy zaznaczyć, że funkcji tej nie spełnia – w opisywanym przypadku – układ sterowania pracą przekształtnika typu BOOST. Realizuje on jedynie algorytm MPPT.

4.2. Algorytm sterowania falownikiem sieciowym

Stabilizacja napięcia na szynie DC jest konieczna dla poprawnej pracy układu. W przypadku jej braku napięcie to zmienia się w sposób niekontrolowany – w zależności m.in. od wartości energii dostarczanej z ogniw PV poprzez układ BOOST. W prezentowanym rozwiązaniu funkcja ta jest realizowana poprzez zmianę amplitudy prądu zadanego prostownika sieciowego [5]. Dzięki temu możliwa jest regulacja ilości energii (mocy czynnej) oddawanej do sieci, a w konsekwencji stabilizacja wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym. Schemat blokowy, prezentujący ideę działania układu sterowania falownikiem sieciowym zaprezentowano na rysunku 6.



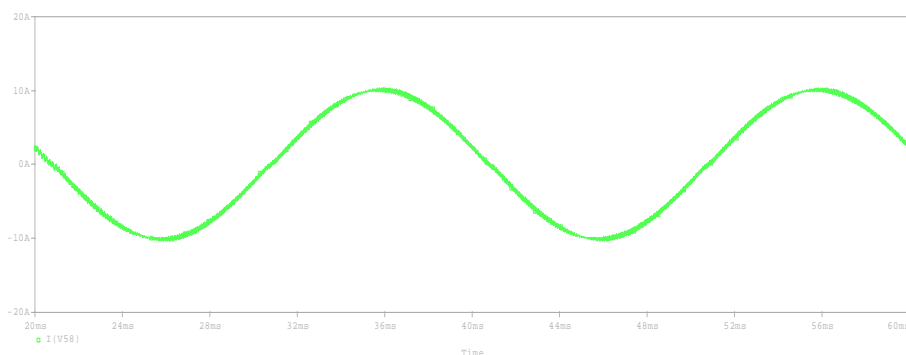
Rys. 6. Schemat blokowy układu sterowania falownikiem sieciowym

Blok w postaci regulatora napięcia DC odpowiada za wyznaczenie amplitudy prądu referencyjnego sieci $i_{sref}(t)$. Natomiast układ synchronizacji sygnału referencyjnego z napięciem sieci pełni funkcję generatora sygnału sinusoidalnego o jednostkowej amplitudzie, który jest przesunięty względem napięcia sieci w fazie o 180 stopni elektrycznych w celu zapewnienia pracy falownikowej przy teoretycznie zerowej wartości mocy biernej.

Zadaniem kolejnego bloku w postaci układu regulacji nadążnej prądu sieci jest zapewnienie generacji prądu sieci o kształcie, jak najbardziej zbliżonym do sygnału zadanego $i_{sref}(t)$.

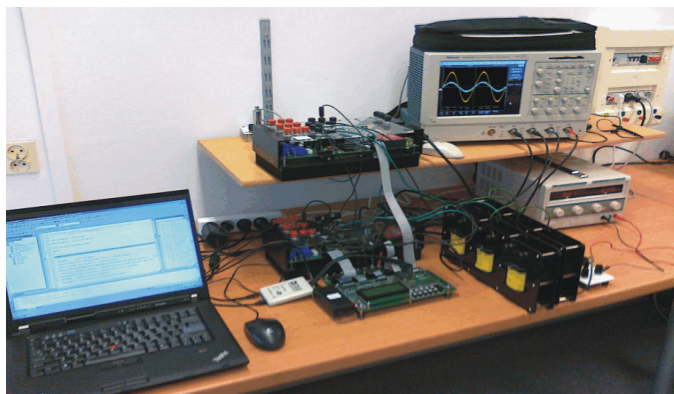
5. WYBRANE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

Wstępne badania symulacyjne oraz eksperymentalne przeprowadzono dla jednofazowej wersji układu. Model symulacyjny zaprojektowano wykorzystując pakiet oprogramowania Orcad firmy Cadence. Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych potwierdzono poprawność funkcjonowania proponowanego rozwiązania części silnoprądowej oraz sterującej układu przekształtnikowego. Przykładowy przebieg prądu fazowego sieci (wynik uzyskany na drodze symulacji) odznaczający się niską zawartością wyższych harmonicznych (wartość współczynnika THD wynosiła 1,2%) zaprezentowano na rysunku 7. W torze sterowania falownikiem sieciowym zastosowano algorytm modulacji jednobiegunowej (częstotliwość impulsowania przyjęto na poziomie 12 kHz). Regulator prądu sieci wchodzący w skład bloku układu regulacji nadążnej prądu (rys. 6) bazuje w analizowanym przypadku na niekonwencjonalnej strukturze będącej połączeniem dolno- i górnoprzepustowych filtrów typu IIR [5, 6], co odpowiadało zaimplementowanemu algorytmowi sterowania w modelu eksperymentalnym.



Rys. 7. Przebieg prądu sieciowego generowanego przez falownik

Badania eksperymentalne wersji jednofazowej układu przeprowadzono wykorzystując m.in. przekształtnik typu LABINVERTER P3-5.0/550MFE [7] i zestaw uruchomieniowy DSP typu ALS-G3-1369 [8] wyposażony w zmiennopozycyjny procesor sygnałowy SHARC ADSP-21369 firmy Analog Devices, a także zasilacz laboratoryjny napięcia stałego z regulowanym ograniczeniem napięcia i prądu wyjściowego (emulujący pracę ogniwa fotowoltaicznego). Ze względu na dużą dynamikę działania układu ograniczenia mocy wyjściowej zasilacza część badań przeprowadzono z wyłączoną tą jego funkcją, zastępując ją szeregowo włączonym z jego wyjściem rezystorem. Dzięki temu możliwa była weryfikacja poprawności działania algorytmu MPPT – sprawdzanie spełnienia warunku dopasowania wartości mocy oddawanej przez układ do maksymalnej mocy generowanej przez „ogniwo”. W końcowej fazie badań laboratoryjnych zasilacz zastąpiono rzeczywistymi ogniwami fotowoltaicznymi.



Rys. 8. Stanowisko laboratoryjne – widok ogólny przy pracy z zasilaczem laboratoryjnym emulującym działanie ogniwa PV

Poniżej zaprezentowano przykładowe zestawienie otrzymanych wyników eksperymentalnych:

- wartość średnia napięcia wyjściowego paneli fotowoltaicznych: 233 V,
- wartość skuteczna napięcia sieciowego: 230 V,
- wartość mocy czynnej oddawanej do sieci: 940 W,
- wyznaczona (maksymalna) sprawność systemu: 96%.

Badania eksperymentalne potwierdziły poprawność funkcjonowania układu oraz umożliwiły dostrojenie nastaw stałych czasowych algorytmu MPPT. Należy przy tym zaznaczyć, że w celu poprawnego funkcjonowania niniejszego algorytmu częstotliwość wykonywania pętli odpowiedzialnej za zmianę współczynnika wypełnienia powinna być większa niż częstotliwość wykonywania pętli decydującej o kierunku zmian współczynnika wypełnienia impulsów załączających.

6. PODSUMOWANIE

W ramach badań sprzęgu DC/AC zespołu ogniw fotowoltaicznych i przesyłowej sieci energetycznej opracowano modele symulacyjny i eksperymentalny układu sterowania oraz części silnoprowadowej. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przyjętych założeń teoretycznych, co z kolei pozwoliło na zgodne z nimi funkcjonowanie całego systemu.

W ramach kolejnych etapów badań przewiduje się modyfikację, umożliwiającą m.in. polepszenie współczynnika sprawności – zwłaszcza przy pracy układu z mocą mniejszą niż znamionowa. Przewiduje się również prace nad optymalizacją algorytmu MPPT pod kątem zwiększenia dokładności i szybkości śledzenia dysponowanej wartości mocy wyjściowej paneli PV. Planowane są ponadto prace mające na celu m.in. eliminację, bądź ograniczenie zjawiska związanego z przepływem niepożądanego prądu na skutek obecności pojemności pasożytniczej między powierzchnią paneli a podłożem. Problem ten nie jest jednak przedmiotem niniejszego artykułu.

LITERATURA

1. <http://solaris18.blogspot.com/2012/01/panel-fotowoltaiczny-punkt-mocy.html> [dostęp 10.2014].
2. Krystkowiak M., Gulczyński A.: Budowa oraz algorytm sterowania przekształtnika energoelektronicznego zaimplementowanego w niekonwencjonalnym systemie mini elektrowni wodnej dedykowanej dla jednostek jachtowych, Poznan University of Technology Academic Journals, zeszyt 80, s. 27-34, 2014.
3. Krystkowiak M., Gulczyński A.: Budowa i zasada działania modelu eksperymentalnego mini elektrowni wodnej dedykowanego dla jednostek jachtowych, PES-9, Kościelisko, s. 133-136, 2014.
4. Fryze S.: Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7 i 8, 1931.
5. Krystkowiak M.: Rozprawa doktorska, pt.: Układ prostownikowy mocy o polepszonych wskaźnikach z energoelektronicznym modulatorem prądu, Politechnika Poznańska, 2009.
6. Gwóźdź M., Krystkowiak M.: Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal power grid current, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7, 2009.
7. ALFINE-TIM: Dokumentacja techniczna: Laboratoryjny przekształtnik 3-fazowy typu P3-5.0/550MFE LABINVERTER wer.1.10.
8. Analog Devices: Data Sheet Final – SHARC Processor. ADSP-21369, Rev. D.

Przyjęto do druku dnia 02.03.2016 r.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL MODELS
OF SOLAR CONVERTER WORKING WITH POWER GRID

Michał KRYSKOWIAK, Adam GULCZYŃSKI

ABSTRACT *In this paper, the elaborated structures of the main circuit and control circuit of the power electronics converter working as a coupling between an energetic grid and photovoltaic panels were presented. The described solution is characterized by very good quality parameters of the transformed energy. To obtain a current network, which is very similar to a sine wave, the inverter working in a current tracking controller mode was used. Additionally the elaborated MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithm was described. With help of this algorithm the highest possible efficiency of the whole system was achieved. The chosen simulation and experimental results of research were analyzed.*

Keywords: *photovoltaic PV, inverter, BOOST, MPPT algorithm*



Dr inż. Michał KRYSWKOWIAK w latach 1996 – 2001 studiował na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. W 2001 roku ukończył z wyróżnieniem studia magisterskie (specjalizację Energoelektronika i Napęd Elektryczny). W tym samym roku podjął pracę na Politechnice Poznańskiej na stanowisku asystenta. W 2009 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie Elektrotechniki i specjalności Energoelektronika oraz awansował na adiunkta. W ciągu ostatnich lat zajmował się m.in. tematyką modulacji prądów w układach prostowniczych mocy i aktywnych filtrach równoległych, a także przekształtnikami energoelektronicznymi implementowanymi w systemach wykorzystujących źródła energii odnawialnej (nawiązując jednocześnie współpracę z firmami zewnętrznymi).

Mgr inż. Adam GULCZYŃSKI w latach 2006 – 2011 studiował na Politechnice Poznańskiej. W roku 2011 ukończył studia II stopnia na kierunku Elektrotechnika (specjalność Mikroprocesorowe Systemy sterowania w Elektrotechnice) oraz studia I stopnia na kierunku Matematyka (specjalność Modelowanie Matematyczne). Obecnie jest asystentem w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania, Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się projektowaniem układów elektronicznych i energoelektronicznych oraz tworzeniem ich oprogramowania.

