

Michał Krystkowiak, Michał Gwózdź
Politechnika Poznańska, Poznań

PRZEKSZTAŁNIK ENERGEOELEKTRONICZNY PEŁNIĄCY FUNKCJĘ SPRZĘGU MIĘDZY SIECIĄ ENERGETYCZNĄ A ZESPOŁEM PANELI FOTOWOLTAICZNYCH PV

POWER ELECTRONICS CONVERTER WORKING AS A COUPLING BETWEEN ENERGETIC GRID AND PHOTOVOLTAIC PANELS PV

Streszczenie: W artykule zaprezentowano część silnoprądową oraz sterującą opracowanej struktury przekształtnika energoelektronicznego pełniącego funkcję sprzęgu między siecią energetyczną prądu przemiennego a źródłem energii odnawialnej OZE - paneli fotowoltaicznych PV. Opisano zaimplementowane rozwiązania mające m.in. na celu uzyskanie możliwie wysokiej sprawności energetycznej całego systemu przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dobrej jakości parametrów przekształcanej energii. Przedstawiono również wybrane wyniki wstępnych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych układu.

Abstract: In this paper the elaborated structures of main circuit and control circuit of power electronics converter working as a coupling between energetic grid and photovoltaic panels were presented. The implemented solutions, which were used in order to obtain the highest possible efficiency of the whole system were also described. The chosen simulation and experimental results of research were analyzed.

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne PV, przekształtnik energoelektroniczny, algorytm MPPT
Keywords: photovoltaic PV, power electronics converter, MPPT algorithm

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 dla różnych punktów pracy.

Ponadto, w celu zapewnienia wysokiej jakości energii oddawanej do sieci, zastosowano falownik tranzystorowy o sinusoidalnym prądzie wyjściowym, który umożliwia jednocześnie stabilizację napięcia na szynie DC. W ramach dalszych prac eksperymentalnych zaproponowano m.in. zastosowanie w obwodzie stałoprądowym baterii superkondensatorów spełniających funkcję bufora energii elektrycznej. W konsekwencji w pewnym stopniu ograniczono wpływ zmienności wydajności energetycznej paneli fotowoltaicznych (zależnej np. od panujących warunków atmosferycznych) na funkcjonowanie prezentowanego systemu przetwarzania energii. Rozważono również możli-

wość implementacji w stałoprądowym obwodzie DC/DC – pośredniczącym w przekazywaniu energii między zespołem paneli PV, a układem falownika sieciowego - przekształtnika typu BOOST pracującego w trybie wielokanałowym (interleaved). W konsekwencji spodziewane jest zwiększenie sprawności systemu oraz ograniczenie pulsacji napięcia na szynie DC (prostownika sieciowego).

W artykule zaprezentowano także wybrane wyniki wstępnych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, umożliwiających kompleksową ocenę poprawności funkcjonowania układu.

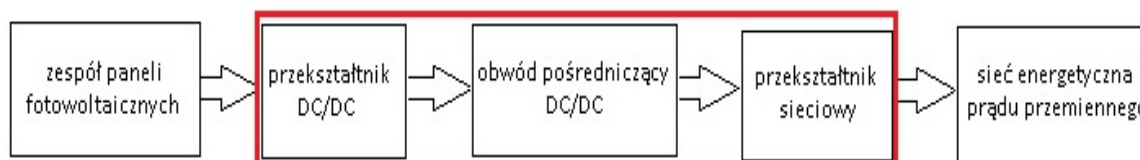
2. Ogólny schemat blokowy i koncepcja systemu przetwarzania energii solarnej

Schemat blokowy systemu umożliwiającego przekazywanie (i przekształcanie) energii z zespołu paneli fotowoltaicznych do sieci energetycznej prądu przemiennego zaprezentowano na rys.1. Możemy wyróżnić następujące bloki, a mianowicie:

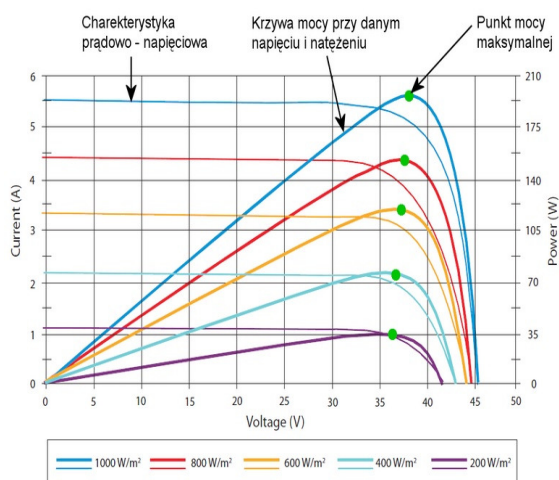
- zespół paneli fotowoltaicznych PV,
- sieć energetyczną prądu przemiennego,
- bloki przekształtnika energoelektronicznego pełniącego funkcję sprzęgu DC/AC, w skład którego wchodzi:

- przekształtnik DC/DC typu BOOST,
- obwód pośredniczący DC/DC,
- blok przekształtnika sieciowego DC/AC.

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 450V. Przykładową rodzinę charakterystyk prądowo-napięciowych zespołu ogniw fotowoltaicznych PV przedstawiono na rys. 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. 5.2). Z tego też powodu, w celu zapewnienia optymalnych warunków pracy całego systemu, w układzie sterowania przekształtnikiem DC/DC należy 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. 1. Schemat blokowy systemu przekształcania i przesyłu energii

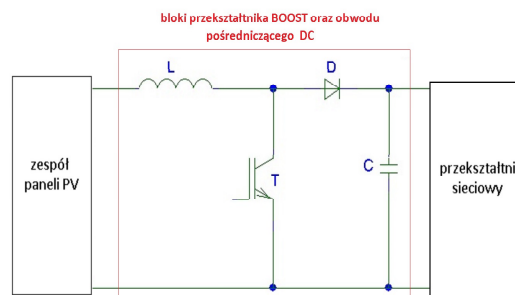


Rys. 2. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe zespołu ogniw fotowoltaicznych [1]

3. Obwód stałoprądowy DC/DC systemu solarnego

3.1. Część silnoprądowa

Ze względu na przyjęty zakres napięć wyjściowych ogniw fotowoltaicznych PV (150V-450V) oraz wymaganą minimalną wartość napięcia na szynie DC część silnoprądowa przekształtnika DC/DC bazuje na układzie impulsowym typu BOOST (rys. 3).

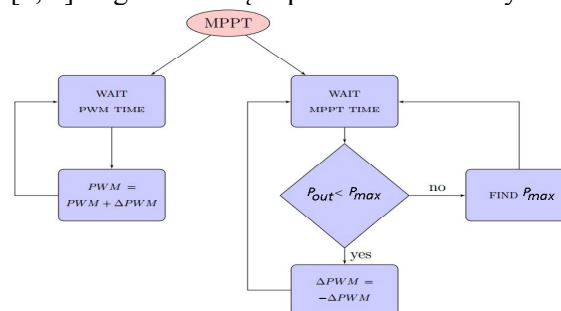


Rys. 3. Schemat ideowy przekształtnika DC/DC typu BOOST

3.2. Opracowany 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 strukturę zaprezentowano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu MPPT

W opracowanym algorytmie wydzielono dwie główne pętle. Pierwsza pętla odpowiedzialna jest za modyfikację współczynnika wypełnienia impulsów (PWM) załączających klucz (T) części silnopądowej 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 (Δ PWM).

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).

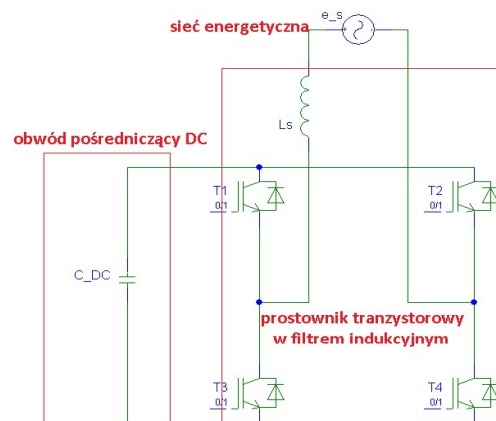
Należy zaznaczyć, że zadaniem układu sterowania przekształtnikiem DC/DC nie jest stabilizacja napięcia w obwodzie pośredniczącym. Zadanie to spełnia regulator, który został zaimplementowany w układzie sterowania przekształtnikiem sieciowym.

4. Część silnopądowa oraz algorytm sterowania przekształtnikiem sieciowym

Falownik sieciowy – odpowiedzialny bezpośrednio za przekazywanie energii do sieci energetycznej – bazuje (w wersji jednofazowej układu) na tranzystorowym mostku H z indukcyjnym filtrem wyjściowym. Schemat ideowy układu zaprezentowano na rys. 5. 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 (współczynnik mocy zbliżony do 1).

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 (w przypadku wersji trójfazowej rozważanej w dalszej części niniejszego artykułu wartość tego napięcia musi być wyższa od wartości maksymalnej napięcia mię-

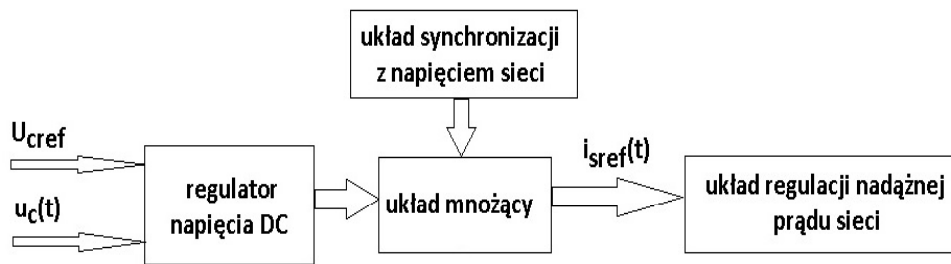
dzyfazowego). Bazując na definicji prądów aktywnych [4] opracowano układ sterowania falownikiem sieciowym pracującym w regulacji nadążnej prądu umożliwiającym regulację oraz stabilizację napięcia na kondensatorach stałoprądowego obwodu pośredniczącego [5]. Należy zaznaczyć, że funkcji tej nie spełnia – w opisywanym przypadku – układ sterowania pracą przekształtnika typu BOOST. Realizuje on jedynie algorytm MPPT.



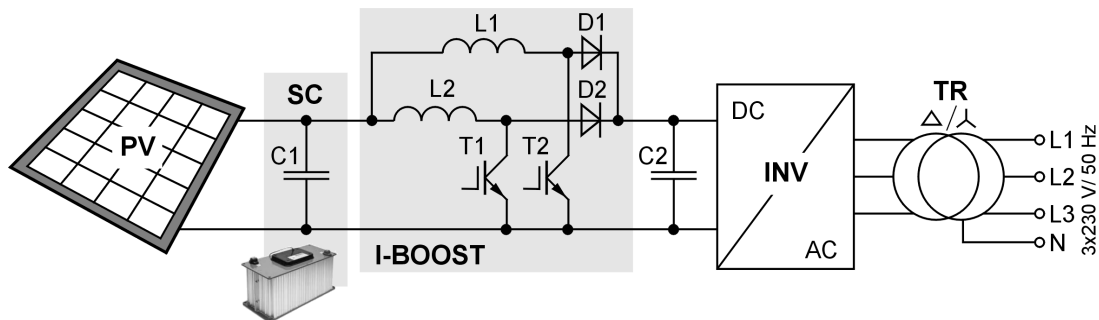
Rys. 5. Schemat części silnopądowej falownika sieciowego

Stabilizacja napięcia na szynie DC jest konieczna dla poprawnej pracy układu. W przypadku jej braku napięcie to zmienia się w sposób niekontrolowany – w zależności 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 rys. 6.

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.



Rys. 6. Algorytm sterowania falownikiem sieciowym



Rys. 7. Zmodyfikowana struktura silnopiędowa systemu przekształcania energii solarnej

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. Proponowane modyfikacje części silnopiędowej i sterującej systemu

Należy zaznaczyć, że w dotychczasowych rozważaniach pominięto niekorzystne zjawisko związane z przepływem prądu na skutek obecności pojemności pasozytniczej między powierzchnią paneli fotowoltaicznych a podłożem – n.p. gruntem (tzw. leakage current). Jest to bardzo istotny problem – zwłaszcza z punktu widzenia zapewnienia bezpiecznej eksploatacji układu. Eliminacja tego problemu jest możliwa np. poprzez sprzężenie falownika wyjściowego z siecią energetyczną poprzez transformator, zapewniający separację galwaniczną omawianego układu od tejże sieci. Rozwiązanie takie rozpatrywano w ramach dalszych badań systemu. Założono w tym przypadku wykorzystanie falownika sieciowego w wersji trójfazowej (rys. 7), co daje możliwość oddawania do sieci większych mocy przy jednoczesnym zapewnieniu pełnej symetrii układu. Zastosowanie transformatora umożliwia ponadto optymalizację energetyczną pracy przekształtnika typu BOOST – poprzez m.in. odpowiedni dobór przekładni transformatora. W celu dalszego polepszenia jakości przekształcania energii zmodyfikowano również

strukturę przekształtnika typu BOOST – poprzez zastosowanie wariantu umożliwiającego pracę w trybie pracy wielokanałowej [9], a w rozważanym przypadku – dwukanałowej (rys. 6). Dzięki przesunięciu impulsów sterujących łącznikami tranzystorowymi (T1, T2) w zmodyfikowanej przetwornicy (I-BOOST) o 180 st. el. możliwe jest dwukrotne zmniejszenie częstotliwości pracy każdego z łączników tranzystorowych przy jednoczesnym ograniczeniu ich prądów w porównaniu do rozwiązania klasycznego (rys. 3) – bez zwiększania wartości pulsacji prądu wyjściowego przetwornicy. W konsekwencji możliwe jest m.in. poprawienie sprawności systemu. W ramach dalszych prac rozważana jest również implementacja baterii superkondensatorów (SC) w obwodzie stałoprądowym (rys. 7). W ten sposób możliwe jest ograniczenie wpływu nagłych wahań napięcia wyjściowego ogniw fotowoltaicznych PV spowodowanych zmianą panujących warunków atmosferycznych na działanie całego systemu.

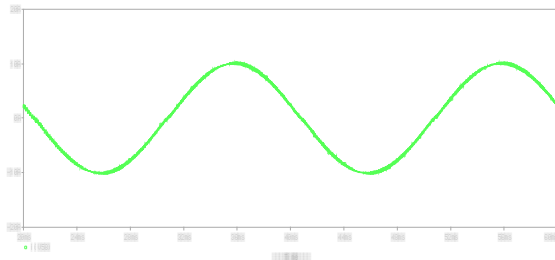
Na zamieszczonych schematach nie uwzględniono diody typu „bypass”, która umożliwia przekazywanie energii z zespołu ogniw PV do szyny DC obwodu pośredniczącego z pominięciem przekształtnika I-BOOST. Taki stan pracy systemu możliwy jest w przypadku, kiedy wartość napięcia wyjściowego ogniw fotowoltaicznych jest większa od wartości chwilowej napięcia na szynie DC (natomiast sam mecha-

nizm stabilizacji tego napięcia pozostaje nadal taki, jak opisano poprzednio).

6. Wybrane wyniki badań

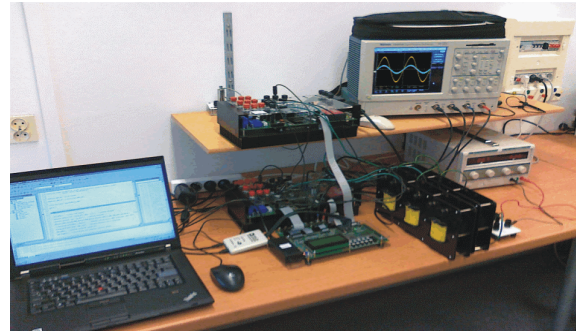
Wstępne badania symulacyjne oraz eksperymentalne przeprowadzono dla jednofazowej wersji układu. W ramach dalszych etapów prac planowana jest implementacja sprzętowa zmodernizowanej struktury układu (rys. 6).

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 odznaczający się niską zawartością wyższych harmonicznych (wartość współczynnika THD wynosiła 1,2%) zaprezentowano na rys. 7. W torze sterowania falownikiem sieciowym zastosowano w tym przypadku algorytm modulacji jednobiegunowej (częstotliwość impulsowania przyjęto na poziomie 12kHz). W ramach regulatora prądu sieci wykorzystano niekonwencjonalną strukturę bazującą na kombinowanym połączeniu dolno- i górnoprzepustowych filtrów typu IIR [5, 6], co odpowiadało zaimplementowanemu algorytmowi sterowania w modelu eksperymentalnym.



Rys. 8. Przykładowy przebieg prądu sieci generowanego przez falownik sieciowy

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 zmienno- i stałoprądowy procesor sygnałowy SHARC ADSP-21369 firmy Analog Devices, a także zasilacz laboratoryjny napięcia stałego z regulowanym ograniczeniem napięcia i prądu wyjściowego (emulujący ogniwa fotowoltaiczne).



Rys. 9. Stanowisko laboratoryjne – widok ogólny przy pracy z zasilaczem laboratoryjnym emulującym działanie ogniwa PV

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 (emulacja rezystancji wewnętrznej ogniwa). 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.

Poniżej zestawiono przykładowe zestawienie otrzymanych wyników eksperymentalnych:

- wartość średnia napięcia wyjściowego paneli fotowoltaicznych: 233V,
- wartość skuteczna napięcia sieciowego: 230V,
- wartość mocy czynnej oddawanej do sieci: 940W,
- 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 (rys. 4).

7. Podsumowanie

W ramach badań sprzęgu DC/AC zespołu ogniw fotowoltaicznych i przemysłowej sieci energetycznej opracowano modele teoretyczny, symulacyjny i eksperymentalny układu sterowania oraz energoelektronicznego. Uzyskane

wyniki potwierdziły poprawność przyjętych założeń teoretycznych, co z kolei pozwoliło na zgodne z nimi funkcjonowanie całego systemu. W ramach kolejnych etapów badań układu sprzęgu przewiduje się jego modyfikację, umożliwiającą m.in. polepszenie współczynnika sprawności – zwłaszcza przy pracy układu z mocą mniejszą niż znamionowa. Przewiduje się również dalsze prace nad optymalizacją algorytmu MPPT pod kątem zwiększenia dokładności i szybkości śledzenia dysponowanej wartości mocy wyjściowej paneli PV.

8. 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, Issue 80 (2014), s. 27-34.
- [3]. Krystkowiak M., Gulczyński A.: Budowa i zasada działania modelu eksperymentalnego mini elektrowni wodnej dedykowanego dla jednostek jachtowych, PES-9, Kościelisko 2014, s. 133-136.
- [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 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.
- [9]. Tomaszuk A., Krupa A.: "High efficiency high step-up DC/DC converters – a review", *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES*, Vol. 59, No. 4, pp. 475-483 (2011).

Autorzy

dr inż. Michał Krystkowiak, dr hab. inż. Michał Gwóźdź, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Zakład Energoelektroniki i Sterowania
email: mikrystek@poczta.onet.pl
Michal.Gwozdz@put.poznan.pl