Prototyp energoelektronicznego przekształtnika solarnego współpracującego z siecią energetyczną prądu przemiennego

Michał Krystkowiak, Michał Gwóźdź

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, uwzględniając m.in. zastosowany algorytm MPPT oraz niekonwencjonalną strukturę regulatora prądu. Przedstawiono także wybrane wyniki wstępnych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych układu.

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne PV, przekształtnik energoelektroniczny, algorytm MPPT, regulator prądu

PRTOTOTYPE OF POWER ELECTRONICS SOLAR CONVERTER WORKING WITH ENERGETIC GRID

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, including elaborated MPPT algorithm and unconventional structure of current regulator, 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.*

Keywords: photovoltaic PV, power electronics converter, MPPT algorithm, current regulator

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 (z zaimplementowanym w układzie sterowania regulatorem prądu o niekonwencjonalnej strukturze), 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 możliwość 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).

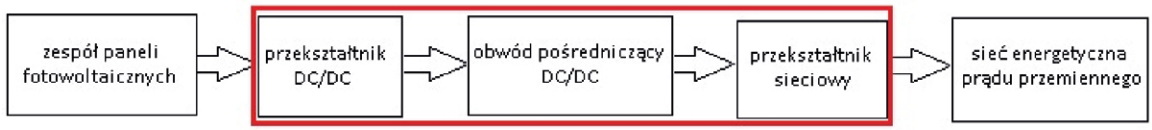
W artykule zaprezentowano także wybrane wyniki wstępnych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, umożliwiających kompleksową ocenę poprawności funkcjonowania układu.

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. Można wyróżnić następujące bloki:

- zespół paneli fotowoltaicznych PV;
- sieć energetyczną prądu przemiennego;
- bloki przekształtnika energoelektronicznego pełniącego funkcję sprzęgu DC/AC, w skład którego wchodzą:
  - 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 V do 450 V. Przykładową rodzinę charakterystyk prądowo-napięciowych zespołu ogniw fotowoltaicznych PV przedstawiono na rys. 2 [1]. Jak wynika z tych charakterystyk, moc uzyskiwana z baterii



Rys. 1. Schemat blokowy systemu przekształcania i przesyłu energii

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 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.

3. Obwód stałoprądowy DC/DC systemu solarnego

3.1. Część silnoprądowa

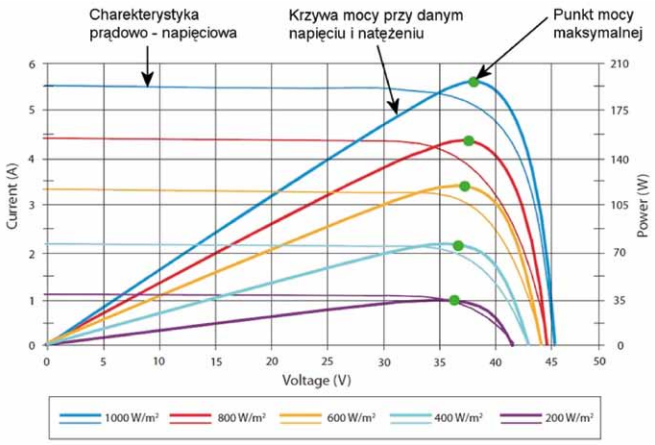
Ze względu na przyjęty zakres napięć wyjściowych ogniw fotowoltaicznych PV (150–450 V) oraz wymaganą minimalną wartość napięcia na szynie DC w obwodzie stałoprądowym zaimplementowano przekształtnik impulsowy typu BOOST (rys. 3).

3.2. Opracowany algorytm MPPT

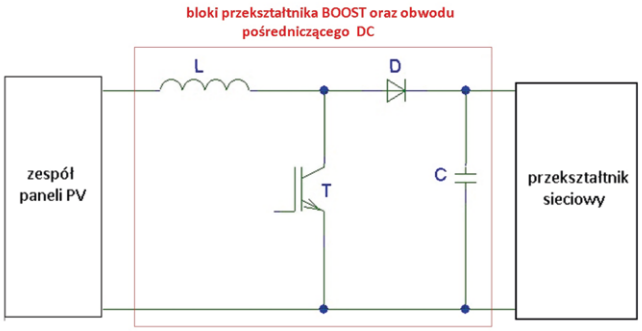
Zadaniem przekształtnika DC/DC typu BOOST jest podwyższenie wartości napięcia wejściowego i dostarczanie (doładowywanie) zespołu kondensatorów stanowiących obwód pośredniczący DC/DC, z którego zasilany jest prostownik sieciowy pracujący w trybie pracy falownikowej. W celu uzyskania możliwie wysokiej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

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).

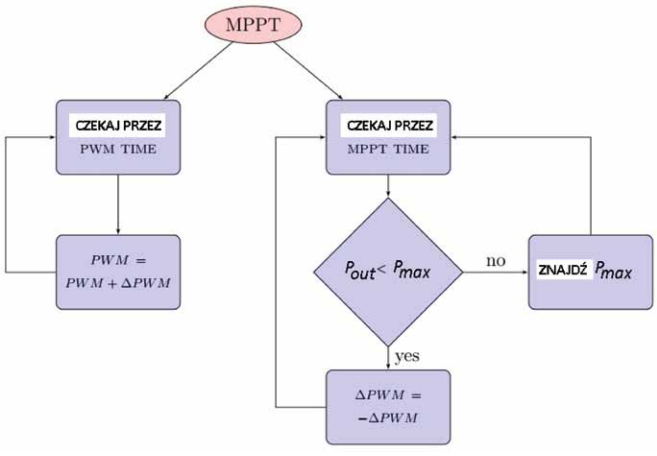
Zadaniem drugiej pętli algorytmu jest poszukiwanie maksymalnej mocy, jaką można uzyskać w określonym punkcie pracy systemu. W zależności od wyniku porównania wartości mocy wyjściowej (P_{out}) dla bieżącego punktu pracy ogniwa PV z wcześniej wyznaczoną wartością maksymalną, układ sterowania decyduje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



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



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



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu MPPT

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.

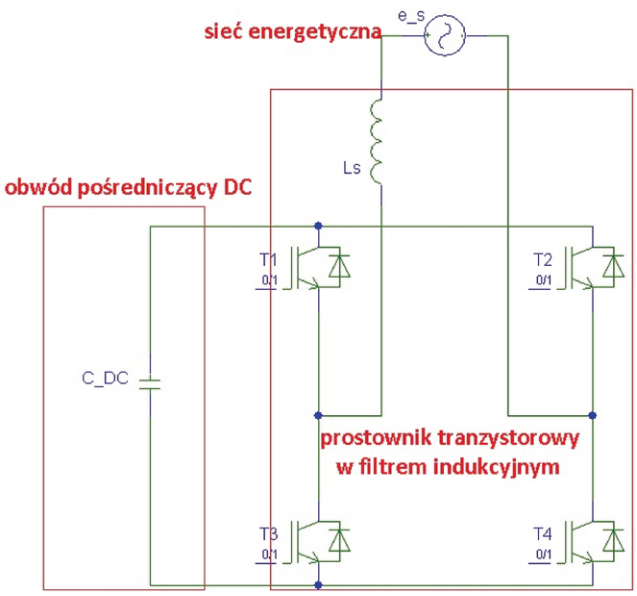
4. Układ sterowania falownikiem sieciowym z niekonwencjonalną strukturą regulatora prądu

Falownik sieciowy – odpowiedzialny bezpośrednio za przekazywanie energii do sieci energetycznej – zbudowano, wykorzystując tranzystorowy mostek 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 międzyfazowego). Bazując na definicji prądów aktywnych [5] opracowano układ sterowania falownikiem sieciowym pracującym w regulacji nadążnej prądu, umożliwiającym stabilizację napięcia na kondensatorach stałoprądowego obwodu pośredniczącego [6]. Należy zaznaczyć, że funkcji tej nie spełnia – w opisywanym przypadku – układ sterowania pracą przekształtnika typu BOOST. Realizuje on jedynie algorytm MPPT.

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 przez zmianę amplitudy prądu zadanego prostownika sieciowego [6]. 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 w fazie względem napięcia sieci o 180 stopni elektrycznych w celu zapewnienia pracy falownikowej przy teoretycznie zerowej wartości mocy biernej.



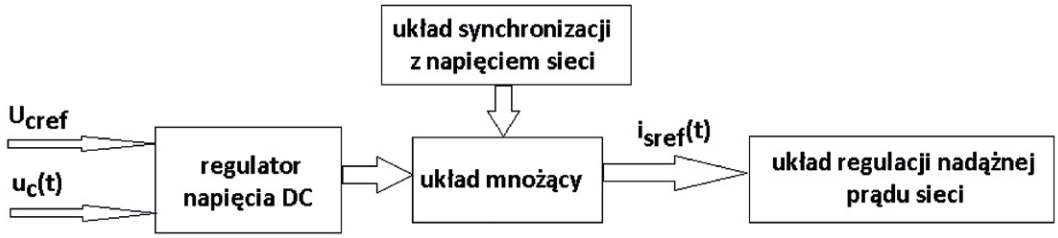
Rys. 5. Schemat części silnoprądowej falownika sieciowego (prostownika w trybie pracy falownikowej)

Zadaniem układu regulacji nadążnej prądu sieci jest zapewnienie generacji prądu sieci o kształcie jak najbardziej zbliżonym do sygnału zadanego $i_{sref}(t)$. W tym celu zaimplementowano modulator PWM oraz regulator prądu o nietypowej strukturze opracowanej w ramach własnych prac, bazujący na kombinowanym połączeniu dolno- i górnoprzepustowych filtrów [6, 7]. Transmitancję operatorową struktury regulatora prądu wyrażono zależnością (1).

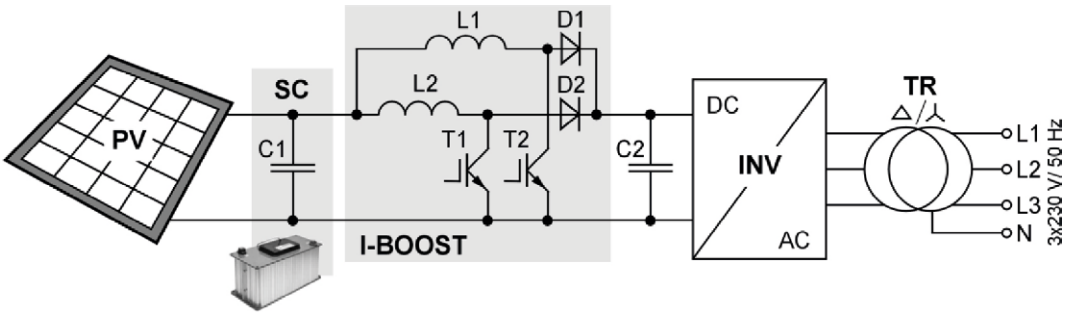
$$F(s)=\left(1+\frac{K_1 sR_2C}{1+sR_1C}\right)\frac{K_F}{1+sT_{FDP}} \qquad (1)$$

gdzie:

- T_{FDP} – stała czasowa filtru dolnoprzepustowego;
- K_F – wzmocnienie filtru dolnoprzepustowego;
- R_2C – stała czasowa części różniczkującej (filtr górnoprzepustowy);
- R_1 – parametr umożliwiający ograniczenie wzmocnienia części różniczkującej dla wyższych częstotliwości;
- K_1 – wyraża efektywne oddziaływanie części różniczkującej na cały układ regulacji.



Rys. 6. Algorytm sterowania falownikiem sieciowym



Rys. 7. Zmodyfikowana struktura silnoprądowa systemu przekształcania energii solarnej

Implementacja opisanego transmitancją (1) regulatora umożliwiła m.in. skrócenie czasu poświęconego na proces strojenia w stosunku do znanych rozwiązań klasycznych regulatorów [6, 7].

W trakcie doboru parametrów i struktury filtrów (pełniących funkcję regulatora prądu) wykorzystywano kryteria wymienione poniżej [6, 7].

Pierwszym z analizowanych kryteriów doboru struktury i parametrów regulatora prądu było ograniczenie szybkości zmian sygnału modulującego modulatora szerokości impulsów. Spełnienie tego warunku gwarantuje, że częstotliwość pracy tranzystorów nie przekroczy progu częstotliwości, z jaką pracuje modulator PWM.

Drugim istotnym dla optymalnego doboru regulatora kryterium jest zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji – przy możliwie wiernym odwzorowaniu w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego.

Ostatnie z analizowanych kryteriów związane było z efektem aliasingu zachodzącym w sygnale sprzężenia zwrotnego. Efekt ten ma miejsce w dyskretnych systemach przetwarzania sygnałów i jest konsekwencją niespełnienia przez takie systemy twierdzenia Kotielnikowa-Shanonna, określającego maksymalną wartość pasma sygnału próbkowanego w stosunku do częstotliwości próbkowania.

Implementacja filtru dolnoprzepustowego w strukturze regulatora prądu umożliwia ograniczenie zjawiska aliasingu. Traktując modulator PWM jako układ próbkująco-pamiętający, można przyjąć, że częstotliwość graniczna filtru powinna być dwukrotnie mniejsza niż częstotliwość pracy modulatora. Natomiast dodatkowa struktura bazująca na członie różniczkującym (filtr górnoprzepustowy), która odznacza się dodatnim przesunięciem fazy, w założeniu ma za zadanie m.in. zminimalizować efekty opóźnienia fazy wprowadzone w układ sterowania przede wszystkim przez modulator PWM.

5. Proponowane modyfikacje części silnoprądowej i sterującej systemu

Należy zaznaczyć, że w dotychczasowych rozważaniach pominięto niekorzystne zjawisko związane z przepływem prądu na skutek obecności pojemności pasożytniczej między powierzchnią paneli fotowoltaicznych a podłożem – np. 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. 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 – m.in. poprzez odpowiedni dobór przekładni transformatora.

W celu dalszego polepszenia jakości przekształcania energii zmodyfikowano również strukturę przekształtnika typu BOOST – poprzez zastosowanie wariantu umożliwiającego pracę w trybie wielokanałowym [8, 9], a w rozważanym przypadku – dwukanałowym (rys. 7). 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 związanej ze stratami dynamicznymi (w trakcie procesów łączeniowych) oraz statycznymi (w czasie przewodzenia) kluczy zastosowanych w przetwornicy I-BOOST.

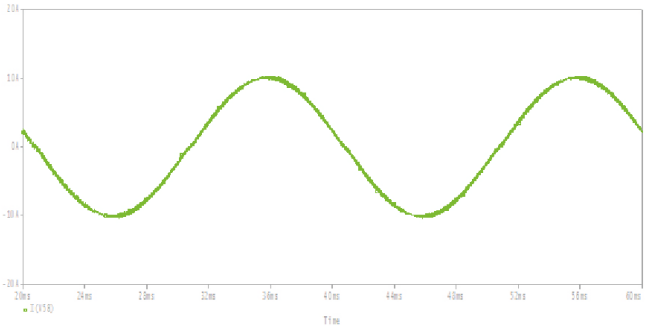
W ramach dalszych prac rozważana jest również implementacja baterii superkondesatorów (SC) w obwodzie stałoprądowym (rys. 7). W ten sposób możliwe jest ograniczenie wpływu nagłych wahań napięcia wyjściowego ogniw fotowoltaicznych PV spowodowanych zmianą panujących warunków atmosferycznych na działanie 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.

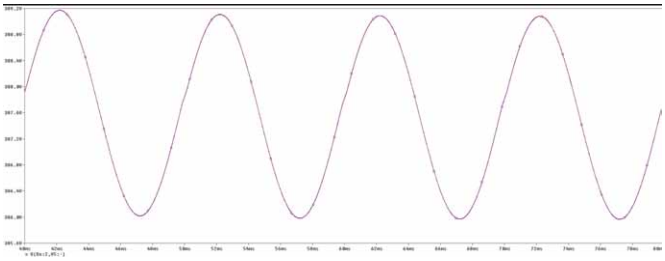
6. Wybrane wyniki badań

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



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

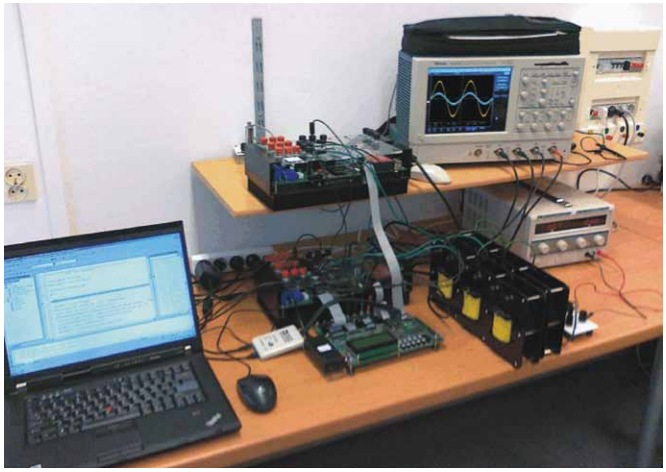


Rys. 9. Przebieg napięcia obwodu pośredniczącego DC/DC (o wartości międzyszczytowej 3 V) – symulacja

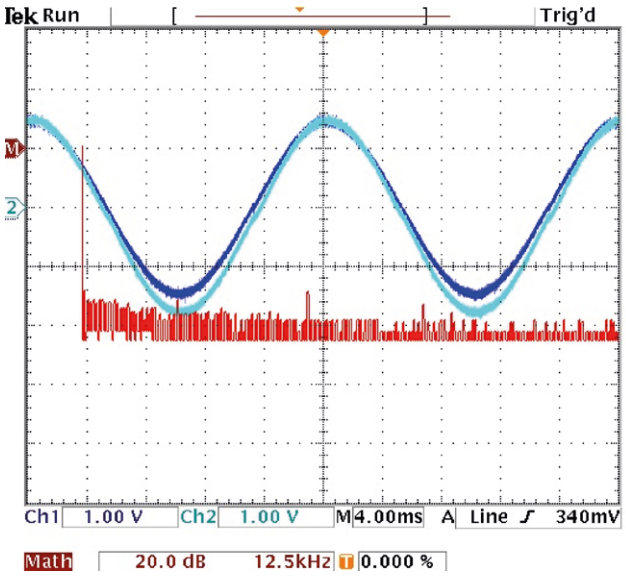
części silnoprądowej oraz sterującej układu przekształtnikowego. Przykładowy przebieg prądu fazowego sieci, odznaczający się niską zawartością wyższych harmonicznych (wartość współczynnika THD wynosiła 1,2%), zaprezentowano na rys. 8. W torze sterowania falownikiem sieciowym zastosowano w tym przypadku algorytm modulacji jednobiegunowej (częstotliwość impulsowania przyjęto na poziomie 12 kHz). Do budowy regulatora prądu sieci wykorzystano niekonwencjonalną strukturę bazującą na kombinowanym połączeniu dolno- i górnoprzepustowych filtrów typu IIR [6, 7], co odpowiadało zaimplementowanemu algorytmowi sterowania w modelu eksperymentalnym.

Na rys. 9 zaprezentowano natomiast przebieg napięcia na kondensatorach obwodu pośredniczącego DC/DC. Mimo poprawnej stabilizacji napięcia na poziomie napięcia referencyjnego, wynoszącego w analizowanym przypadku 400 V, zauważyć można składową przemienną o częstotliwości 100 Hz. Wynika ona z oddziaływania sieci energetycznej na układ oraz istoty działania prostownika wyjściowego pracującego w trybie pracy falownikowej.

Badania eksperymentalne wersji jednofazowej układu przeprowadzono, wykorzystując m.in. przekształtnik typu LABINVERTER P3-5.0/550MFE [10] i zestaw uruchomieniowy DSP typu ALS-G3-1369 [11], 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).



Rys. 10. Stanowisko laboratoryjne – widok ogólny przy pracy z zasilaczem laboratoryjnym emulującym działanie ogniwa PV



Rys. 11. Przebieg prądu referencyjnego oraz rzeczywistego sieci (oraz jego analiza widmowa w skali decybelowej) – badania eksperymentalne

Ze względu na dużą dynamikę działania układu ograniczenia mocy wyjściowej zasilacza część badań przeprowadzono przy wyłączeniu tej funkcji. Przy braku ograniczenia mocy w zasilaczu włączono w szereg na wyjściu rezystor, którego rolą była emulacja rezystancji wewnętrznej ogniwa PV. 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 podano 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 przekształtnikowego (bez uwzględnienia ogniw PV): 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 model symulacyjny i model eksperymentalny układu sterowania wraz z częścią energoelektroniczną. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przyjętych założeń teoretycznych.

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.

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 minielektrowni 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 minielektrowni wodnej dedykowanego dla jednostek jachtowych*. PES-9, Kościelisko 2014, s. 133–136.

[4] Tan K., Islam S.: *Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 19, Number 2, June 2004.

[5] Fryze S.: *Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*. „Przegląd Elektrotechniczny" 7 i 8/1931.

[6] Krystkowiak M.: Rozprawa doktorska, pt.: *Układ prostowniko wy mocy o polepszonych wskaźnikach z energoelektronicznym modulatorem prądu*. Politechnika Poznańska, 2009.

[7] Gwóźdź M., Krystkowiak M.: *Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal power grid current*. „Przegląd Elektrotechniczny" 7/2009.

[8] Gwóźdź M.: *Stability of Discrete Time Systems on Base Generalized Sampling Expansion*. „Kwartalnik Elektryka", Politechnika Śląska, 1 (217)/ 2011, Gliwice, 29–40.

[9] Tomaszuk A., Krupa A.: *High efficiency high step-up DC/DC converters – a review*. Bulletin of the Polish Academy of Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, pp. 475–483 (2011).

[10] ALFINE-TIM: Dokumentacja techniczna: Laboratoryjny przekształtnik 3-fazowy typu P3-5.0/550MFE LABINVERTER wer.1.10.

[11] Analog Devices: Data Sweet Final – SHARC Processor. ADSP-21369, Rev. D.

dr inż. Michał Krystkowiak, dr hab. inż. Michał Gwóźdź – Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Energoelektroniki i Sterowania;
e-mail: mikrystek@poczta.onet.pl,
e-mail: michal.gwozdz@put.poznan.pl

artykuł recenzowany