

*ogniwo fotowoltaiczne,
wielokanałowy przekształtnik energoelektroniczny,
algorytm MPPT, prąd upływu*

Michał KRYSTKOWIAK*, Michał GWÓZDŹ*

PRZEKSZTAŁTNIK ENERGEOELEKTRONICZNY DLA ELEKTROWNI FOTOWOLTAICZNEJ WSPÓLPRACUJĄCEJ Z SIECIĄ ENERGETYCZNĄ

W artykule zaprezentowano części sterującą oraz silnoprądową przekształtnika energoelektronicznego pełniącego funkcję sprzęgu pomiędzy źródłem energii odnawialnej (OZE) w postaci paneli fotowoltaicznych (PV), a siecią elektroenergetyczną. Przedstawiono zastosowane rozwiązania mające na celu m.in. uzyskanie możliwie wysokiej sprawności energetycznej całego systemu przy jednoczesnym zachowaniu dobrej jakości parametrów energii przekazywanej do sieci. W artykule zwrócono również uwagę na zjawisko przepływu niepożądanego tzw. prądu upływu, związanego z pojemnością doziemną paneli PV. Przedstawiono również wybrane wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych układu.

1. WSTĘP

1.1. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE SYSTEMU SOLARNEGO

W artykule zaprezentowano część silnoprądową oraz sterującą opracowanej struktury przekształtnika energoelektronicznego pełniącego funkcję sprzęgu między siecią energetyczną prądu przemiennego, a źródłem energii odnawialnej. W analizowanym przypadku źródłem tym jest zespół paneli fotowoltaicznych (PV). Przedstawiono m.in. zaimplementowany algorytm MPPT (ang. *Maximum Power Point Tracking*), umożliwiający osiągnięcie maksymalnej efektywności całego systemu dla różnych punktów pracy PV. Ponadto, w celu zapewnienia wysokiej jakości energii oddawanej do sieci, zastosowano falownik tranzystorowy o quasi-sinusoidalnym prądzie wyjściowym, który umożliwia jednocześnie stabilizację napięcia na szynie DC. W ramach prac eksperymentalnych zaproponowano m.in. zastosowanie w obwodzie DC baterii super-

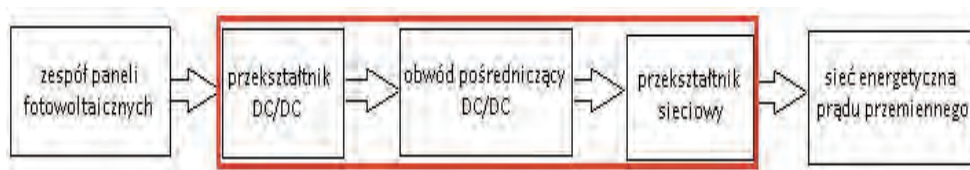
* Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: mikrystek@poczta.onet.pl, Michal.Gwozdz@put.poznan.pl

kondensatorów lub zespołu akumulatorów spełniających funkcję bufora energii elektrycznej. W konsekwencji, w znaczącym stopniu ograniczono wpływ zmiennej wydajności energetycznej paneli fotowoltaicznych (zależnej, np. od panujących warunków atmosferycznych) na funkcjonowanie systemu przetwarzania energii. Rozważono również możliwość implementacji w obwodzie pośredniczącym DC układu przekształtnika typu BOOST w wersji wielokanałowej (ang. *interleaved BOOST converter* – I-BOOST). W analizach uwzględniono także oddziaływanie na pracę układu negatywnego zjawiska związanego z przepływem tzw. prądu upływu paneli PV oraz zaprezentowano sposób jego eliminacji.

W artykule przedstawiono ponadto wybrane wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, umożliwiających kompleksową ocenę poprawności funkcjonowania całego systemu.

1.2. SCHEMAT BLOKOWY SYSTEMU I OGÓLNA ZASADA DZIAŁANIA

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

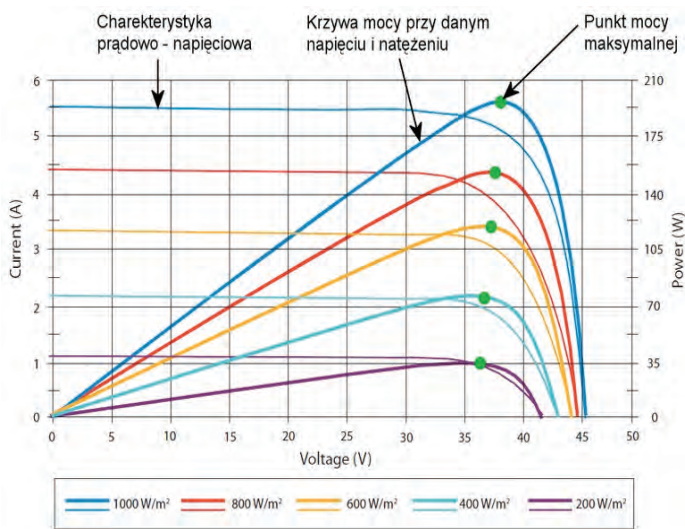


Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy systemu przetwarzania energii

Można w nim wyróżnić następujące bloki i elementy systemu przetwarzania energii:

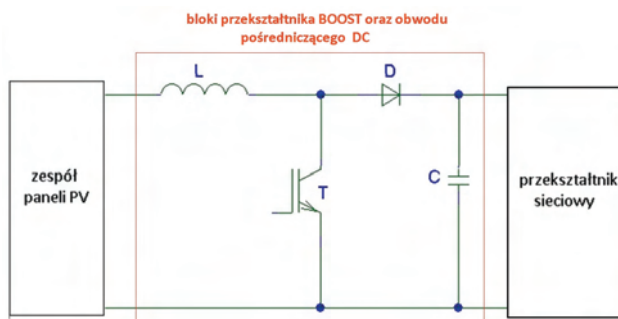
- bloki przekształtników energoelektronicznych pełniących funkcję sprzęgu DC/AC, w skład którego wchodzi:
 - przekształtnik DC/DC typu BOOST – wraz z obwodem pośredniczącym prądu stałego,
 - przekształtnik (falownik) sieciowy,
- samą sieć energetyczną.

W rozważanym przypadku założono wykorzystanie zespołu paneli fotowoltaicznych o zakresie zmienności napięcia wyjściowego (zależnego m.in. od temperatury, stopnia obciążenia oraz natężenia padającego promieniowania słonecznego) od 150 do 450 V – stąd konieczność zastosowania przetwornicy DC/DC typu BOOST. Przykładową rodzinę charakterystyk prądowo-napięciowych zespołu ogniw fotowoltaicznych PV przedstawiono na rysunku 2 [12].



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe zespołu ogniw PV [12]

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 osiąga wartość maksymalną (tzw. punkt mocy maksymalnej). Z tego też powodu, w celu zapewnienia optymalnych – w sensie energetycznym – warunków pracy całego systemu, w układzie sterowania przekształtnikiem DC/DC należy zaimplementować algorytm sterowania wartością pobieranej z paneli mocy. 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 promieniowania słonecznego). Opracowany i zaimplementowany algorytm MPPT [6, 7] przedstawiono w dalszej części artykułu.

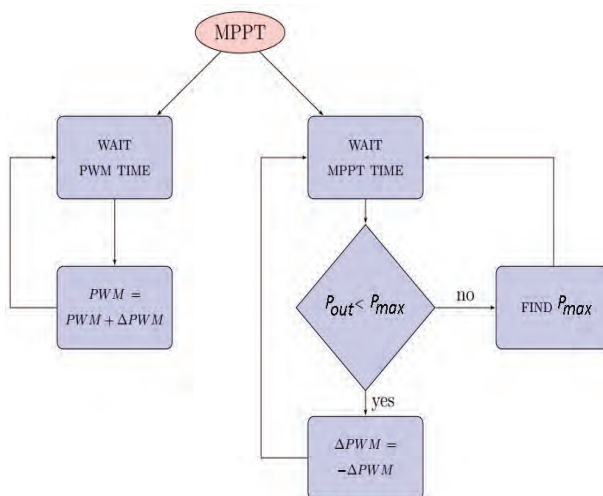


Rys. 3. Schemat ideowy części silnoprądowej przekształtnika impulsowego (wersja jednokanałowa)

Ze względu na przyjęty zakres napięć wyjściowych ogniw fotowoltaicznych (150 V–450 V) oraz minimalną wymaganą wartość napięcia na szynie DC część silnoprądowa przekształtnika DC/DC bazuje na układzie impulsowym typu BOOST. Na rysunku 3 przedstawiono klasyczną strukturę takiego układu. W docelowym prototypie przemysłowym zamierzone jest zaimplementowanie układu BOOST w wersji wielokanałowej (I-BOOST) – gwarantującego większą efektywność przekazywania energii w szerokim zakresie zmienności napięcia wejściowego (tj. wyjściowego paneli PV).

2. ZAIMPLEMENTOWANY ALGORYTM MPPT

Zadaniem przekształtnika DC/DC typu BOOST (lub I-BOOST) jest podwyższenie wartości napięcia wejściowego i dostarczanie (doładowywanie) zespołu kondensatorów stanowiących obwód pośredniczący DC/DC, z którego zasilany jest falownik sieciowy. W celu uzyskania możliwie wysokiej efektywności wykorzystania zasobów energetycznych paneli fotowoltaicznych PV opracowano, a następnie zaimplementowano w układzie sterowania przekształtnikiem BOOST (I-BOOST) opracowany algorytm MPPT [6, 7]. Jego schemat zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy zaimplementowanego algorytmu MPPT

W niniejszym 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 (ΔP_{WM}). Zadaniem drugiej pętli algorytmu jest poszukiwanie maksymalnej mocy, jaką uzyskać można 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 *MPPT TIME*.

Uzyskanie możliwie wysokiej efektywności w przypadku opracowanego algorytmu jest uwarunkowane przede wszystkim właściwym doбором parametrów odpowiednio: *PWM TIME* oraz *MPPT TIME*. W analizowanym przypadku ich optymalizacji dokonano doświadczalnie na podstawie oceny wyników uzyskanych w trakcie badań eksperymentalnych. W konsekwencji częstotliwość wykonywania pętli odpowiedzialnej za zmianę współczynnika wypełnienia impulsów była pięciokrotnie większa od częstotliwości, z jaką działa pętla decydująca o kierunku zmian tegoż współczynnika.

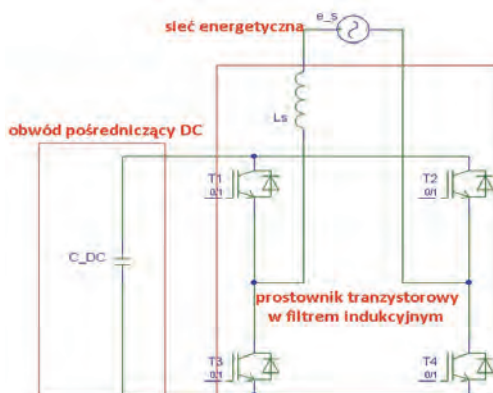
Należy zaznaczyć również, że zadaniem układu sterowania przekształtnikiem DC/DC nie jest stabilizacja napięcia w obwodzie pośredniczącym. Zadanie to spełnia regulator, który został zaimplementowany w układzie sterowania przekształtnikiem sieciowym – opisany w dalszej części artykułu.

3. CZĘŚĆ SILNOPRĄDOWA I STERUJĄCA BLOKU FALOWNIKA SIECIOWEGO

Falownik sieciowy (prostownik tranzystorowy w trybie pracy falownikowej) – 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 rysunku 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.

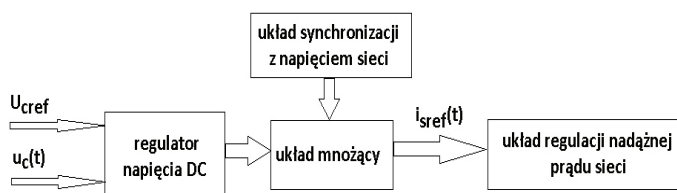
Poprawna praca tego układu możliwa jest tylko pod warunkiem, że wartość chwilowa napięcia w obwodzie pośredniczącym DC jest większa od wartości amplitudy napięcia sieci (w przypadku wersji trójfazowej rozważanej w dalszej części niniejszego artykułu wartość tego napięcia musi być wyższa od wartości maksymalnej napięcia przewodowego). Bazując m.in. na definicji prądów aktywnych [1, 8] opracowano układ sterowania falownikiem sieciowym pracującym w regulacji nadążnej prądu umożliwiającym regulację oraz stabilizację napięcia na kondensatorach stałoprądowe-

go obwodu pośredniczącego [5]. Należy zaznaczyć, że – w opisywanym przypadku – funkcji tej nie spełnia układ sterowania pracą przekształtnika typu BOOST. Realizuje on jedynie algorytm MPPT.



Rys. 5. Schemat ideowy części silnoprądowej 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 m.in. od wartości energii dostarczanej z ogniw PV poprzez układ BOOST. W prezentowanym rozwiązaniu funkcja ta jest realizowana poprzez zmianę amplitudy prądu zadanego falownikowi sieciowemu [5]. Dzięki temu możliwa jest regulacja ilości energii oddawanej do sieci, a w konsekwencji stabilizacja wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym. Schemat blokowy, prezentujący ideę działania układu sterowania falownikiem sieciowym pokazano na rysunku 6.



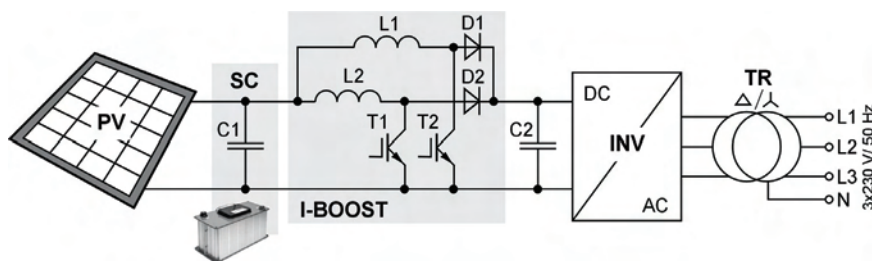
Rys. 6. Schemat blokowy algorytmu sterowania falownikiem sieciowym

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 $i_{sref}(t)$.

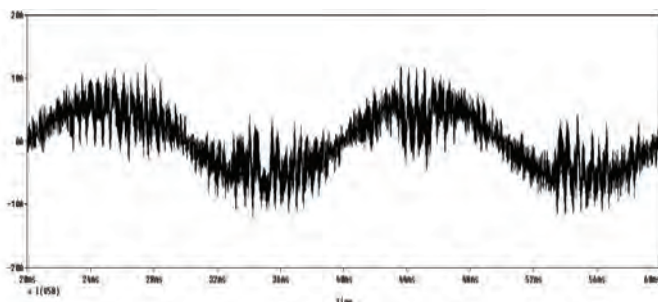
4. STRUKTURA CZĘŚCI SILNOPRĄDOWEJ SYSTEMU SOLARNEGO

Całościowo, zaproponowaną strukturę części silnoprądowej opracowanego systemu przetwarzania energii solarnej zaprezentowano na rysunku 7.

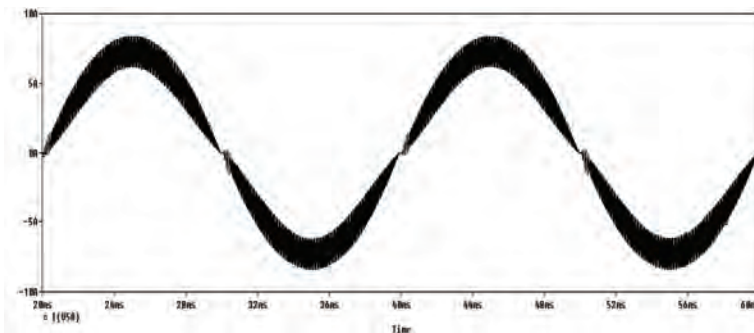


Rys. 7. Schemat ideowy części silnoprądowej opracowanego systemu przetwarzania energii solarnej

Należy zaznaczyć, że w dotychczasowych rozważaniach pominięto – wymienione na wstępie – niekorzystne zjawisko związane z przepływem prądu upływu na skutek obecności pojemności pasożytniczej między powierzchnią paneli fotowoltaicznych a podłożem (ziemią). Jest to bardzo istotny problem, zwłaszcza z punktu widzenia zapewnienia bezpiecznej eksploatacji układu, zawartości niepożądanych harmonicznych w prądzie sieci oraz sprawności energetycznej systemu. Przykładowe przebiegi (uzyskane na drodze symulacji) prądu wyjściowego falownika sieciowego, umożliwiające dokonanie analizy porównawczej dla dwóch przypadków pracy systemu – z prądem upływu oraz bez tego prądu – zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 8 i 9. Sygnał referencyjny prądu dla falownika sieciowego w obydwu sytuacjach jest identyczny.



Rys. 8. Przykładowy przebieg sygnału wyjściowego falownika sieciowego z uwzględnieniem prądu upływu



Rys. 9. Przykładowy przebieg sygnału wyjściowego falownika sieciowego bez uwzględnienia prądu upływu

Eliminacja tego problemu jest możliwa, np. poprzez sprzężenie falownika wyjściowego z siecią elektroenergetyczną poprzez transformator (rys. 7), 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, co daje możliwość oddawania do sieci większych mocy przy jednoczesnym zapewnieniu pełnej symetrii układu. Zastosowanie transformatora umożliwi ponadto optymalizację energetyczną pracy przekształtnika typu BOOST m.in. poprzez dobór przekładni teoż transformatora.

W celu dalszego polepszenia jakości przekształcania energii zmodyfikowano również strukturę przekształtnika typu BOOST – poprzez zastosowanie wariantu umożliwiającego pracę w trybie wielokanałowym [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.

5. OPCJONALNY BUFOR ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W ramach dalszych prac rozważana jest możliwość implementacji baterii superkondensatorów (SC) na wyjściu zespołu ogniw fotowoltaicznych PV (rys. 7). W ten sposób możliwe jest znaczące ograniczenie nagłych wahań napięcia wyjściowego ogniw PV spowodowanych nagłą zmianą panujących warunków atmosferycznych (przede wszystkim zmiana natężenia padającego światła słonecznego).

Oczywiście, jeżeli wymagana jest od prezentowanego systemu również dłuższa praca w przypadku braku energii elektrycznej pozyskiwanej z ogniw PV, należy rozważyć im-

plementację baterii akumulatorów w obwodzie stałoprądowym (mają one znacznie większą gęstość energii) w porównaniu z zasobnikami kondensatorowymi, co umożliwia zasilanie wymagających odbiorników przez dłuższy czas. W tym przypadku konieczne jest jednak zastosowanie dodatkowego przekształtnika energoelektronicznego w postaci sterowanego źródła prądowego. W konsekwencji możliwa staje się pełna kontrola prądu ładującego, co znacznie zwiększa trwałość zasobników akumulatorowych – aspekt bardzo istotny ze względów ekonomicznych. Obecnie trwają prace mające na celu dobór min.:

- struktury silnoprądowej systemu uwzględniające miejsce implementacji akumulatorów (superkondensatorów) oraz dodatkowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądu,
- optymalnego – w sensie realizacji efektywności pracy systemu do jego kosztu – poziomu napięć zespołu baterii akumulatorów (superkondensatorów),
- typu stosowanych akumulatorów (czynnik istotny m.in. ze względu doboru charakterystyki ładowania – wybór sposobu pracy dodatkowego źródła prądowego).

6. STRUKTURA I PARAMETRY REGULATORA

W UKŁADZIE REGULACJI NADAŻNEJ PRĄDU FALOWNIKA SIECIOWEGO

W torze sterowania falownikiem sieciowym zastosowano modulator PWM realizujący algorytm modulacji jednobiegunowej. Natomiast do budowy nadażnego regulatora prądu sieci wykorzystano niekonwencjonalną strukturę bazującą na kombinowanym połączeniu dolno- i górnoprzepustowych filtrów cyfrowych typu IIR [2, 3, 4, 5]. Transmitancję operatorową opracowanej struktury regulatora prądu wyrażono zależnością (1)

$$F(s) = K_F \left(1 + \frac{K_{FGP} s T_{FGP}}{1 + s T_{FGP}} \right) \frac{1}{1 + s T_{FDP}} \quad (1)$$

gdzie: T_{FDP} – stała czasowa sekcji dolnoprzepustowej, K_F – wzmacnienie regulatora, T_{FGP} – stała czasowa sekcji różniczkującej (filtru górnoprzepustowego), K_{FGP} – wzmacnienie sekcji górnoprzepustowej regulatora.

W trakcie doboru parametrów i struktury filtrów (pełniących funkcję regulatora prądu) wykorzystywano wymienione poniżej kryteria [2, 5].

Pierwszym z nich było ograniczenie szybkości zmian sygnału modulującego modulatora szerokości impulsów.

Drugim – istotnym dla właściwego działania układu kryterium – jest zapewnienie stabilności zamkniętego układu regulacji przy możliwie wiernym odwzorowaniu w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego. Do analizy stabilności wykorzystano kryterium Bodego umożliwiające m.in. uwzględnienie wpływu członu opóźniającego e^{-st} .

Ostatnim z analizowanych kryteriów doboru struktury i parametrów regulatora było kryterium związane z efektem aliasingu zachodzącym w sygnale sprzężenia

zwrotnego. Efekt ten ma miejsce w dyskretnych systemach przetwarzania sygnałów (i jest konsekwencją faktycznego niespełniania przez nie twierdzenia Kotelnikowa–Shanonna, o próbkowaniu).

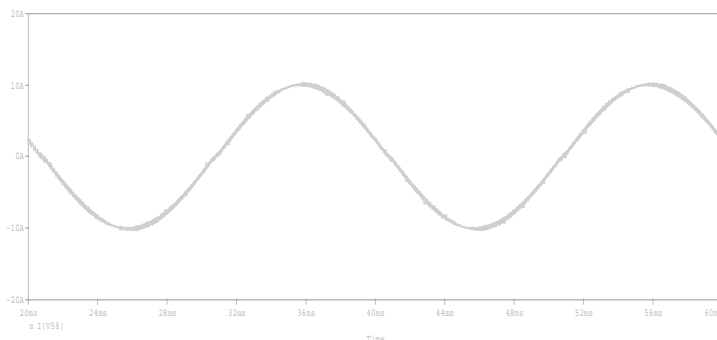
Implementacja filtra dolnoprzepustowego w strukturze regulatora prądu umożliwia ograniczenie zjawiska aliasingu. Traktując modulator PWM jako układ próbkująco-pamiętający można przyjąć, że częstotliwość graniczna filtra powinna być dwukrotnie mniejsza niż częstotliwość pracy modulatora. Natomiast dodatkowa 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.

Na podstawie pomiarów wartości amplitud sygnałów wyjściowego oraz referencyjnego (badania eksperymentalne) dokonano oceny uchybu ustalonego, który wynosi w rozpatrywanym przypadku około 3,5%.

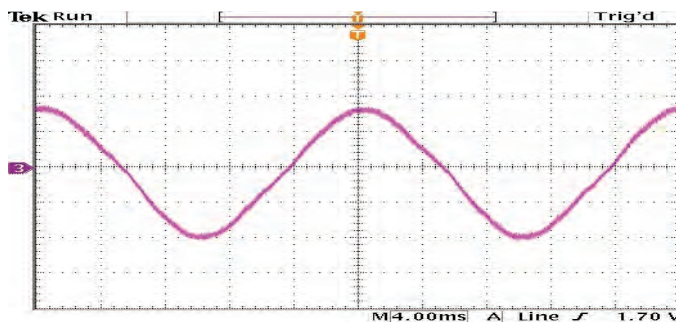
7. WYBRANE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

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. Przykładowe przebiegi prądów fazowych sieci odznaczające się niską zawartością wyższych harmonicznych (wartość współczynnika THD oscylowała wokół wartości 1%) zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 10 (badania symulacyjne) oraz 11 (badania eksperymentalne).



Rys. 10. Przykładowy przebieg prądu sieci generowanego przez falownik sieciowy (badania symulacyjne)



Rys. 11. Przykładowy przebieg prądu sieci generowanego przez falownik sieciowy (badania eksperymentalne)

Wstępne badania eksperymentalne wersji jednofazowej układu przeprowadzono wykorzystując m.in. przekształtniki 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 ogniwa fotowoltaiczne). 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 (prototypu przemysłowego układu) zasilacz zastąpiono rzeczywistymi ogniwami fotowoltaicznymi.

Poniżej zestawiono przykładowe zestawienie otrzymanych wyników eksperymentalnych układu docelowego:

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

Generalnie, badania eksperymentalne potwierdziły poprawność funkcjonowania układu oraz umożliwiły dokładne dobranie nastaw stałych czasowych poszczególnych bloków algorytmu MPPT.

7. PODSUMOWANIE

W ramach badań opisanego w artykule systemu elektrowni solarnej opracowano modele teoretyczny, symulacyjny i eksperymentalny układu sterowania oraz części

energoelektronicznej. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przyjętych założeń teoretycznych, co z kolei pozwoliło na zgodne z nimi funkcjonowanie całości układu.

W ramach kolejnych etapów badań układu sprzęgu energoelektronicznego ogniw PV z siecią przewiduje się jego modyfikację, umożliwiającą m.in. dalsze polepszenie współczynnika sprawności – zwłaszcza przy pracy układu z mocą mniejszą niż znamionowa. Przewiduje się również kolejne prace nad optymalizacją algorytmu MPPT pod kątem zwiększenia dokładności i szybkości śledzenia dysponowanej wartości mocy wyjściowej paneli PV. Ponadto planowana jest modyfikacja układu w celu zaimplementowania baterii akumulatorów, co z kolei umożliwi zasilanie odbiorników przez określony czas – w przypadku braku możliwości uzyskania energii z ogniw PV.

LITERATURA

- [1] FRYZE S., *Moc rzeczywista, urojona i pozorną w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, 1931, nr 7, 8.
- [2] GWÓŹDŹ M., KRYSKOWIAK M., *Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal power grid current*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009, 7.
- [3] KACZOREK T., *Teoria sterowania i systemów*, PWN, Warszawa 1999.
- [4] KACZOREK T., *Dodatnie układy jedno- i dwuwymiarowe*, OWPW, Warszawa 2000.
- [5] KRYSKOWIAK M., *Układ prostownikowy mocy o polepszonych wskaźnikach z energoelektronicznym modulatorem prądu*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2009.
- [6] KRYSKOWIAK M., GULCZYŃSKI A., *Budowa i zasada działania modelu eksperymentalnego mini elektrowni wodnej dedykowanego dla jednostek jachtowych*, PES-9, Kościelisko 2014, 133–136.
- [7] KRYSKOWIAK M., GULCZYŃSKI A., *Budowa oraz algorytm sterowania przekształtnika energoelektronicznego zaimplementowanego w niekonwencjonalnym systemie mini elektrowni wodnej dedykowanej dla jednostek jachtowych*, Poznań University of Technology Academic Journals, 2014, 80, 27–34.
- [8] PIRÓG S., *Energoelektronika. Negatywne oddziaływanie układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*, AGH, Kraków 1998.
- [9] TOMASZUK A., KRUPA A., *High efficiency high step-up DC/DC converters – a review*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2011, Vol. 59, No. 4, 475–483.
- [10] ALFINE-TIM: Dokumentacja techniczna: Laboratoryjny przekształtnik 3-fazowy typu P3-5.0/550MFE LABINVERTER wer.1.10.
- [11] Analog Devices: Data Sheet Final – SHARC Processor ADSP-21369, Rev. D.
- [12] <http://solaris18.blogspot.com/2012/01/panel-fotowoltaiczny-punkt-mocy.html> [dostęp 10.2014].

POWER ELECTRONICS CONVERTER FOR PV PANNEL WORKING WITH A POWER GRID

In the paper the elaborated structures of both main and control circuit of power electronics converter coupling photovoltaic panels and power grid is presented. The implemented solutions, being used to obtain the highest possible efficiency of the whole system. A phenomenon of PV leakage current are analyzed also. The selected results of simulation and laboratory experiments are presented too.