

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII
BIOMEDYCZNEJ

KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW PRZETWARZANIA
ENERGII



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

JEDNOFAZOWE PRZEKSZTAŁTNIKI DC–AC
I AC–DC Z ELIMINACJĄ SKŁADOWEJ
PODWÓJNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI PO STRONIE
DC

MGR INŻ. ŁUKASZ STAWIARSKI

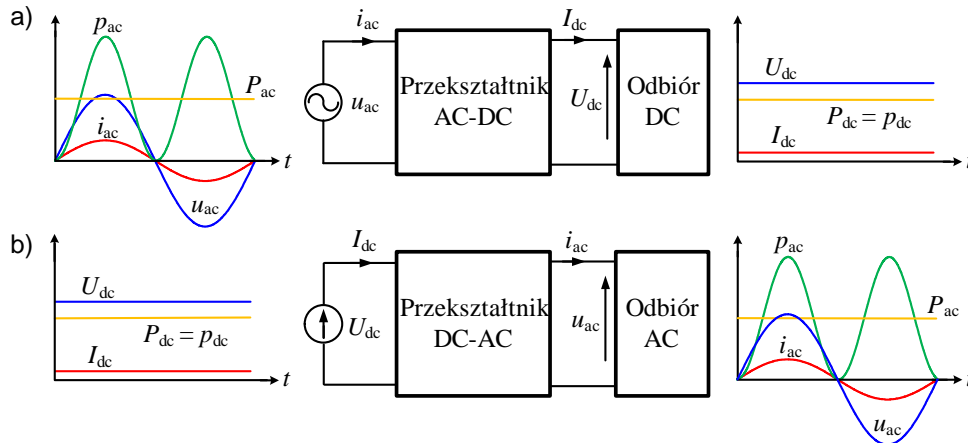
PROMOTOR:
Prof. dr hab. inż. Stanisław PIRÓG

Kraków, Luty 2015

1 Wstęp

W ostatnim czasie na znaczeniu zyskuje znane od dawna zagadnienie poprawy jakości energii elektrycznej [2]. Zgodnie z wymaganiami stawianymi przyłączanym odbiorom, w celu optymalnego wykorzystania potencjału przesyłowego linii elektroenergetycznej oraz ograniczenia strat przesyłowych należy zapewnić, aby miały one współczynnik mocy zbliżony do jedności. Wymaganie to, opisywane szeroko w bardzo popularnej ostatnio koncepcji *Smart Grid* [3], jest stawiane również rozproszonym wytwórcom energii (przykładowo jednofazowe instalacje fotowoltaiczne), którzy powinni generować prąd współfazowy z napięciem linii elektroenergetycznej. Zagadnienie to jakkolwiek doskonale znane od dawna, dopiero w ostatnich latach, wraz z ogromnym wzrostem liczby przyłączanych do sieci elektroenergetycznej urządzeń elektronicznych i AGD zyskało na znaczeniu.

Na rysunku 1 przedstawiono blokową koncepcję pożądaną integracji jednofazowego systemu prądu zmiennego z systemem prądu stałego z wykorzystaniem przekształtników energoelektronicznych. Celem układu jest zapewnienie sinusoidalnego prądu linii AC i stałego napięcia w systemie DC, nie zawierającego tętnień o podwójnej częstotliwości napięcia linii AC.



Rysunek 1: Integracja systemów prądu stałego i zmiennego: (a) AC-DC, (b) DC-AC.

Chwilowe wartości napięcia i prądu w jednofazowym systemie prądu przemiennego, przy założeniu jednostkowego współczynnika mocy, można opisać następująco:

$$u_{ac}(t) = \sqrt{2}U_{ac} \sin(\omega t) = U_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$i_{ac}(t) = \sqrt{2}I_{ac} \sin(\omega t) = I_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

Chwilowa moc jednofazowego systemu prądu przemiennego jest zatem równa:

$$p_{ac}(t) = u_{ac}(t) \cdot i_{ac}(t) = 2U_{ac}I_{ac} \sin^2(\omega t) = P_{ac}(1 - \cos(2\omega t)) \quad (3)$$

Moc chwilowa (3) jest sumą składowej stałej P_{ac} (moc czynna) oraz składowej zmiennej o podwójnej częstotliwości $-P_{ac} \cdot \cos(2\omega t)$ (o zerowej wartości średniej). Pomijając straty, czyli zakładając 100% sprawność przekształcania energii, stała moc systemu prądu stałego musi być równa mocy czynnej jednofazowego systemu prądu przemiennego, co można zapisać jako:

$$P_{ac} = P_{dc} \neq p_{ac}(t) \quad (4)$$

Z zależności (4) wynika, że chwilowa moc jednofazowego systemu prądu przemiennego nie jest równa mocy systemu prądu stałego. Układ przekształtnikowy realizujący sprzęg pomiędzy systemem DC, a jednofazowym systemem AC musi zapewnić chwilowe dopasowanie mocy poprzez cykliczne gromadzenie energii (w przedziałach czasu, gdy występuje jej nadmiar w systemie AC) i jej wydatkowanie (w przedziałach czasu, gdy występuje jej niedobór w systemie AC). Zapewnienie przez przekształtnik AC–DC lub DC–AC jednostkowego współczynnika mocy wiąże się z koniecznością zbilansowania mocy chwilowych systemów AC i DC.

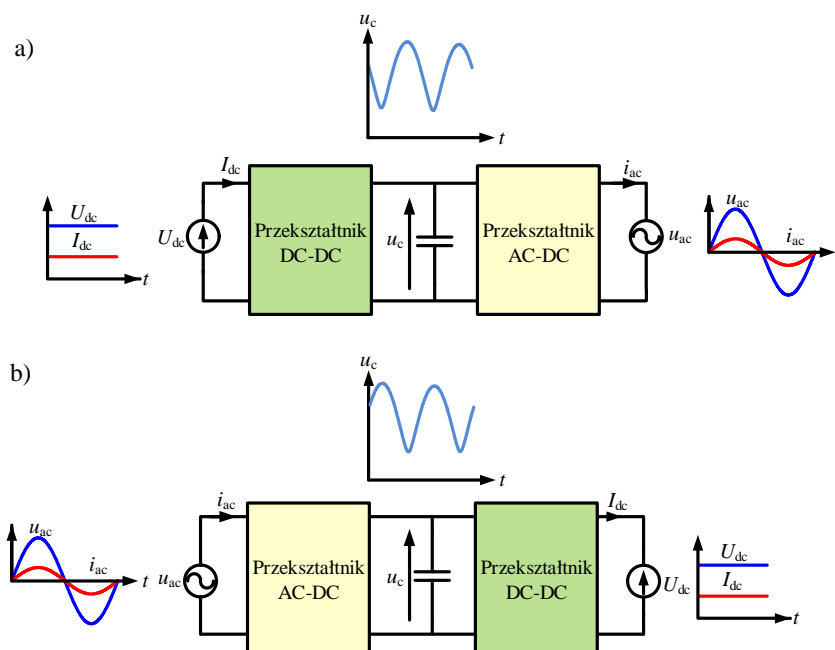
Jedną z najbardziej rozpowszechnionych topologii w systemach AC–DC małej mocy, są układy posiadające mostek diodowy jako stopień wejściowy. Takie rozwiązania pomimo szeregu wad (niesinusoidalny, silnie odkształcony prąd źródła oraz pobór mocy biernej [8, 9]), są z powodu niskiego kosztu powszechnie stosowane. Dopasowanie mocy chwilowych systemów jest zazwyczaj realizowane poprzez stosowanie kondensatorów (w większości przypadków kondensatorów elektrolitycznych) o dużej wartości pojemności. Oprócz tego, silnie odkształcony prąd jest źródłem niepożądanych harmonicznych, w niektórych przypadkach wymagających filtracji. Analogicznie sprawa przedstawia się w klasycznie stosowanych topologiach przekształtników o jednostkowym współczynniku mocy (ang. PFC – *Power Factor Correction*) w których wykorzystuje się elementy pasywne (kondensatory, dławiki), które gromadzą w sobie energię wielokrotnie większą od ilości energii potrzebnej do zbilansowania mocy chwilowych systemów. Rozwiązania klasyczne prowadzą do konieczności doboru elementów pasywnych o potencjalnie dużej zdolności do magazynowania energii, co pociąga za sobą ich duże wymiary fizyczne. Wiąże się to z kosztami i nie chodzi tu wbrew pozorom tylko o koszty finansowe (koszt produkcji, materiałów, transportu etc.), ale również koszty eksploatacyjne, ekologiczne (wpływ produkcji, przetwarzania materiałów na środowisko), a nawet społeczne (wyższa cena = mniejsza dostępność) – jest to wielowymiarowe zagadnienie [12]. W związku z tym poszukiwane są rozwiązania umożliwiające minimalizację parametrów energetycznych elementów pasywnych (minimalizacja wielkości $\left[(1 - k) \cdot \sum Li_{max}^2 + k \cdot \sum Cu_{max}^2 \right]$, k – parametr kosztu $[0 \div 1]$), nawet kosztem bardziej rozbudowanej topologii układu i bardziej zaawansowanych metod sterowania, w celu zwiększenia gęstości energii konstruowanych przekształtników (kW/dm^3) [5].

Również problem występowania składowej podwójnej częstotliwości po stronie DC jest w niektórych aplikacjach dość znaczący, a niezbędne filtry, ze względu na potrzebę filtracji niskiej częstotliwości, są duże i kosztowne. W jednofazowych systemach AC–DC zjawisko to jest szczególnie niepożądane w prostownikach o jednostkowym współczynniku mocy zasilających odbiorniki małej mocy przykładowo falowniki sterujące trójfazowymi układami napędowymi (elektronarzędzia, urządzenia AGD). Składowa zmienna występująca w napięciu wyjściowym prostownika zasilającego 3-fazowe falowniki, przekłada się na występowanie niepożądanej składowej zmiennej w prądach, a przez to i w momencie silnika. Jej eliminacja wymaga bardziej złożonych algorytmów modulacji PWM w falownikach oraz prowadzi do niepełnego wykorzystania napięcia zasilającego falownik.

W jednofazowych systemach DC–AC problem ten jest szczególnie uciążliwy w układach baterii fotowoltaicznych dołączonych do jednofazowej linii elektroenergetycznej. Przy przyłączeniu ogniwa fotowoltaicznego poprzez przekształtnik energoelektroniczny do jednofazowej linii prądu przemiennego, w przebiegach prądu i napięcia ogniwa pojawia się składowa zmienna podwójnej częstotliwości wywołana niezbilansowaniem mocy chwilowych ogniwa i linii AC, co w efekcie zmniejsza sprawność konwersji energii

promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Efektywne poszukiwanie punktu mocy maksymalnej (ang. MPPT – *Maximum Power Point Tracking* – szerzej [10,11]) wymaga utrzymania składowej podwójnej częstotliwości w napięciu (prądzie) ogniwa fotowoltaicznego, poniżej poziomu 1% wartości napięcia (prądu) DC [4].

W ostatnim czasie zagadnienie związane z Aktywnym Magazynowaniem Energii Bilansującej (ang. APD – *Active Power Decoupling*) w jednofazowych przekształtnikach DC-AC i AC-DC jest szeroko badane i opisywane w literaturze światowej [6]. Efektywne magazynowanie energii bilansującej zwiększa niezawodność [4] poprzez eliminację kondensatorów elektrolitycznych, najbardziej zawodnych elementów wchodzących w skład przekształtników energoelektronicznych [7]. Prowadzi to również do redukcji kosztów materiałowych, poprzez stosowanie elementów pasywnych zaprojektowanych do gromadzenia mniejszych energii. Przykładową koncepcję APD zaprezentowano rysunku 2. Jako magazyn energii bilansującej jest wykorzystywany kondensator, którego napięcie zmienia się w bardzo szerokim zakresie. W znanych publikacjach nie znajduje się opisu zagadnienia optymalizacji parametrów energetycznych elementów pasywnych ($\min \left[(1 - k) \cdot \sum Li_{max}^2 + k \cdot \sum Cu_{max}^2 \right]$) dla prezentowanych topologii. Nie jest publikowany również wpływ wzrostu wartości napięcia kondensatora bilansującego na poziomy maksymalnych prądów i napięć innych elementów pasywnych. Również efekt stosowania APD, w kontekście zwiększonych wymagań stawianych przed filtrem wejściowym nie został zaprezentowany.



Rysunek 2: Jedna z koncepcji APD: (a) DC-AC, (b) AC-DC.

2 Cele badawcze i ich realizacja

Pierwszym celem badawczym było opracowanie topologii oraz algorytmu sterowania jednofazowego przekształtnika energoelektronicznego DC-AC (w topologii falownika dołączonego do linii AC) oraz AC-DC (w topologii zasilacza PFC o jednostkowy współczynniku mocy), umożliwiającego eliminację składowej podwójnej częstotliwości w przebiegach prądu i napięcia po stronie DC.

Drugim z celów badawczych było wykazanie, że opracowana topologia umożliwia efektywne magazynowanie energii bilansującej prowadzące do wyeliminowania konieczności stosowania kondensatorów elektrolitycznych.

Ostatnim z celów badawczych było przeprowadzenie analizy opracowanej topologii pod kątem minimalizacji parametrów energetycznych zastosowanych elementów pasywnych ($\min \left[(1 - k) \cdot \sum Li_{max}^2 + k \cdot \sum Cu_{max}^2 \right]$).

Poprawność działania opracowanej topologii oraz algorytmu sterowania miała zostać zweryfikowana w ramach badań symulacyjnych (Matlab-Simulink®) oraz modelem czasu rzeczywistego w układzie FPGA) oraz laboratoryjnych na skonstruowanych modelach użytkowych przekształtników.

W rozdziale pierwszym wprowadzono w tematykę podejmowanego zagadnienia. Opisano zjawisko niezbilansowania mocy chwilowych występujących w jednofazowych przekształtnikach AC–DC oraz DC–AC. Nakreślono ponadto wymagania stawiane przed nowoczesnymi przekształtnikami energoelektronicznymi. Zaprezentowany został obecny stan wiedzy dotyczący zagadnienia efektywnego magazynowania energii bilansującej w jednofazowych przekształtnikach AC–DC oraz DC–AC. Wymieniono najważniejsze pozycje z literatury światowej opisujące badania prowadzone w tej tematyce. Zaprezentowano potencjalne kierunki dalszych badań oraz sformułowano cele badawcze.

W rozdziale drugim przedstawiono zbiór podstawowych zagadnień użytecznych w trakcie późniejszych analiz. Zaprezentowano rozważania teoretyczne dotyczące stosowanych w jednofazowych systemach AC–DC i DC–AC magazynów energii bilansującej. Przeprowadzono analizę wpływu energii maksymalnej elementów pasywnych używanych w układach przekształtnikowych na wymiary fizyczne tych podzespołów. Opisano koncepcję zastosowania jako stopień wyjściowy w systemie AC–DC przełącznika prądu lub napięcia pracującego z przewodzeniem półokresowym, zmieniającego kierunek prądu w linii prądu przemiennego zgodnie z polaryzacją napięcia. Zaprezentowano zalety i wady każdego z rozwiązań. Przeprowadzono analizę strat mocy w dławikach w kontekście różnych przebiegów prądów tych elementów.

W rozdziale trzecim zaprezentowano po dwie topologie przekształtników AC–DC i DC–AC wraz z kompletną analizą działania, w różnych trybach pracy. Wynikiem analizy jest opracowanie zagadnienia minimalizacji sumy energii maksymalnych użytych elementów pasywnych ($\min \left[(1 - k) \cdot \sum Li_{max}^2 + k \cdot \sum Cu_{max}^2 \right]$), przy zapewnieniu poprawnej pracy układu i spełnieniu kryteriów jakościowych.

W rozdziale czwartym opisano opracowane algorytmy sterowania badanych topologii. Zaprezentowane zostały schematy blokowe układów regulacji. Opracowano modele przekształtników w środowisku Matlab-Simulink®, które wraz z zaimplementowanym układem sterowania zostały gruntownie zbadane w trakcie przeprowadzonych badań symulacyjnych. Wynikiem prac jest zestawienie parametrów jakościowych oraz ilościowych dla każdej z prezentowanych topologii, na podstawie którego dokonany został wybór po jednej z badanych topologii (dla konfiguracji AC–DC oraz DC–AC) do dalszych badań.

W rozdziale piątym zaprezentowano uznaną w środowisku naukowym metodę testowania algorytmów sterowania w oparciu o modele czasu rzeczywistego zrealizowane w układach FPGA. Przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych zaimplementowanych modeli czasu rzeczywistego wybranych topologii oraz układów sterowania w technologii FPGA.

W rozdziale szóstym opisano zaprojektowany i zbudowany przekształtnik w konfiguracji AC–DC. Zaprezentowane zostały wyniki badań laboratoryjnych układu w stanie ustalonym oraz w stanach dynamicznych (rozruch, skokowe zmiany mocy obciążenia). Wyznaczone zostały parametry jakościowe badanego rozwiązania, takie jak całkowita sprawność elektryczna, współczynnik mocy, współczynnik zawartości harmonicznych prądu. Zaprezentowano w praktyce sposób na zwiększenie sprawności przekształtnika. Opisano wady oraz zalety badanej topologii wraz z potencjalnymi kierunkami dalszych badań.

W rozdziale siódmym opisano zaprojektowany i zbudowany przekształtnik w konfiguracji DC–AC. Opisano metodę blokowania prądu wstecznego przepływającego przez tyrystory oraz przedstawiono sposób ochrony stosowanych tyrystorów przed zjawiskiem fałszywych wyzwoleń. Zaprezentowane zostały wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika dla dwóch różnych obciążeń: rezystancyjnego oraz linii prądu przemiennego. Dla obydwu konfiguracji wyznaczone zostały parametry jakościowe: sprawność, współczynnik zawartości harmonicznych oraz współczynnik mocy. Zaprezentowano również (wraz z wynikami praktycznymi) metodę zwiększenia sprawności układu poprzez zmniejszenie częstotliwości pracy wyjściowej części przekształtnika. Opisane zostały słabe oraz mocne punkty badanej topologii wraz z potencjalnymi kierunkami dalszych prac badawczych.

W rozdziale ósmym przedstawiono podsumowanie przeprowadzonych badań. Zweryfikowano realizację celów badawczych. Zaprezentowane zostały również kierunki dalszych badań.

W dodatkach zamieszczono schematy elektryczne oraz schematy obwodów drukowanych zaprojektowanych modeli użytkowych przekształtników.

3 Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań

W toku badań zaproponowane zostały cztery topologie (dwie dla konfiguracji AC–DC oraz dwie dla konfiguracji DC–AC). Wybór topologii został poprzedzony przeglądem dostępnej literatury krajowej i międzynarodowej. Każda z zaproponowanych topologii implementowała efektywniejszy (niż w tradycyjnych rozwiązaniach) sposób magazynowania energii bilansującej umożliwiającą w praktycznej realizacji eliminację kondensatorów elektrolitycznych. Dodatkowo każda z nich dawała możliwość redukcji składowych podwójnej częstotliwości w przebiegach prądów i napięć po stronie DC.

Przeprowadzona została analiza teoretyczna wszystkich prezentowanych rozwiązań, wynikiem której jest opracowanie formuł matematycznych opisujących przebiegi prądów i napięć występujących w przekształtnikach. Wyprowadzone zależności określają również sposób doboru wartości stosowanych elementów pasywnych oraz dają obraz ich wzajemnych powiązań. Opracowane zostały również formuły analityczne opisujące zagadnienie minimalizacji parametrów energetycznych (minimalizacja wielkości $(1-k) \cdot \sum Li_{max}^2 + k \cdot \sum Cu_{max}^2$). W zamieszczonych przykładach zaprezentowano wpływ zmian wartości składowej U_0 na parametry elementów pasywnych (wartości prądów, napięć, energii maksymalnych).

Na podstawie wyników analizy przeprowadzone zostały badania symulacyjne w środowisku Matlab-Simulink®. Opracowane dla każdej z badanych topologii algorytmy sterowania zostały zweryfikowane w oparciu o zbudowane modele symulacyjne. Szczegółowo przebadano układy w stanie ustalonym, podczas rozruchu oraz nagłych zmian

mocy obciążenia. Wyznaczone zostały parametry jakościowe dla każdej z badanych topologii umożliwiające ich wzajemne porównanie.

Na podstawie wniosków z przeprowadzonych badań symulacyjnych wybrano dwie topologie. Takie zawężenie obszaru badań gwarantowało skupienie się jedynie na najlepszych rozwiązaniach i umożliwiło gruntowniejsze przeprowadzenie dalszych analiz. Opracowano modele czasu rzeczywistego wybranych układów, które wraz z algorytmem sterowania zaimplementowano w układzie FPGA. Przeprowadzono badania symulacyjne czasu rzeczywistego w strukturze FPGA wybranych topologii. Badano zachowanie układów w stanie ustalonym jak również w stanach dynamicznych. Zaimplementowano oraz zweryfikowano poprawność działania logicznych układów zabezpieczeń niezbędnych w praktycznej realizacji. Wyniki badań symulacyjnych czasu rzeczywistego w układzie FPGA potwierdzają prawidłową implementację oraz działanie algorytmu sterowania w docelowej strukturze. Zaprezentowane wyniki świadczą również o spełnieniu przez badane topologie wszystkich założeń badawczych.

Dla pełnej weryfikacji uwzględniającej rzeczywiste parametry i właściwości elementów (np. pojemności i indukcyjności pasożytnicze) zaprojektowano, wykonano, uruchomiono i przebadano dwa w pełni funkcjonalne modele użytkowe przekształtników energoelektronicznych (pierwszy pracujący w konfiguracji AC–DC o mocy znamionowej 450 W oraz drugi w konfiguracji DC–AC mocy 320 W). W przypadku konfiguracji DC–AC dużo czasu i starań zajęło poszukiwanie przyczyny fałszywych wyzwoleń tyrystorów, a następnie wprowadzenie skutecznej metody ochrony. W ramach projektu opracowane zostały również kompletne układy pomiarowe (w wersji izolowanej oraz nieizolowanej) umożliwiające pomiar wymaganych przez układ sterowania i regulacji wielkości elektrycznych. Zaproponowane rozwiązania pomiarowe sprawdziły się w praktyce i mogą zostać wykorzystane w przyszłości, w czasie badań wdrożeniowych.

Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych stanowią ostateczną weryfikację poprawności działania zaproponowanych rozwiązań. Wykazano, że badane topologie spełniają założenia badawcze, w aspekcie efektywnego magazynowania energii bilansującej, zastąpienia kondensatorów elektrolitycznych kondensatorami polipropylenowymi oraz eliminacji składowych podwójnej częstotliwości w przebiegach prądów i napięć po stronie DC. Potwierdza to również poprawność przeprowadzonych analiz matematycznych oraz badań symulacyjnych. Badaniom podlegała także sprawność elektryczna zbudowanych urządzeń. W przypadku obydwu topologii zaproponowane zostały (wraz z wynikami praktycznymi) sposoby jej zwiększenia.

Podsumowując, do najbardziej istotnych osiągnięć przeprowadzonych prac badawczych należy zaliczyć:

- uproszczoną teoretyczną analizę działania wybranych topologii,
- określenie na jej podstawie zasad doboru wartości parametrów elementów i algorytmów sterowania oraz wyprowadzenie formuł analitycznych opisujących zagadnienie minimalizacji parametrów energetycznych ($(1 - k) \cdot \sum Li_{max}^2 + k \cdot \sum Cu_{max}^2$),
- opracowanie i weryfikacja modeli symulacyjnych w środowisku Matlab-Simulink®,
- opracowanie modeli czasu rzeczywistego w FPGA i przeprowadzenie badań symulacyjnych,

- zaprojektowanie i zbudowanie modeli użytkowych przekształtników w konfiguracjach AC–DC oraz DC–AC,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych zbudowanych przekształtników weryfikujących w sposób doświadczalny zaproponowaną metodę efektywnego magazynowania energii bilansującej oraz skutecznej eliminacji składowych podwójnej częstotliwości sieciowej w przebiegach napięć i prądów po stronie DC,
- praktyczną weryfikację opracowanych algorytmów sterowania,
- podsumowanie wad i zalet badanych topologii.

4 Dalsze kierunki badań

Jednym z istotnych zagadnień, które wymaga poprawy jest kwestia niskiej sprawności elektrycznej badanych przekształtników. O ile przypadku konfiguracji AC–DC, zwłaszcza po zastosowaniu jako łącznik S_2 tranzystora typu MOSFET SiC, poziom sprawności urządzenia ($\eta = 97\%$) jest akceptowalny, to dla konfiguracji DC–AC musi zostać znacząco zwiększony (obecnie 74% przy $f_i = 30$ kHz). Zaproponowane zostały pewne sposoby na minimalizację strat energii w badanym przekształtniku. Istnieje tutaj sporo możliwości, poczynając od zmiany częstotliwości pracy łączników, poprzez zastosowanie nowych, szybszych elementów półprzewodnikowych (np. SiC), a skończywszy na implementacji technologii „miękkiego” przełączania dostępnego w technikach rezonansowych [1].

Każde z tych rozwiązań posiada swoje wady oraz zalety. Zmniejszenie częstotliwości pracy łącznika S_2 wiąże się koniecznością zastosowania większych filtrów wyjściowych, a nowe rozwiązania półprzewodnikowe mogą być nieopłacalne ekonomicznie. Nie można zatem z góry stwierdzić, które podejście jest najlepsze. Wymaga to przeprowadzenia dalszych badań, których wyniki mogą stanowić solidną bazę do prac wdrożeniowych i komercjalizacji proponowanego rozwiązania.

W niektórych krajach europejskich, zwłaszcza w przypadku konfiguracji DC–AC, normy prawnie wymagają zapewnienia izolacji galwanicznej pomiędzy układem przekształtnikowym (część DC), a linią AC. Badane rozwiązania nie posiadają izolacji galwanicznej, jednak umożliwiają jej wprowadzenie poprzez modyfikację topologii i zastosowanie transformatora wysokiej częstotliwości w miejsce dławika L_2 . Istnieje tutaj kilka możliwych topologii izolowanych które mogą zostać wykorzystane np. topologie typu *flyback*, *forward*.

Wpływ parametrów transformatora (indukcyjności rozproszenia, pojemności międzyzwojowe), wybór odpowiedniej topologii zapewniającej izolację czy też dobór właściwej częstotliwości pracy łączników półprzewodnikowych w kontekście minimalizacji energii maksymalnych elementów pasywnych oraz zapewniania wysokiej sprawności działania, nie jest znany. Prawdopodobnie modyfikacji będzie wymagał również opracowany algorytm sterowania. Zatem poprawne wprowadzenie do badanych topologii izolacji galwanicznej bazującej na transformatorze wysokiej częstotliwości wymaga przeprowadzenia dalszych prac badawczych w skład których wejdą analizy teoretyczne, badania symulacyjne oraz weryfikacja doświadczalna podczas badań laboratoryjnych.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/N/ST7/00245.

Literatura

- [1] T. Citko, H. Tunia, B. Winiarski. *Układy rezonansowe w energoelektronice*. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, 2001.
- [2] Z. Hanzelka. *Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia*. Wydawnictwo AGH, 2013.
- [3] A. Ipakchi, F. Albuyeh. Grid of the future. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 7(2):52–62, march-april 2009.
- [4] S. Kjaer, J. Pedersen, F. Blaabjerg. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 41(5):1292–1306, sept.-oct. 2005.
- [5] J. Kolar, U. Drogenik, J. Biela, M. Heldwein, H. Ertl, T. Friedli, S. Round. PWM Converter Power Density Barriers. *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, strony P–9–P–29, April 2007.
- [6] H. Li, K. Zhang, H. Zhao, S. Fan, J. Xiong. Active Power Decoupling for High-Power Single-Phase PWM Rectifiers. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28(3):1308–1319, March 2013.
- [7] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. *Power Electronics. Converters, Applications, and Design. Third Edition*. John Wiley & Sons, INC., 2003.
- [8] S. Piróg. *Energoelektronika. Negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczania*. Polska Akademia Nauk - Komitet Elektrotechniki. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 1998.
- [9] S. Piróg. *Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2006.
- [10] Ł. Stawiarski, M. Szarek, A. Penczek, A. Mondzik. Jednofazowy system fotowoltaiczny o zmiennej strukturze sterowania, dołączany do linii elektroenergetycznej. *Przegląd Elektrotechniczny - Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, ISSN 0033-2097*, 89(2b):34–39, 2013.
- [11] M. Szarek, Ł. Stawiarski, A. Mondzik, R. Stala, A. Penczek. Jednofazowy system fotowoltaiczny dołączany do linii elektroenergetycznej. Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System. *Przegląd Elektrotechniczny - Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, ISSN 0033-2097*, 88(2):218–222, 2012.
- [12] H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg. Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 7(2):17–26, June 2013.