

doi:10.15199/48.2016.06.07

Wysokosprawny przekształtnik sieciowy AC-DC z łącznikami z węgla krzemu wspomagający diodowe systemy napędowe

Streszczenie. Artykuł prezentuje wysokosprawny przekształtnik sieciowy AC-DC dedykowany do wspomagania zainstalowanych systemów napędowych bazujących na prostownikach diodowych. W publikacji zaprezentowano założenia dotyczące pracy układu, zaimplementowany algorytm sterowania oraz model laboratoryjny. Ponadto przedstawiono wyniki eksperymentalne uzyskane podczas badań wysokosprawnego modelu przekształtnika o mocy 10 kVA pracującego z częstotliwością łączeń 16 kHz wykorzystujący łączniki z węgla krzemu (SiC).

Abstract. This paper presents concept of the Support Converter (SC) for passive front-end AC drives. The converter acts as a parallel active filter to compensate high-order current harmonics of the diode rectifier and is able to transfer a part of the energy from regenerative braking back to the grid. The paper presents general system assumptions, applied control method, 10 kVA / 16 kHz SC laboratory model and experimental measurements of the analyzed system. (**High Efficient SiC MOSFET Support Converter for Passive Front End AC Drives**).

Słowa kluczowe: przekształtnik wspomagający, węgiel krzemu (SiC), kompensacja harmoniczných, wysoka sprawność.

Keywords: Support Converter, SiC, harmonics compensation, high efficiency.

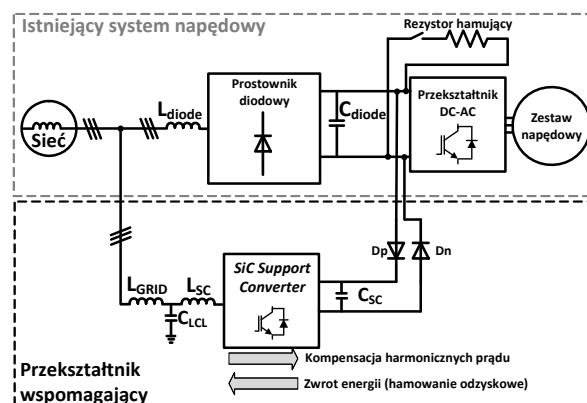
Wstęp

Łączniki energoelektroniczne z węgla krzemu (SiC) stosowane są w wielu aplikacjach w celu podniesienia sprawności przekształtników poprzez redukcję strat łączeniowych lub w celu minimalizacji wymiarów / ciężaru całego układu [1]-[7]. Jednakże ciągle, pomimo znaczącego spadku ceny elementów z węgla krzemu (wyrażonego min. przez malejące współczynniki $\$/A$ lub $\$/mm^2$) ich cena jest nieporównywalnie wyższa niż ich krzemowych odpowiedników (np. krzemowych tranzystorów IGBT). Z tego powodu trudno jest ekonomicznie uzasadnić stosowanie elementów z węgla krzemu w systemach w których głównym kryterium jest koszt i opłacalność, jak np. zespoły napędowe. Zwiększenie sprawności układu o 1% poprzez zastosowanie dużo droższych elementów z węgla krzemu nie przynosi wymiernych zysków w oczekiwanym czasie eksploatacji. Inny powód dla którego stosuje się szerokopasmowe przyrządy mocy to możliwość minimalizacji filtra po stronie sieci dzięki zwiększeniu częstotliwości łączeń oferowanemu przez elementy SiC.

W niniejszym artykule przedstawiono inną możliwość aplikacji elementów mocy z węgla krzemu. Jest nią oparty o tranzystory SiC przekształtnik wspomagający (ang. Support Converter, SC) zainstalowane już systemy napędowe bazujące na prostownikach diodowych [8]. Wspomniany przekształtnik wspomagający podłączony jest równolegle do istniejącego układu oferując zwiększenie funkcjonalności istniejącego systemu i poprawę jakości przetwarzanej energii. Schemat proponowanego rozwiązania został przedstawiony na rysunku 1.

Znamionowa moc dodatkowego układu to około 50% mocy znamionowej istniejącego zestawu napędowego. Dzięki zastosowanemu algorytmowi sterowania przekształtnik może kompensować niepożądane harmoniczne prądu generowane przez prostownik diodowy podczas normalnej pracy napędu (praca jako filtr aktywny). Szybsze przełączanie elementów mocy z węgla krzemu a dzięki temu mniejszy filtr po stronie sieci pozwalają na uzyskanie wyższej dynamiki i skuteczności kompensacji. Ponadto proponowany układ umożliwia zwrot do sieci znacznej części energii podczas hamowania odzyskowego zestawu napędowego [8]. Dodatkową funkcjonalnością przekształtnika wspomagającego, zarówno w trybie pracy jako filtr aktywny jak i przy zwrocie energii jest kompensacja mocy biernej, tak aby po stronie sieci nie było przesunięcia fazowego między prądem a napięciem (w przypadku pracy jako filtr aktywny) lub wynosiło ono dokładnie 180 stopni

elektrycznych (w przypadku hamowania odzyskowego). Konstrukcja przekształtnika oraz wysokotemperaturowe parametry tranzystorów SiC pozwalają na krótkotrwałe (poniżej 1 min.) przeciążenia układu (nawet do 200% mocy znamionowej przekształtnika) i odzyskanie znacznej części energii podczas hamowania [8], [9].



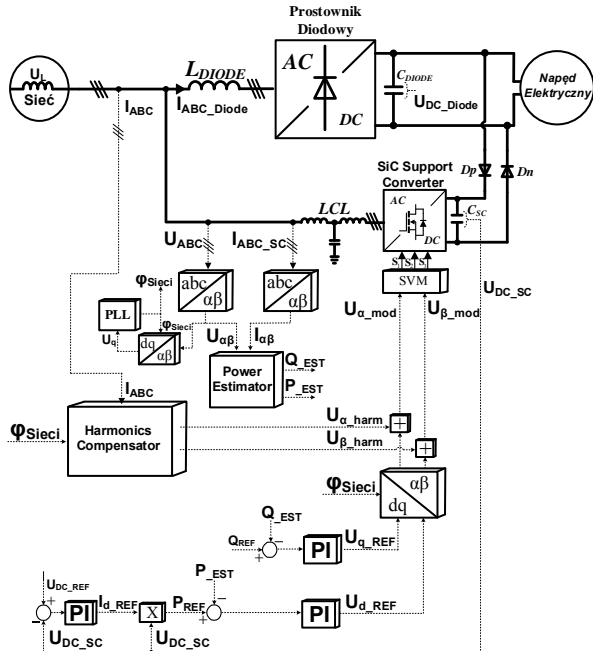
Rys.1. Schemat analizowanego układu

Proponowane rozwiązanie zostało przebadane symulacyjnie w pakiecie Synopsys Saber [8]. Założenie projektowe dotyczące przekształtnika sieciowego wykorzystującego łączniki z węgla krzemu zostały przedstawione w [9] oraz [10]. Niniejszy artykuł przedstawia zastosowany algorytm sterowania, model eksperymentalny przekształtnika wykorzystujący tranzystorowy moduł z elementami z węgla krzemu (tranzystory i diody) oraz wyniki badań eksperymentalnych proponowanej koncepcji.

Algorytm sterowania

Aby zrealizować zakładane funkcjonalności przekształtnika wspomagającego zastosowano algorytm sterowania bazujący na bezpośrednim sterowaniu mocą (ang. Direct Power Control, DPC) z modulacją wektorową (ang. Space Vector Modulation, SVM). Schemat blokowy zaimplementowanej metody sterowania przedstawia rysunek 2. Zarówno w trybie pracy falownikowej (zwrot energii do sieci) jak i w trybie pracy jako filtr aktywny w torze głównym regulacji znajdują się sygnały reprezentujące moc: czynną i bierną. Moc bierna regulowana jest bezpośrednio poprzez wartość liczbową zadaną tak, aby przesunięcie fazowe między prądem a napięciem po stronie

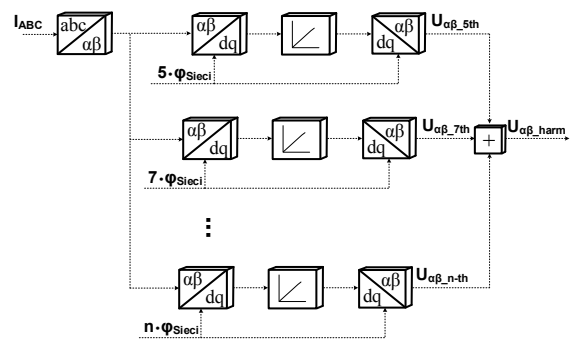
sieci wynosiło odpowiednio 0 stopni elektrycznych dla normalnej pracy zestawu napędowego i 180 stopni dla hamownia odzyskowego. Wartość mocy czynnej zadawana jest pośrednio, poprzez regulator napięcia U_{DC} przekształtnika. W torze regulacji obwodu DC wartość zmierzona napięcia (U_{DC}) porównywana jest z wartością napięcia zadaną przez użytkownika ($U_{DC REF}$), uchyb podawany jest na regulator PI (rys. 2) [11], [12].



Rys.2. Schemat blokowy zaimplementowanego algorytmu sterowania

W badanym układzie wartości nastaw regulatorów PI dla regulacji mocy i poziomu napięcia obwodu DC dobierane są na podstawie kryterium optimum symetrii [13]. Jednak na stanowisku eksperymentalnym ze względu na opóźnienia w torze pomiarowym regulatory były dodatkowo dostrajane na podstawie obserwacji reakcji układu na skokowe zmiany wartości zadanych oraz skokowe zmiany obciążenia.

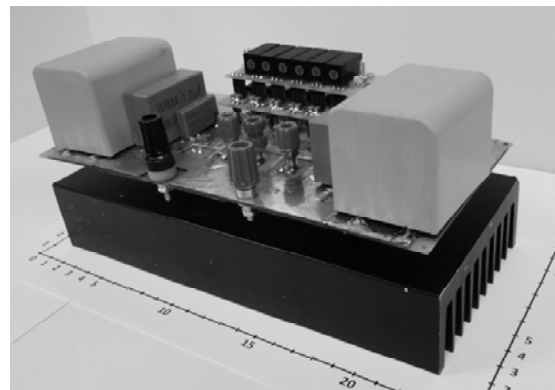
Funkcjonalnością zaimplementowaną w dodatkowym torze regulacji w proponowanym algorytmie sterowania jest kompensacja wyższych harmoniczných prądu [11]. Schemat blokowy kompensatora przedstawia rysunek 3. Kompensacja zrealizowana jest w oparciu o filtry pasmowo-przepustowe. Zmierzony odkształcony prąd sieci ze stacjonarnego układu współrzędnych $\alpha\text{-}\beta$ przekształcany jest do wirującego układu $d\text{-}q$, przy czym dla każdej wyższej harmoniczných układ wiruje z odpowiadającą jej częstotliwością. I tak odpowiednio dla 5-tej harmoniczných jest to 5-ta wielokrotność częstotliwości sieci, dla 7-mej siódma wielokrotność itd. W ten sposób w układzie $d\text{-}q$ każda harmoniczna kontrolowana jest jak sygnał stały, który jest filtrowany z odpowiednim wzmocnieniem k a następnie ponownie przekształcany do stacjonarnego układu $\alpha\text{-}\beta$. Uzyskane w ten sposób napięcia w układzie $\alpha\text{-}\beta$ odpowiadające zawartości poszczególnych harmoniczných w zmierzonym prądzie dodawane są z przeciwnym znakiem przed modulator wektorowy jako dodatkowy sygnał w torze regulacji [12], [13]. Zastosowanie opisanej metody kompensacji harmoniczných pozwala na selektywną kompensację wybranych wyższych harmoniczných, najbardziej istotnych z punktu widzenia poprawy jakości przetwarzanej energii elektrycznej. Ponadto, realizacja cyfrowa oparta jest głównie na przekształceniach układów współrzędnych i prostym filtrze, co nie obciąża znacząco jednostki obliczeniowej realizującej algorytm sterowania.



Rys.3. Schemat blokowy kompensatora harmoniczných prądu

Model laboratoryjny przekształtnika 10 kVA

W celu weryfikacji proponowanego rozwiązania zaprojektowano i wykonano model laboratoryjny przekształtnika AC-DC o mocy 10 kVA. Po wstępnych badaniach symulacyjnych w pakiecie Synopsys Saber zdecydowano się za zastosowanie trójfazowego modułu SiC CCS050M12CM2, o napięciu 1,2 kV i prądzie znamionowym 50 A firmy Cree [14]. Zdjęcie modelu eksperymentalnego przedstawia rysunek 4.



Rys.4. Zdjęcie zaprojektowanego i badanego modelu eksperymentalnego przekształtnika wspomagającego o mocy 10 kVA

Jak przedstawiono na rysunku 4 moduł tranzystorowy został umieszczony na radiatorze (Fisher SK92 220 mm) i podłączony do dwuwarstwowej płytki PCB stanowiącej obwód mocy przekształtnika. W celu zapewnienia odpowiedniej pojemności obwodu DC zastosowano dwa kondensatory ze stałym dielektrykiem Vishay MKP 80 uF/700 V oraz dodatkowe szybkie kondensatory 1 uF/1 kV oraz 150 nF/1 kV (tzw. snubbery). Na wierzchniej warstwie obwodu mocy zamontowano sześć sterowników bramkowych z dodatkowymi diodami Zenera oraz rezystorami tłumiącymi możliwie najbliższe wyjść sterujących modułu. Przy wymiarach 221 mm x 100 mm x 106 mm sekcja mocy przekształtnika ma objętość 2,3 dm³.

Analizowany przekształtnik wspomagający został podłączony do sieci poprzez filtr LCL. Parametry filtru, przedstawione w Tabeli 1, zostały dobrane na podstawie określonych na etapie projektowania warunków pracy układu, takich jak: częstotliwość łączeń (16 kHz), maksymalne dopuszczalne napięcie w obwodzie DC (700 V), maksymalne dopuszczalne tętnienia prądu po stronie przekształtnika ($\approx 25\%$) oraz częstotliwość rezonansowa filtru (7,07 kHz). Parametry pracy układu zostały dobrane tak, aby przy możliwie wysokiej dynamice oraz zredukowanym hałasie ($f_{st} = 16$ kHz uznano za granicę słyszalności) uzyskać możliwie najwyższą sprawność przekształtnika.

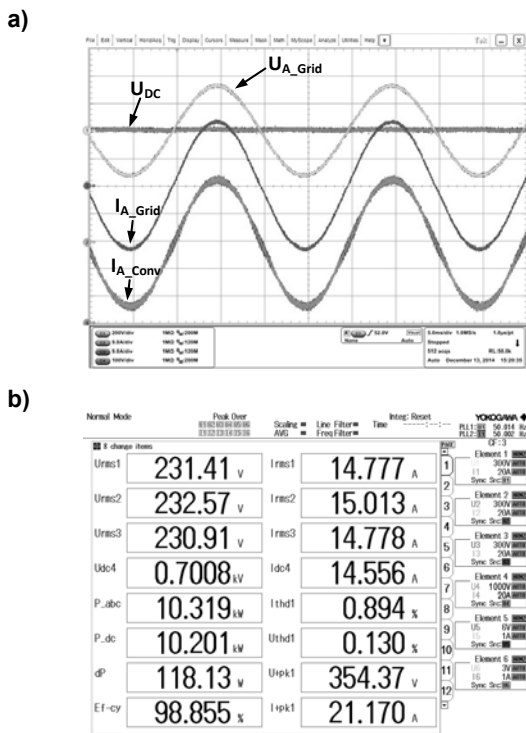
Tabela 1. Parametry modelu eksperymentalnego

Parametr	Wartość
Moc znamionowa	10 [kVA]
Znamionowe napięcie AC	230 [V RMS]
Znamionowy prąd AC	14,5 [A RMS]
Znamionowe napięcie DC	580 - 700 [V DC]
Prąd znamionowy DC	14,3 – 17,3 [A DC]
Częstotliwość łączeń	16 [kHz]
Typ filtru po stronie sieci	LCL
Parametry filtru	Dla $f_{sw} = 16$ [kHz] $L_{SC} = 1,5$ [mH] $C_{LCL} = 5$ [μ F] $L_{Grid} = 100$ [μ H]
Pojemność obwodu DC	$C_{SC} = 162$ [μ F]
Typ kondensatora w obw. DC	Vishay MKP 1848
Sekcja mocy	1x CCS050M12CM2
Radiator	1x Fisher SK92 220 mm ($R_{TH} = 0,9$ K/W)

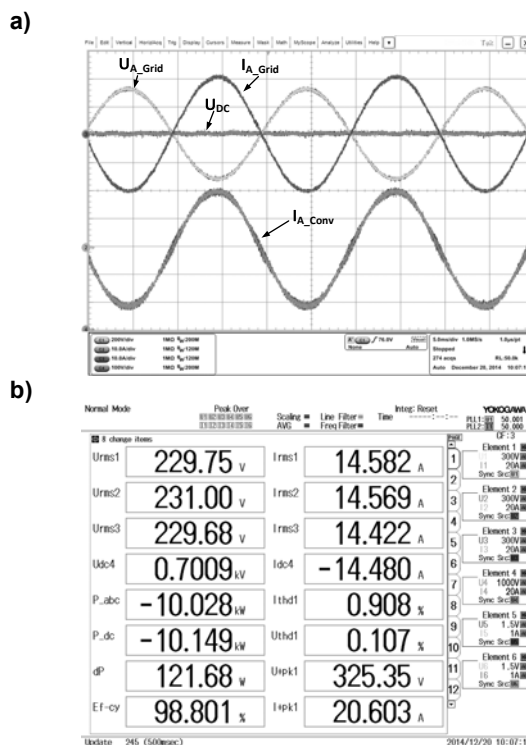
Badania eksperymentalne

W pierwszej części badań eksperymentalnych zweryfikowano poprawne działanie układu pomiarowego (pomiar prądów i napięć oparty o przetworniki LEM), generacji impulsów sterujących oraz realizacji sprzętowej zaproponowanego algorytmu sterowania na platformie dSpace 1006. Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono przebiegi prądów i napięć oraz wydruki ekranu z analizatora mocy Yokogawa WT1806 dla mocy znamionowej przy pracy prostownikowej (rys. 5) oraz falownikowej (rys. 6) przekształtnika podłączonego do sieci elektroenergetycznej. Pomiar sprawności analizatorem mocy obejmuje straty w półprzewodnikach oraz filtrze po stronie sieci.

Na zaprezentowanych przebiegach zilustrowano, że zarówno układ pomiarowy jak i algorytm sterowania działają prawidłowo umożliwiając synchronizację przekształtnika z siecią oraz stabilną pracę w warunkach znamionowego obciążenia przy współczynniku THD prądu po stronie sieci poniżej 1%.



Rys.5. Praca prostownikowa modelu przekształtnika przy nominalnym obciążeniu. a) Przebiegi prądów i napięć, od góry: napięcie sieci, faza A (U_{A_Grid}), napięcie w obwodzie DC (U_{DC}), prąd po stronie sieci, faza A (I_{A_Grid}), prąd po stronie przekształtnika, faza A (I_{A_Conv}); b) wydruk ekranu z analizatora mocy Yokogawa WT1806

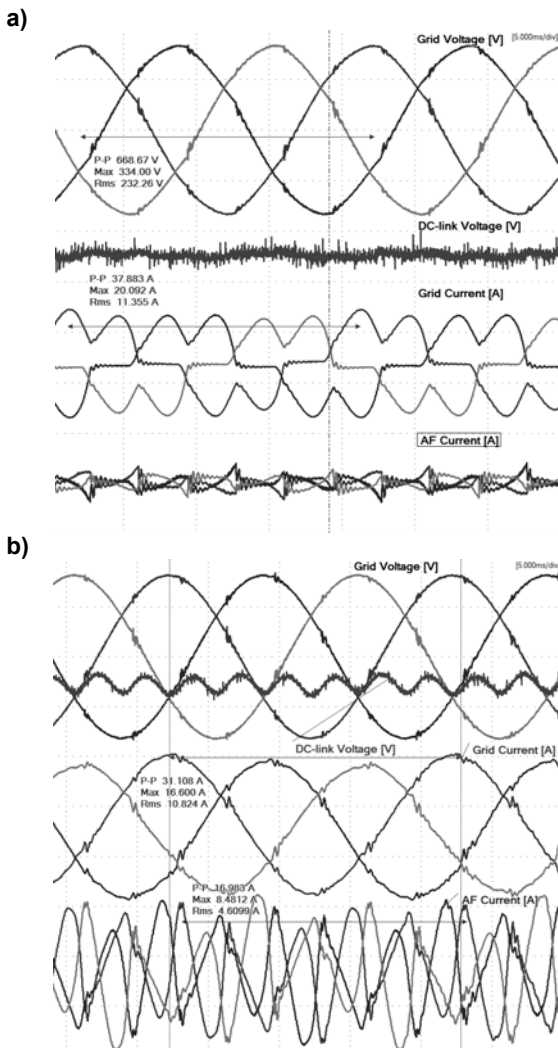


Rys.6. Praca falownikowa przekształtnika przy nominalnym obciążeniu. a) Przebiegi prądów i napięć, od góry: napięcie sieci, faza A (U_{A_Grid}), napięcie w obwodzie DC (U_{DC}), prąd po stronie sieci, faza A (I_{A_Grid}), prąd po stronie przekształtnika, faza A (I_{A_Conv}); b) wydruk ekranu z analizatora mocy Yokogawa WT1806

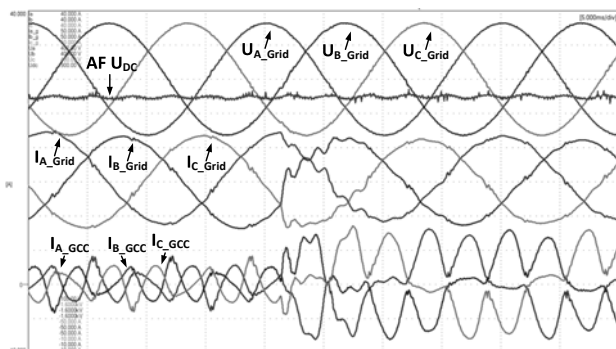
W kolejnym kroku badań przeanalizowano pracę modelu laboratoryjnego jako przekształtnika wspomagającego istniejący system napędowy, tj. w konfiguracji jak na rysunku 1. Rysunek 7 ilustruje kompensację wyższych harmonicznych prądu sieci (funkcjonalność realizowana przez opisywany SC), a dokładniej - rysunek 7a) przedstawia pracę prostownika diodowego zasilającego 7 kW obciążenie bez działającej kompensacji harmonicznych (współczynnik THD prądu po stronie sieci wynosi 36,5%), natomiast rysunek 7b) obrazuje analogiczną sytuację, ale z działającą kompensacją harmonicznych (współczynnik THD prądu po stronie sieci został zredukowany do 3%). W obu przypadkach prostownik diodowy jest podłączony do sieci zasilającej przez filtr typu L o wartości 1,85 mH. Zmierzona eksperymentalnie za pomocą analizatora mocy Yokogawa sprawność prostownika diodowego razem z filtrem aktywnym przy obciążeniu 7 kW wynosi 98,6% potwierdzając bardzo niskie straty opracowanego modelu laboratoryjnego.

W kolejnym kroku prac przeanalizowano dodatkową funkcjonalność proponowanego układu, jaką jest możliwość kompensacji mocy biernej. Na rysunku 8 przedstawiono proces załączenia kompensacji mocy biernej przy jednoczesnej kompensacji wyższych harmonicznych prądu. Przesunięcie fazowe generowane jest przez filtr $L = 10$ mH prostownika diodowego z 6 kW obciążeniem. Przebieg załączenia potwierdza poprawną pracę algorytmu sterowania oraz układu pomiarowego, zarówno prądy po stronie sieci jaki i przekształtnika są w pełni kontrolowane, zrównoważone i bez przeregulowań.

Kolejne wyniki eksperymentalne przedstawiają stany dynamiczne i zmianę trybów pracy analizowanego układu (przejście między kompensacją harmonicznych a pracą falownikową).

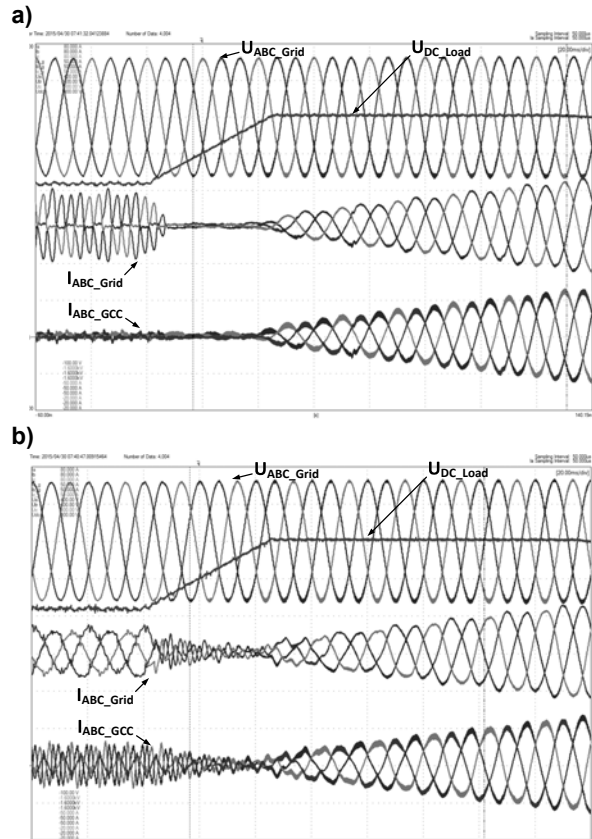


Rys.7. Wspomaganie diodowego systemu napędowego zasilającego 7 kW obciążenie. Kompensacja wyższych harmoniczných prądu (filtracja aktywna). a) praca bez kompensacji harmoniczných prądu; b) praca z kompensacją harmoniczných prądu. Od góry: napięcia sieci (Grid Voltage), napięcie w obwodzie DC przekształtnika wspomagającego (DC-link Voltage), prądy po stronie sieci (Grid Current), prądy przekształtnika wspomagającego (AF Current)



Rys.8. Proces załączenia kompensacji mocy biernej generowanej przez 10 mH filtr L prostownika diodowego obciążonego 6 kW, przy działającej jednocześnie kompensacji wyższych harmoniczných prądu. Od góry: napięcia sieci (U_{ABC_Grid}), napięcie w obwodzie DC przekształtnika wspomagającego (AF U_{DC}), prądy po stronie sieci (I_{ABC_Grid}), prądy przekształtnika wspomagającego (I_{ABC_gcc})

Rysunek 9 przedstawia przejście z pracy prostownikowej układu (zasilającego 2,8 kW obciążenie) do hamowania odzyskowego i zwrotu 5,5 kW do sieci (praca falownikowa przekształtnika wspomagającego). Rysunek 9a) przedstawia zmianę trybu pracy bez wcześniejszej kompensacji harmoniczných, natomiast rysunek 9b) obrazuje analogiczną sytuację ale z przekształtnikiem wspomagającym kompensującym wyższe harmoniczne prądu sieci podczas pracy prostownikowej.

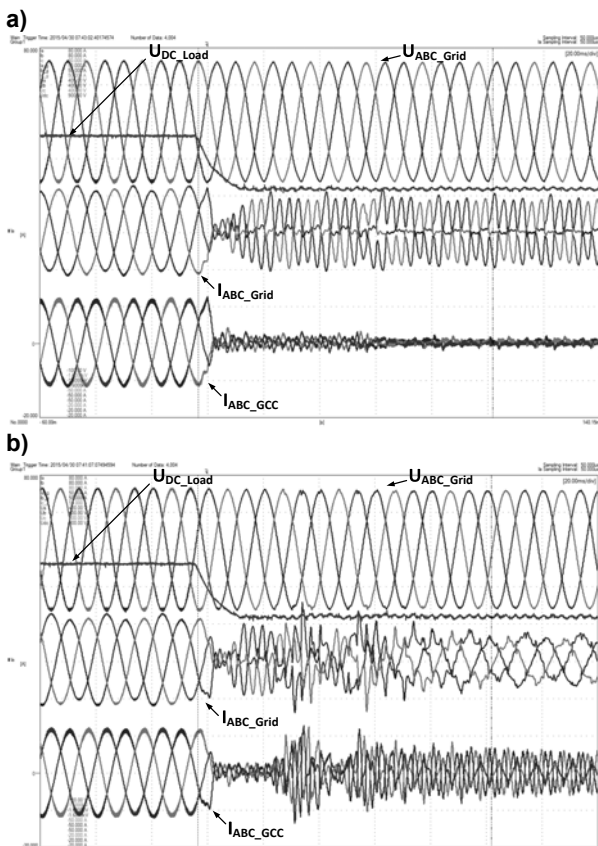


Rys.9. Wspomaganie diodowego systemu napędowego. Przejście z pracy prostownikowej układu (zasilającego 2,8 kW obciążenie) do hamowania odzyskowego i zwrotu 5,5 kW do sieci. a) praca bez kompensacji harmoniczných prądu; b) praca z kompensacją harmoniczných prądu. Od góry: napięcia sieci (U_{ABC_Grid}), napięcie w obwodzie DC prostownika diodowego (U_{DC_Load}), prądy po stronie sieci (I_{ABC_Grid}), prądy przekształtnika wspomagającego (I_{ABC_gcc})

Odwrotna sytuacja, tzn. przejście z hamowania odzyskowego i zwrotu 5,5 kW do sieci elektroenergetycznej do pracy prostownikowej układu i zasilania 2,8 kW obciążenia została przedstawiona na rysunku 10. Podobnie jak poprzednio rysunek 10a) przedstawia zmianę trybu pracy bez dodatkowej funkcjonalności jaką jest kompensacja wyższych harmoniczných prądu, natomiast na rysunku 10b) można zaobserwować załączenie kompensacji wyższych harmoniczných prądu po stronie sieci. W obu przypadkach prostownik diodowy podłączony jest do sieci przez filtr $L=1,85$ mH.

Przedstawione stany dynamiczne i zmiana trybów pracy ilustrują poprawne działanie zaimplementowanej metody sterowania oraz układu sterująco-pomiarowego. Prądy są kontrolowane i zrównoważone, bez znaczących przeregulowań.

Dynamika zmian trybów pracy układu ograniczona jest przez dynamikę zastosowanego źródła napięcia stałego (Chroma Programmable DC Source), które wykorzystywane zostało w celu symulacji zwrotu energii do sieci elektroenergetycznej.



Rys.10. Wspomaganie istniejącego diodowego systemu napędowego. Przejście z hamowania odzyskowego i zwrotu 5,5 kW do sieci do pracy prostownikowej układu i zasilania 2,8 kW obciążenia; a) praca bez kompensacji harmonicznego prądu; b) praca z kompensacją harmonicznego prądu. Od góry: napięcia sieci (U_{ABC_Grid}), napięcie w obwodzie DC prostownika diodowego (U_{DC_Load}), prądy po stronie sieci (I_{ABC_Grid}), prądy przekształtnika wspomagającego (I_{ABC_GCC})

Podsumowanie i wnioski

Artykuł prezentuje wysokosprawny przekształtnik AC-DC zbudowany w oparciu o elementy mocy z węgla krzemu dedykowany do wspomaganie istniejących diodowych systemów napędowych. Dodatkowy przekształtnik, podłączony równolegle do istniejącego już układu umożliwia kompensację mocy biernej i wyższych harmonicznego prądu podczas normalnej pracy układu napędowego a także zwrot energii do sieci podczas hamowania odzyskowego. W artykule przedstawiono założenia pracy układu, zaproponowano algorytm sterowania bazujący na bezpośrednim sterowaniu mocą z modulacją wektorową oraz metodą kompensacji wyższych harmonicznego prądu, opisano opracowany model laboratoryjny wykorzystujący łączniki SiC oraz przedstawiono weryfikację eksperymentalną poprawności działania zaprojektowanego przekształtnika.

Otrzymane wyniki potwierdzają założenia i poprawną pracę analizowanego układu. Zaprezentowany model laboratoryjny bazujący na łącznikach z węgla krzemu pracuje prawidłowo zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych uzyskując zakładaną wysoką sprawność. Zastosowany algorytm sterowania pozwala na realizację oczekiwanych funkcjonalności znacząco poprawiając jakość energii wymienianej przez istniejący układ napędowy z siecią elektroenergetyczną.

Przedstawione wyniki eksperymentalne mają charakter wyników wstępnych, ze względu na ograniczenia zaplecza

laboratoryjnego oraz czasowe nie przetestowano pracy przekształtnika wspomagającego przy nominalnych, założonych parametrach układu (zakładano, że moc dodatkowego przekształtnika to 50% mocy istniejącego układu). Ponadto planowane są szersze analizy sprawności modelu laboratoryjnego oparte o analizy termiczne.

Praca jest częścią projektu badawczego „Badania i rozwój procedur optymalizacji wielokryterialnej nowoczesnych przekształtników AC-DC w szczególności dla systemów energetyki odnawialnej / rozproszonej”. Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2012/05/B/ST7/01183.

Autor: mgr inż. Szymon Piasecki, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: szymon.piasecki@ee.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Friedrichs P., Silicon Carbide Power semiconductors – New opportunities for high efficiency, 3-rd IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2008), 1770-1774
- [2] Sheridan D.C., Ritenour A., Kelley R., Bondarenko V., Casady J.B., Advances in SiC VJFETs for renewable and high-efficiency power electronics applications, International Power Electronics Conference (IPEC), (2010)
- [3] Rixin Lai and all, A High-Power-Density Converter, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 4, Issue 4, (2010), 4 – 12
- [4] Stalter O., Kranzer D., Rogalla S., Burger B., Advanced solar power electronics, 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, (2010), 3 – 10
- [5] Biela J., Schweizer M., Waffler S., Kolar J. W., SiC vs. Si - Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC-DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), n.7, 2872-2882
- [6] Rabkowski J., Peftitsis D., Nee H.P., SiC power transistors – a new era in power electronics is initiated, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6 (2012), n.2, 17-26
- [7] Wrzcionko B., Bortis D., Kolar J.W., A 120°C Ambient Temperature Forced Air-Cooled Normally-off SiC JFET Automotive Inverter System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (2014), n.5, 2345-2358
- [8] Piasecki S., Rabkowski J., Wrona G., Platek T., SiC-based Support Converter for passive front-end AC drive applications, *IEEE Industrial Electronics Conference (IECON)*, (2013), 6008-6013
- [9] Piasecki S., Rabkowski J., Experimental Investigations on the Grid-connected AC/DC Converter Based on Three-phase SiC MOSFET Module, *17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE ECCE Europe)*, (2015), 1-10
- [10] Rabkowski J., Piasecki S., Kazmierkowski M.P., Design of a Three-phase AC/DC Converter with Paralleled SiC MOSFETs, *Proc. of Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, (2014)
- [11] Piasecki S., Jasinski M., Milicua A., Brief view on Control of Grid-Interfacing AC-DC-AC Converter and Active Filter under Unbalanced and Distorted Voltage Conditions, *Compel*, Vol. 30 No. 1, (2011), 351-373
- [12] Piasecki S., Jasinski M., Wrona G., Chmielak W., Robust Control of Grid Connected AC-DC Converter for Distributed Generation, *IEEE Industrial Electronics Conference (IECON)*, Montreal, Canada, (2012), 5844 – 5849
- [13] Jasiński M., Wrona G., Piasecki S., Chapter 3: Control of Grid Connected Converter (GCC) Under Grid Voltage Disturbances z książki: Orłowska-Kowalska, Blaabjerg, Rodríguez „Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives”, Springer International Publishing Switzerland (2014), 91-142
- [14] Nota katalogowa modułu CCS050M12CM2