



Mateusz SULIGA¹

ANALIZA PRACY PRZEKSZTAŁTNIKA SMC STEROWANEGO METODĄ WEKTORA PRZESTRZENNEGO

Artykuł prezentuje badania symulacyjne pośredniego przekształtnika matrycowego o topologii Sparse Matrix Converter (SMC). W porównaniu do standardowego układu przekształtnika matrycowego, topologia SMC wykorzystuje mniej elementów półprzewodnikowych, co zmniejsza cenę wykonania układu. Do sterowania łącznikami została wybrana metoda sterowania wektorowego, Space Vector Modulation (SVM). Wynikami przeprowadzonych badań są przebiegi kształtowanych napięć wyjściowego oraz prądów wejściowych przekształtnika. Wyznaczone spektrum harmonicznych przebiegów potwierdza poprawność działania zaprojektowanego modelu przekształtnika oraz przedstawia procentową zawartość wyższych harmonicznych. Układ typu SMC spełnia założenia związane z przekształtnikami matrycowymi, przy jednoczesnym wykorzystaniu mniejszej ilości elementów półprzewodnikowych.

Słowa kluczowe: pośredni przekształtnik matrycowy (IMC), SMC, wektorowa modulacja szerokości impulsu (SVM), przemiennik częstotliwości

1. Wprowadzenie

Początek lat 80 ubiegłego wieku jest przełomowym okresem w rozwoju technologii przekształtników matrycowych. To w tym czasie został zapropono-

¹ Autor do korespondencji: Mateusz Suliga
Adres e-mail: m.suliga@prz.edu.pl

wany pierwszy układ, który wykorzystuje, w pełni sterowane, łączniki dwukierunkowe do kształtowania napięć wyjściowych i prądów wejściowych. Przekształtniki matrycowe należą do grupy przemienników częstotliwości, które do sterowania wykorzystują metodę modulacji szerokości impulsów. Możemy je podzielić ze względu na ich budowę na przekształtniki matrycowe bezpośrednie (DMC) i pośrednie (IMC).

Układ IMC tworzy układ falownika i prostownika połączonych obwodem pośredniczącym. W części prostownikowej zostały zastosowane dwukierunkowe łączniki tranzystorowe pozwalające na kształtowanie prądów wejściowych. Natomiast część falownikowa składa się ze standardowego układu trójfazowego. Standardowy układ przekształtnika IMC wykorzystuje 18 tranzystorów i 18 diod. Jednak zastosowanie takiego układu jest nieoptyczne z powodu dużej ilości wykorzystanych tranzystorów. Z tego powodu zostały opracowane struktury, które wykorzystują mniejszą ilość łączników, należą do nich: SMC (eng. Sparse Matrix Converter), VSMC (eng. Very Sparse Matrix Converter), USMC (eng. Ultra Sparse Matrix Converter) oraz ILMC (eng. Inverting Link Matrix Converter) [1][4]. Porównanie wykorzystanych elementów półprzewodnikowych w każdej ze struktur przedstawia tabela 1. Do sterowania, każdym z tych układów, wykorzystuje się metody modulacji szerokości impulsu, do których możemy zaliczyć metodę skalarną, metodę Venturinio oraz metodę wektorową.

Tabela 1. Porównanie liczby tranzystorów i diod w różnych typach przekształtników [1]

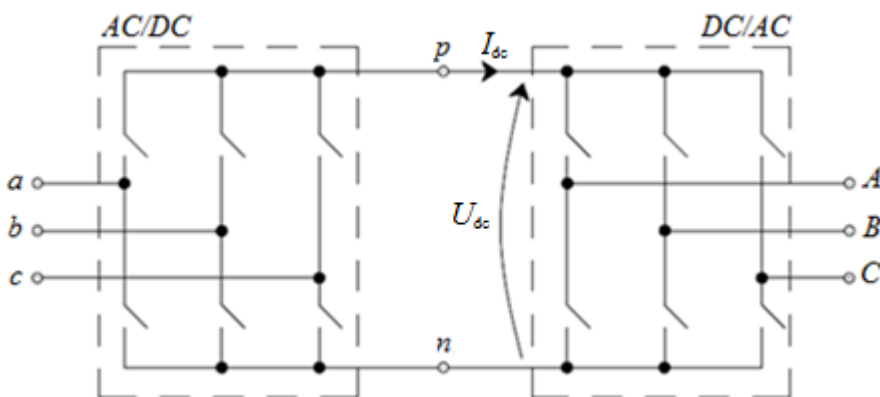
Table 1. Comparison of the numbers of transistors and diodes in different type of converters [1]

Typ przekształtnika	Tranzystory	Diody
IMC	18	18
SMC	15	18
VSMC	12	30
USMC	9	18
ILMC	14	14

W artykule została zaprezentowana analiza pośredniego przekształtnika matrycowego o topologii SMC. Do sterowania układem wykorzystano metodę modulacji wektorowej opisaną w publikacjach [1, 7].

2. Topologia SMC

Strukturę pośrednich przekształtników matrycowych możemy podzielić na część prostownikową, część falownikową i łączący je obwód pośredniczący (Rys. 1.) [3–5]. Zadaniem części prostownikowej jest przekształcenie trójfazowych napięć zasilających na stałe napięcie wyjściowe, przy jednoczesnym kształtowaniu sinusoidalnych prądów wejściowych. Natomiast część falownikowa z napięcia stałego tworzy trójfazowe napięcie przemienne o określonych wartościach amplitudy i częstotliwości. W obwodzie pośredniczącym układu przekształtnika IMC nie jest wykorzystany żaden element dodatkowy, co wpływa na możliwą minimalizację układu.



Rys. 1. Struktura pośredniego przekształtnika matrycowego [4]

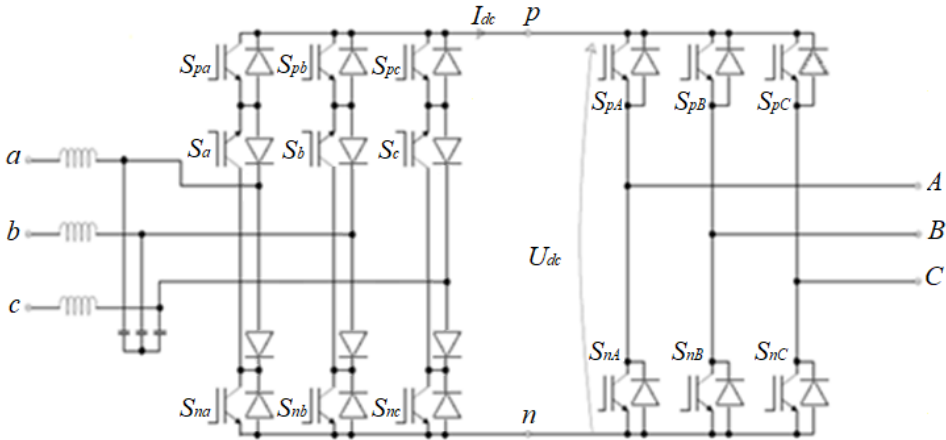
Fig. 1. Topology of the indirect matrix converter [4]

Struktura SMC w odróżnieniu od standardowego pośredniego przekształtnika matrycowego wykorzystuje mniejszą liczbę łączników tranzystorowych. Część prostownikową struktury SMC tworzy dziewięć tranzystorów, które możemy podzielić na:

- Tranzystory połączone z potencjałem p obwodu pośredniczącego: S_{pa} , S_{pb} , S_{pc}
- Tranzystory połączone z potencjałem n obwodu pośredniczącego: S_{na} , S_{nb} , S_{nc}
- Tranzystory środkowe: S_a , S_b , S_c

Część falownikowa tworzy standardowy tranzystorowy falownik napięcia, którego łączniki zostały opisane jako:

- Tranzystory połączone z potencjałem p obwodu pośredniczącego S_{pA} , S_{pB} , S_{pC}
- Tranzystory połączone z potencjałem n obwodu pośredniczącego S_{nA} , S_{nB} , S_{nC}



Rys. 2. Schemat pośredniego przekształtnika matrycowego o topologii SMC

Fig. 2. Scheme of an Sparse Matrix Converter

3. Model układu przekształtnika SMC

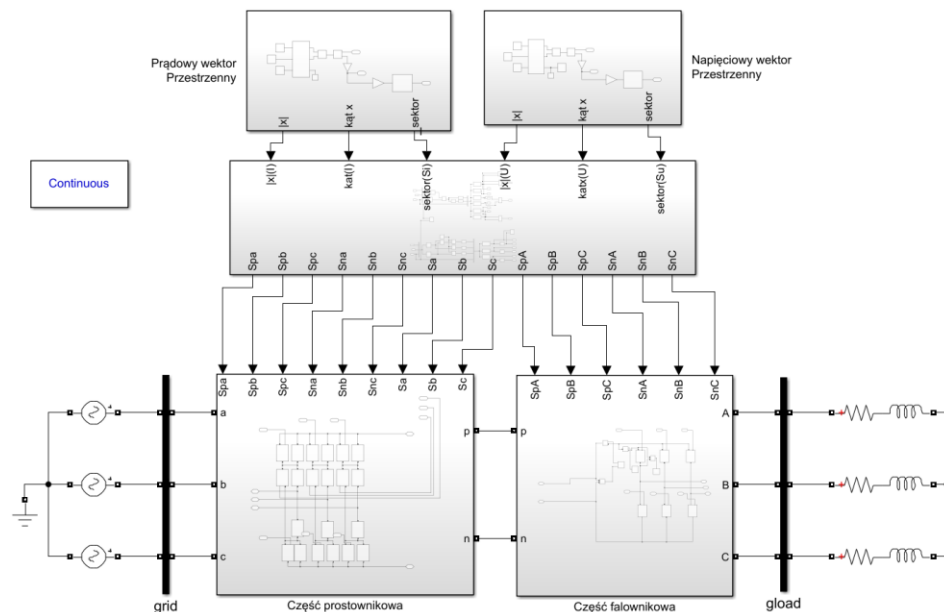
Zaprojektowany model przekształtnika o strukturze SMC został wykonany w środowisku obliczeniowym MatLab/Simulink (Rys.3.). Układ został stworzony zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2. Do wykonania modelu została wykorzystana biblioteka „Simscape Electrical” [6]. Biblioteka ta umożliwia modelowanie systemów mechatronicznych, obwodów analogowych oraz jedno- i wielofazowych systemów energoelektronicznych.

Model przekształtnika SMC przedstawiony na rysunku 3 przedstawia układ w postaci połączonych subsystemów programu Matlab/Simulink. Składa się on z części prostownikowej zasilanej z trójfazowego źródła napięcia o częstotliwości 50Hz i amplitudzie 230V, oraz z części falownikowej, na wyjściu której zastosowany został odbiornik rezystancyjno-indukcyjny o parametrach $R = 2 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$. Łączniki tranzystorowe wykorzystane w budowie poszczególnych części wykorzystują technologie tranzystorów IGBT i zakładają brak strat energii przy przełączeniach.

Do wyznaczenia przedziałów przewodzenia łączników części prostownikowej i falownikowej została wykorzystana metoda modulacji wektorowej opisana

w artykułach [1] [7]. Dzięki metodzie opisanej w tych artykułach jesteśmy w stanie wyznaczyć sygnały sterujące wszystkimi łącznikami części falownikowej oraz łącznikami części prostownikowej, które są połączone z potencjałem p i n obwodu pośredniczącego. Do wyznaczenia sygnałów sterujących tranzystorami środkowymi części prostownikowej należy wykorzystać zależność:

$$S_x = S_{px} \cup S_{nx} \quad (x = a, b, c) \tag{1}$$



Rys. 3. Model przekształtnika SMC w programie Matlab/Simulink

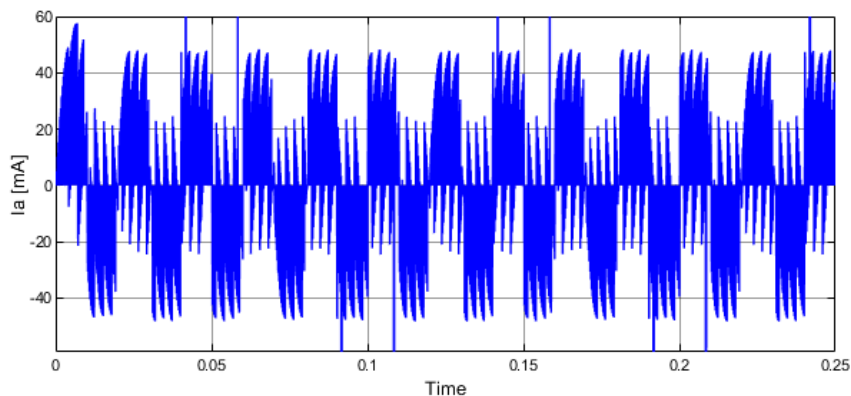
Fig. 3. Sparse Matrix Converter model in Matlab/Simulink

4. Wyniki pomiarów

Część prostownikowa

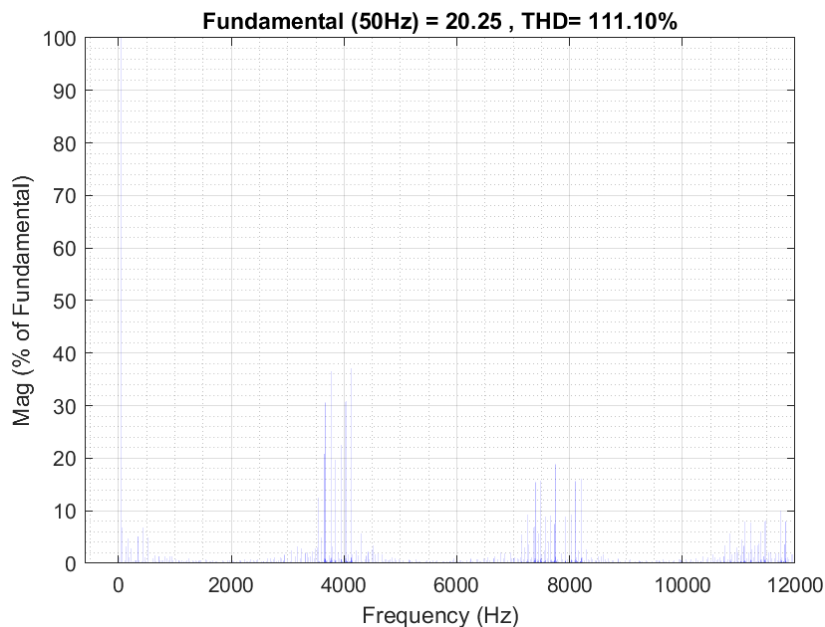
Jedną z idei stosowania przekształtników matrycowych jest możliwość kształtowania prądu wejściowego przekształtnika. Na rysunku 4 zaprezentowany został przebieg prądu wejściowego jednej fazy zamodelowanego przekształtnika SMC. Możemy zaobserwować, że otrzymany przebieg jest okresowy, ale nie przypomina kształtem sinusoidy. Niestandardowy kształt spowodowany jest przez brak układu filtrującego na wejściu przekształtnika. W takiej sytuacji do sprawdzenia poprawności działania układu została wykonana analiza Fouriera (Rys. 5.). Wynik analizy pokazuje, że składowa podstawowa o częstotliwości

50Hz osiąga wartość największa, co potwierdza poprawność działania układu prostownikowego. Oprócz składowej podstawowej możemy również zaobserwować składowe odkształcenia, które tworzą pasma boczne wokół częstotliwości próbkowania.



Rys. 4. Przebieg prądu wejściowego

Fig. 4. Input current waveform

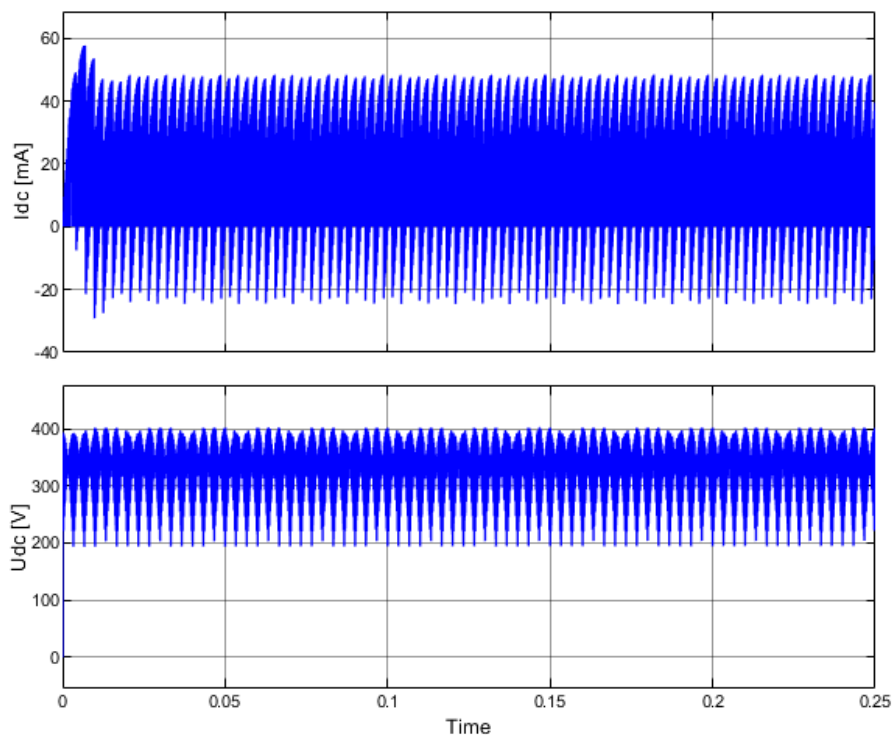


Rys. 5. Analiza częstotliwościowa prądu wejściowego

Fig. 5. Frequency analysis of the input current

Obwód pośredniczący

Na rysunku 6 zostały zaprezentowane przebiegi napięć i prądów części pośredniczącej układu przekształtnika SMC. Analizując napięcie wyprostowane otrzymane z części prostownikowej, możemy zaobserwować momenty przełączeń pomiędzy napięciami międzyfazowymi.



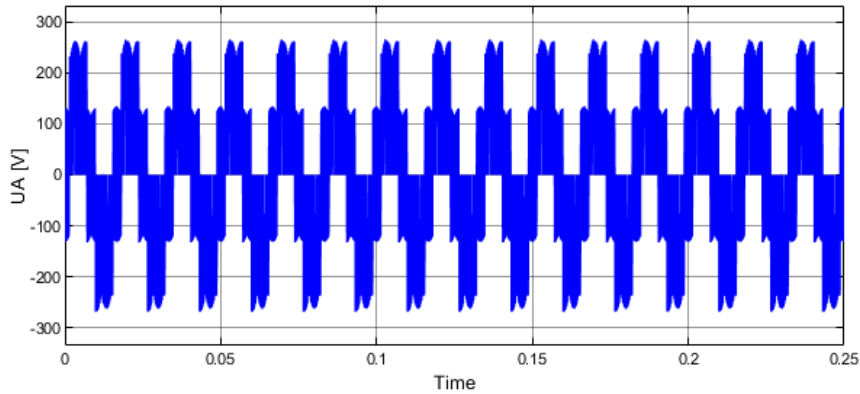
Rys. 6. Przebieg prądu i napięcia obwodu pośredniczącego

Fig. 6. DC-link current and voltage waveforms

Część falownikowa

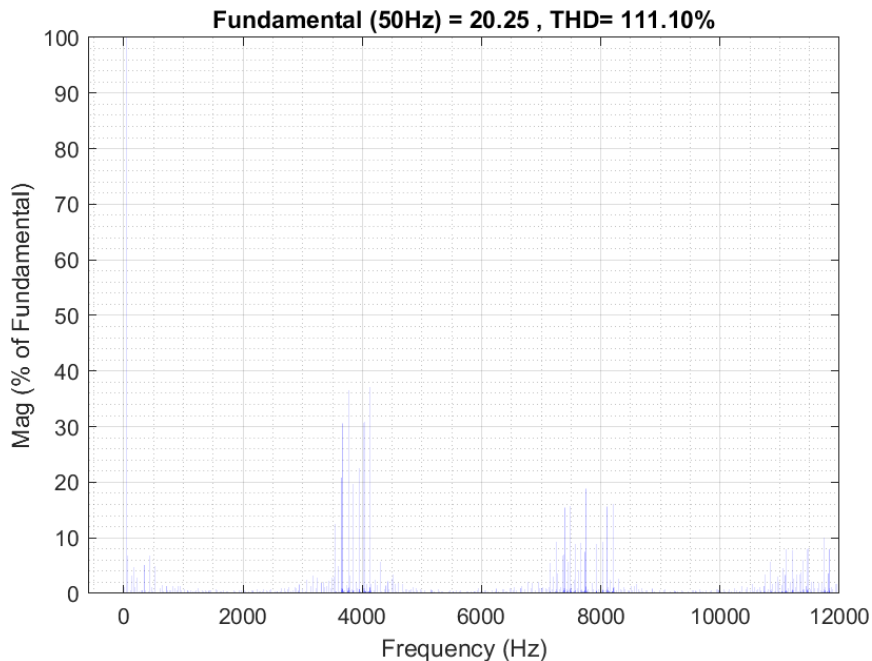
Poza kształtowaniem prądu wejściowego, rolą przekształtnika SMC jest wytworzenie napięcia wyjściowego o żądanych parametrach częstotliwości i amplitudy. W sterowaniu modelem została założona częstotliwość równa 60Hz i amplituda równa amplitudzie zasilania. Wyniki symulacji zaprezentowane na rysunkach 7 i 9, prezentują kolejno przebieg napięcia wyjściowego jednej fazy oraz przebieg napięcia międzyfazowego pomiędzy fazą A i B. Otrzymane napięcia są zniekształcone. Żeby sprawdzić poprawność działania części falownikowej

układu, utworzone napięcie wyjściowe jednej fazy zostało poddane analizie Fouriera. Wynika z niej że składowa podstawowa napięcia równa jest 60Hz, a składowe odształcenia tworzą pasma boczne w obrębie częstotliwości próbkowania.



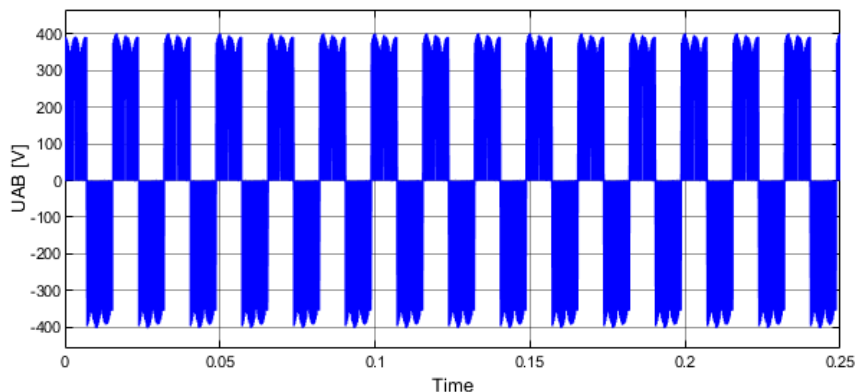
Rys. 7. Przebieg napięcia fazowego na wyjściu przekształtnika

Fig. 7. Waveform of the phase voltage at the output of the converter



Rys. 8. Analiza częstotliwościowa napięcia wyjściowego

Fig. 8. Frequency analysis of the output voltage



Rys. 9. Przebieg napięcia międzyfazowego na wyjściu przekształtnika

Fig. 9. Waveform of the phase-to-phase voltage at the output of the converter

5. Podsumowanie

Analizując otrzymane wyniki symulacji, możemy stwierdzić że zamodelowany układ przekształtnika SMC spełnia założenia dotyczące działania przekształtników matrycowych. Potwierdzają to analizy częstotliwościowe prądów wejściowych i napięć wyjściowych. Możemy zatem stwierdzić, że topologia SMC osiąga takie same wartości co Standardowy przekształtnik IMC, przy jednoczesnym stosowaniu mniejszej liczby elementów półprzewodnikowych. Wpływa to pozytywnie na ostateczny koszt wykonania przekształtnika.

Literatura

- [1] Suliga M.: Analiza pracy wybranego układu pośredniego przekształtnika matrycowego, Praca magisterska, Rzeszów 2019
- [2] Alesina A.C.: Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine Switch Direct AC-AC Converter, IEEE 1989.
- [3] Jappe T.K., Mussa S.A., Heldwein M.L.: Analysis of indirect matrix converter topologies in voltage step-up operation mode, IEEE 2011.
- [4] Jussila M.: Comparison of Space-Vector-Modulation Direct and Indirect Matrix Converters in Low-Power Applications, Tampere 2007
- [5] Nguyen T.D., Hong-Hee Lee: Modulation Strategies to Reduce Common-Mode Voltage for Indirect Matrix Converters, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 59, no. 1, January 2012
- [6] MATLAB Documentation, R2018b
- [7] Suliga. M.: Analiza pracy pośredniego przekształtnika matrycowego sterowanego metodą modulacji wektora przestrzennego, Rzeszów 2020

ANALYSIS OF THE SPARSE MATRIX CONVERTER CONTROLLED BY SPACE VECTOR MODULATION

Summary

This article presents simulation studies of Sparse Matrix Converter (SMC). Compared to the standard Indirect Matrix Converter (IMC), the SMC topology uses fewer semiconductor elements, which reduces cost of the converter. The Space Vector Modulation (SVM) is used to control each of the switches. The results of the conducted tests are waveform of output voltages and input currents of the converters. The determined spectrum of harmonic waveforms confirms the correct operation of the designed converter model and presents the percentage content of higher harmonics. The SMC topology meet the assumptions related to matrix converters, while using fewer number of semiconductor elements.

Keywords: Indirect Matrix Converter, Sparse Matrix Converter, Space Vector Modulation, frequency converter, IMC, SVM

DOI: 10.7862/re.2022.6

Submitted/Tekst złożono w redakcji: listopad 2022 r.

Accepted / Przyjęto do druku: grudzień 2022 r.

Published/Tekst opublikowano: grudzień 2022 r.