

Influence of Power Converters on Increasing the Share of Renewable Energy Sources

Authors

Katarzyna Przytuła
Dariusz Zieliński

Keywords

converters, SVM, multi-channel converter, interleaved converter, VOC

Abstract

The article shows various configurations of the topology of grid converters with their control systems, tailored to the needs of the energy market and regulations. Power electronic systems are used for the integration of renewable energy sources with power grids and help to increase the part they play in this network. Of particular note are the multi-channel systems, which form the basis of the modern energy market. They are more efficient and have a higher efficiency than conventional systems. The simulations are performed in the MATLAB/Simulink environment. They consist mainly of an analysis of the high harmonics injected into the grid by converters and analysis of the benefits of implementing the converter with alternating work.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016111

1. Introduction

The strategic objective of a modern energy policy is to obtain energy from renewable sources. Compared to traditional sources (fossil), they are friendlier for the environment. The highest percentage of alternative sources are photovoltaic and wind farms [1]. Converters are a part of these sources, they mediate in connecting the listed energy sources to the grid. Converters can be integrated or built-in; they convert generated voltage, which is usually unstable parametrically, into the grid's stable voltage. They are also used to transfer energy from renewable sources across very long distances, e.g. by sea (HVDC systems), where the transmission of alternating current is very poor [2]. The main disadvantage of these devices is that they are the source of high harmonics, resulting in deformations of the current and voltage. The level of distortion is highly dependent on the nature of the structure and the properties of the control system of a converter [3, 4]. The use of filters in this instance is one way of reducing distortion of the grid voltage, but their size may be uneconomical and have a low power factor.

The main assumption, that is, the grid converters' influence on increasing the share of renewable energy sources, is analysed in terms of two things. Firstly, in terms of the process control, construction and characteristics of the converters.

Improving their properties affects the process of building new renewable power plants, because it reduces the amount of high harmonics injected into the network. The more people build the renewable plants, the more prominent role in the grid the converters have, due to the injection of high harmonics.

Secondly, the assumption is considered in terms of the nature of the converter's response. A solution was analysed in the form of a multi-channel converter, which increases the efficiency of the system by alternating work. Consequently, it increases the share of renewable energy sources.

This article is a review of the existing types of converters and their control systems. The first part of the paper shows the table, provided by the authors, based on simulation studies THD (Total Harmonic Distortion) for various types of converter systems. The second part presents an original idea of multi-channel converters and the benefits arising from their use.

Simulations were carried out to show the relation of the junction temperature to the converters' work and they demonstrated an improved performance in alternating work.

2. The influence of the converter structure on the high harmonics

In economic terms, the most appropriate solution for couplings in power electronics are converters with thyristor circuits. They are used for the construction of high power converters. However, they emit a large amount of odd high harmonics. The solution which limits the disadvantages of their application is the use of a fully controlled IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor). They can be controlled by PWM (Pulse Width Modulation).

Another factor influencing its quality is the number of levels of the converter. The least effective is the two-level inverter [5]. The more levels, the better the sinusoidal voltage is and a device injects less high harmonics into the power grid. In economic terms, the application of two-level inverters may be worse

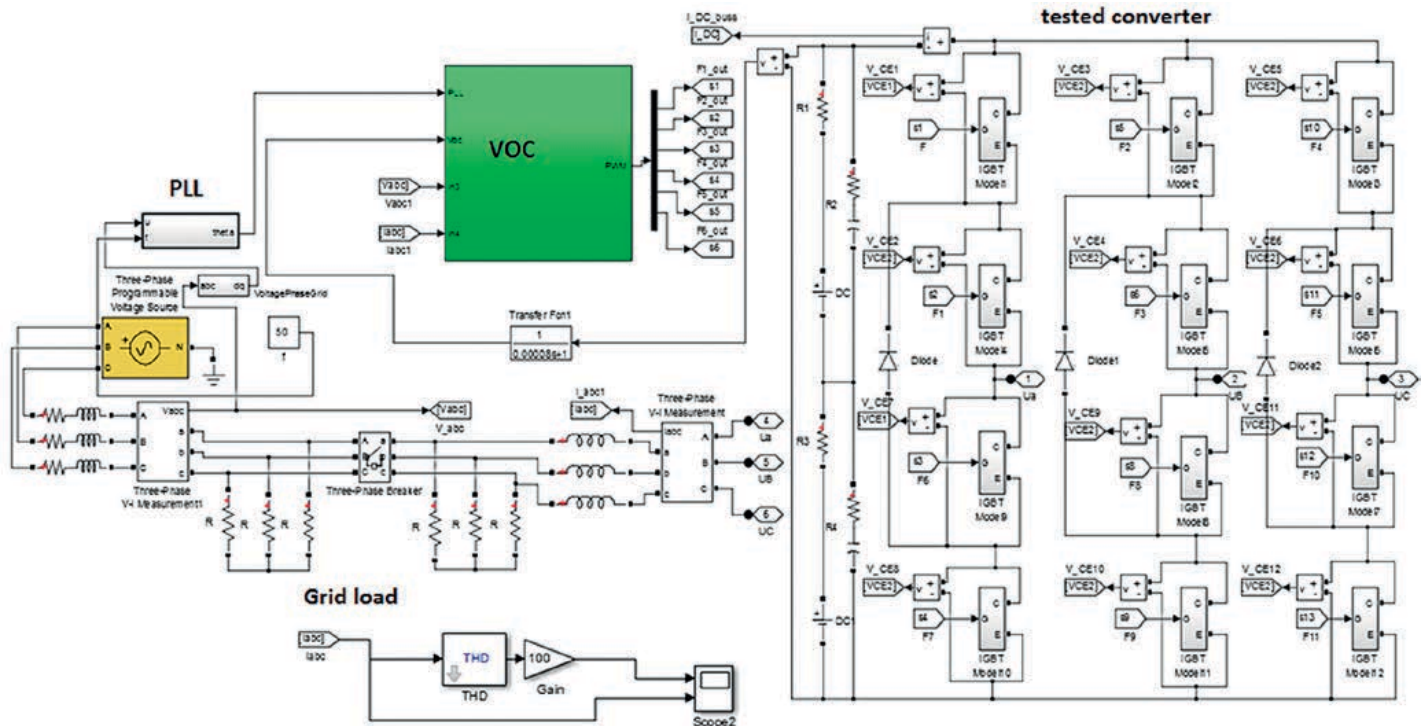


Fig. 1. Test model to study the THD factor of various converters (in the figure a three-level type)

THD [%]	Type of converter	Filters
7.73	1x two-level	3x filter 20 mH
3.90	1x three-level	3x filter 20 mH
CONTINUOUS WORK		
6.25	2 x 2-level in parallel with shifting modulation signal	6x filter 10 mH 3x filter 20 mH
7.75	2 x 2-level in parallel with no shifting modulation signal	6x filter 10 mH 3x filter 20 mH
2.45	3 x 2-level in parallel with shifting modulation signal	9x filter 10 mH 3x filter 20 mH
9.27	3 x 2-level in parallel with no shifting modulation signal	9x filter 10 mH 3x filter 20 mH
ALTERNATING WORK		
10.00	2 x 2-level in parallel	6x filter 10 mH 3x filter 20 mH
8.50	3 x 2-level in parallel	9x filter 10 mH 3x filter 20 mH
CONTINUOUS WORK		
1.56	2 x 3-level in parallel with shifting modulation signal	6x filter 10 mH 3x filter 20 mH
3.12	2 x 3-level in parallel with no shifting modulation signal	6x filter 10 mH 3x filter 20 mH
3.10	3 x 3-level in parallel with shifting modulation signal	9x filter 10 mH 3x filter 20 mH
3.34	3 x 3-level in parallel with no shifting modulation signal	9x filter 10 mH 3x filter 20 mH
ALTERNATING WORK		
5.45	2 x 3-level in parallel	6x filter 10 mH 3x filter 20 mH
5.38	3 x 3-level in parallel	9x filter 10 mH 3x filter 20 mH

Tab. 1. THD value depending on the construction of the converter system

because of the need to use a large output filter and the transistors with a higher operating voltage [6].

3. Determining the THD factor for various topologies of converter

The study is conducted for converters controlled by VOC, built using IGBTs. DC bus voltage is 600 V, control voltage – 230 V AC, the switching frequency $f = 5000$ Hz. The type of converter or converter systems, the filters and the THD factor in various cases is provided in Tab. 1. The studies are a simulation and have been implemented in MATLAB/ Simulink and used the real-time system dSPACE [7]. Its main task is reflecting real conditions in the projected power systems. The conditions set out in the simulation are laboratory conditions and do not include all the factors present in reality. However, these restrictions do not affect the overall assessment of the advantages and disadvantages of the presented systems. They focus primarily on the impact of the structure of the converter on the THD factor. An exemplary simulation model is shown in Fig. 1. The results of the simulations are shown in Tab. 1.

According to the theory, a two-level converter has significantly worse quality parameters than a three-level one. This situation can also be seen in cases when the converters are connected in parallel. During this exercise, a positive treatment has also been a shift in the phase of the PWM modulation signal for one of the converters connected in parallel (Fig. 2) [8].

Three modulating signals are shifted in relation to each other by 120 degrees for a three-channel inverter. This allows reducing the amount of high harmonics in the output voltage.

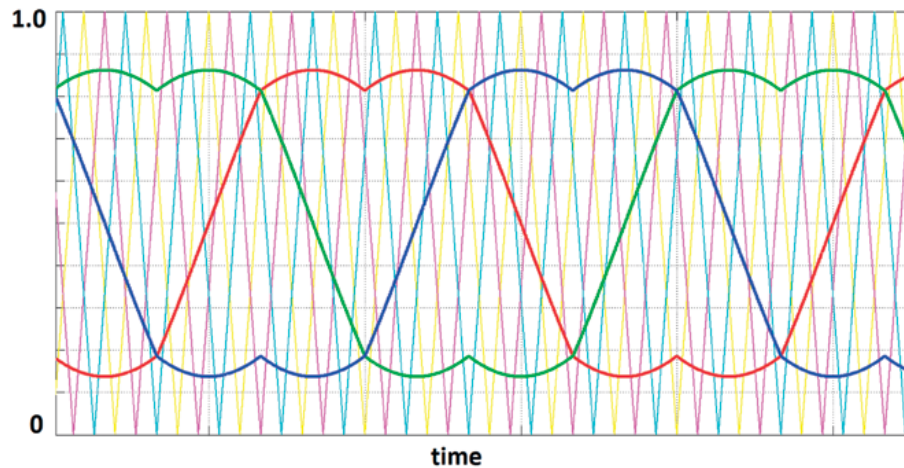


Fig. 2. Modulating signal (sawtooth) and modulated signal in three different PWM modules of control systems of multi-channel converters.

4. Alternating work mode in parallel converters

As a result of the simulations it can be said that the alternating work of parallel converters in creating output sinusoidal voltage is an unfavourable method because of the high harmonics injected into the grid. This method is based on the PWM signal switching between two (or more) inverters. At the point when a lower amount of power is generated by renewable power plants, the device turns on and off one of the two inverters, each for half of the period, as shown in Fig. 5a. This method can replace the complete turning off of one of several converters in times of lower energy requirements, thus reducing the losses and a share of the cooling systems.

The block model of such a converter system with a VOC (Voltage Oriented Control) system control is shown in Fig. 3a. This method can replace the need for the total switching off of one of several operating converters in periods of lower energy demand. As a consequence, it will reduce the losses and the operation of the cooling systems. The research method was applied to the VOC described in [9, 10], which introduces the least disturbance. The DPC (Direct Power Control) method has a variable switching frequency and inferior properties due to the level of the disturbances generated, which is why it was omitted in the study [11]. In addition, synchronisation of the PWM signal with the switching cycle of the converters between each other, due to the existing inertia in the elements of power electronics and controls, causes an additional interference in the process of building a signal, as shown in Picture 3b. This is the result of the short overvoltage in a compensatory choke circuit. This phenomenon causes short voltage dips in the power grid. The defined problem is the basis for further research and discussion.

A flow of the output voltage in a converter without the output filter is shown in Fig. 3c. However, using appropriate filters can minimise the high harmonics content in output voltage, which is necessary in real systems.

Turning off the transistors at half way through the period brings many benefits. Examples of the relationship between the junction temperature and transient thermal impedance are shown in

Fig. 4. This dependence shows that during a pause the transistor junction temperature decreases (depending on the type of the converter's key, the cooling system, the pause time, the nature of the input pulse, etc.).

Next, the relationship between the transistor's junction temperature and time is simulated, for cases of multi-channel converters connected in parallel.

On the other hand, Fig. 6 shows the dependence of conductivity on the temperature of an exemplary IGBT (SKM300GA12T4) transistor. As can be seen, the higher the temperature, the smaller the output safety current in the device. This demonstrates that the alternating work (when the inverter is turned off), in each half of the period (for the two-channel converter), has a positive effect on its current value.

A multichannel converter with alternating work also provides greater reliability of the power supply. This is demonstrated by a simulated failure of one of the converters in the multi-channel system and work switching, e.g. from three-channel to two-channel mode. In the case of a short-circuit of one of the keys in any of the multi-channel converters, information is sent to the control system. The control system switches work, e.g. from three-channel mode (three converters) to a two-channel converter, ensuring the continuity of the power supply.

In emergencies of a failure of two of the three converters, the controller switches work to a properly functioning converter and the continuous work of that converter's transistors. The alternating, three-channel work enables cooling in the transistors in 1/3 of the period and increases the productivity and improves reliability of transistors threefold compared to traditional solutions. In Fig. 7 the authors propose the idea of switching alternating work of three inverters connected in parallel to two of them in a certain period of time. At the time of failure of one of the three converters of the system, the control system excludes the faulty converter and ensures continuity of the power supply by the two other converters taking over.

The disadvantage of this method is the appearance of voltage dips and overvoltage during switching of the converters because

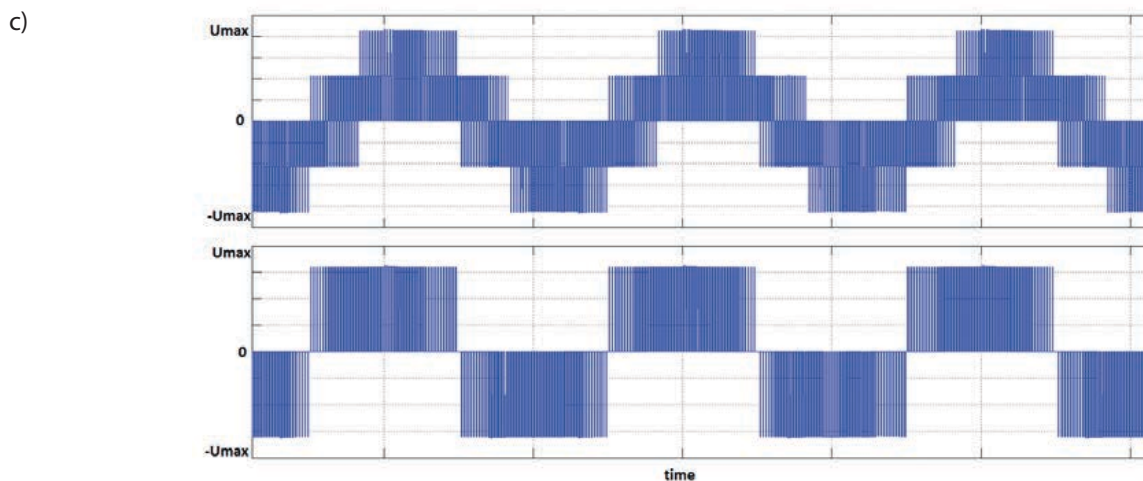
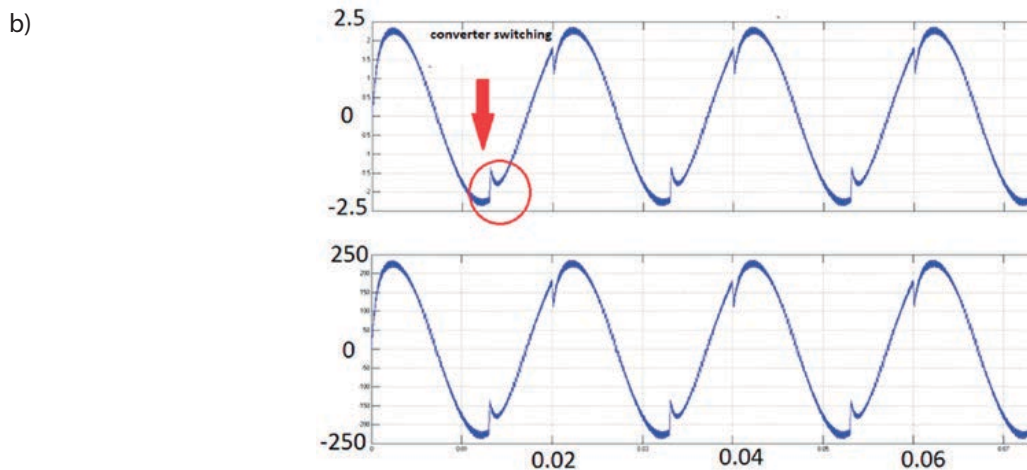
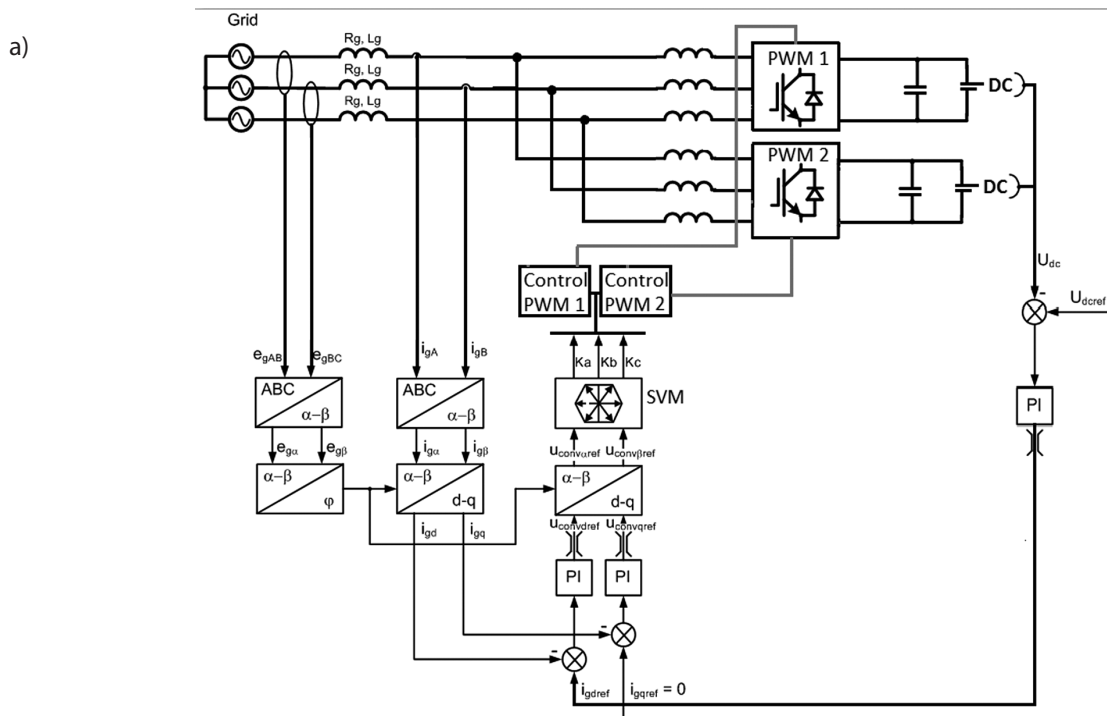


Fig. 3. a) A block model of the interleaved converter (three-channel), b) the current waveform and the output voltage of the multi-channel converter with output filter, c) the output phase and interfacial voltage, without output filters, for phase 1

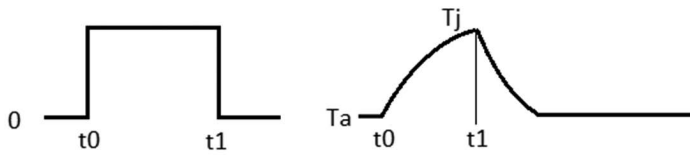


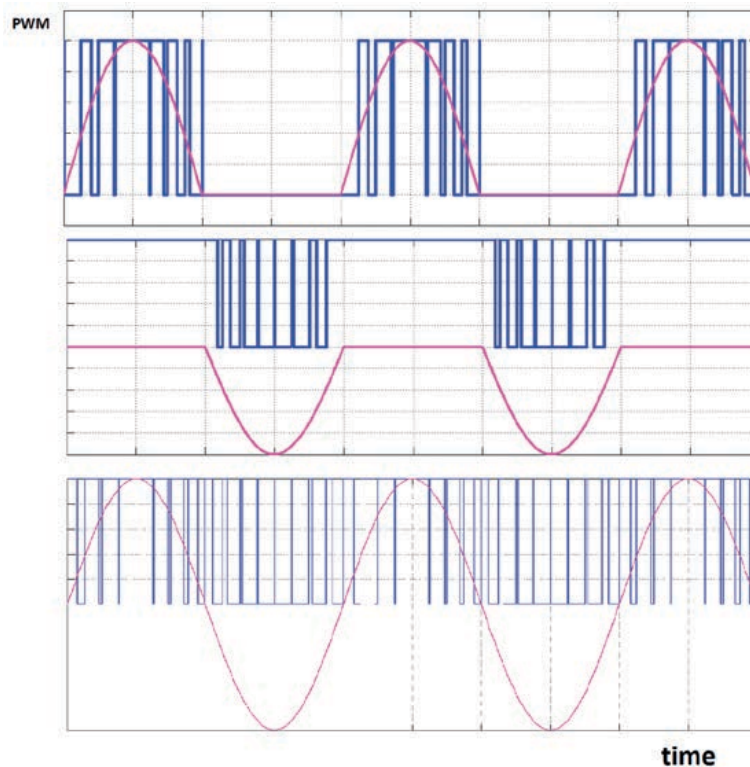
Fig. 4. Dependence of the junction temperature and transient thermal impedance, where t_0 – time of abrupt power increase at the junction, t_1 – time of the junction power's return to zero, T_A – initial junction temperature, T_j – maximum junction temperature [12]

of the inertia of the system, as can be seen in Fig. 8. It is important to detect an inverter failure as soon as possible and immediately disable it from the power grid.

5. Conclusions

Nowadays, the most commonly used converters may not be sufficient for market needs. The article shows that three-level converters have a better performance in terms of power quality, immunity issues and economy compared to two-level converters. The presented proposal of a multi-channel system consisting of two or more multi-level converters, with control VOC and alternating work mode, improves the electrical parameters. The use of a three-level inverter reduces the THD, while alternating work allows a periodic cooling of transistors, which increases the current efficiency, power efficiency and reliability. Further research is essential to gain knowledge of the use of improved technology converter systems, their control system, and the fastest switching and detection of failures in order to increase the share of renewable energy in the power grid.

a)



b)

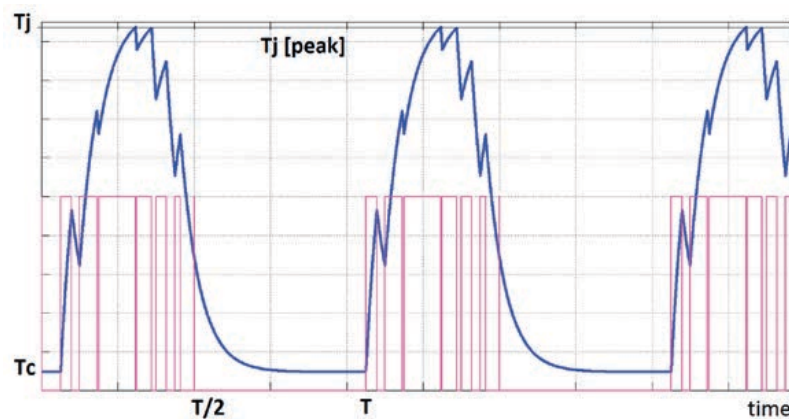


Fig. 5. a) PWM signal of the sinusoid signal during alternating work of the first and the second converter, as well as during joint work of both converters, b) Dependence of the transistor's junction temperature (blue), where T_j – junction temperature, T – period, T_c – temperature of the casing module and the PWM signal of one of the converters

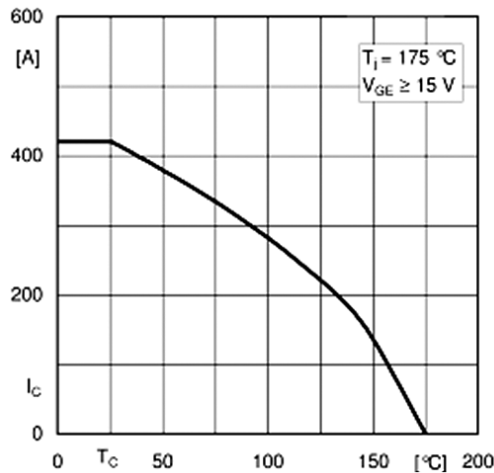


Fig. 6. Relationship between the IGBT transistor current and the junction temperature [13]

These simulations are also the beginning of the construction of a converter in real laboratory conditions, using the real-time system dSPACE. It is fundamental for the research to include external factors, which are not included in the simulations in this paper. In addition, research will be continued on the elimination of short voltage dips during the converters' alternating work, occurring due to compensatory chokes.

REFERENCES

1. T. Okulski, "Analiza struktury produkcji energii elektrycznej we Francji i w Polsce" [Analysis of electricity generation structures in France and Poland], *Polityka Energetyczna*, Vol. 16, Issue 3, 2013.
2. T.J. Hammons et al., "Enhancement of Power System Transient Response by Control of HVDC Converter Power", *Electric Machines & Power Systems* Volume 28, Issue 3, 2000, pp. 219–241.

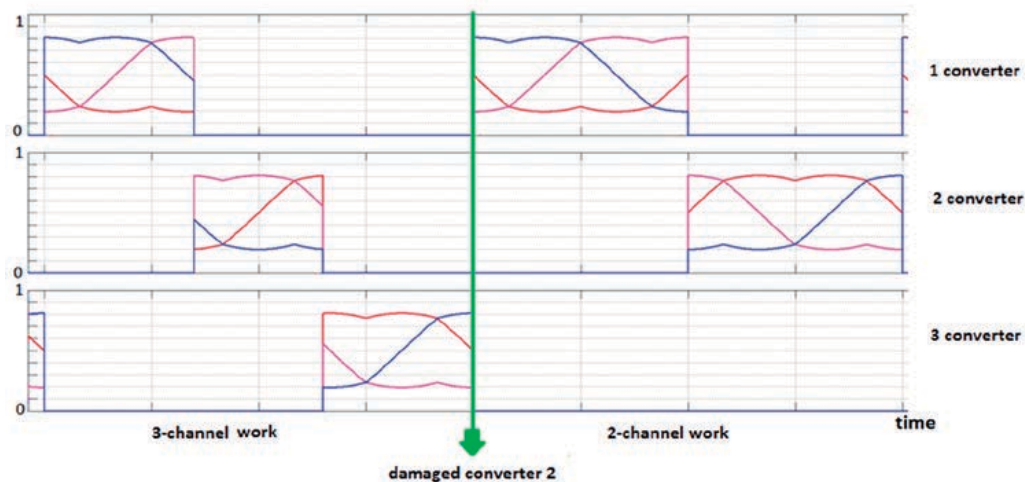


Fig. 7. Idea of switching work from a three-channel to a two-channel converter; the control signal in SVM module

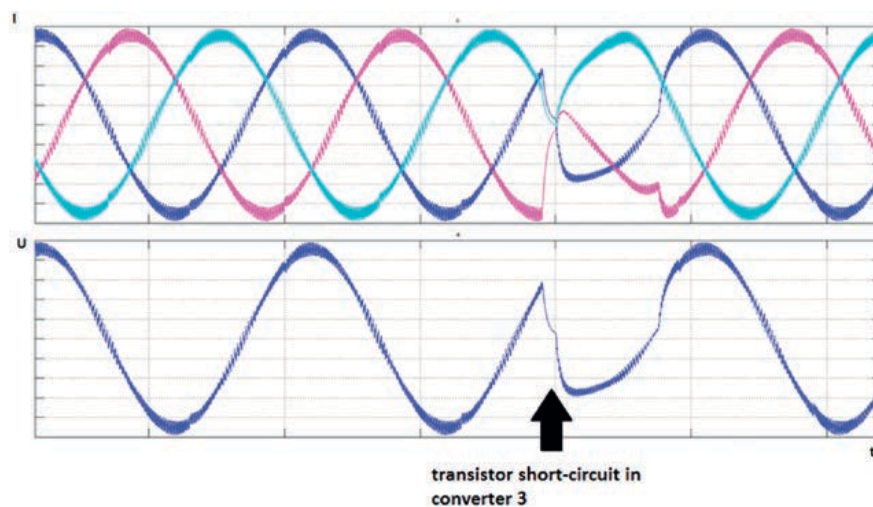


Fig. 8. Current and voltage wave during a short-circuit in a transistor in converter 3, the place of switching the work mode from three-channel to two-channel

3. W. Jarzyna, P. Filipek, M. Charlak, "Właściwości przetwarzania energii elektrycznej w układach generatorów elektrowni wiatrowych" [Properties of electricity processing in wind power plant generator circuits], *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 5, 2008.
4. W. Jarzyna, P. Lipnicki, "The Comparison of Polish Grid Codes to Certain European Standards and the Resultant Differences for WPP Requirements", *Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013 15th European Conference, 2–6 September, 2013, Lille. IEEE Xplore Digital Library.
5. M. Ikonen, O. Laakkonen, M. Kettunen, "Two-level and three-level converter comparison in wind power application", www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf.
6. R. Strzelecki, "Technologie energoelektroniczne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych" [Power electronic technologies in modern power systems], *Zeszyt Naukowy AM w Gdyni*, No. 62, 2009, pp. 164–189.
7. D. Zieliński, "Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas zapadów napięcia" [Test bench for synchronicity analysis of grid converters at voltage drops] – *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarcie i Ochronie Środowiska*, No. 2, 2014, pp. 77–80.
8. J. Yong-Sin et al., "A Carrier Comparison PWM Method for Reducing Input Current THD of Three-Phase PWM Rectifier", *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, 7th International, Vol. 4, 2012, pp. 3015–3020.
9. M. Knapczyk, K. Pieńkowski, "Analysis of Pulse Width Modulation Techniques for AC/DC Line-Side Converters, Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines", *Drives and Metrology of Wrocław University of Technology*, No. 59, Studies and Research, No. 26, Wrocław, 2006.
10. M. Knapczyk, K. Pieńkowski, "High-Performance Decoupled Control of PWM Rectifier with Load Compensation", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, No. 60, *Studia i Materiały* No. 27, 2007.
11. M. Knapczyk, K. Pieńkowski, "Analiza nieliniowych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC" [Analysis of nonlinear methods for AC/DC grid converter control], Conference proceedings of XIV. KOMEL Technology Seminar, Ustroń-Jaszowiec, 2005.
12. Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS. General Considerations for IGBT and Intelligent Power Modules, September 1998.
13. Semikron –IGBT SKM300GA12T4 thyristor catalogue sheet.

Katarzyna Przytuła

Lublin University of Technology, Department of Electrical Drives and Machines

e-mail: poczta.katarzyna@gmail.com

She gained her Master's degree in electrical engineering, specialising in power engineering in the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science at Lublin University of Technology (2014). Currently a PhD student in the Department of Electrical Machines and Drives of that university. Deals with issues of control devices in power electronics, used primarily in the electric power grid. Carries out research in interleaved converters.

Dariusz Zieliński

Lublin University of Technology, Department of Electrical Drives and Machines

e-mail: shadow031@gmail.com

He gained his Master's degree in electrical engineering, specialising in microprocessor drives in industrial automation in the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science at Lublin University of Technology (2013). Currently a PhD student in the Department of Electrical Machines and Drives of that university. Deals with issues of power electronic, equipment design used primarily in electric power grid and real-time systems.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 125–131. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Wpływ przekształtników energoelektronicznych na wzrost udziału odnawialnych źródeł energii

Autorzy

Katarzyna Przytuła
Dariusz Zieliński

Słowa kluczowe

falownik, SVM, przekształtnik wielokanałowy, VOC, THD

Streszczenie

Artykuł przedstawia różne konfiguracje topologii przekształtników sieciowych wraz z systemami sterowania, które są dostosowane do potrzeb rynku energetycznego oraz obowiązujących przepisów. Opisane układy energoelektroniczne stosowane są do integracji źródeł odnawialnych do istniejących sieci elektroenergetycznych i wpływają na wzrost ich udziału w tej sieci. Podkreślone jest znaczenie układów wielokanałowych, które stają się podstawą nowoczesnej energetyki, są wydajniejsze i posiadają wyższą sprawność od tradycyjnych układów. Symulacje przeprowadzono w środowisku MATLAB/Simulink. Obejmują one przede wszystkim analizę ilości harmonicznych wprowadzanych do sieci przez przekształtniki oraz analizę korzyści układu przekształtnikowego realizującego pracę naprzemienną.

1. Wstęp

Celem strategicznym współczesnej polityki energetycznej jest pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych, które w porównaniu ze źródłami tradycyjnymi (kopalnymi) są bardziej przyjazne środowisku naturalnemu. Największy procent źródeł alternatywnych stanowią farmy wiatrowe i fotowoltaiczne [1]. Częścią tych źródeł są różnego rodzaju przekształtniki energoelektroniczne, które pośredniczą w przyłączaniu wymienionych źródeł energii do sieci elektroenergetycznej. Przekształtnik energoelektroniczny może być zintegrowany lub wbudowany, przekształca generowane napięcie, które z reguły jest niestabilne parametrycznie, na sztywne i stabilne napięcie sieciowe. Służą również do przesyłu energii z odnawialnych źródeł

energii na bardzo dalekie odległości, np. przez morze (systemy HVDC), gdzie przesył prądem przemiennym jest bardzo niekorzystny [2]. Układy te są źródłem wyższych harmonicznych, powodujących odkształcenia prądu i napięcia. Poziom odkształceń ściśle zależy od charakteru budowy i właściwości systemu sterowania samych przekształtników [3, 4].

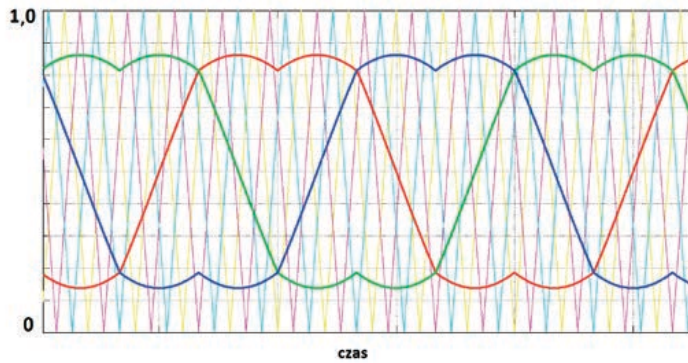
Zastosowanie w tym przypadku filtrów jest jednym ze sposobów zmniejszania zniekształceń napięcia sieciowego, jednak ich wielkość może się okazać nieekonomiczna, a do tego odznaczać się niskim współczynnikiem mocy.

Główne założenie, czyli wpływ przekształtników energoelektronicznych na wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w sieci

elektroenergetycznej, przeanalizowano pod kątem dwóch zagadnień. Po pierwsze pod względem sposobu sterowania, budowy i cech stosowanych przekształtników. Ulepszanie ich właściwości wpływa na powstawanie nowych elektrowni źródeł odnawialnych, gdyż zmniejsza się ilość wyższych harmonicznych wstrzykiwanych przez nie do sieci. Im więcej jest budowanych elektrowni źródeł odnawialnych, tym przekształtniki odgrywają bardziej znaczącą rolę pod względem zakłóceń w sieci. Po drugie pod względem trybu pracy układów przekształtnikowych połączonych równolegle. Przeanalizowano rozwiązanie w postaci wielokanałowego przekształtnika, który zwiększa wydajność układu przez pracę naprzemienną, w konsekwencji następuje

Rys. 1. Model do badania THD różnych przekształtników, na rysunku przekształtnik 3-poziomowy

132



Rys. 2. Sygnał modulujący (pilokształtny) i modulowany w trzech różnych modułach PWM, w systemach sterowania przekształtnikami układu wielokanałowego

THD [%]	Rodzaj przekształtnika	Filtry
7,73	1 x 2-poziomowy	3 x filtr 20 mH
3,90	1 x 3-poziomowy	3 x filtr 20 mH
PRACA CIĄGŁA		
6,25	2 x równoległe 2-poziomowe, faza sygnału carrier przesunięta	6 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
7,75	2 x równoległe 2-poziomowe, faza sygnału carrier nieprzesunięta	6 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
2,45	3 x równoległe 2-poziomowe, faza carrier przesunięta	9 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
9,27	3 x równoległe 2-poziomowe, faza carrier nieprzesunięta	9 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
PRACA NAPRZEMIENNA		
10,00	2 x równoległe 2-poziomowe	6 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
8,50	3 x równoległe 2-poziomowe	9 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
PRACA CIĄGŁA		
1,56	2 x równoległe 3-poziomowe, faza carrier przesunięta	6 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
3,12	2 x równoległe 3-poziomowe, faza carrier nieprzesunięta	6 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
3,10	3 x równoległe 3-poziomowe, 3 PWM, faza carrier przesunięta	9 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
3,34	3 x równoległe 3-poziomowe, faza carrier nieprzesunięta	9 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
PRACA NAPRZEMIENNA		
5,45	2 x równoległe 3-poziomowe	6 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH
5,38	3 x równoległe 3-poziomowe	9 x filtr 10 mH 3 x filtr 20 mH

Tab. 1. Wartość współczynnika THD w zależności od budowy układu przekształtnikowego

wzrost udziału większych elektrowni przy tym samym układzie przekształtnikowym. Niniejszy artykuł jest przeglądem rodzajów przekształtników i ich systemów sterowania. W pierwszej części artykułu umieszczono tabelę zrealizowaną przez autorów na podstawie symulacji badań współczynnika THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) dla różnego rodzaju układów przekształtnikowych. W drugiej części zaprezentowano ideę realizacji pracy przekształtników wielokanałowych oraz korzyści wynikające z ich stosowania. Przeprowadzono symulacje

zależności temperatury złącza od charakteru pracy przekształtników i wykazano zwiększoną wydajność z pracy naprzemiennnej.

2. Wpływ budowy przekształtnika na wyższe harmoniczne

Pod względem ekonomicznym najodpowiedniejszym rozwiązaniem sprzęgów energoelektronicznych są przekształtniki zbudowane na układach tyrystorowych. Wykorzystywane są one do budowy przekształtników o dużych mocach. Emitują one jednak dużą liczbę wyższych harmonicznych

nieparzystych. Rozwiązaniem, które ogranicza tę wadę, jest zastosowanie w pełni sterowanych tranzystorów IGBT (ang. *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Mogą być one sterowane metodą PWM (ang. *Pulse Width Modulation*).

Kolejnym czynnikiem wpływającym na jakość energii elektrycznej jest liczba poziomów przekształtnika. Najmniej efektywnym jest przekształtnik 2-poziomowy [5]. Im zastosowanych jest więcej poziomów, tym napięcie w większym stopniu odwzorowuje kształt sinusoidy i urządzenie wprowadza mniej harmonicznych do sieci elektroenergetycznej. Pod względem ekonomicznym stosowanie 2-poziomowych przekształtników może okazać się gorsze, ze względu na konieczność stosowania dużych filtrów na wyjściu i tranzystorów o wyższym napięciu pracy [6].

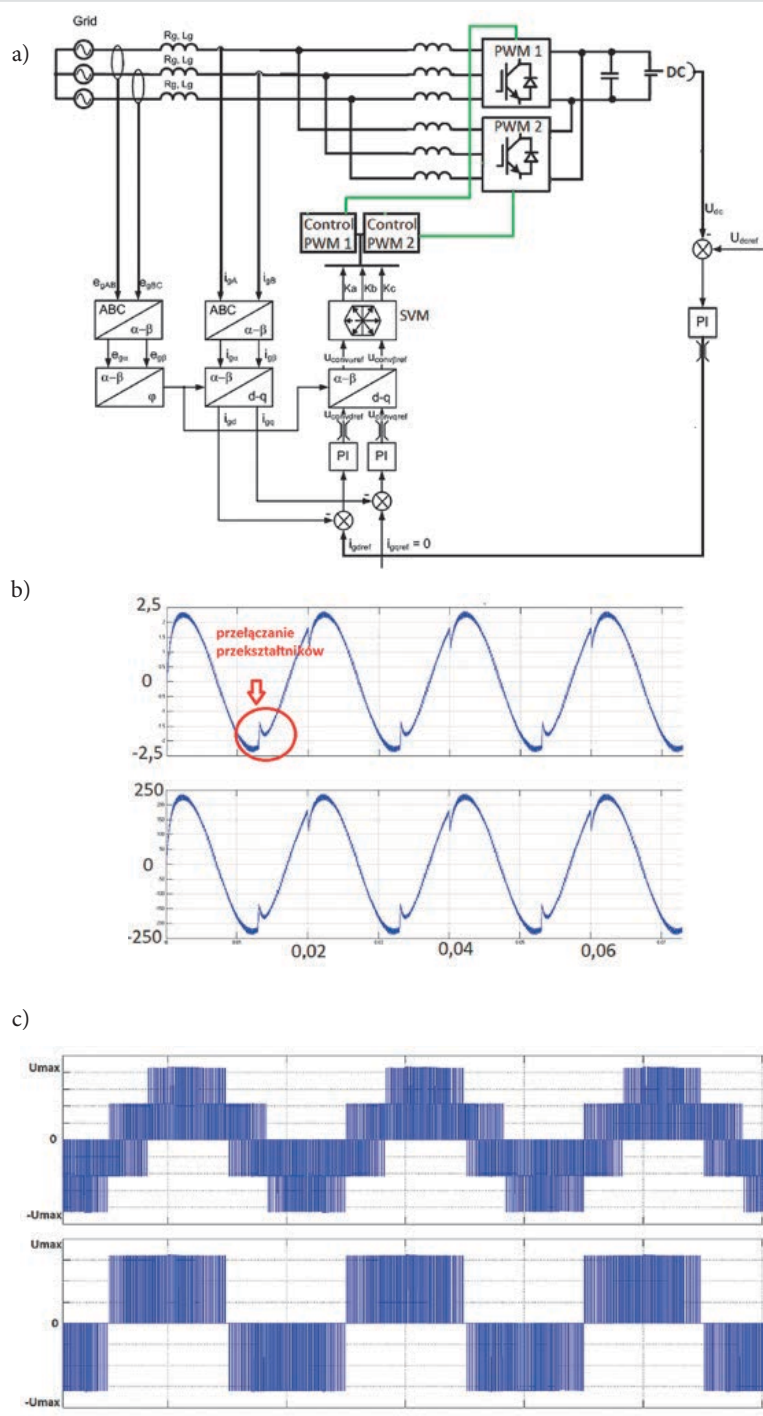
3. Określenie wielkości THD dla różnych topologii układów przekształtnikowych

Badania zostały przeprowadzone dla przekształtników sterowanych metodą VOC, zbudowanych z wykorzystaniem tranzystorów IGBT. Napięcie na szynie DC jest równe 600 V, napięcie sterujące 230 V AC, częstotliwość kluczkowania $f = 5000$ Hz. Rodzaj przekształtnika lub układów przekształtników oraz dobór filtra oraz wartość współczynnika THD w danym przypadku podany został w tab. 1. Przeprowadzone badania mają charakter symulacyjny i zostały zrealizowane w środowisku MATLAB/Simulink oraz z wykorzystaniem systemu czasu rzeczywistego dSpace [7], którego zadaniem jest rzeczywiste odwzorowanie warunków panujących w projektowanych układach energoelektronicznych. Warunki określone w symulacji są warunkami laboratoryjnymi i nie uwzględniają wszystkich czynników obecnych w rzeczywistości. Ograniczenia te jednak nie wpływają na ogólną ocenę wad i zalet przedstawianych układów. Skupiają się przede wszystkim na wpływie samej struktury przekształtnika na współczynnik THD. Przykładowy model symulacyjny, na którym opierały się badania, został przedstawiony na rys. 1. Wyniki symulacji przedstawiono w tab. 1.

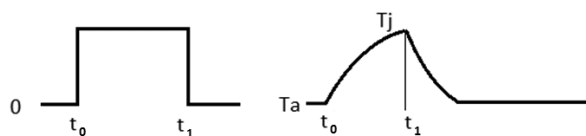
W tab. 1 przedstawiono współczynniki THD w zależności od typu układu przekształtników. Zgodnie z założeniami teoretycznymi przekształtnik 2-poziomowy wykazuje znacznie gorsze parametry jakościowe energii niż przekształtnik 3-poziomowy. Widać to również dla układu kilku przekształtników połączonych równoległe. Podczas przeprowadzanych badań korzystnym zabiegiem okazała się również zmiana fazy sygnału modulującego PWM dla jednego z przekształtników w układzie równoległym (rys. 2) [8].

Trzy sygnały modulujące przesunięte są względem siebie o 120 stopni dla 3-kanałowego układu przekształtnika. Pozwala to na zmniejszenie ilości wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym.

4. Tryb pracy naprzemiennnej przekształtników połączonych równoległe
W rezultacie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że praca naprzemienna



Rys. 3. a) Model blokowy 3-kanalowego układu przekształtników, b) przebieg prądu i napięcia wyjściowego układu wielokanałowego przekształtników z zastosowaniem filtra wyjściowego, c) przebieg napięcia fazowego i międzyfazowego na wyjściu, bez filtrów wyjściowych 1 fazy



Rys. 4. Zależność temperatury złącza tranzystora, gdzie t_0 – czas wzrostu skokowego mocy na złączu, t_1 – czas powrotu mocy złącza do zera, T_a – temperatura początkowa złącza, T_j – temperatura maksymalna złącza [12]

przekształtników równoległych przy tworzeniu napięcia sinusoidalnego na wyjściu jest metodą niekorzystną ze względu na poziom wyższych harmonicznych wprowadzanych do sieci. Metoda ta polega na przełączaniu sygnału PWM pomiędzy dwa (lub więcej) falowniki, w momencie niższej generacji mocy przez elektrownie odnawialnych źródeł energii, włączając i wyłączając jeden z dwóch falowników, co pół okresu, podobnie jak na rys. 5a. Metoda ta może zastąpić konieczność całkowitego wyłączenia jednego z kilku pracujących przekształtników w okresie mniejszego zapotrzebowania na energię, zmniejszając straty i udział układów chłodzących. Schemat blokowy takiego układu przekształtnikowego ze sterowaniem VOC przedstawia rys. 3a. W badaniach zastosowano metodę VOC opisaną w [9, 10], która wprowadza najmniejsze zakłócenia. Metoda DPC (ang. *Direct Power Control*) posiada zmienną częstotliwość kluczkowania i gorsze własności ze względu na poziom generowanych zakłóceń, dlatego pominięto ją w badaniach [11].

Ponadto synchronizacja sygnału PWM i cyklu przełączania przekształtników między sobą, ze względu na występującą inercję w elementach energoelektronicznych i sterujących, powoduje dodatkowe zakłócenia w procesie tworzenia sygnału, co widać na rys. 3b. Jest to wynikiem powstałego przepięcia w obwodzie dławika wyrównawczego. To zjawisko powoduje krótkie zapady napięcia sieciowego. Zdefiniowany problem jest podstawą do kolejnych badań i rozważań.

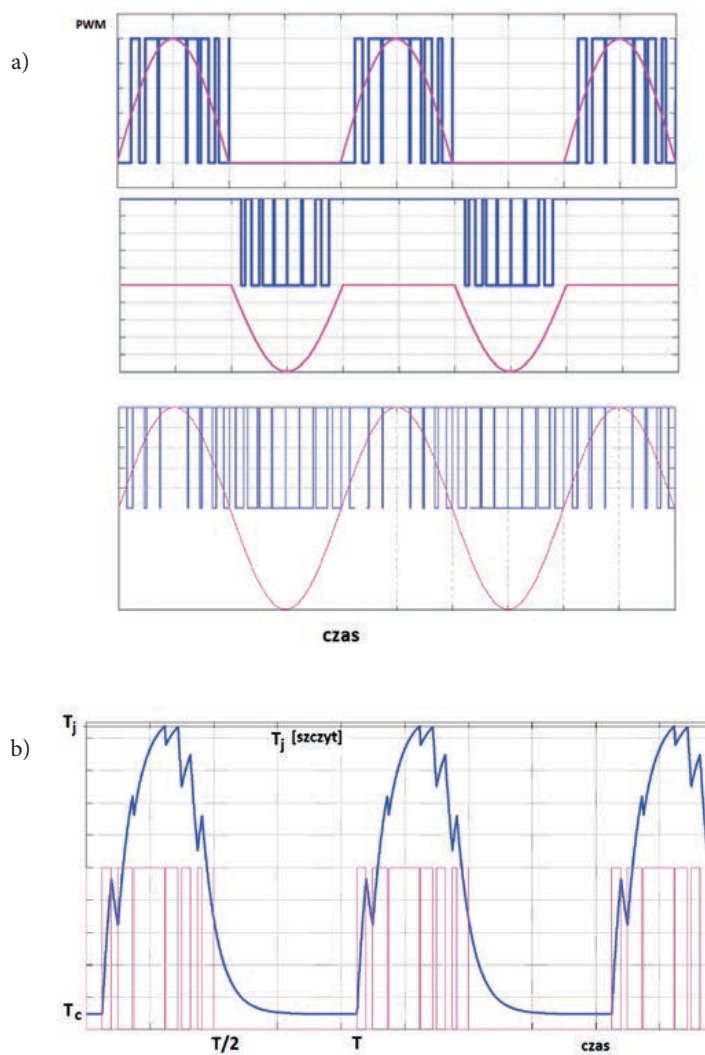
Przebieg napięcia wyjściowego bez filtrów wyjściowych przedstawia rys. 3c. Stosując jednak odpowiednie filtry, można zminimalizować zawartość wyższych harmonicznych w napięciu, dlatego są niezbędne w rzeczywistych układach.

Wyłączanie tranzystorów co pół okresu niesie jednak wiele korzyści. Przykładową zależność między temperaturą złącza a przejściową impedancją termiczną przedstawiono na rys. 4. Z zależności tej wynika, że w momencie przerw w zasilaniu temperatura złącza tranzystora maleje (w zależności od rodzaju klucza przekształtnika, układu chłodzenia, czasu przerwy, charakteru impulsu wejściowego itd.).

Następnie zostały zasymulowane zależności temperatury złącza tranzystora od czasu, dla rozpatrywanych przypadków połączenia równoległego układu wielokanałowego.

Natomiast rys. 6 przedstawia zależność prądu przewodzenia w funkcji temperatury przykładowego tranzystora IGBT (SKM300GA12T4). Widać, że im wyższa temperatura tranzystora, tym wydajność urządzenia jest mniejsza. Dowodzi to faktu, że praca naprzemienna, czyli wyłączanie danego przekształtnika co pół okresu (dla układu 2-kanalowego) wpływa korzystnie na jego wydajność prądową.

Praca wielokanałowa przekształtników zapewnia również wyższą niezawodność zasilania. Dowodzą tego wyniki przeprowadzonych badań, podczas których symulowano uszkodzenia jednego z przekształtników i przełączano pracę, np. 3-kanalową na 2-kanalową. W przypadku wykrycia zwarcia jednego z kluczy w dowolnym przekształtniku układu wielokanałowego



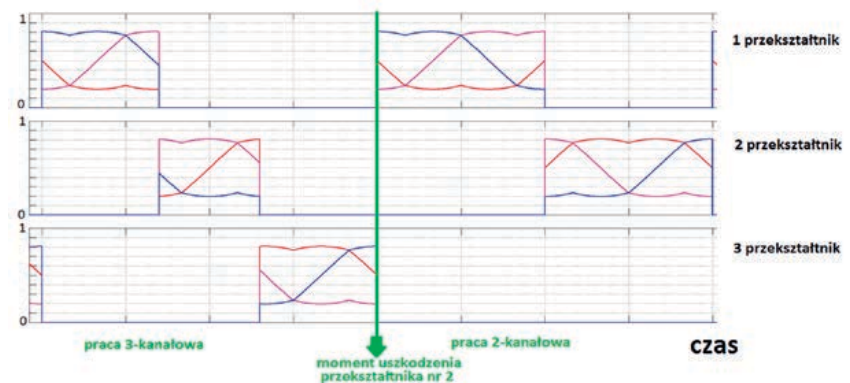
Rys. 5. a) Sygnał PWM sygnału sinusoidalnego podczas pracy naprzemiennej pierwszego, drugiego przekształtnika oraz łączna praca obu przekształtników, b) Zależność temperatury złącza tranzystora (niebieski), gdzie T_j – temperatura złącza, T – okres, T_c – temperatura modułu obudowy oraz sygnału PWM jednego z przekształtników

informacja trafia do układu sterowania. Ten przełącza pracę np. układu 2-kanalowego (dwóch przekształtników) na pracę jednego przekształtnika, zapewniając ciągłość zasilania.

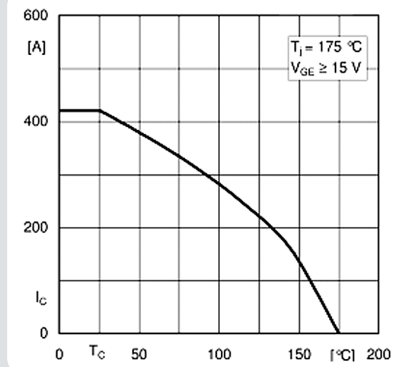
W sytuacji krytycznej awarii dwóch z trzech przekształtników sterownik przełącza się na jeden poprawnie działający przekształtnik i pracę ciągłą kluczy tranzystorowych tego przekształtnika. Praca nieciągła, 3-kanalowa pozwala na wychłodzenie tranzystorów w przedziale 1/3 okresu i zwiększa wydajność tranzystorów oraz zwiększa niezawodność trzykrotnie w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami.

Rysunek 7 przedstawia proponowaną przez autorów ideę przełączenia pracy naprzemiennej trzech połączonych równolegle przekształtników na pracę dwóch z nich w pewnym okresie czasu. W momencie awarii jednego z trzech przekształtników w układzie wielokanałowym sterowanie układem wyklucza z pracy uszkodzony przekształtnik i zapewnia ciągłość zasilania poprzez przejęcie pracy przez dwa pozostałe przekształtniki.

Wadą tej metody jest pojawienie się przepięć oraz zapadów napięcia i prądu w momencie przełączania przekształtników, ze względu



Rys. 7. Idea przełączenia pracy 3-kanalowej na pracę 2-kanalową – sygnał sterujący w module SVM

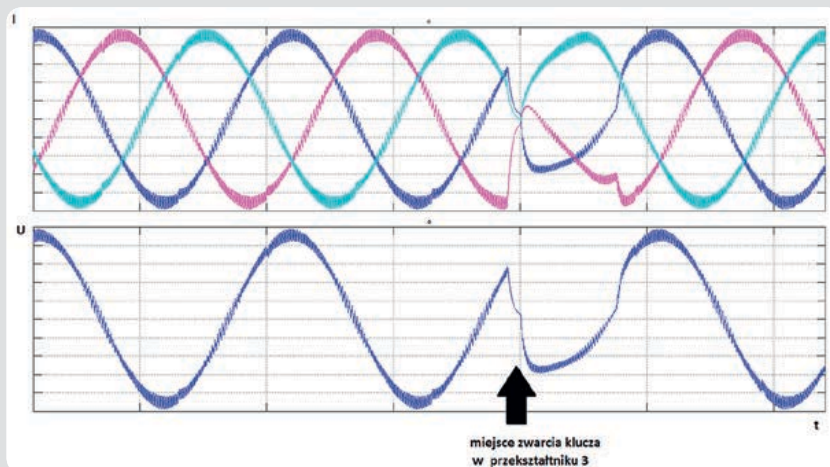


Rys. 6. Zależność prądu tranzystora IGBT SKM300GA12T4 od temperatury złącza [13]

na inercję układu, tak jak ma to miejsce na rys. 8. Istotne jest więc jak najszybsze wykrycie awarii przekształtnika, aby natychmiast wyłączyć go z pracy w sieci.

5. Wnioski

Najczęściej stosowane obecnie przekształtniki 2-poziomowe z czasem mogą okazać się niewystarczające na potrzeby rynku energii elektrycznej. W artykule pokazano, że przekształtniki 3-poziomowe wykazują lepsze parametry pod względem jakości energii, odporności na zakłócenia oraz ekonomii w porównaniu z 2-poziomowymi. Prezentowana propozycja polepszenia parametrów elektrycznych to układ wielokanałowy złożony z dwóch lub więcej przekształtników wielopoziomowych, ze sterowaniem VOC i z możliwością pracy naprzemiennej, np. w przypadku mniejszego generowania mocy przez OZE. Zastosowanie przekształtnika 3-poziomowego pozwala na zmniejszenie współczynnika THD, natomiast praca naprzemienna umożliwia okresowe wychłodzenie tranzystorów, co w praktyce zwiększa ich wydajność prądową, sprawność i niezawodność zasilania, a także zmniejsza udział układów chłodzenia zewnętrznego. Badania są podstawą do stosowania ulepszonych technologii układów przekształtnikowych, ich sterowania, jak najszybszego przełączania i wykrywania awarii w celu wzrostu udziału



Rys. 8. Przebieg prądu i napięcia przy zwarcu klucza w przekształtniku 3 – miejsce przełączenia pracy 3-kanalowej na pracę 2-kanalową

odnawialnych źródeł energii w sieci elektroenergetycznej. Powyższe symulacje są również początkiem budowy układów przekształtnikowych w rzeczywistych warunkach, za pomocą systemu czasu rzeczywistego dSpace. Jest to baza do badania ich pod kątem wielu czynników zewnętrznych, których nie uwzględniono w symulacjach. Ponadto badania będą kontynuowane pod kątem eliminacji krótkich zapadów napięcia podczas pracy naprzemiennej przekształtników, spowodowanych dławikami wyrównawczymi.

Bibliografia

1. Okulski T., Analiza struktury produkcji energii elektrycznej we Francji i w Polsce, *Polityka Energetyczna* 2013, t. 16, z. 3.
2. Hammons T.J. i in., Enhancement of Power System Transient Response by

Control of HVDC Converter Power, *Electric Machines & Power Systems* 2000, Vol. 28, Issue 3, s. 219–241.

3. Zieliński D., Lipnicki P., Jarzyna W., Synchronization of Voltage Frequency Converters with the Grid in the Presence of Notching, *COMPEL International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 2015, No. 3.
4. Jarzyna W., Lipnicki P., The Comparison of Polish Grid Codes to Certain European Standards and resultant Differences for WPP Requirements. *Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013 15th European Conference, 2–6 September 2013 Lille. IEEE Xplore Digital Library.
5. Ikonen M., Laakkonen O., Kettunen M., Two-level and threelevel converter comparison in wind power application [online], www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf.
6. Strzelecki R., Technologie energoelektroniczne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych. *Zeszyt Naukowy Akademii Morskiej w Gdyni* 2009, nr 62, s. 164–189.
7. Zieliński D., Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas zapadów napięcia, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 2014, nr 2, s. 77–80.
8. Yong-Sin J. i in., A Carrier Comparison PWM Method for Reducing Input Current THD of Three-Phase PWM Rectifier, *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, 2012 7th International, Vol. 4, s. 3015–3020.
9. Knapczyk M., Pieńkowski K., Analysis of Pulse Width Modulation Techniques for AC/DC Line-Side Converters, *Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Metrology of the Wrocław University of Technology* 2006, No. 59, *Studies and Research* 2006, No. 26.
10. Knapczyk M., Pieńkowski K., High-Performance Decoupled Control Of PWM Rectifier With Load Compensation, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* 2007, nr 60, seria *Studia i Materiały* 2007, nr 27.
11. Knapczyk M., Pieńkowski K., Analiza nieliniowych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC, materiały konferencyjne XIV Seminarium Technicznego KOMEL, Ustroń – Jaszowiec, 2005.
12. Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS. General Considerations for IGBT and Intelligent Power Modules, Sept. 1998.
13. Semikron, nota katalogowa tranzystora IGBT SKM300GA12T4.

Katarzyna Przytuła

mgr inż.
Politechnika Lubelska
e-mail: pocztka.katarzyna@gmail.com

Ukończyła studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność elektroenergetyka na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2014). Obecnie doktorantka w Katedrze Napędów i Maszyn Elektrycznych macierzystej uczelni. Zajmuje się projektowaniem sterowania urządzeń energoelektronicznych, stosowanych głównie w sieciach elektroenergetycznych, oraz badaniami wielokanałowych przekształtników sieciowych.

Dariusz Zieliński

mgr inż.
Politechnika Lubelska
e-mail: shadow031@gmail.com

Ukończył studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność napędy mikroprocesorowe w automatyce przemysłowej na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2013). Obecnie doktorant w Katedrze Napędów i Maszyn Elektrycznych macierzystej uczelni. Zajmuje się zagadnieniami projektowania urządzeń energoelektronicznych, stosowanych głównie w sieciach elektroenergetycznych oraz systemami czasu rzeczywistego.