

## WPLYW PRZEKSZTAŁNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH NA WZROST UDZIAŁU ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Katarzyna PRZYTUŁA<sup>1</sup>, Dariusz ZIELIŃSKI<sup>2</sup>

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

1. tel.: 605308165; e-mail:poczta.katarzyna@gmail.com

2. tel.: 781830870; e-mail:shadow031@gmail.com

**Streszczenie:** Alternatywne źródła energii coraz częściej zastępują te konwencjonalne. Są bowiem niewyczerpalnym źródłem energii i nie zanieczyszczają środowiska naturalnego. Największy procent źródeł alternatywnych stanowią farmy wiatrowe i fotowoltaiczne. Ich budowa wiąże się ze stosowaniem przekształtników energoelektronicznych, które pośredniczą w przyłączaniu wymienionych źródeł energii do sieci elektroenergetycznej. Wadą włączenia do sieci elektroenergetycznej źródeł tego typu jest generacja wyższych harmonicznych. W artykule przedstawiono zależność topologii przekształtnika od generowanych harmonicznych oraz zaproponowano rozwiązania w postaci przekształtnika wielokanałowego z trybem pracy naprzemienną. Zwiększając w ten sposób wydajność całego układu w chwilach mniejszej generacji mocy przez OZE można doprowadzić do wzrostu udziału źródeł odnawialnych w sieci elektroenergetycznej. Modele badawcze symulowano w środowisku MATLAB/Simulink.

**Słowa kluczowe:** układy przekształtnikowe, przekształtniki wielokanałowe, OZE, THD

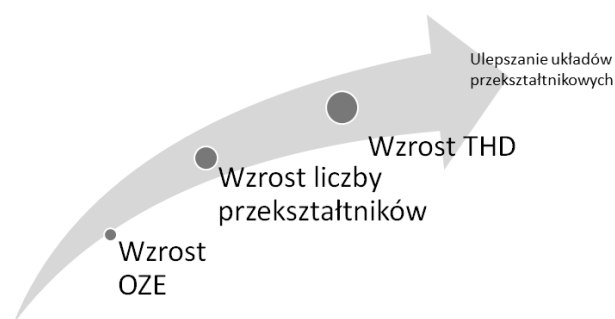
### 1. WSTĘP

Systemy energoelektroniczne są w dzisiejszych czasach nieodłącznym elementem sieci elektroenergetycznych. Są to najszybsze i najpewniejsze układy przyłączające odnawialne źródła energii, takie jak farmy fotowoltaiczne czy wiatrowe do sieci. W krajach takich jak Dania udział elektrowni wiatrowych przekracza już 30%, a w Portugalii 20%. W 2000 roku udział OZE wyniósł 2%, w 2005 roku wzrósł do 3%, a w 2010 roku osiągnął wielkość 7% [1]. Narzucanie norm prawnych dotyczących procentu udziału energii odnawialnej w krajach Unii Europejskiej doprowadzi do wzrostu odnawialnych źródeł energii, takich jak farmy wiatrowe i fotowoltaiczne, a zatem układów energoelektronicznych, które są nieodłączną ich częścią[2].

Tematykę artykułu, czyli wpływ przekształtników energoelektronicznych na wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w sieci elektroenergetycznej, można analizować pod różnym kątem. Po pierwsze pod względem sposobu sterowania, budowy i cech stosowanych przekształtników. Im lepsze właściwości układów, tym mniejsze zakłócenia wprowadzają one do sieci. Pomaga to na przyłączanie coraz większej liczby OZE do sieci nie naruszając obowiązujących norm dotyczących jakości energii. Po drugie pod względem sposobu pracy przekształtników.

W artykule opisano tryb pracy układów przekształtnikowych połączonych równolegle z pracą naprzemienną. Celem takiego zabiegu jest zwiększenie wydajności prądowej w czasie niższego zapotrzebowania na moc i ograniczenie w ten sposób udziału układów chłodzenia. Celem tych

rozważań jest zwiększenie udziału OZE w sieci elektroenergetycznej.



Rys. 1. Wpływ przekształtników na udział elektrowni OZE

### 2. RODZAJ PRZEKSZTAŁNIKA A GENERACJA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH

Głównym problemem, który stwarzają układy przekształtnikowe jest generacja wyższych harmonicznych do sieci elektroenergetycznej. Problem ten minimalizuje się poprzez zastosowanie rozbudowanych topologii przekształtników i zmianę ich sterowania. Przekształtnik dwupoziomowy (zawierający sześć tranzystorów) jest podstawową strukturą tego typu układów. Największą jego wadą jest wysoki współczynnik THD (ang. *Total Harmonic Distortion*). W celu zmniejszenia tego problemu buduje się przekształtniki trój- i wilopoziomowe [3]. W celu potwierdzenia wpływu topologii przekształtników na współczynnik THD, zbadano różne układy w tych samych warunkach. Symulacji dokonano w środowisku MATLAB/Simulink.

Rozpatrywane przypadki w artykule oparte są o sterowanie VOC (ang. *Voltage Oriented Control*) i przebadane na podstawie przykładowego modelu fragmentu sieci elektroenergetycznej przedstawionego na rys. 2. Sterowanie wektorowe VOC jest jednym z bardziej precyzyjnych sposobów sterowania przekształtnikami [4].

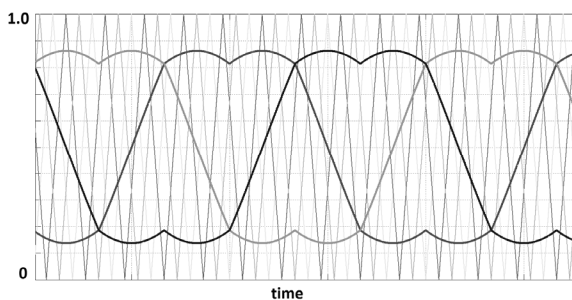
Przebadano różne topologie przekształtników: dwupoziomowy, trójpoziomowy i połączenia równoległe dwóch i trzech tych rodzajów przekształtników. Skonstruowano również model przekształtnika wielokanałowego z pracą ciągłą i naprzemienną. Najwyższy współczynnik THD uzyskał przekształtnik dwupoziomowy. Natomiast im wyższy poziom przekształtnika tym współczynnik THD ma niższą wartość. Zgodnie z teorią im zastosowanych jest więcej poziomów, tym napięcie w większym stopniu odwzorowuje

kształt sinusoidy i urządzenie wprowadza mniej harmonicznych do sieci elektroenergetycznej. Wiąże się to jednak z koniecznością stosowania większej liczby tranzystorów, a co za tym idzie podwyższenia kosztów budowy układu. Pod względem ekonomicznym stosowanie dwupoziomowych przekształtników może jednak okazać się bardziej niekorzystne, ze względu na konieczność stosowania dużych filtrów na wyjściu i tranzystorów o wyższym napięciu pracy.



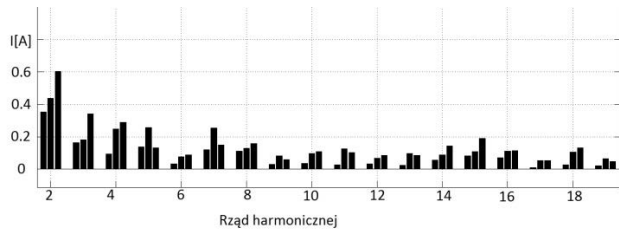
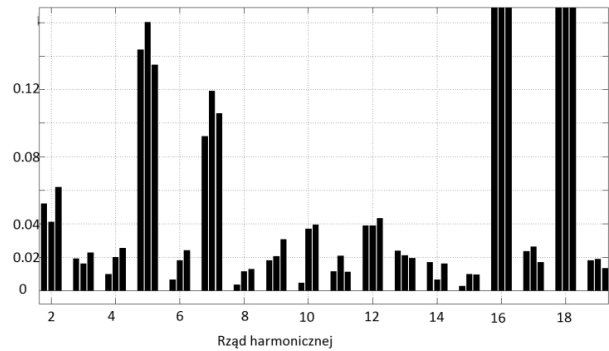
Rys. 2. Modelowy fragment sieci elektroenergetycznej I przyłączonego do niego przekształtnik NPC

Ponadto przeprowadzono badania pod kątem spektrum harmonicznych. Rysunek 3 przedstawia spektrum harmonicznych dla pracy trzech przekształtników pracujących równolegle. Pierwszy wykres dotyczy pracy gdzie sygnał modulujący (piłokształtny) w module PWM jest identyczny dla wszystkich trzech przekształtników. Drugi wykres dotyczy symulacji przy przesuniętych sygnałach modulujących o 120 stopni względem siebie (względem każdego modułu PWM poszczególnych przekształtników). Rysunek 3 przedstawia trzy sygnały modulowane (sterowania wektorowego), które zamieniane są na sygnał PWM, podawany na bramki tranzystorów IGBT. Na rysunku widać również trzy sygnały modulujące (piłokształtne) przesunięte względem siebie o 120 stopni. W przypadku normalnej pracy trzech równoległych przekształtników energoelektronicznych wszystkie trzy sygnały są zgodne ze sobą w fazie. Powoduje to zagęszczenie punktów tworzących sinusoidalny kształt napięcia, a w konsekwencji mniejszy współczynnik THD. Zanikają również poszczególne harmoniczne, co widać dokładnie na rysunku 4. Wszystkie wyższe harmoniczne uległy obniżeniu, co działa na korzyść omawianej topologii przekształtnika.

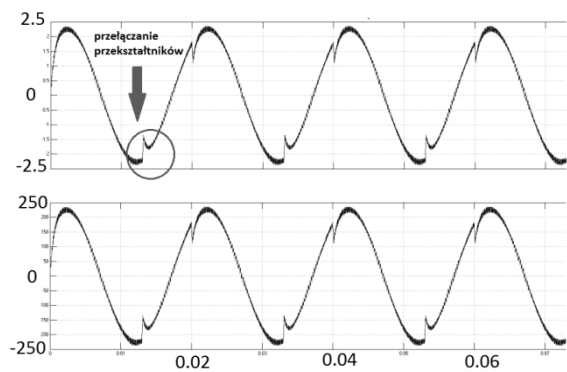


Rys. 3. Sygnał modulujący (piłokształtny) i modulowany w trzech różnych modułach PWM, w systemach sterowania przekształtnikami układu wielokanałowego

Praca naprzemienna, powoduje zakłócenia w napięciu wyjściowym, co widać na rys. 5. Są to krótkotrwałe zapady napięcia, które przyczyniają się do podwyższenia współczynnika THD, a w konsekwencji do pogorszenia się jakości energii.



Rys. 4. Spektrum harmonicznych dla układu przekształtników równoległych: a) wspólny sygnał modulujący, b) trzy sygnały modulujące przesunięte względem siebie o 120 stopni



Rys. 5. Przebieg prądu i napięcia wyjściowego układu przekształtników wielokanałowych z pracą naprzemienną

### 3. TRYB PRACY NAPRZEMIENNEJ PRZEKSZTAŁNIKÓW RÓWNOLEGLYCH

Straty w kluczach półprzewodnikowych są opisane wzorem (1), gdzie  $P_{TOT1}$  to straty wynikające z przepływu prądu, a  $P_{TOTswitch}$  to straty wynikające z przełączania kluczy półprzewodnikowych[5]. Im moc tranzystora większa tym współczynnik energii przełączania IGBT jest większy, większa energia potrzebna jest do jego przełączenia. Na skutek tego, straty przełączania IGBT są proporcjonalne do rozmiaru tranzystora. Oplacalne staje się więc stosowanie trzech mniejszych przekształtników pracujących równolegle, niż jeden większy, pokrywający parametrami przesyłaną moc.

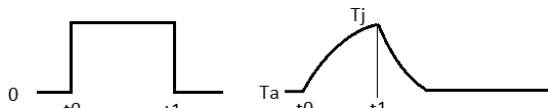
$$\begin{aligned}
 P_{TOT1} &= V_{CE} \cdot I_c \cdot D \\
 P_{TOTswitch} &= E \cdot f \\
 P_c &= P_{TOT1} + P_{TOTswitch} + P_d
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- gdzie:  $V_{CE}$  – spadek napięcia kolektor-emiter,  
 $I_c$  – prąd kolektora, D-poziom wypełnienia sygnału w jednym cyklu pracy,  
 $E$  – energia przełączania tranzystora IGBT,  
 $f$  – częstotliwość kluczowania,  
 $P_{TOTswitch}$  – straty mocy wynikające z kluczowania tranzystorów,  
 $P_c$  – straty całkowite,  
 $P_d$  – straty na diodzie zwrotnej.

Stosowanie układów równoległych ma również inne zalety. W przypadku konieczności remontu lub awarii jednego z przekształtników może okazać się konieczność obniżenia przesyłanej mocy, ale nie następuje przerwa w zasilaniu, tak jak ma to miejsce w przypadku użycia jednego przekształtnika.

Przedmiotem badań są przekształtniki połączone równolegle z możliwością pracy naprzemienną. Metoda ta polega na przełączaniu sygnału PWM pomiędzy dwa (lub więcej) falowniki. Włączając i wyłączając jeden z dwóch falowników, co pół okresu (lub co 1/3 okresu w przypadku trzech falowników) zyskujemy kolejne korzyści. W przypadku pobliskiego zwarcia w sieci, istnieje mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia wszystkich trzech przekształtników. Układ sterowania nie załącza wtedy kolejnego przekształtnika w danym okresie. Kolejną zaletą trybu pracy naprzemienną jest załączanie jej w przypadku niższej generacji mocy, np. przez farmy wiatrowe. Zamiast wyłączenia całkowitego jednego z trzech pracujących przekształtników, układ przełącza się w pracę naprzemienną. Generuje w ten sposób mniej strat, a tranzystory mają możliwość okresowego wychładzania się. Może zaistnieć sytuacja, w której tranzystory zaczną wychładzać się pasywnie bez konieczności stosowania zaawansowanych, zewnętrznych układów chłodzenia, zyskując w ten sposób na ogólnej sprawności.

Należy pamiętać, że wydajność prądowa tranzystora IGBT maleje wraz ze wzrostem temperatury złącza [6]. Przykładowe zależności między temperaturą złącza a przejściową impedancją termiczną pokazane są na rys. 6. Z zależności tych 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.).



Rys. 6. 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 [6]

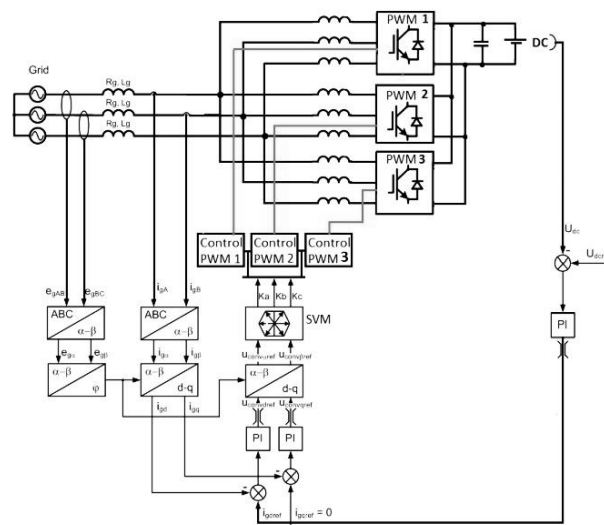
Wadą jest to, że synchronizacja sygnału PWM i cyklu przełączania przekształtników między sobą, ze względu na występującą inercję w elementach energoelektronicznych i sterujących, powoduje dodatkowe zakłócenia w procesie tworzenia sygnału, co widać na rys. 4.

#### 4. SYMULACJE PRACY NAPRZEMIENNEJ

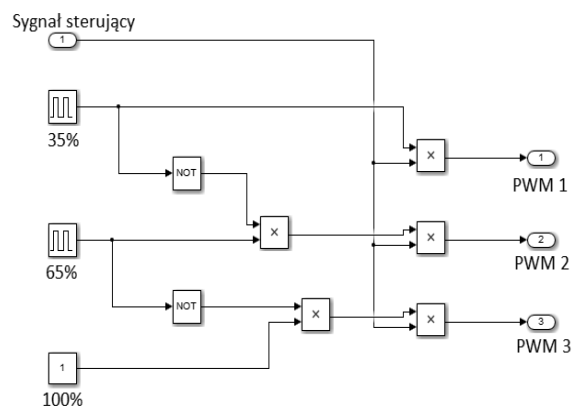
Badania przeprowadzono na układzie przekształtnika, ze sterowaniem wektorowym VOC (ang. *Vector Oriented Control*) podłączonego do przykładowego fragmentu sieci elektroenergetycznej. Wartość napięcia stałego na szynie DC wynosi 700 V. Rysunek 7 przedstawia blokowy schemat takiego układu. Zbudowano jeden system sterowania i trzy systemy kontrolujące, zajmujące się przełączaniem przekształtników naprzemiennie.

Rysunek 8 pokazuje wnętrze układu sterującego, złożonego z trzech modułów „Control PWM 1, PWM2 i PWM3”. Są one odpowiedzialne za załączanie pracy naprzemienną. Wylączają cyklicznie sygnał sterujący SVM (ang. *Space Vector Modulation*) na poszczególny przekształtnik lub pracują w trybie ciągłym i odwierciadlają oryginalny sygnał sterujący do wszystkich przekształtników jednocześnie.

Według przykładowego modelu na rysunku 8 pierwszy przekształtnik pracuje przez 35% okresu, drugi przez 30% (65–35%), a trzeci przez 35% (100–65%).

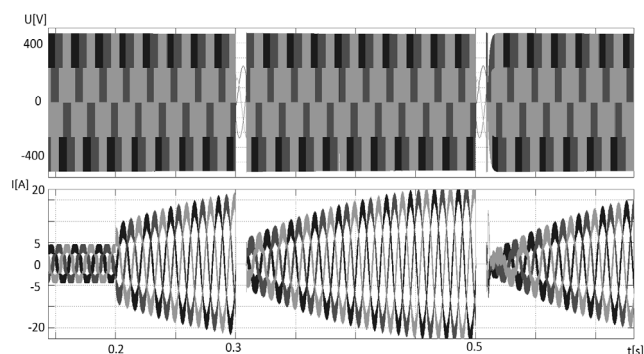


Rys. 7. Schemat blokowy układu sterowania wektorowego VOC dla trzech równolegle połączonych przekształtników, wraz z trybem pracy naprzemienną



Rys. 8. Moduł wyboru kluczującego przekształtnika

Na rysunku 9 zostały przedstawione wyniki symulacji porównujących prądy i napięcia dla różnych stanów pracy równolegle połączonych ze sobą przekształtników. W pierwszej fazie, kiedy źródło OZE pracuje z pełną mocą, wszystkie trzy przekształtniki pracują równolegle z pracą ciągłą. Istnieją jednak sytuacje, w których może dojść do awarii np. wiatranka, bądź źródło wiatru nie jest dostatecznie silne na przekazanie oczekiwanej ilości energii. Następuje wówczas przełączenie pracy ciągłej na tryb pracy naprzemienną pomiędzy trzy lub dwa przekształtniki.



Rys. 9. Wyniki symulacji zmian trybu pracy układu trzech przekształtników połączonych równolegle

W 0,2 s następuje podłączenie przekształtników do sieci, w czasie 0,3 s. przełączono pracę ciągłą na pracę naprzemienną, natomiast w 0,5 s następuje przejście z pracy trójkanałowej na dwukanałową. Za każdym razem następuje płynny wzrost prądu do wartości ustalonej w sterowaniu VOC, wywołana działaniem regulatorów PI.

Z symulacji wynika, że praca w każdym trybie wygląda podobnie i jest możliwe płynne przejście z jednego trybu do drugiego. Rysunek przedstawia pracę układu przekształtnikowego bez zastosowania filtrów. Zastosowanie ich powoduje jednak krótkie zapady napięcia tak jak ma to miejsce na rys. 5. 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 nieobjętych niniejszego artykułu.

## 5. WNIOSKI

Artykuł dowodzi, że priorytetem przy budowie nowych elektrowni wiatrowych, fotowoltaicznych czy innych powinien być prawidłowy dobór przekształtników, które łączą te elementy z siecią elektroenergetyczną. Zaniedbanie tego zadania może wiązać się z wysokim współczynnikiem THD i przekroczeniem norm związanych z jakością dostarczanej do odbiorcy energii, a także wysokimi stratami.

Dowodzono, że praca równoległa przekształtników jest jednym z bardziej korzystnych zabiegów. Zwiększa ona niezawodność zasilania, straty i zwiększa sprawność układu. Tryb naprzemienny wprowadza dodatkowe zalety, przy

obniżonej mocy generowanej przez elektrownię OZE – możliwość pasywnego chłodzenia tranzystorów IGBT. Zastosowanie tego typu rozwiązań staje się więc podstawą do kolejnych badań w kierunku ulepszenia technologii przekształtników, zwiększania ich ilości w sieci, a w konsekwencji zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii.

## 6. LITERATURA

1. Okulski T., Analiza struktury produkcji energii elektrycznej we Francji i w Polsce. POLITYKA ENERGETYCZNA Tom 16 Zeszyt 3, 2013 ISSN 1429-6675.
2. 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, 02 Sep – 06 Sep 2013 Lille. IEEE Xplore Digital Library.
3. Strzelecki R., Technologie energoelektroniczne w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych. Zeszyt Naukowy AM w Gdyni 62 (2009), 164–189.
4. 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, No. 3, 2015
5. Seyezhai R., Mathur B.L., Performance evaluation of inverted sine PWM technique for an asymmetric cascaded multilevel inverter, 2005–2009 JATIT
6. Mitsubishi Semiconductors Power Modules MOS. GENERAL CONSIDERATIONS FOR IGBT AND INTELLIGENT POWER MODULES. Sept. 1998

## INFLUENCE OF POWER CONVERTERS ON INCREASING THE SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

The highest percentage of alternative sources are wind farms and photovoltaic arrays. Power electronic system are used for the integration renewable energy sources with power grids and helping to increase their participation in this network. The biggest problem of it is the fact that the more renewable sources are present in the power grid the bigger number of converters is applied and a higher THD factor is indicated in the output voltage wave. It can lead to exceeding the required standards. The article shows the various configuration of topology of grid converters with their control system, that can be used in power grid. The authors analyzes the high harmonics injected into the network by the converters. There are also the own solution of converter connected in parallel with alternating working mode. This paper provides a description of the benefits and disadvantages of implementation this solution in the power grid and when this mode can work. The improvement of converters is very important for the renewable energy market and their spreading. A case study has been carried out using MATLAB/Simulink environment.

**Keywords:** converters, SVM, multi-channel converter, parallel converters