

Anna CZMIL¹

WIELOPOZIOMOWE PRZEKSZTAŁTNIKI ENERGOELEKTRONICZNE – TOPOLOGIE, ZASADA DZIAŁANIA, METODY MODULACJI

W artykule zostały omówione wybrane zagadnienia dotyczące budowy topologicznej, sposobu działania i sterowania oraz metod modulacji stosowanych w przekształtnikach wielopoziomowych. Dokonano przeglądu podstawowych topologii przekształtników wielopoziomowych, do których zalicza się przekształtniki z diodami poziomującymi, przekształtniki z kondensatorami poziomującymi, przekształtniki kaskadowe oraz przekształtniki hybrydowe. Opisano ogólną strukturę działania przekształtnika wielopoziomowego składającą się z kilku etapów w zależności od jego zastosowania i topologii. W strukturze działania wyszczególniono etapy zewnętrznej pętli sterowania, wewnętrznej pętli sterowania, stabilizacji napięć DC oraz modulacji. Następnie zaprezentowano podział metod modulacji stosowanych w przekształtnikach wielopoziomowych i dokonano szczegółowego opisu wybranych metod modulacji. W dalszej części artykułu zostały szczegółowo opisane metody modulacji, tj. metoda z sygnałami nośnymi z przesuniętymi poziomami oraz metoda z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo posłużyły do przedstawienia analizy strat mocy w przekształtnikach wielopoziomowych.

Słowa kluczowe: przekształtniki energoelektroniczne, układy topologiczne, sterowanie, struktura działania, metody modulacji, analiza strat mocy przekształtników

1. Wstęp

Przekształtnik energoelektroniczny to układ przekazujący energię elektryczną między dwoma obwodami, które różnią się między sobą częstotliwością oraz wartościami prądów i napięć. Przekształtnik wielopoziomowy pozwala na uzyskanie syntezy pożądanego przebiegu napięcia wyjściowego z wykorzystaniem kilku poziomów napięcia DC [1]. Tak zwany przekształtnik "wielopoziomowy" musi posiadać co najmniej trzy poziomy [2]. Wraz ze wzrostem liczby poziomów przekształtnika zmniejsza się zawartość harmoniczných w przebiegu napięcia wyjściowego oraz stromość zmian napięcia, rośnie natomiast złożoność układu sterowania oraz koszt przekształtnika [3].

¹ Autor do korespondencji: Anna Czmil, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, d488@stud.prz.edu.pl.

Przełączniki wielopoziomowe znajdują szerokie zastosowanie między innymi w przemyśle, dystrybucji oraz rozdzielaniu energii elektrycznej [4]. Wzrost popularności przełączników wielopoziomowych ma związek z ich wysoką sprawnością, możliwościami regulacyjnymi, a także możliwościami dopasowywania parametrów energii elektrycznej z poziomu dystrybucji do poziomu konkretnych potrzeb urządzeń odbiorczych [5].

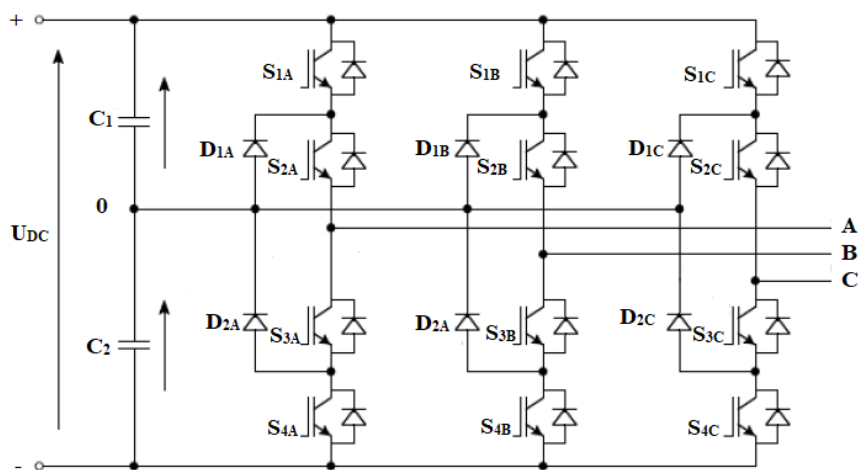
2. Podstawowe topologie przełączników wielopoziomowych

Wyróżnia się kilka podstawowych topologii przełączników wielopoziomowych, do których zalicza się:

- przełączniki z diodami poziomującymi (ang. *Diode-Clamped Converters*),
- przełączniki z kondensatorami poziomującymi (ang. *Capacitor-Clamped Converters*),
- przełączniki kaskadowe (ang. *Cascade Converters*) oraz
- przełączniki hybrydowe (ang. *Hybrid Converters*) [6].

2.1. Przełącznik NPC

3-poziomowy przełącznik z punktem neutralnym (ang. Neutral Point Clamped Converter, NPC) jest najczęściej spotykanym w literaturze przełącznikiem wielopoziomowym, który został zakwalifikowany do grupy przełączników z diodami poziomującymi.



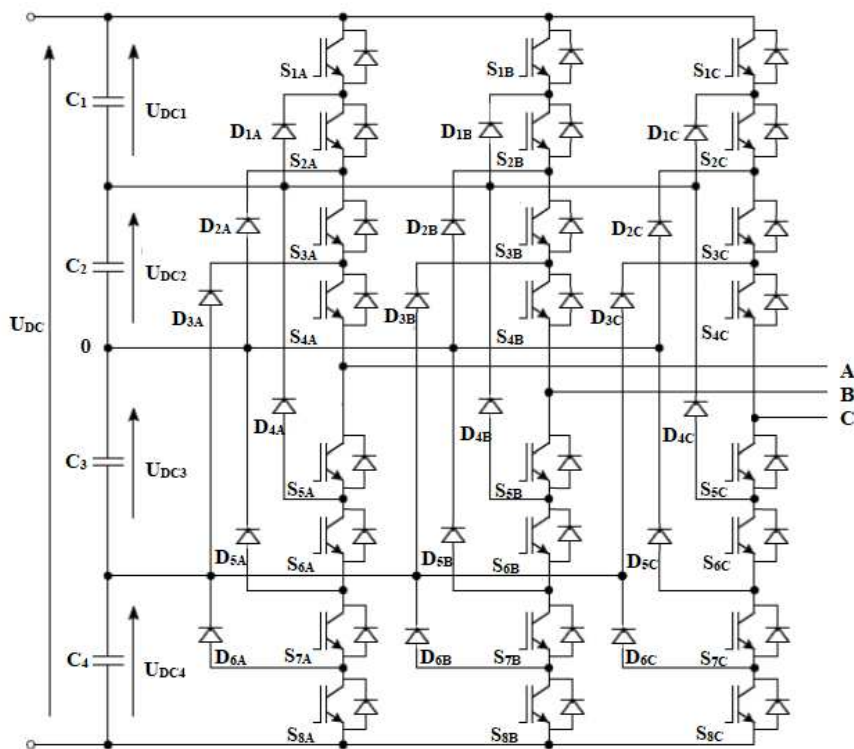
Rys. 1. Trójfazowy przełącznik NPC

Fig. 1. A three-phase NPC converter

W przekształtniku NPC, zawory energoelektroniczne pracują przy napięciu wynoszącym połowę napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} . Na rys. 1 przedstawiono schemat głównych obwodów trójfazowego przekształtnika NPC. Posiada on 12 tranzystorów ($S_{1x}, S_{2x}, S_{3x}, S_{4x}$), oraz 6 diod poziomujących (D_{1x}, D_{2x} , gdzie $x \in \{A, B, C\}$), które są przyłączone pomiędzy tranzystorami górnymi lub dolnymi oraz do punktu neutralnego 0. Kondensatory C_1 i C_2 mają taką samą pojemność [6].

2.2. Przekształtnik z diodami poziomującymi

Przekształtnik n-poziomowy z diodami poziomującymi jest przekształtnikiem wielopoziomowym oraz stanowi rozwinięcie przekształtnika NPC. Przekształtnik ten umożliwia przyłączenie wyjścia danej fazy do n różnych poziomów napięć, przy czym napięcie obwodu pośredniczącego powinno być rozłożone równomiernie na n-1 kondensatorach. Zostało to przedstawione na rys.2. Dzięki zastosowaniu diod poziomujących $D_{1x} - D_{6x}$, gdzie $x \in \{A, B, C\}$, odpowiednie kondensatory są przyłączane do wyjścia.



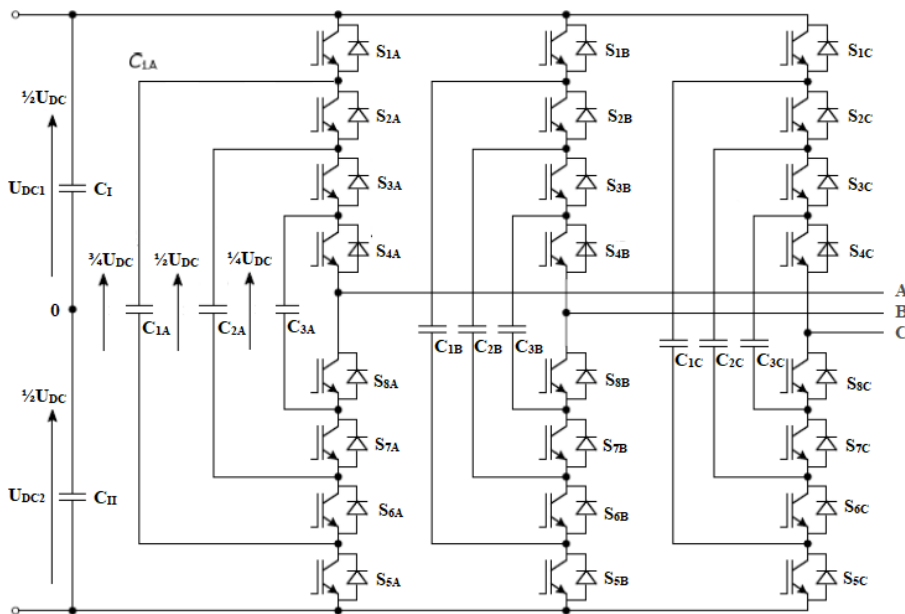
Rys. 2. Trójfazowy 5-poziomowy przekształtnik z diodami poziomującymi

Fig. 2. A three-phase five-level diode clamped converter

Należy również dodać, że napięcie na dowolnym z wyłączonych zaworów jest równe napięciu $U_{DC}/n-1$, co stanowi dużą zaletę tego przekształtnika. Napięcia na diodach poziomujących są natomiast różne i wynoszą kolejno $\frac{1}{4}U_{DC}$ dla D_{1x} i D_{6x} , $\frac{1}{2}U_{DC}$ dla D_{2x} i D_{5x} oraz $\frac{3}{4}U_{DC}$ dla D_{3x} i D_{4x} , gdzie $x \in \{A, B, C\}$. W oparciu o wymienione właściwości przekształtników z diodami poziomującymi można stwierdzić, iż mogą być one konstruowane przy użyciu zaworów sterowanych o niższym napięciu znamionowym. Napięcia znamionowe diod poziomujących jednak nie są równe [6].

2.3. Przekształtnik z kondensatorami poziomującymi

Napięcie wyjściowe w 5-poziomowym przekształtniku z kondensatorami poziomującymi jest tworzone poprzez odpowiednie przyłączenie do wyjścia tego przekształtnika szeregowo połączonych kondensatorów C_{1x} , C_{2x} i C_{3x} , gdzie $x \in \{A, B, C\}$, które powinny być naładowane odpowiednio do napięć $\frac{3}{4}U_{DC}$, $\frac{1}{2}U_{DC}$, $\frac{1}{4}U_{DC}$.



Rys. 3. Trójfazowy 5-poziomowy przekształtnik z kondensatorami poziomującymi

Fig. 3. A three-phase five-level capacitor-clamped converter

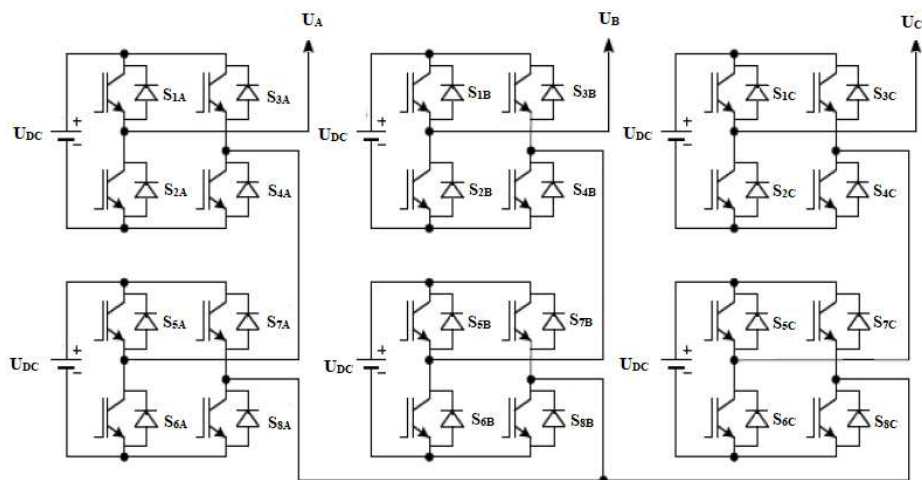
Na wyjściu tego przekształtnika można uzyskać pięć poziomów napięć 0, $\pm\frac{1}{2}U_{DC}$ oraz $\pm\frac{1}{4}U_{DC}$. Należy również zaznaczyć, że napięcia 0 i $\pm\frac{1}{4}U_{DC}$ można

uzyskać przy różnych stanach zaworów, nazywanych nadmiarowymi. Kondensatory C_{1x} , C_{2x} i C_{3x} , gdzie $x \in \{A, B, C\}$, przez które przepływa prąd wyjściowy są przyłączane do wyjścia, dlatego napięcia na tych kondensatorach będą mogły się zmieniać [6].

2.4. Przekształtnik kaskadowy

W wersji podstawowej przekształtnik kaskadowy jest zbudowany z przekształtników mostkowych, z których każdy umożliwia wygenerowanie 3-poziomowego napięcia wyjściowego, natomiast jednofazowy przekształtnik kaskadowy składający się z dwóch przekształtników mostkowych z takimi samymi napięciami obwodu DC jest w stanie wygenerować 5-poziomowe napięcie wyjściowe. Przekształtnik kaskadowy pozwala wygenerować 5 poziomów napięć przy 16 różnych stanach zaworów.

W przekształtniku kaskadowym źródła napięcia obwodu pośredniczącego DC muszą być separowane galwanicznie. Mogą być one wytwarzane za pomocą prostowników przyłączonych do uzwojeń wtórnych transformatora wielouzwojeniowego lub kilku jednofazowych transformatorów. Zastosowanie takiego transformatora jest bardzo kosztowne, dodatkowo jest on głównym źródłem strat w takim przekształtniku. Przekształtniki kaskadowe cechuje najmniejsza liczba elementów w porównaniu z zaprezentowanymi wcześniej topologiami przekształtników wielopoziomowych. Napięcia występujące na tych elementach są takie same (w przypadku idealnym) i wynoszą $U_{DC}/(n-1)$.



Rys. 4. Trójfazowy 5-poziomowy przekształtnik kaskadowy

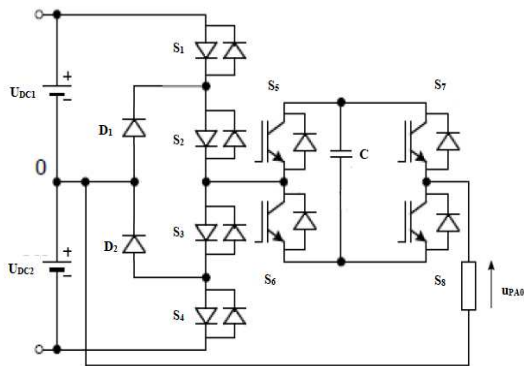
Fig. 4. A three-phase five-level cascade converter

Przełączniki kaskadowe można podzielić na przełączniki kaskadowe symetryczne i asymetryczne. Jeśli są zasilane ze źródeł napięcia stałego DC o takim samym napięciu, to wtedy nazywane są przełącznikami symetrycznymi, natomiast, gdy napięcia stałe mają różne wartości, przełącznik taki nazwa się asymetrycznym [7].

2.5. Przełącznik hybrydowy

Przełączniki hybrydowe składają się z podstawowych przełączników wielopoziomowych, zbudowanych z różnego rodzaju zaworów (np. tyrystorów GTO wraz z tranzystorami IGBT), i mogących różnić się napięciem obwodów pośredniczących. Znajdują one zastosowanie w rozwiązaniach niestandardowych, które wymagają ulepszonych właściwości przełącznika wielopoziomowego.

Na rys. 5 zaprezentowano przykład jednofazowego przełącznika hybrydowego składającego się z przełącznika NPC i przełącznika mostkowego.



Rys. 5. Przełącznik hybrydowy - NPC z przełącznikiem mostkowym

Fig. 5. A hybrid converter- NPC with bridge converter

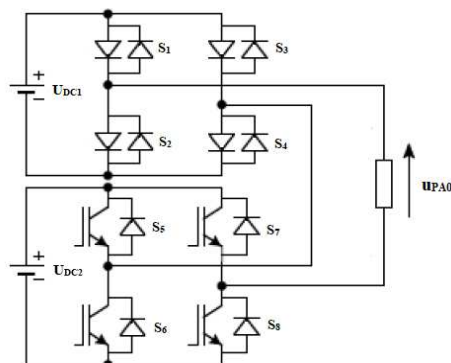
Jako drugi przykład zamieszczono przełącznik kaskadowy asymetryczny wykonany z dwóch przełączników mostkowych – rys. 6.

Uzyskanie wyższego napięcia wyjściowego (U_{DC1}) przy niższych częstotliwościach przełączania umożliwiło zastosowanie tyrystorów GTO, natomiast bardziej korzystne przebiegi napięcia wyjściowego u_{PA0} zawdzięcza się zastosowaniu 2- lub 3-krotnie niższego napięcia U_{DC2} .

Ważną zaletą przełącznika hybrydowego jest wykorzystanie w nim przełącznika z punktem neutralnym, dającego stabilny i równomierny rozkład napięć U_{DC1} . Zaletą jest także możliwość zwiększenia liczby poziomów napięcia wyjściowego do 7 lub 9, co pozwala z kolei na zmniejszenie liczby użytych zaworów w porównaniu do podstawowych topologii.

Rys. 6. Przekształtnik hybrydowy o strukturze kaskadowej asymetrycznej 7- lub 9-poziomowy

Fig. 6. A 7- or 9-Level asymmetrical hybrid cascaded multilevel converter

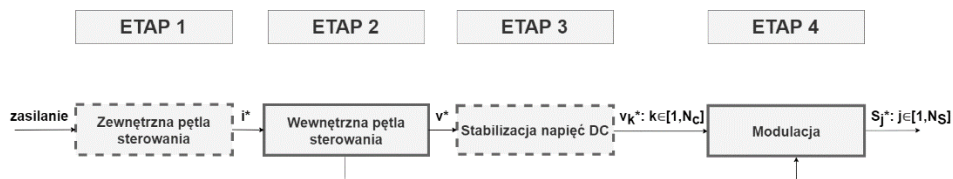


Napięcia kondensatorów obwodu pośredniczącego w przekształtnikach mostkowych (U_{DC2} – rys. 5.a) są stabilizowane poprzez utrzymywanie wartości mocy czynnej na poziomie 0. Założenie to może być spełnione w przypadku, gdy istnieje możliwość przewidzenia zmian napięcia przekształtnika we względnie długim okresie czasowym. Napięcia przekształtnika można z kolei przewidzieć, jeśli można przewidzieć parametry odbiornika.

Bardzo ważną zaletą przekształtnika kaskadowego jest jego modularność, dzięki której na częściach składowych modułów (zależne od liczby poziomów przekształtnika) występują niższe napięcia, jego budowa jest łatwiejsza, natomiast koszt niższy[6].

3. Działanie wielopoziomowego przekształtnika

Działanie wielopoziomowego przekształtnika składa się z kilku etapów w zależności od jego zastosowania i topologii. Na rys. 6 przedstawiono ogólną strukturę działania przekształtnika wielopoziomowego. Pierwsze trzy etapy są związane z generowaniem napięcia wyjściowego, natomiast w ostatnim krok dotyczy modulacji przy pomocy impulsów przełączające S_j dla półprzewodników N_s konwertera wielopoziomowego.



Rys. 7. Struktura działania przekształtnika wielopoziomowego: sterowanie i etapy modulacji

Fig. 7. General structure of a multilevel converter: control and modulation stages

Na rys. 7. pomocą linii ciągłej zaznaczono etapy, które są niezbędne do działania przekształtnika wielopoziomowego, natomiast za pomocą linii przerywanej zaznaczono etapy opcjonalne, które są zależne od zastosowania, topologii oraz konfiguracji przekształtnika [8].

3.1. Etap 1: Zewnętrzna pętla sterowania

Pierwszy etap pracy przekształtnika, nazywany zewnętrzną pętlą sterowania, jest związany z konkretnym zastosowaniem przekształtnika mocy. Wejście do tej pętli zależy od zastosowania, np. regulacji prędkości maszyny w napędzie silnikowym [9]. Wyjście z pętli jest zazwyczaj aktualnym punktem odniesienia i^* , który jest wykorzystywany jako wejście do wewnętrznej pętli sterującej [8].

3.2. Etap 2: Wewnętrzna pętla sterowania

Celem wewnętrznej pętli sterowania jest śledzenie aktualnej wartości odniesienia i^* . Pętla ta jest zawarta w każdej strukturze pracy wielopoziomowego przekształtnika mocy. W celu rozwiązania tego problemu sterowania, konieczna jest znajomość dynamicznych równań prądów wyjściowych. Można je uzyskać z modelu systemu, w zależności od tego, co jest podłączone do zacisków przetwornicy mocy [8].

3.3. Etap 3: stabilizacja napięć DC

Przekształtniki wielopoziomowe cechuje występowanie w nich rozproszonego obwodu pośredniczącego, co wiąże się z potrzebą zapewnienia w nich stabilnych wartości napięć. W przekształtniku NPC stabilizacja napięć uzyskuje się dzięki stabilizacji potencjału punktu środkowego obwodu DC. Brak stabilizacji napięć obwodu pośredniczącego może prowadzić zmian w zakresie potencjału punktu środkowego i tym samym spowodować uszkodzenie zaworów w przekształtniku.

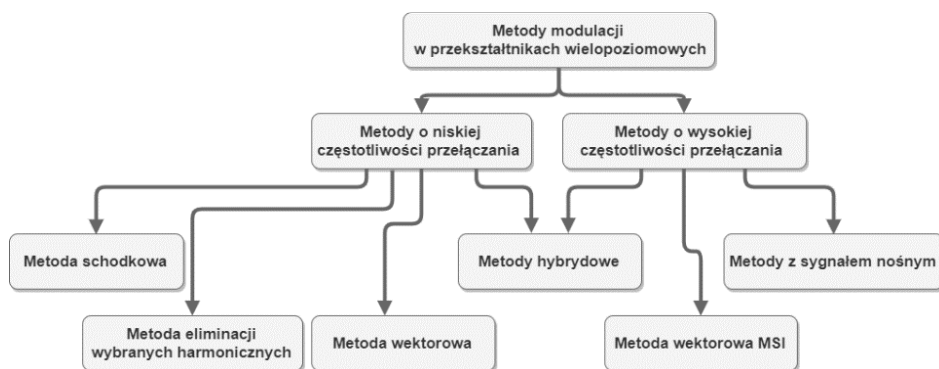
Wpływ na napięcia kondensatorów umożliwia występowanie stanów nadmiarowych w przekształtniku. Przy większych prędkościach obrotowych występuje tendencja do naturalnego balansowania napięć DC dzięki wykorzystaniu przy wyższych wartościach współczynnika głębokości modulacji wektorów, które nie wpływają na rozkład napięć kondensatorów [10].

4. Metody modulacji w przekształtnikach wielopoziomowych

Metody modulacji przekształtników wielopoziomowych są rozszerzeniami lub modyfikacjami poprzednich wersji stosowanych do konwerterów dwupoziomowych [11].

Można je zasadniczo podzielić na dwie grupy: metody o niskiej częstotliwości przełączania oraz metody o wysokiej częstotliwości. Zestawienie najczęściej stosowanych metod przedstawia rys. 8.

Do pierwszej grupy należy metoda schodkowa, metoda eliminacji wybranych harmonicznych oraz metoda wektorowa. Metody te cechuje właściwość, iż zawory przekształtnika przełączane są raz lub kilka razy na okres podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego u_{PA0} . W drugiej grupie metod modulacji znalazła się metoda wektorowa MSI oraz metody z sygnałem nośnym, w których częstotliwość przełączania jest znacznie wyższa niż w grupie pierwszej. Metoda hybrydowa natomiast łączy w sobie cechy metod pochodzących z obu tych grup.



Rys. 8. Podział metod modulacji w przekształtnikach wielopoziomowych

Fig. 8. Division of modulation methods in multilevel converters

Główną zaletą metod o niskiej częstotliwości przełączania jest to, że zawory przełączane są raz bądź kilka razy na okres podstawowej harmonicznej, a zatem straty mocy przełączania są tutaj minimalne. Ta grupa metod modulacji nadaje się do przekształtników dużej i bardzo dużej mocy, gdzie używa się wysokonapięciowych zaworów o dużych czasach przełączania. Zaletą metod o wysokiej częstotliwości przełączania jest wierniejsze odtwarzanie sygnałów modulujących.

Różne metody mogą być stosowane do sterowania różnych topologii przekształtników wielopoziomowych. Do obliczeń strat mocy ΔP przyjęto, że przekształtnik 2-poziomowy jest sterowany metodą z sygnałem nośnym, przekształtnik z diodami poziomującymi jest sterowany metodą z sygnałami nośnymi z przesuniętymi poziomami, natomiast przekształtnik z kondensatorami poziomującymi i przekształtnik kaskadowy sterowane są metodą modulacji z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo, dlatego tylko na tych metodach skupiono się w dalszej części artykułu.

4.1. Metoda z sygnałami nośnymi z przesuniętymi poziomami

W tej metodzie ($n-1$) sygnałów nośnych $SN1 - SN_{n-1}$ o takiej samej częstotliwości są rozmieszczone kolejno jeden nad drugim, pokrywając zakres zmian sygnału modulującego SM , który nie powoduje występowania nadmodulacji. Amplitudy sygnałów nośnych są takie same i wynoszą odpowiednio $1/(n-1)$ zakresu zmian sygnału modulującego, a przesunięcia fazowe między nimi są zerowe. Przełączenia odbywają się w chwilach zrównania jednego z ($n-1$) sygnałów nośnych SN_x z sygnałem modulującym SM .

Częstotliwość wszystkich sygnałów nośnych f_s w metodzie jest stała, definiuje się natomiast współczynnik częstotliwości m_f , będący krotnością częstotliwości sygnału nośnego f_s do częstotliwości sygnału modulującego f_M .

$$m_f = \frac{f_s}{f_M}$$

W przypadku metody z sygnałami nośnymi z przesuniętymi poziomami współczynnik częstotliwości powinien całkowity oraz nieparzysty [H1]. Metoda ta przeznaczona jest do przekształtnika z diodami poziomującymi, ponieważ przy sterowaniu w przekształtniku z kondensatorami poziomującymi oraz kaskadowym konieczne jest stosowanie dodatkowych układów stabilizujących poziomy napięć na odpowiednich kondensatorach. Wiąże się to z nierównomiernym obciążeniem kondensatorów obwodów pośredniczących lub kondensatorów poziomujących [6].

4.2. Metoda z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo

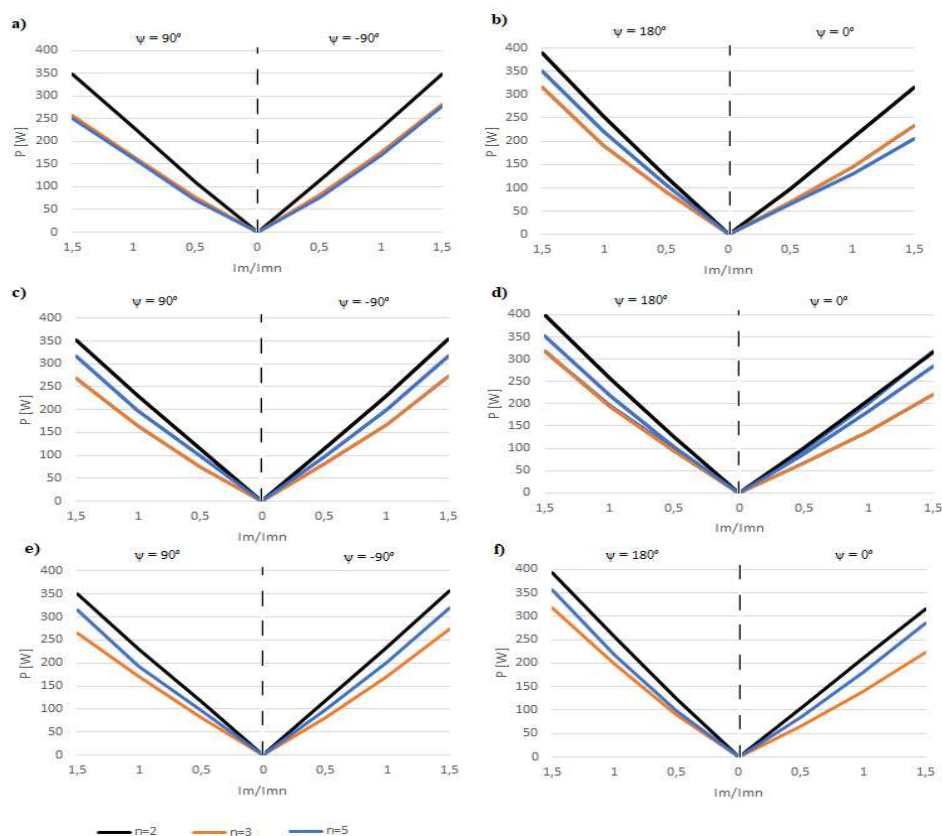
W metodzie z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo ($n-1$) sygnałów nośnych mają tę samą częstotliwość i amplitudę, ale są przesunięte względem siebie o kąt $360^\circ/(n-1)$. Zastosowanie tej metody pozwala na eliminację wszystkich parzystych harmonicznych, w przypadku gdy współczynnik częstotliwości jest całkowity, nieparzysty dla parzystych n lub tylko całkowity dla nieparzystych n .

Metoda z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo przeznaczona jest do przekształtnika z kondensatorami poziomującymi, a także do przekształtnika kaskadowego, nie można jej natomiast stosować do przekształtnika z diodami poziomującymi. Sterowanie to realizuje 2_{n-1} stanów zaworów, z których wszystkie są niezbędne do odtworzenia sygnału modulującego S_M , natomiast przekształtnik z diodami poziomującymi umożliwia zrealizowanie jedynie n stanów zaworów, co nie jest wystarczające do odtworzenia sygnału modulującego w tym przekształtniku za pomocą metody z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo.

Użycie metody z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo w przekształtniku z kondensatorami poziomującymi oraz kaskadowym umożliwia utrzymywanie napięć kondensatorów poziomujących na stabilnych poziomach bez konieczności stosowania dodatkowych układów wyrównujących napięcia [6].

5. Straty mocy w przekształtnikach wielopoziomowych

W pracy [6] wykazano, że dla przekształtników wielopoziomowych o napięciu $U_{DC} = 750$ V straty mocy przewodzenia wzrastają wraz z liczbą poziomów przekształtnika. Jest to związane z faktem, iż z każdym kolejnym poziomem przekształtnika dodawane są kolejne tranzystory, które nie pozwalają na zmniejszenie strat mocy przewodzenia ΔP_{CON} , ponieważ posiadają niższe napięcia blokowania.



Rys. 9. Całkowite straty mocy ΔP w trójfazowych 2-, 3- i 5-poziomowych przekształtnikach a, b) z diodami poziomującymi, c), d) z kondensatorami poziomującymi i e), f) kaskadowych. Przekształtniki pracują w kondycjonerze energii a), c), e) przy prądzie biernym $\psi = \varphi = \pm 90^\circ$, b), d), f) przy prądzie współfazowym z napięciem sieci $\psi = 0^\circ$ lub $\psi = 180^\circ$. $mf = 143$ dla $n = 2$, $mf = 62$ dla $n = 3$ i $mf = 35$ dla $n = 5$, $\delta_U = 1,32$

Fig. 9. Total power losses ΔP in three-phase 2-, 3- and 5-level converters a, b) diode clamped converters, c), d) capacitor-clamped converter and e), f) cascade converters. The converters work in the energy conditioning system a), c), e) at reactive current - $\psi = \varphi = \pm 90^\circ$, b), d), f) at co-phase current with network voltage $\psi = 0^\circ$ or $\psi = 180^\circ$. $mf = 143$ for $n = 2$, $mf = 62$ for $n = 3$ and $mf = 35$ for $n = 5$, $\delta_U = 1,32$

Wyniki przeprowadzonej analizy całkowitych strat mocy ΔP [6] zostały zamieszczone na rys. 8. Największe straty mocy zanotowano dla przekształtników 2-poziomowych, a mniejsze straty są dla przekształtników 3 i 5-poziomowych. Jest to związane ze stratami przełączania ΔP_{TSW} , które są większe dla przekształtników z tranzystorami o wyższym napięciu blokowania.

Straty mocy przewodzenia przekształtnika z kondensatorami poziomującymi w porównaniu ze stratami mocy przekształtnika kaskadowego są porównywalne. Jest to spowodowane zastosowaniem tej samej metody modulacji dla obu przekształtników, która miała wpływ na uzyskanie zbliżonych przebiegów prądu zaworów w tych przekształtnikach.

Najniższe straty spośród przekształtników 5-poziomowych zanotowano w przekształtniku z diodami poziomującymi, co jest związane z przewodzeniem mniejszej liczby zaworów niż w topologiach pozostałych przekształtników 5-poziomowych. Mniejsza liczba zaworów przewodzących powoduje zmniejszenie strat mocy przewodzenia ΔP_{CON} . Przy pracy falownikowej wszystkie straty przekształtników porównywalne względem poziomów [6].

6. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym opracowaniu zagadnienia mają na celu przybliżenie tematyki przekształtników energoelektronicznych. Znajomość tej tematyki we współczesnym świecie wydaje się niezbędna ze względu na ich coraz częstsze zastosowanie w urządzeniach odbiorczych oraz urządzeniach związanych z generowaniem energii elektrycznej w odnawialnych źródłach energii.

Omówione przekształtniki różnią się pod względem topologii występowaniem dodatkowych elementów, takich jak diody i kondensatory poziomujące. Jedynie przekształtniki kaskadowe cechują się najmniejszą liczbą elementów wchodzących w skład ich topologii, co powoduje redukcję kosztów ich budowy, a także może powodować zmniejszenie strat mocy. Etapy działania wielopoziomowego przekształtnika są uzależnione od jego zastosowania oraz wymagań.

Modulacja przekształtników wielopoziomowych jest także jednym z zagadnień znajdujących się w centrum zainteresowania badaczy, ponieważ straty mocy i jakość przebiegów wyjściowych są silnie uzależnione od sposobu ustawienia parametrów sygnałów.

Szeroki wachlarz rozwiązań prezentowany w niniejszym opracowaniu pokazuje, że przekształtniki wielopoziomowe pozwalają na zastąpienie tradycyjnych transformatorów energetycznych takimi rozwiązaniami, które udostępniają o wiele więcej funkcjonalności niż tradycyjne rozwiązania.

Literatura

- [1] Zhang J., Xu S., Din Z., Hu X.: Hybrid Multilevel Converters: Topologies, Evolutions and Verifications, *Energies*, vol. 12, no. 4, 2019, s. 615, <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/615> (dostęp: 04.11.2019r.).
- [2] Lai J.S., Peng F.Z.: Multilevel converters-a new breed of power converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 3, 1996, pp. 509–517, <https://ieeexplore.ieee.org/document/502161> (dostęp: 31.10.2019r.).
- [3] Hanzelka Z.: Rozważania o jakości energii elektrycznej (IV). *Elektroinstalator*, nr 12, 2001, s. 10-17.
- [4] Bayoumi E. H.: Power electronics in smart grid distribution power systems: a review, *International Journal of Industrial Electronics and Drives*, vol. 3, no. 1, 2016, s. 20, https://www.researchgate.net/publication/305288782_Power_electronics_in_smart_grid_distribution_power_systems_a_review (dostęp: 03.11.2019r.).
- [5] Zygmantowski M., Michałak J.: Przekształtniki energoelektroniczne w EP, Artykuły Referencyjne, Biblioteka Źródłowa Energetyki Prosumenckiej, Stowarzyszenie Klaster 3x20, 2014, http://bzep.pl/static/uploads/MICHALAK_ZYGMANTOWSKI_PRZEKSZTALTNIKI_ENERGIELEKTRONICZNE_W_EP2.pdf, (dostęp: 06.11.2019r.).
- [6] Zygmantowski M.: Analiza porównawcza właściwości wybranych wielopoziomowych przekształtników energoelektronicznych przeznaczonych do układów kondycjonowania energii elektrycznej, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, 2009.
- [7] Pieńkowski K., Knapczyk M.: Przekształtniki energoelektroniczne AC/DC/AC i AC/AC- układy topologiczne i sterowanie, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 72/2005, 2005, s. 247.
- [8] Leon J.I., Vazquez S., Franquelo L.G.: Multilevel Converters: Control and Modulation Techniques for Their Operation and Industrial Applications, *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, 2017, pp. 2066-2081, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8010540> (dostęp: 05.11.2019r.).
- [9] Kazmierkowski M.P., Franquelo L., Rodriguez J., Perez M., Leon J.: High-Performance Motor Drives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 3, 2011, pp. 6-26, https://www.researchgate.net/publication/261774243_High-Performance_Motor_Drives (dostęp: 12.11.2019r.).
- [10] Biskup T., Kołodziej H., Paluszczak D., Sontowski J., Michałak J., Zygmantowski M.: Przekształtnik 3-poziomowy NPC 3,3 kV do integracji z silnikiem klatkowym, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2/2015(106), 2015, s. 163.
- [11] Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B.: The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past present and future power electronics, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 63, no. 5, 2016, pp. 2688-2701, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7386640> (dostęp: 05.11.2019r.).

MULTILEVEL POWER ELECTRONIC CONVERTERS - TOPOLOGIES, OPERATION, MODULATION METHODS

Summary

In this paper selected issues concerning topological structure, operation and control as well as modulation methods used in multilevel converters are presented. There is reviewed general topologies of multilevel converters, which include Diode-Clamped Converters, Capacitor-Clamped Converters, Cascade Converters and Hybrid Converters. The general structure of a multilevel converter consisting of several stages depending on its application and topology is described. In the structure of operation, the stages of Outer Control Loop, Inner Control Loop, DC voltage stabilization and modulation are specified. Next, the division of modulation methods used in multilevel converters is presented and a detailed description of selected modulation methods is made. In the further part of the article the modulation methods were described in detail, i.e. the Level-Shifted Carrier Modulation Technique and Phase-Shifted Carrier Modulation Technique were used to present the analysis of power losses in multilevel converters.

Keywords: power electronic converters, topology, control, operation, modulation methods, power loss analysis

DOI: 10.7862/re.2020.1

Przesłano do redakcji: listopad 2019 r.

Przyjęto do druku: luty 2021 r.