

STRESZCZENIE

Badanie zastosowania topologii przekształtnika wielopoziomowego typu Hex-Y w aplikacji napędów bezpośrednich niskich częstotliwości.

mgr inż. Paweł Błaszczuk

1. Wstęp

Przekształtniki wielopoziomowe badane są od lat 60 XX wieku [1]. Jedną z odmian niniejszych urządzeń są kaskadowe przekształtniki wielopoziomowe charakteryzujące się wysoką niezawodnością (zapewnianą przez redundantne moduły mocy), wysoką jakością prądów i napięć wyjściowych (zapewnioną przez ilość poziomów napięć) oraz możliwością zastosowania ich w aplikacjach wysokiego oraz średniego napięcia przy użyciu komponentów niskonapięciowych.

Przekształtniki kaskadowe zbudowane są z danej ilości gałęzi - zależnej od topologii. Każda z gałęzi zbudowana jest natomiast z szeregowego połączenia modułów, z których każdy zawiera bank kondensatorów oraz dany układ przełączników. Najczęściej spotykane są moduły zbudowane z półmostka, lub mostka H.

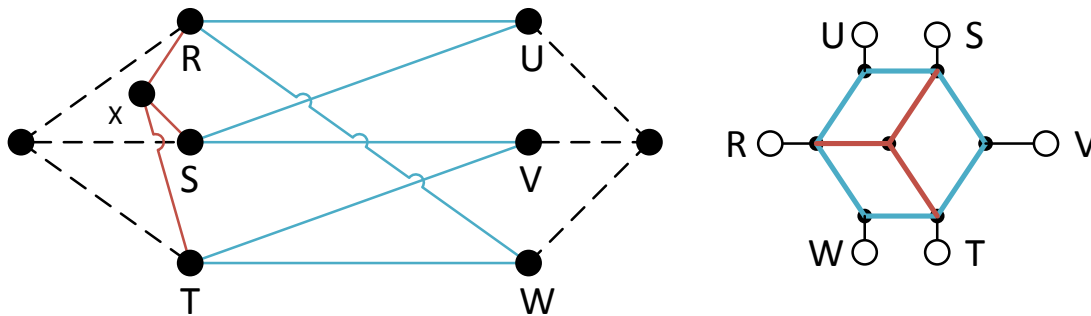
W niniejszej rozprawie zaproponowano nową topologię w rodzinie przekształtników kaskadowych. Topologia ta znajduje zastosowanie w systemach przekształcania energii pomiędzy dwoma obwodami trójfazowymi (3-3). Topologia nazwana Hex-Y i charakteryzuje się dziewięcioma gałęziami, z których trzy tworzą połączenia gwiazdowe, natomiast pozostałe sześć gałęzi łączy naprzemiennie fazy dwóch systemów.

Istniejące topologie, które znajdują zastosowanie w układach 3-3 to: przekształtnik macierzowy (M3C), Hexverter, czy przekształtnik z pośrednim obwodem DC.

Celem pracy jest opis i analiza zaproponowanej topologii, przedstawienie algorytmu sterowania przekształtnika oraz przeprowadzenie badań zarówno danego obwodu jak i analizy porównawczej topologii Hex-Y z topologią M3C.

2. Opis topologii

Topologia Hex-Y składa się z dziewięciu gałęzi. Rysunek 1 przedstawia schemat topologii. Na niebiesko oznaczono sześć gałęzi H - za ich pomocą zbudowane jest naprzemienne połączenie faz dwóch obwodów trójfazowych tworzące połączenie heksagonalne (tzw. Hexverter [2]). Na czerwono oznaczono gałęzie Y tworzące połączenie gwiazdowe pomiędzy fazami jednego z obwodów trójfazowych.



Rysunek 1. Graf topologii przekształtnika Hex-Y

W pracy dokonano analizy obwodu, z której wynika, że obwód posiada 9 wierzchołków oraz 15 gałęzi. Obwód posiada więc 7 niezależnych pętli prądowych (1) [3].

$$n = b - x + 1 = 15 - 9 + 1 = 7 \quad (1)$$

gdzie

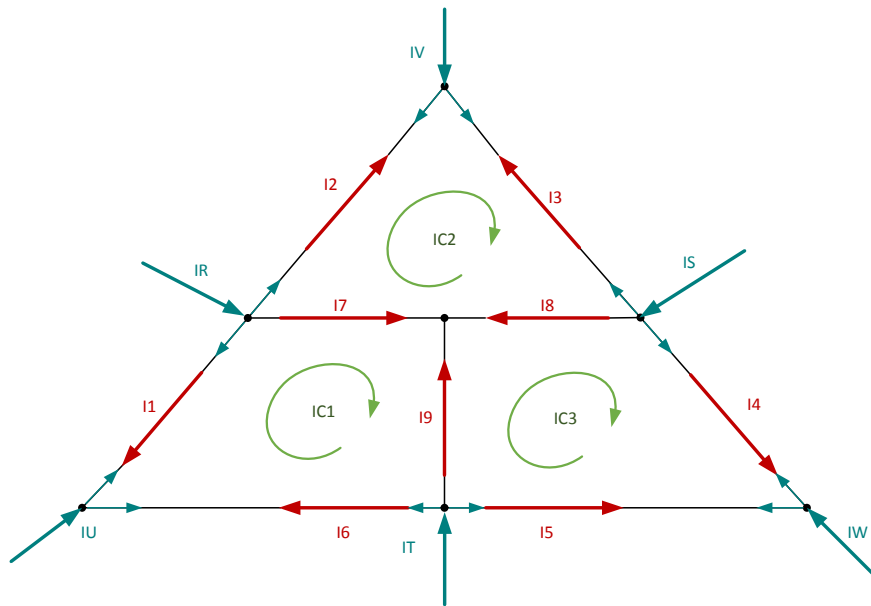
n – liczba niezależnych pętli,

b – liczba krawędzi grafu,

x – liczba wierzchołków grafu.

Do określenia prądów w obwodzie trójfazowym wymagane są dwa niezależne prądy. W związku z tym, zaproponowany obwód posiada $7 - 2 \cdot 2 = 3$ prądy, które nie wpływają na wartości prądów w obwodach wyjściowych. Prądy te nazwane są prądami cyrkulującymi, ponieważ zamykają się w gałęziach przekształtnika. W dalszej części pracy, prądy te zostaną wykorzystane jako stopnie swobody pozwalające na balansowanie przepływu energii pomiędzy poszczególnymi gałęziami przekształtnika. Rysunek 2 przedstawia przyjęte oznaczenia prądów.

Z analizy obwodu wyznaczono również dwa dodatkowe stopnie swobody związane z napięciami. Jest to napięcie punktu gwiazdowego (w części Y przekształtnika) oraz różnica napięcia pomiędzy punktami neutralnymi obwodu wejściowego oraz wyjściowego. To napięcie jednak nie będzie wykorzystywane



Rysunek 2. Przyjęte oznaczenia prądów w obwodzie. Na czerwono oznaczono prądy gałęziowe. Niebiesko oznaczono prądy wyjściowe. Zielono oznaczono prądy cyrkulujące.

do sterowania, lecz zostanie ono regulowane do wartości zero, jako, że w większości aplikacji jest ono niepożądane.

Praca przedstawia sposób przeliczania wartości napięć oraz prądów wyjściowych do wartości napięć i prądów gałęziowych. Przykładowo, dla symetrycznych sinusoidalnych przebiegów o tej samej amplitudzie i różnych częstotliwościach (ω_1, ω_2), oraz przy braku prądów cyrkulujących, prądy w gałęziach są równe (2).

$$\mathbf{i}_b = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos(\omega_2 t) \\ \frac{1}{4} [-\cos(\omega_2 t) + \sqrt{3} \sin(\omega_2 t)] \\ \frac{1}{4} [-\cos(\omega_2 t) + \sqrt{3} \sin(\omega_2 t)] \\ \frac{1}{4} [-\cos(\omega_2 t) - \sqrt{3} \sin(\omega_2 t)] \\ \frac{1}{4} [-\cos(\omega_2 t) - \sqrt{3} \sin(\omega_2 t)] \\ \frac{1}{2} \cos(\omega_2 t) \\ \cos(\omega_1 t) - \frac{1}{4} \cos(\omega_2 t) - \frac{1}{4} \sqrt{3} \sin(\omega_2 t) \\ \frac{1}{2} [-\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) + \sqrt{3} \sin(\omega_1 t)] \\ \frac{1}{4} [-2 \cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_2 t) + \sqrt{3} [-2 \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)]] \end{bmatrix} \quad (2)$$

Przykładowe napięcia wyznaczono przy przyjęciu podobnych założeń: identyczne amplitudy, różne częstotliwości napięć wyjściowych. Dodatkowo przyjęto napięcie punktu gwiazdowego oraz neutralnego wynoszące zero. Równanie (3) opisuje napięcia w poszczególnych gałęziach.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) \\ \frac{1}{2} [-2\cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_2 t) + \sqrt{3}\sin(\omega_2 t)] \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_2 t) - \sqrt{3}(\sin(\omega_1 t) - \sin(\omega_2 t))] \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_2 t) + \sqrt{3}(-\sin(\omega_1 t) - \sin(\omega_2 t))] \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_2 t) + \sqrt{3}(\sin(\omega_1 t) - \sin(\omega_2 t))] \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t) + 2\cos(\omega_2 t) + \sqrt{3}\sin(\omega_1 t)] \\ -\cos(\omega_1 t) \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t) - \sqrt{3}\sin(\omega_1 t)] \\ \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t) + \sqrt{3}\sin(\omega_1 t)] \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. Analiza mocy

Przekształtniki MMC posiadają rozproszony magazyn energii - banki kondensatorów znajdują się w każdym module. Do poprawnej pracy przekształtnika wymagane jest, żeby energie w poszczególnych gałęziach nie różniły się znacząco od siebie.

Znając przebiegi napięć i prądów w gałęziach można obliczyć energię gałęzi w funkcji czasu (4).

$$e_b(t) = \int_0^t p_b \cdot dt + E_{b,0} = \int_0^t v_b \cdot i_b \cdot dt + E_{b,0} \quad (4)$$

gdzie

b – numer gałęzi ($b = 1 \dots 9$),

$E_{b,0}$ – początkowa wartość energii w danej gałęzi,

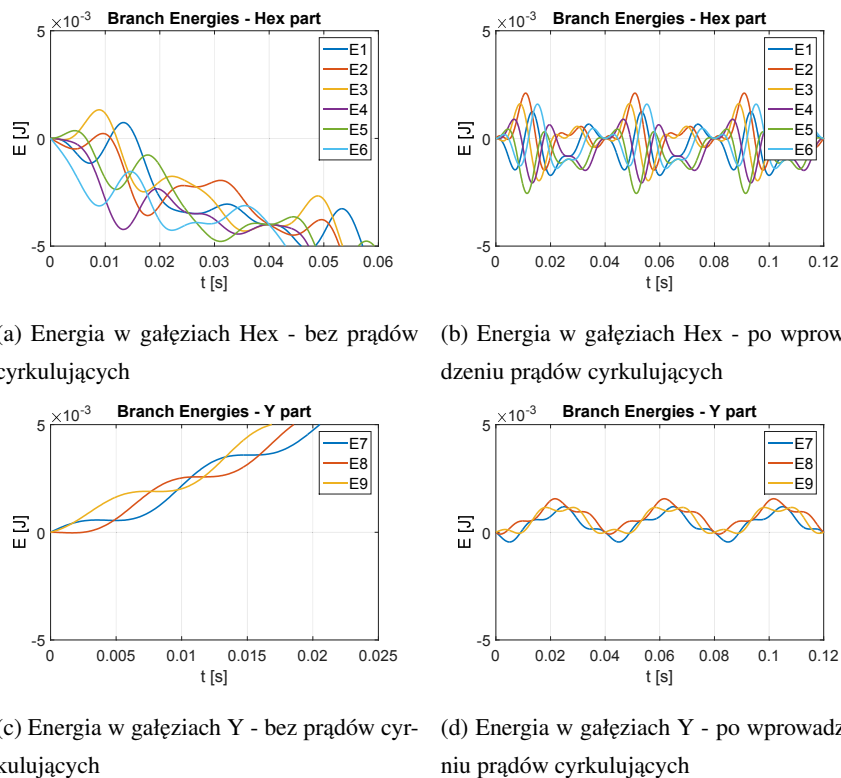
p_b, v_b, i_b – odpowiednio moc, napięcie i prąd w danej gałęzi.

Jeżeli w wyrażeniu pod całką znajdzie się wartość stała, oznacza to, że energia w danej gałęzi będzie dążyć do $\pm\infty$ (w zależności od znaku stałej).

Analizując wartości mocy przy przyjęciu wartości napięć i prądów zdefiniowanych przez równania (2) oraz (3) można zauważyć, że wartości mocy posiadają części stałe. Żeby je wyeliminować, należy wprowadzić niezerowe wartości prądów cyrkulujących oraz napięcia punktu gwiazdowego. Należy zauważyć, że są to wartości wewnętrzne przekształtnika - nie wywierają one wpływu na napięcia i prądy wyjściowe.

W pracy dokonano analizy różnych przebiegów i znaleziono funkcje, które pozwalają na wyeliminowanie komponentów stałych z mocy w każdej z gałęzi. Praca przedstawia sposób obliczania wymaganych wartości dla danych przebiegów.

Wpływ wprowadzenia prądów cyrkulujących na energię w gałęziach przedstawiono na Rysunku 3. Jak widać, po wprowadzeniu odpowiednio dobranych prądów, energie w poszczególnych gałęziach oscylują wokół tej samej wartości.



Rysunek 3. Energie w poszczególnych gałęziach przekształtnika dla przykładowego przebiegu napięć i prądów w systemie.

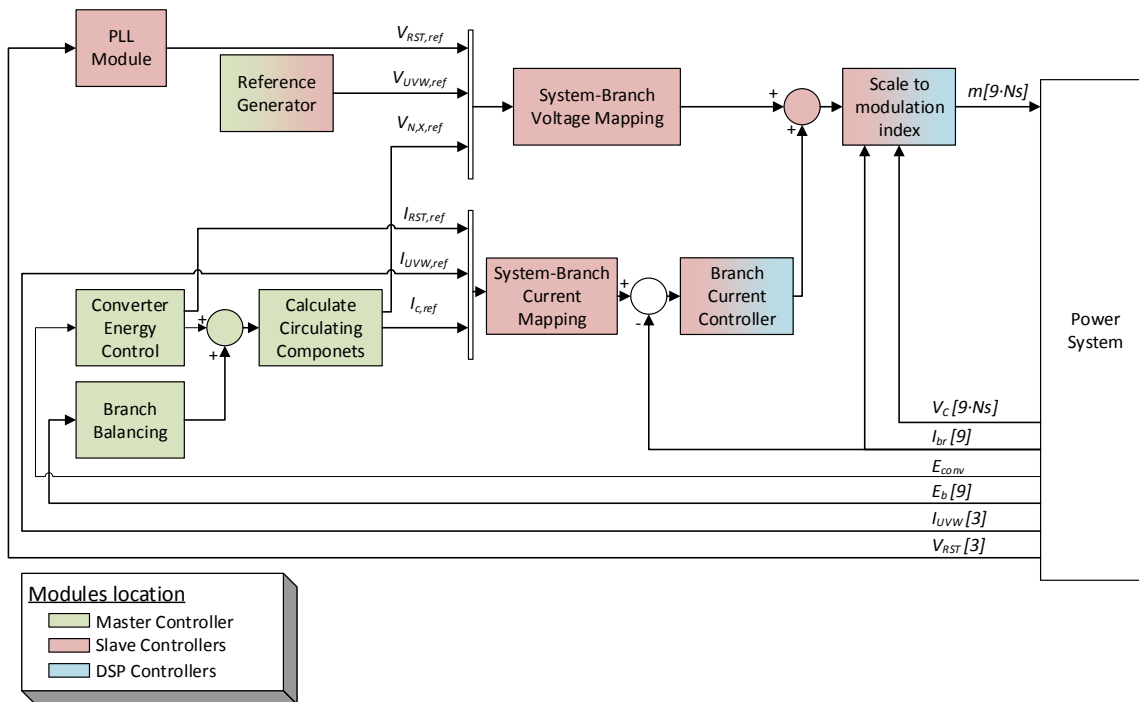
Wadą tego rozwiązania jest niestety zwiększenie strat przekształtnika spowodowane wzrostem wartości prądów gałęziowych.

4. Algorytm sterowania

Algorytm sterowania przedstawiony w pracy został zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink. Jest on również przygotowany do automatycznej generacji kodu na sterownik przemysłowy. Rysunek 4 przedstawia schemat blokowy algorytmu z rozróżnieniem miejsca implementacji danego modułu. Na zielono oznaczono komponenty zaimplementowane w nadrzędnym sterowniku. Na czerwono oznaczono komponenty zaimplementowane w podrzędnych sterownikach. Na niebiesko oznaczono moduły zaimplementowane na procesorach DSP znajdujących się w poszczególnych modułach.

Poszczególne moduły odpowiedzialne są za:

- *PLL Module* jest modułem synchronizacji z siecią zasilającą. Dodatkowo estymuje on aktualną wartość napięcia sieciowego w celu wykrycia zapadu napięcia,
- *Reference Generator* jest modułem odpowiedzialnym za generację wartości zadanych napięć i prądów na wyjściach przekształtnika,



Rysunek 4. Algorytm sterowania przekształtnika Hex-Y.

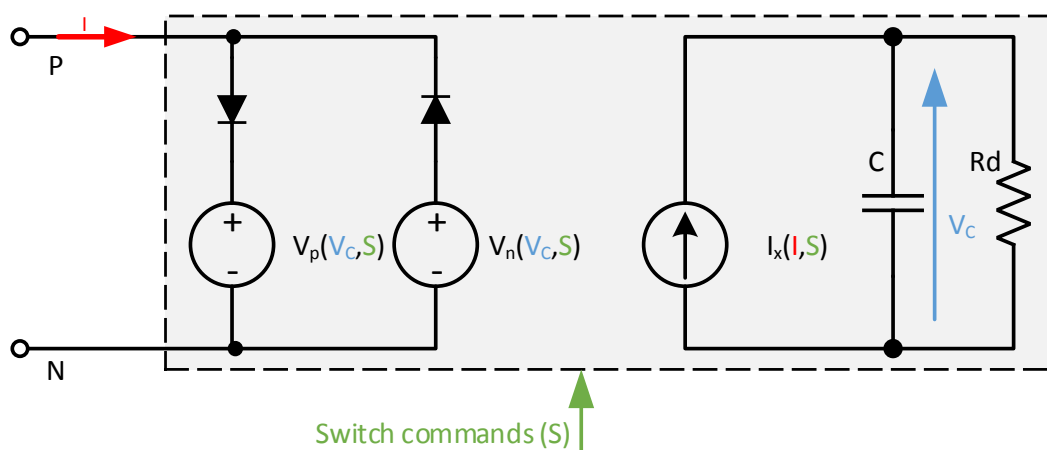
- *Converter Energy Control* jest modulem odpowiedzialnym za bilans mocy w przekształtniku. Steruje on wartością prądu pobieranej z sieci zasilającej w celu zapewnienia wymaganej mocy na wyjściu przekształtnika przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego poziomu energii w rozproszonym zasobniku energii jakim jest sam przekształtnik,
- *Branch Balancing* odpowiada za równomierny podział energii pomiędzy wszystkimi gałęziami przekształtnika,
- *Circulating Current Calculation* odpowiada za obliczenie wartości prądów cyrkulujących, które pozwolą na zadany przepływ mocy pomiędzy gałęziami przekształtnika. Moduł bazuje na wcześniej wyznaczonych wzorach,
- *System-Branch Voltage Mapping* przelicza wartości napięć fazowych na wymagane napięcia gałęziowe przy użyciu wcześniej wyznaczonych równań,
- *System-Branch Current Mapping* przelicza wartości prądów fazowych na wymagane prądy gałęziowe przy użyciu wcześniej wyznaczonych równań,
- *Branch Current Controller* jest modulem odpowiedzialnym za regulację prądu w poszczególnych modulech. Jest on zaimplementowany na dwóch poziomach - część całkowita znajduje się w sterowniku przemysłowym AC 800 PEC, natomiast część proporcjonalna znajduje się na procesorze DSP,

- *Scale to modulation index* odpowiada za przeskalowanie obliczonej wartości zadanej na wymagany indeks modulacji.

5. Badania symulacyjne

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych zbudowano model modułu mocy bazując na [4]. Model rozszerzono budując model uśredniony. Rysunek 5 przedstawia schemat obwodu pojedynczego modułu.

Wartościami wejściowymi do modelu są: prąd I oraz indeks modulacji m . Wartością wyjściową jest napięcie na terminalach $P - N$. Dodatkową wartością mierzalną jest napięcie kondensatora V_C .



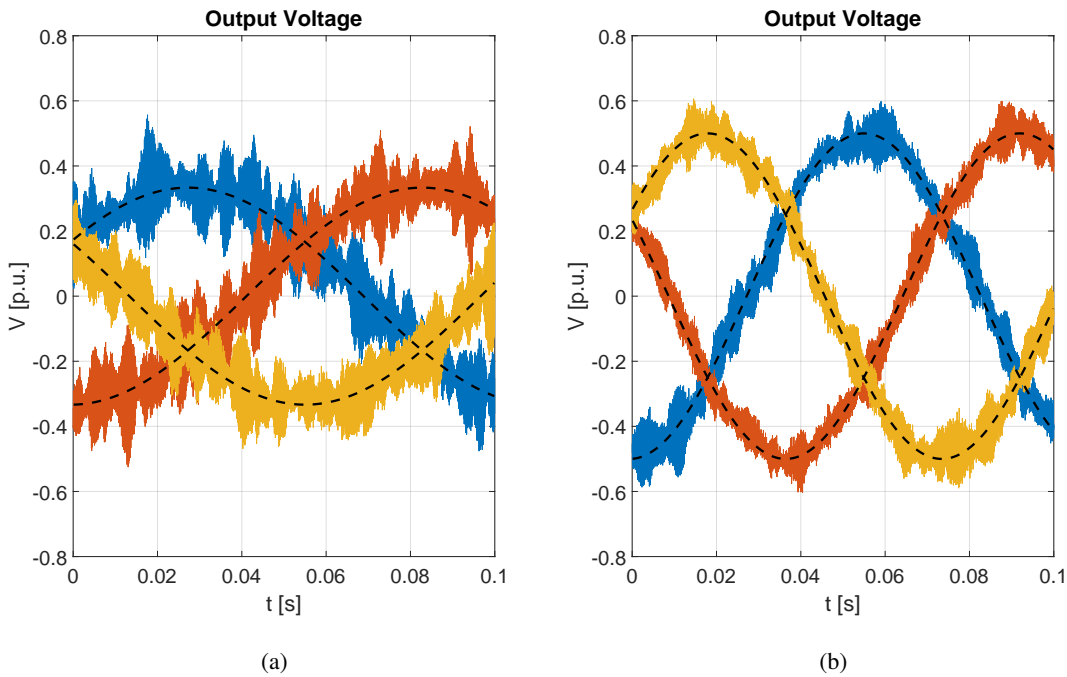
Rysunek 5. Schemat modelu symulacyjnego modułu mocy.

Szeregowe połączenie modułów tworzy gałąź, która jest elementem bazowym użytym w symulacjach.

Ze względu na wysokie moce i napięcia w układzie nie było możliwości budowy prototypu. Ograniczenia zidentyfikowane w symulatorze RTS¹ nie pozwoliły na dokonanie badań. W związku z powyższym szczegółowy model symulacyjny, którego moduły mogą być użyte do generacji kodu C na sterowniki został przygotowany. Model szczegółowy został poddany szczegółowej analizie. Na podstawie doświadczeń z przekształtnikami MMC w innych topologiach, autor jest przekonany, że zakres badań symulacyjnych jest wystarczający, żeby potwierdzić możliwość pracy niniejszego układu sterowania w obiekcie rzeczywistym.

Jako przykładowe wyniki, na Rysunku 6 zamieszczono przebiegi napięć o zadanej amplitudzie i częstotliwości. Z wykresów można wywnioskować, że algorytm sterowania podąża za wartościąadaną.

¹Real-Time Simulator wspiera do sześciu gałęzi jednocześnie.



Rysunek 6. Napięcie wyjściowe 6 Hz (a), 9 Hz (b). Wartości zadane oznaczone są czarną, przerywaną linią

W pracy przeanalizowano zachowanie układu w stanie ustalonym oraz stanach przejściowych. Dodatkowo przeprowadzono badania procesu ładowania oraz możliwość dostarczania mocy biernej przez przekształtnik. Dla każdego z testów poza pomiarem wartości wyjściowych, mierzone były wartości wewnętrzne takie jak napięcia kondensatorów w poszczególnych gałęziach, czy prądy gałęziowe.

5.1. Porównanie z topologią M3C

Zaproponowana topologia Hex-Y została porównana z przekształtnikiem macierzowym, który znajduje zastosowanie w tym samym obszarze (konwersja pomiędzy dwoma układami trójfazowymi) oraz zawiera taką samą ilość gałęzi jak Hex-Y.

Do celów porównania zbudowano uproszczony model symulacyjny zarówno przekształtnika M3C jak i Hex-Y. Oba modele są na tym samym poziomie szczegółowości, żeby porównanie można uznać za miarodajne.

Wyniki symulacji stanu ustalonego przedstawiono w Tabeli 1. Badania przeprowadzono dla obciążenia typu generator/silnik (pierwsze cztery w tabeli) oraz dla obciążenia rezystancyjnego (dwa ostatnie). Badania miały na celu określenie w jakich warunkach dany przekształtnik ma lepszą charakterystykę, tzn. niższe oscylacje napięcia w kondensatorach oraz niższą wartość prądu gałęziowego.

Tabela 1. Wartości oscylacji napięć w kondensatorach oraz wartości prądów gałęziowych dla topologii Hex-Y oraz M3C

Napięcie [kV]	f_2 [Hz]	Hex-Y			M3C		
		$V_{C,rip}$ [%]	$I_{b,RMS}$	$I_{b,max}$	$V_{C,rip}$ [%]	$I_{b,RMS}$	$I_{b,max}$
0	0	0.75	0.021	0.056	0.06	0.004	0.005
1	3	1.08	0.043	0.168	0.25	0.007	0.015
2	6	2.07	0.130	0.338	2.11	0.079	0.159
3	9	3.98	0.432	0.818	12.21	0.267	0.477
2	0	2.16	0.107	0.430	5.31	0.218	0.578
2	3	1.87	0.095	0.300	1.52	0.047	0.110

Podsumowując badania można stwierdzić, że przekształtnik Hex-Y posiada lepszą charakterystykę pracy szczególnie dla niskich częstotliwości przy wymaganych wysokich wartościach prądów. Taką charakterystykę posiadają obciążenia typu walce, wyciągarki, czy generatory synchroniczne pracujące przy niskich częstotliwościach.

Można również zauważyć, że dla wyższych częstotliwości pracy przekształtnik Hex-Y charakteryzuje się dużo niższą wartością oscylacji napięć w kondensatorach. Wartości prądów są jednak dużo wyższe niż dla przekształtnika M3C.

5.2. Dostarczanie mocy biernej

W pracy zbadano również możliwość dostarczania mocy biernej przez przekształtnik. Cecha ta jest wymagana w układach wysokich mocy - w szczególności generatorów energii. Wymóg jest zdefiniowany przez normy prawne w większości państw. W Unii Europejskiej wymóg ten jest zdefiniowany w rozporządzeniu 2016/631 [5].

Zachowanie przekształtnika podczas zapadu napięcia o zadanej głębokości zostało zbadane. Wyniki pokazują, że przekształtnik Hex-Y jest w stanie dostarczać moc bierną przez zadany czas w trakcie trwania zapadu napięcia.

6. Podsumowanie

Praca zawiera szczegółową analizę topologii przekształtnika Hex-Y, która została zaproponowana przez autora. Kluczowe osiągnięcia to:

- przedstawienie nowej topologii przekształtnika MMC,
- zdefiniowanie stopni swobody, które zostaną użyte w algorytmie sterowania,

-
- analiza mocy w gałęziach i odnalezienie takich wartości prądów cyrkulujących, przy których wartości mocy nie posiadają części stałej, w związku z czym napięcia w gałęziach nie dążą do $\pm\infty$,
 - zaproponowanie algorytmu sterowania z użyciem wcześniej wyznaczonych równań pozwalających obliczyć prądy cyrkulujące zapewniające zadany przepływ energii w układzie,
 - budowa modelu symulacyjnego gałęzi,
 - przedstawienie porównania topologii Hex-Y z M3C i znalezienie obszaru, w którym przesłałnik Hex-Y stanowi lepszą alternatywę od przekształtnika macierzowego.

Bibliografia

- [1] M. Malinowski. “Cascaded multilevel converters in recent research and applications”. In: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* 65.5 (2017), pp. 567–578. ISSN: 2300-1917. DOI: 10.1515/bpasts-2017-0062.
- [2] L. Baruschka and A. Mertens. “A new 3-phase direct modular multilevel converter”. In: *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications* 2.2 (2011), pp. 1–10. ISSN: 0095-3997. DOI: 10.1177/0095399703256775.
- [3] S. Bolkowski. *Teoria Obwodów Elektrycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2017.
- [4] W. Li and J. Belanger. “An Equivalent Circuit Method for Modelling and Simulation of Modular Multilevel Converters in Real-Time HIL Test Bench”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 31.5 (2016), pp. 2401–2409. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2541461.
- [5] European Union. “Commission Regulation (EE) 2016/631 establishing a network code on requirements for grid connection of generators”. In: *Official Journal of the European Union* 14 April 2016 (2016), p. 68.