AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW PRZETWARZANIA ENERGII

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ:

NIEIZOLOWANY WIELOPOZIOMOWY PRZEKSZTAŁTNIK MODUŁOWY DC/DC TYPU YY

mgr inż. Krzysztof Kóska

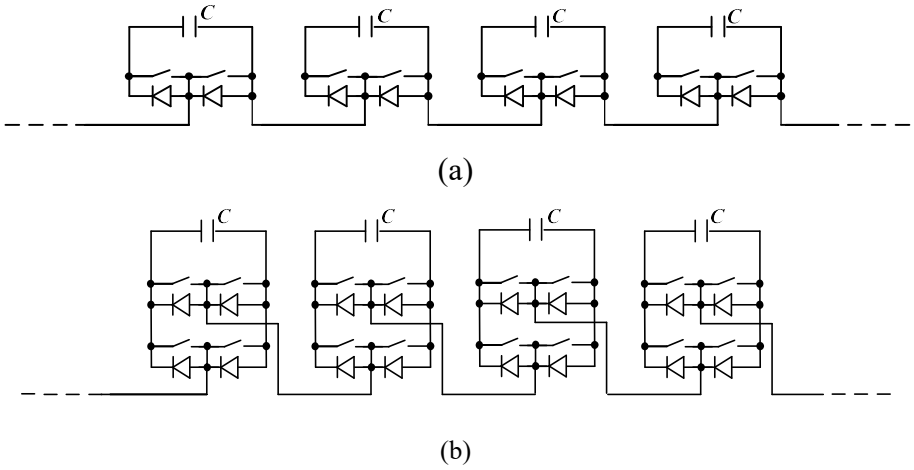
PROMOTOR
Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

Kraków, 2018

1. WPROWADZENIE

Współczesne układy energoelektroniczne przekształcają energię elektryczną w szerokim zakresie mocy, napięć i prądów. Są one wykorzystywane zarówno w urządzeniach małej mocy, zasilanych napięciem rzędu kilku woltów, jak również w systemach przesyłowych prądem stałym, przy napięciach przekraczających kilkaset kilowoltów oraz mocach setek megawatów. Nie będzie nadużyciem stwierdzenie, że znacząca część produkowanej obecnie energii elektrycznej jest przekształcana przez układy energoelektroniczne: na etapie produkcji (energetyka odnawialna), przesyłu energii (systemy HVDC, FACTS) oraz zasilania odbiornika (napędy falownikowe, oświetlenie LED, urządzenia AGD, elektronika użytkowa). Coraz szersze wykorzystanie układów energoelektronicznych jest zapewnione przez nieustanny rozwój technologii łączników półprzewodnikowych, układów sterowania oraz topologii przekształtników.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono analizę działania topologii nieizolowanego wielopoziomowego przekształtnika DC/DC typu YY. Zbadana topologia należy do rodziny wielopoziomowych przekształtników modułowych MMC (*ang. Modular Multilevel Converter*). Składają się one z szeregowo połączonych modułów (komórek) o topologii półmostka lub pełnego mostka (Patrz Rys. 1).



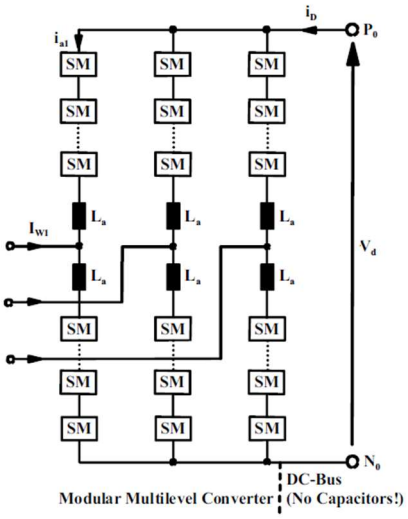
Rys. 1. Gałąź przekształtnika typu MMC składająca się z połączonych szeregowo modułów o topologii półmostka (a) lub pełnego mostka (b).

Topologicznie przekształtniki MMC są zbliżone do izolowanych mostkowych falowników wielopoziomowych IHBI [3]. Główną cechą wyróżniającą jest brak separowanych źródeł, które zasilają obwody pośredniczące poszczególnych komórek. Stabilizację napięć kondensatorów pośredniczących *C* na zadanym poziomie uzyskuje się poprzez odpowiednią kontrolę prądów oraz napięć w przekształtniku.

Typowym dla przekształtników MMC rozwiązaniem jest zasilanie potrzeb własnych komórki za pomocą dodatkowej przetwornicy DC/DC, której źródłem jest napięcie na jej własnym kondensatorze pośredniczącym. Zaletą tego sposobu zasilania jest istotne uproszczenie układu izolacji przekształtnika. Obwody elektryczne modułu znajdują się na tzw. pływającym potencjale, a separacja pomiędzy wejściem, a wyjściem pomocniczego układu zasilającego DC/DC nie musi uwzględniać całkowitego napięcia znamionowego przekształtnika. Teoretycznie, rozwiązanie to znosi ograniczenia, co do maksymalnej liczby modułów połączonych szeregowo, co pozwala wykorzystać przekształtniki MMC w systemach średniego i wysokiego napięcia.

Najbardziej znanym wielopoziomowym przekształtnikiem modułowym jest trójfazowy

falownik MMC (Patrz Rys. 2). Znalazł on zastosowanie w systemach przesyłu energii elektrycznej HVDC. Został on skomercjalizowany przez koncerny energetyczne: SIEMENS „HVDC Plus®” [2], ABB „HVDC-light® Generation 4” [14], ALSTOM „HVDC MaxSine®” [4] oraz C-EPRI „HVDC Flexible®” [13]. Są to urządzenia o mocy setek megawatów, charakteryzujące się ogromną złożonością. W porównaniu do klasycznych systemów przesyłowych HVDC, które wykorzystują przekształtniki tyrystorowe o komutacji sieciowej, linia przesyłowa zasilona falownikiem MMC pracuje przy stałej polaryzacji napięcia, a nie prądu.



Rys. 2. Trójfazowy falownik MMC. SM – moduł typu półmostek [12].

Wielopoziomowe przekształtniki modułowe prądu przemiennego są relatywnie dobrze rozpoznane i przeanalizowane. Można je wykorzystać w układach kompensacji mocy biernej w sieciach średniego napięcia typu STATCOM [9], układach napędowych średniego napięcia [6] oraz w systemach HVDC [11].

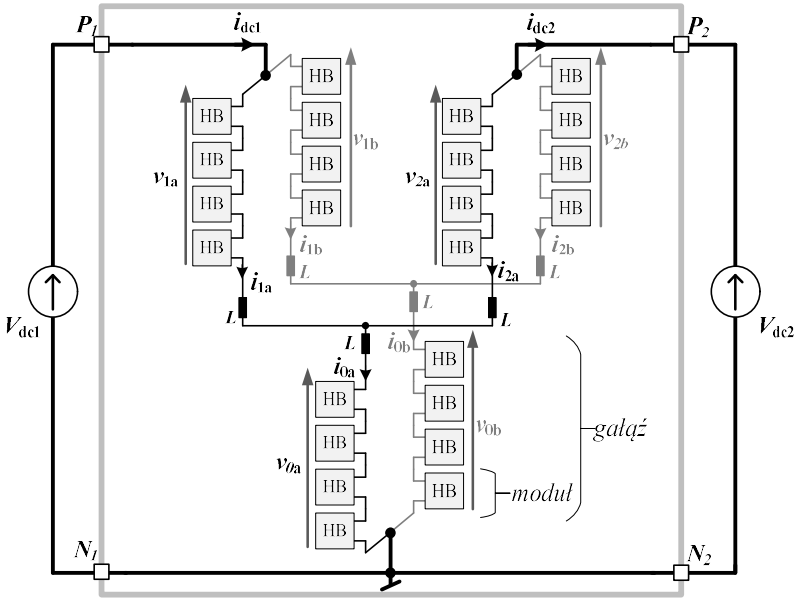
Z drugiej strony, wielopoziomowe przekształtniki modułowe DC/DC stanowią słabo zbadaną grupę topologii. Przyczyną tego stanu rzeczy jest brak równie oczywistych obszarów zastosowań, które wykorzystywałyby największą zaletę topologii MMC, jaką jest skalowalność napięcia roboczego przekształtnika. Stwierdzenie to może stracić na aktualności wraz z planowanym rozwojem systemów przesyłowych prądu stałego HVDC. Współczesne systemy HVDC mają strukturę typu punkt-punkt (*ang. point-to-point*), a ich zadaniem jest przesłanie energii elektrycznej pomiędzy dwoma odległymi miejscami.

Obecnie prowadzone są prace badawcze dotyczące możliwości połączenia pojedynczych linii przesyłowych w sieć prądu stałego, wykorzystując przekształtniki umożliwiające pracę przy stałej polaryzacji napięcia [8], [1]. Wraz z rozbudową systemów przesyłowych HVDC, zaistnieje konieczność bezpośredniego połączenia dwóch linii o różnych wartościach napięcia stałego. Do takiego zadania można wykorzystać topologie MMC DC/DC. W raporcie stowarzyszenia CIGRE [1] przedstawiono wymagania, jakie musiałyby spełniać przekształtniki DC/DC w przyszłych sieciach przesyłowych prądu stałego. Przedmiotem tej rozprawy jest analiza działania wielopoziomowego przekształtnika modułowego DC/DC typu YY. Przekształtnik YY może być wykorzystany do jednej z wymienionych w raporcie [1] aplikacji, tj. połączenia dwóch sieci DC o zbliżonych wartościach napięcia bez zapewnienia separacji galwanicznej.

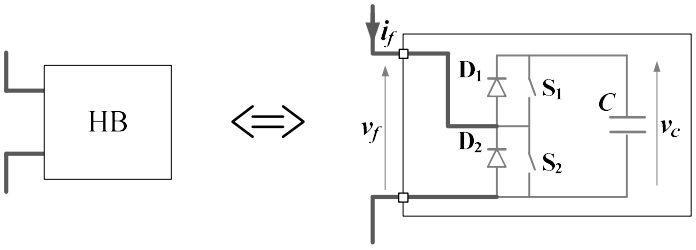
Topologię przekształtnika modułowego typu YY przedstawiono na Rys. 3. Przekształtnik

składa się z sześciu gałęzi: *1a*, *1b*, *2a*, *2b*, *0a*, *0b*. Są one podzielone na dwie grupy: *a* i *b*. Każda grupa, składająca się z trzech gałęzi, jest połączona w kształt litery Y. Każda gałąź przekształtnika zawiera *N* identycznych modułów (komórek) HB połączonych szeregowo z dławikiem gałęziowym o indukcyjności *L*. W rozprawie założono, że przekształtnik zbudowany jest z komórek typu półmostek. Uproszczoną strukturę wewnętrzną pojedynczego modułu przedstawiono na Rys. 4.

Przekształtnik może pracować dwukwadrantowo przy zmianie kierunku prądu. Topologia umożliwia zarówno podwyższanie, jak i obniżanie napięcia stałego o dodatniej polaryzacji. Zarówno wejście (zaciski P_1, N_1) jak i wyjście (zaciski P_2, N_2) przekształtnika mają charakter dynamicznego źródła prądu.



Rys. 3. Topologia przekształtnika modułowego typu YY.



Rys. 4. Uproszczona struktura wewnętrzna pojedynczej komórki HB.

2. CELE BADAWCZE I ICH REALIZACJA

Rozprawa doktorska jest pierwszym dokładnym opracowaniem dotyczącym działania przekształtnika YY. Została ona zaproponowana przez pracowników Korporacyjnego Centrum Badawczego firmy ABB w Krakowie Pawła Klimczaka oraz Pawła Błaszczyka. W publikacji [5], napisanej przy współautorstwie autora tej rozprawy doktorskiej, przedstawiono podstawowe założenia pracy przekształtnika w idealnych warunkach, przy założeniu zerowych strat przekształtnika oraz w otwartym układzie sterowania. Jednakże, przedstawiona analiza nie daje jasnej odpowiedzi czy przekształtnik YY będzie działał w przypadku rzeczywistym, tj. przy występowaniu strat mocy w przekształtniku,

występowaniu nieuniknionych zakłóceń w układzie regulacji, rozrzucie parametrów poszczególnych modułów itp. Dodatkowo nie przeprowadzono analizy dotyczącej maksymalnego współczynnika wzmocnienia przekształtnika oraz nie podano metody rozruchu topologii ze stanu z całkowicie rozładowanymi kondensatorami pośredniczącymi.

Głównym celem badawczym rozprawy doktorskiej było opracowanie układu sterowania dedykowanego dla przekształtnika YY, pracującego w zamkniętej pętli regulacji, który zapewnia jego stabilną pracę przy założonych zmianach obciążenia i napięcia wejściowego. Układ sterujący przekształtnika YY powinien realizować następujące zadania:

- regulować prąd wyjściowy przekształtnika, tak aby nadążał on za wartością zadaną,
- balansować napięcia kondensatorów pośredniczących we wszystkich modułach na zadanym poziomie, równym V_C^*,
- regulować prądy i napięcia we wszystkich gałęziach przekształtnika,
- zapewniać stabilną pracę przy zmianach wartości napięcia wejściowego, prądu obciążenia, zmianie kierunku przesyłania mocy oraz w stanach awaryjnych,
- umożliwiać rozruch przekształtnika ze stanu początkowego z całkowicie rozładowanymi kondensatorami pośredniczącymi w modułach.

Przystępując do badań przyjęto następujące cele badawcze:

1) Określenie warunków balansowania napięć kondensatorów pośredniczących w przekształtniku YY dla zadanego rozrzutu parametrów modułów. Analizę przeprowadzono na przykładzie pojedynczej gałęzi przekształtnika.

2) Opracowanie modelu analitycznego przekształtnika YY. Na jego podstawie określono możliwości regulacyjne topologii oraz wyznaczono warunki pracy, które zapewniają minimalną wartość skuteczną prądów gałęziowych lub minimalną wartość międzyszczytową tętnień kondensatorów pośredniczących w modułach.

3) Opracowanie dedykowanego układu sterowania przekształtnika YY pracującego w zamkniętym układzie regulacji, który oprócz kontroli prądów wejściowego i wyjściowego przekształtnika, zapewni stabilizację napięć kondensatorów pośredniczących na zadanym poziomie.

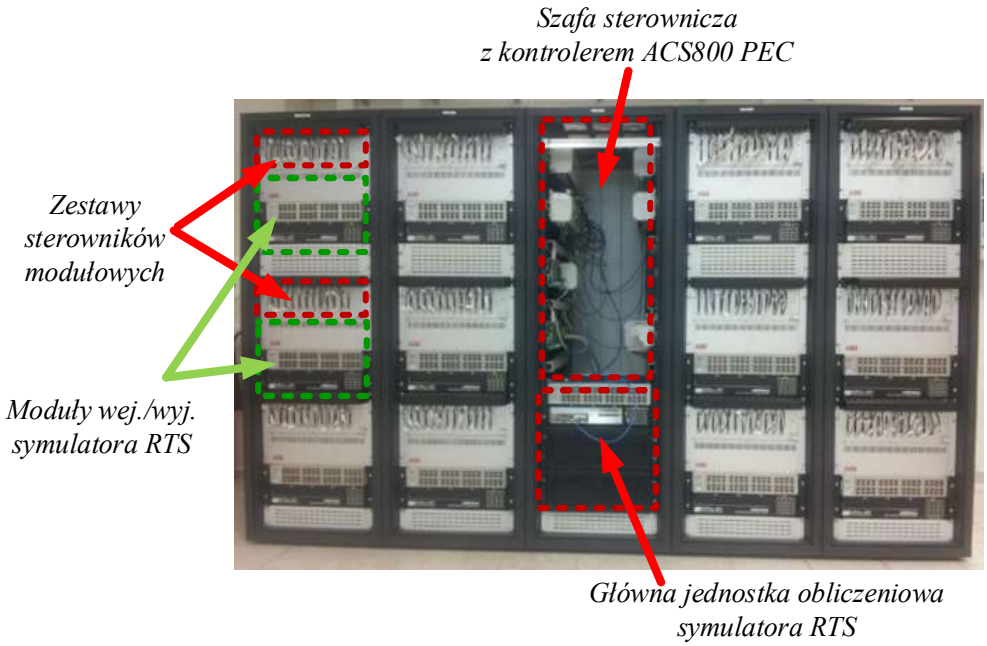
4) Opracowanie procedury rozruchowej przekształtnika przy założeniu, że w stanie początkowym wszystkie kondensatory pośredniczące w modułach są całkowicie rozładowane.

5) Weryfikację symulacyjną działania przekształtnika YY. Przeprowadzono ją za pomocą dwóch metod. Wstępne badania zostały wykonane w środowisku symulacyjnym PLECS®. Ostateczną weryfikację działania układu sterowania przekształtnika YY przeprowadzono za pomocą symulacji typu HIL z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego RTS opartego na systemie OPAL-RT®.

Realizacja demonstratora analizowanego przekształtnika dla aplikacji średniego lub wysokiego napięcia wiązałaby się z ogromnymi nakładami pracy i kosztami. Przekraczają one zakres pojedynczej rozprawy doktorskiej. Alternatywnym sposobem weryfikacji działania analizowanego przekształtnika jest wykonanie modelu w pomniejszonej skali. Wadą tego rozwiązania jest pominięcie większości problemów technicznych, które związane są realizacją przekształtnika średniego i wysokiego napięcia: zapewnienia odpowiednich odstępów izolacyjnych, realizację układu chłodzenia dla poszczególnych modułów, zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej, ograniczenia prądów pojemnościowych związanych z dużymi wartościami pochodnych napięć itp. Zagadnienia te są obszarem

osobnych, szczegółowych badań naukowych związanych z realizacją przekształtników dużych mocy w aplikacjach średniego i wysokiego napięcia.

Z wymienionych względów zdecydowano, aby działanie przekształtnika DC/DC typu YY zostało zweryfikowane za pomocą symulacji typu HIL (*ang. Hardware-in-the-loop*). Głównym założeniem tej metody jest połączenie sprzętowego dedykowanego układu sterującego z modelem symulacyjnym sterowanego obiektu pracującym w czasie rzeczywistym. Weryfikacja działania układów sterownia metodą HIL jest szeroko stosowana zarówno w jednostkach naukowych, jak i w przemyśle [10], [7]. Jej główną zaletą jest możliwość sprawdzenia działania przekształtnika w różnych warunkach pracy z docelowym układem sterującym. Metoda ta zapewnia znaczące skrócenie czasu projektowania oraz redukcję kosztów związanych z pracochłonnymi testami eksperymentalnymi. Weryfikację działania przekształtnika YY przeprowadzono za pomocą układu symulacyjnego udostępnionego przez Korporacyjne Centrum Badawcze ABB w Krakowie (Patrz Rys. 5). Opracowany układ sterowania zaimplementowano w sterowniku przemysłowym ACS800 PEC® współpracującym z zespołem sterowników modułowych opartych na procesorach sygnałowych. Model symulacyjny obwodów mocy badanego przekształtnika został uruchomiony za pomocą symulatora czasu rzeczywistego RTS (*ang. RTS – real time simulator*) zbudowanego w oparciu o komercyjny system OPAL-RT®.



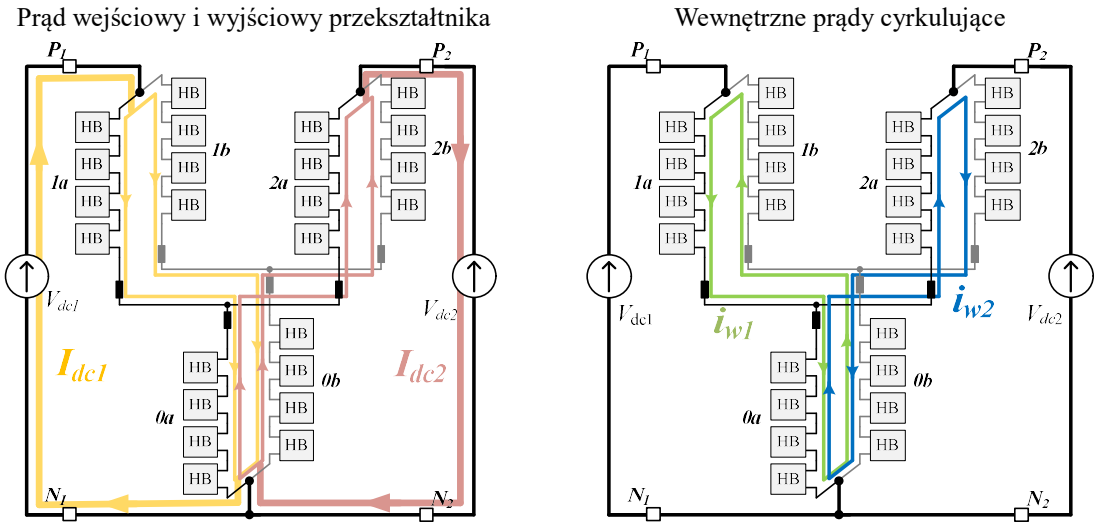
Rys. 5. Zdjęcie systemu symulacyjnego RTS. (Materiały udostępnione przez Korporacyjne Centrum Badawcze ABB w Krakowie).

3. PRZEPROWADZONE BADANIA I ICH WYNIKI

W ramach pracy doktorskiej przebadano działanie topologii wielopoziomowego przekształtnika modułowego DC/DC typu YY. W trakcie pracy zrealizowano wszystkie założone cele badawcze rozprawy.

W rozdziale 1 przedstawiono wprowadzenie do wielopoziomowych przekształtników modułowych. Na podstawie przeglądu literatury sporządzono listę wybranych topologii MMC. Zaletą topologii YY w porównaniu do przedstawionych przekształtników modułowych DC/DC jest mniejsza liczba modułów oraz brak sprzężonych elementów magnetycznych.

W rozdziale 2 przedstawiono podstawowe założenia działania przekształtnika YY. Wartość napięcia kondensatora pośredniczącego C, we wszystkich komórkach jest stabilizowana na zadanym poziomie, poprzez odpowiednie sterowanie wewnętrznymi prądami, które cyrkulują pomiędzy gałęziami przekształtnika oraz wykorzystaniem specjalnej metody balansującej napięcia pośredniczące komórek w poszczególnych gałęziach. Przepływ prądów cyrkulujących w topologii YY jest możliwy, ponieważ gałęzie przekształtnika są połączone w dwie równoległe grupy: a i b. Na Rys. 8 zaznaczono ścieżki przewodzenia dla stałego prądu wejściowego I_{dc1} (żółty) i wyjściowego I_{dc2} (brązowy) oraz wewnętrznych zmiennych prądów cyrkulujących: i_{w1} oraz i_{w2} (zielony, niebieski).



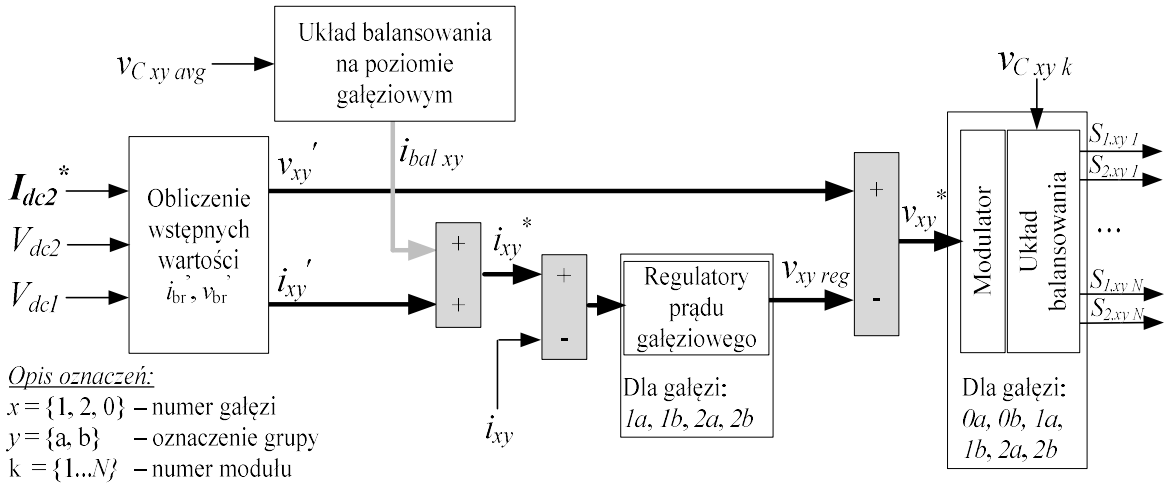
Rys. 6. Obwody przewodzenia prądu wejściowego (I_{dc1} - żółty), wyjściowego (I_{dc2} - brązowy) oraz prądów cyrkulujących (i_{w1} - zielony, i_{w2} - niebieski).

Zadaniem układu sterowania przekształtnika jest utrzymanie napięć kondensatorów pośredniczących w modułach na zadanym poziomie. Dla pojedynczej komórki oznacza to, że moc obciążająca kondensator pośredniczący jest zbilansowana przez moc wyjściową modułu. Balansowanie napięć kondensatorów pośredniczących w gałęziach jest zapewnione przez dwa mechanizmy: wymuszeniu przewodzenia zmiennych prądów cyrkulujących wewnątrz przekształtnika oraz wykorzystaniu redundancji stanów odpowiadających poszczególnym poziomom napięcia wyjściowego pojedynczej gałęzi.

W rozdziale 3 opisano działanie pojedynczej gałęzi przekształtnika YY. Na bazie przeglądu literatury przedstawiono wybrane dwie metody modulacji napięcia gałęziowego: NLM i PWM. Następnie określono warunki regulacji napięć kondensatorów pośredniczących, które podzielone są na dwa poziomy: balansowania gałęziowego i modułowego. Przedstawiono również układ sterowania prądu gałęziowego oraz przeanalizowano wpływ opóźnień w torze regulacji na stabilność układu. Przeprowadzona analiza została zweryfikowana symulacyjnie w programie PLECS®. Wyniki badań symulacyjnych zostały zamieszczone i opisane w rozdziale 4. Przygotowany model symulacyjny zawierał obwód elektryczny składający się z pojedynczej gałęzi połączonej równolegle z idealnym źródłem napięcia. W modelu uwzględniono rozrzut parametrów pomiędzy poszczególnymi modułami. Umożliwiło to sprawdzenie działania układu balansowania oraz porównanie modulatorów NLM i PWM w warunkach nieidealnych. Modulator NLM zapewnia znacznie lepszą stabilizację napięć kondensatorów pośredniczących w porównaniu do modulacji PWM. Niestety zaleta ta jest okupiona jest zmienną częstotliwością łączeń w modułach i zwiększonymi stratami. W dalszych

badaniach założono, że w przekształtniku YY wykorzystywana będzie modulacji typu PWM.

W rozdziale 5, po wprowadzeniu dotyczącym działania pojedynczej gałęzi, przedstawiono schemat blokowy układu sterowania dla całego przekształtnika YY (Rys 3.). Wyszczególniono w nim wymagane przez układ sterowania sygnały pomiarowe oraz określono tryb pracy poszczególnych gałęzi. Założono, że w zamkniętej pętli regulacji prądu pracują wyłącznie gałęzie *1a*, *1b*, *2a*, *2b* przekształtnika. Do prawidłowego działania wymagane są pomiary napięć kondensatorów pośredniczących we wszystkich modułach przekształtnika pomiary prądów gałęzi *1a*, *1b*, *2a*, *2b* oraz pomiar napięcia wejściowego V_{dc1} i wyjściowego V_{dc2}.



Rys. 7. Schemat blokowy układu sterowania przekształtnika YY

W rozdziale 6 został przedstawiony model analityczny przekształtnika YY przy założeniu braku strat mocy. W rozdziale zawarto wyprowadzenie zależności opisujących przebiegi prądów i napięć gałęziowych, które zapewniają zerową moc czynną każdej gałęzi w topologii. Przy założeniu braku strat i braku rozrzutu parametrów pomiędzy modułami, warunek ten jest wystarczający do balansowania napięć kondensatorów pośredniczących w komórkach. Następnie określono możliwości regulacyjne przekształtnika. Topologia YY umożliwia zarówno podwyższanie jak i obniżanie napięcia wejściowego. Ze względu na dużą wartość międzyszczytową prądów cyrkulujących oraz tętnienia napięć kondensatorów pośredniczących, maksymalny użyteczny współczynnik wzmocnienia napięcia przekształtnika YY nie może być większy od dwóch. Najmniejsze wartości prądów cyrkulujących występują, gdy iloraz napięcia wejściowego i wyjściowego przekształtnika są zbliżone do jedności. W takich punktach pracy prądy gałęzi *0a*, *0b* są znacząco mniejsze od pozostałych gałęzi, ponieważ są one proporcjonalne do różnicy prądów wejściowego i wyjściowego przekształtnika.

W celu optymalizacji przekształtnika YY przeanalizowano wpływ kształtu przebiegów napięć i prądów gałęziowych na wartości skuteczne prądów oraz na tętnienia napięć kondensatorów pośredniczących. Częstotliwość prądów cyrkulujących w przekształtniku powinna być jak największa, aby redukcji wymaganej wartości pojemności kondensatorów pośredniczących. Wartość maksymalnej częstotliwości jest ograniczona przez pasmo przenoszenia układu kontroli prądów gałęziowych, która jest zdeterminowana przez opóźnienia występujące w torze regulacji. Teoretycznie najlepszym wyborem jest wymuszenie prostokątnych przebiegów dla prądów cyrkulujących i zmiennych napięć

gałęziowych. Ze względu na ograniczenia rzeczywistego urządzenia nie jest to realizowalne fizycznie. Z tego powodu założono, aby funkcje opisujące kształt przebiegów zmiennych prądów i napięć w przekształtniku zawierały pierwszą i trzecią harmoniczną. Wartości amplitud poszczególnych harmonicznych zostały dobrane w celu redukcji wartości skutecznych prądów gałęziowych.

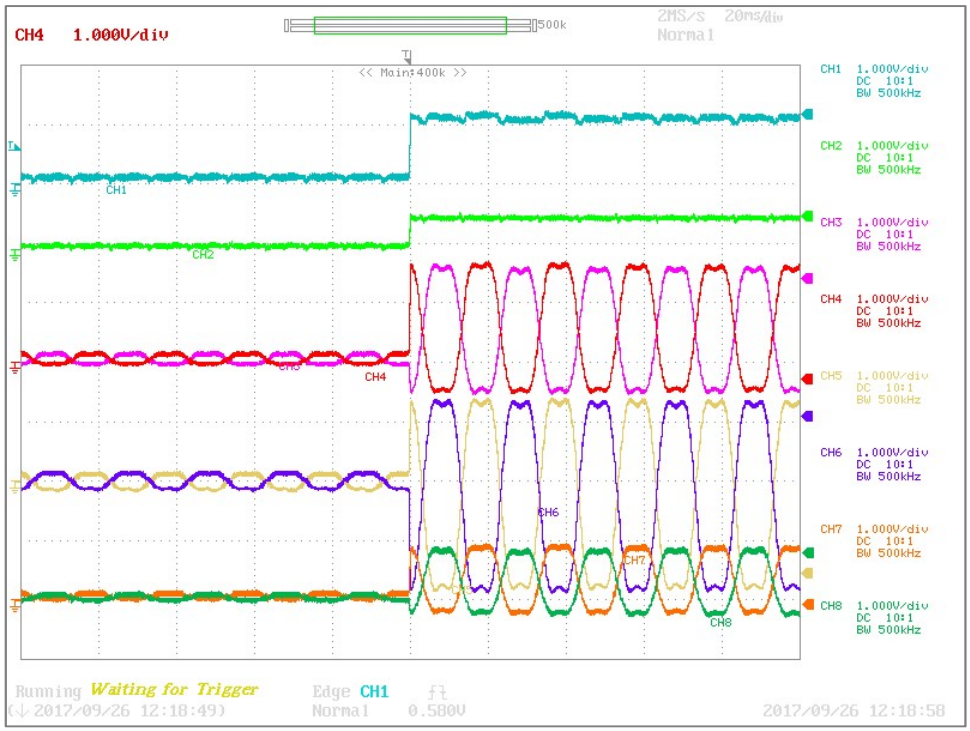
Dodatkowo w rozdziale 6 przeanalizowano wpływ indukcyjności dławików gałęziowych na tętnienia prądów związanych z modulacją napięcia. Wyprowadzono zależność na wartość indukcyjności w funkcji założonej wartości współczynnika tętnień prądów gałęziowych.

W rozdziale 7 przedstawiono układ balansowania mocy gałęzi przekształtnika YY. Analitycznie przebadano dwa warianty działania układu. W pierwszym wariancie, założono, że balansowanie mocy gałęzi zapewnione będzie przez równoczesną kontrolę prądów i napięć gałęziowych przekształtnika. W drugim wariancie założono, że moc gałęzi regulowana będzie wyłącznie poprzez wpływ na zadane przebiegi prądów gałęziowych. Wadą pierwszej metody jest brak możliwości balansowania układu przy braku obciążenia i dla małych wartości współczynnika wzmocnienia napięcia przekształtnika. Natomiast druga metoda umożliwia balansowanie mocy we wszystkich dopuszczalnych punktach pracy przekształtnika, ale zakłada, że prąd wejściowy przekształtnika i_{dc1} może zawierać składową zmienną o względnie niskiej wartości międzyszczytowej.

Ostatecznie założono, że opracowany układ balansowania wykorzystuje drugi wariant pracy. Regulacja mocy gałęzi zapewniona jest przez wymuszenie dodatkowych prądów gałęziowych w przekształtniku. Prądy te zostały rozłożone na sześć niezależnych liniowo składników. Następnie, na podstawie analizy wartości czynnych mocy chwilowych gałęzi, wyprowadzono zależności pomiędzy mocą wyjściową poszczególnych gałęzi, a wartościami prądów balansujących. Układ balansowania działa w zamkniętej pętli regulacji na podstawie pomiaru wartości uchybu pomiędzy wartością średnią napięć kondensatorów pośredniczących w gałęzi, a wartością zadaną V_C^*.

W rozdziale 8 opisano proces rozruchu przekształtnika YY ze stanu początkowego z całkowicie rozładowanymi kondensatorami pośredniczącymi. Jest on podzielony na kilka etapów, w trakcie których ładowane kondensatory pośredniczące w poszczególnych gałęziach przekształtnika YY. W trakcie pasywnego ładowania kondensatorów pośredniczących wykorzystywany jest dodatkowy rezystor rozruchowy ograniczający prąd wejściowy przekształtnika.

W rozdziale 9 przedstawiono badania symulacyjne działania przekształtnika YY. Model symulacyjny przykładowego przekształtnika YY został opracowany na podstawie zależności wyprowadzonych w rozdziałach 6-7. Model symulacyjny uwzględniał rozrzut parametrów pomiędzy modułami. Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły prawidłowe działanie przekształtnika i balansowanie napięć kondensatorów pośredniczących dla wybranych punktów pracy oraz zmian prądu obciążenia, napięcia wejściowego i wyjściowego. Wartości zarejestrowanych przebiegów prądów i napięć przekształtnika YY w obu typach symulacji były zgodne z przeprowadzoną analizą matematyczną. Przykładowe przebiegi prądów wyjściowych i_{dc1}, i_{dc2} oraz prądów gałęziowych otrzymane za pomocą symulacji typu HIL przedstawiono na Rys. 8. Ilustrują one działanie przekształtnika dla skokowej zmiany prądu obciążenia ($I_{dc2}^* = 0 \rightarrow 50$ A, $V_{dc1} = 2{,}5$ kV, $V_{dc2} = 5$ kV). Prądy gałęziowe zawierają zarówno składową stałą jak i zmienną okresową, której źródłem są wewnętrzne prądy cyrkulujące w przekształtniku YY.



Rys. 8. Wyniki badań symulacyjnych HIL – przebiegi prądów wyjściowych oraz gałęziowych przekształtnika YY dla skokowej zmiany prądu obciążenia: $I_{dc2}^{*} = 0 \rightarrow 50$ A. $V_{dc1} = 2{,}5$ kV, $V_{dc2} = 5$ kV.
CH1: i_{c1}, CH2: i_{dc2}, CH3: i_{1a}, CH4: i_{1b}, CH5: i_{2a}, CH6: i_{2b}, CH7: i_{0a}, CH8: i_{0b} .
Podziałka: 100A/div (100A/1V), 20ms/div

Podsumowując, do najbardziej istotnych i oryginalnych osiągnięć przeprowadzonych prac badawczych należy zaliczyć:

1. Opracowanie modelu analitycznego przekształtnika MMC DC/DC typu YY oraz wyznaczenie warunków pracy dla minimalizacji wartości skutecznych prądów w gałęziach lub wartości szczytowej tętnień napięć kondensatorów pośredniczących w modułach.
2. Opracowanie stabilnego układu sterowania przekształtnika MMC DC/DC typu YY z uwzględnieniem rozrzutu parametrów pomiędzy gałęziami układu.
3. Opracowanie procedury rozruchowej przekształtnika MMC DC/DC typu YY.
4. Zaproponowanie metody projektowania badanego układu.
5. Przeprowadzenie weryfikacji symulacyjnej działania przekształtnika MMC DC/DC typu YY za pomocą symulatora czasu rzeczywistego RTS oraz programu symulacyjnego PLECS®.

4. DALSZE KIERUNKI BADAŃ

Rozprawa doktorska jest pierwszym opracowaniem dotyczącym wielopoziomowego przekształtnika modułowego DC/DC typu YY. Poruszono w niej jedynie wybrane, podstawowe zagadnienia dotyczące jego działania. Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazano kierunki dalszych badań nad tą topologią. Są to:

1. Analiza działania przekształtnika YY wykazała, że wymaga on względnie dużych wartości pojemności kondensatorów pośredniczących w modułach, szczególnie w przypadku dużej różnicy pomiędzy napięciem wejściowym i wyjściowym

przekształtnika. Dalsze studia nad tą topologią powinny się skupić nad opracowaniem metod redukcji wymaganej wartości pojemności w modułach.

2. W przedstawionej rozprawie doktorskiej skupiono się głównie na opracowaniu układu sterowania przekształtnika YY, pomijając kwestie aplikacyjne. Ciekawym tematem badawczym jest określenie jego użyteczności dla konkretnych zastosowań w potencjalnych przyszłych sieciach prądu stałego MVDC lub HVDC.

Przekształtnik YY jest ciekawym rozwiązaniem umożliwiającym bezpośrednie przetwarzanie średniego lub wysokiego napięcia stałego. Ze względu na swoje własności (brak izolacji galwanicznej, dwukierunkowe przetwarzanie energii, ograniczona wartość współczynnika wzmocnienia napięcia) można go nazwać stałoprądowym odpowiednikiem autotransformatora.

WYBRANA LITERATURA

[1] Barker C. D., et al. „Requirements of DC-DC converters to facilitate large DC grids", CIGRE, SC B4 HVDC and Power Electronics, 2012.

[2] Davies M., et al., „HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation" Siemens Energy Sector, 2008.

[3] Hammond P. W., „A new approach to enhance power quality for medium voltage AC drives" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 1, pp. 202-208, 1997.

[4] Kirby N., „ALSTOM Grid HVDC Tres Amigas and VSC Technology" Alstom, 2011.

[5] Klimczak P., Blaszczyk P., Jez R. and Koska K., „Double wye Modular Multilevel Converter - direct DC-DC topology," 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), pp. 1-6, Glasgow, 2016

[6] Kolb J., Kammerer F., Gommeringer M. and Braun M., „Cascaded Control System of the Modular Multilevel Converter for Feeding Variable-Speed Drives" in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 1, pp. 349-357, Jan. 2015.

[7] Leonard J., Hadidi R. and Fox J. C., „Real-time modeling of multi-level megawatt class power converters for Hardware-In-the-Loop testing" International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies, pp. 566-571, 2015.

[8] Páez J. D., et al. „DC-DC Converters for HVDC Grids: A Survey", International Conference on Components and Systems do DC Grids 14-Grenoble, 2017.

[9] Pereira M., Retzmann D., Lottes J., Wiesinger M. and Wong G., „SVC PLUS: An MMC STATCOM for network and grid access applications" 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, 2011

[10] Piróg S., Stala R., Stawiarski Ł., „Power electronic converter for photovoltaic systems with the use of FPGA-based real-time modeling of single phase grid-connected systems", Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 57, No. 4, 2009.

[11] Saeedifard M. and Iravani R., "Dynamic Performance of a Modular Multilevel Back-to-Back HVDC System," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2903-2912, Oct. 2010.

[12] Silke A., Hamerski R., Marquardt R., „New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission" Power Electronics Specialists Conference PESC, 2008.

[13] Nota techniczna „HVDC Flexible” C-EPRI Electric Power Engineering, State Grid Smart Grid Research Insitute Co.,Ltd, 2017.

[14] Nota techniczna „HVDC Light® It’s time to connect” ABB Id No: POW-0038, 2013.