

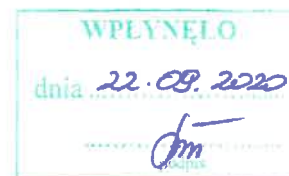
dr hab. inż. Arkadiusz Lewicki, prof. uczelni

Gdańsk, 05.09.2020

Politechnika Gdańska,

Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk



Recenzja rozprawy doktorskiej

przygotowana dla

Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Tytuł oryginalny rozprawy:

„Hex-Y – a modular multilevel converter topology. Feasibility study for direct-drive low frequency application”

tytuł w języku polskim **“Badanie możliwości zastosowania topologii przekształtnika wielopoziomowego typu Hex-Y w aplikacjach napędów bezpośrednich niskich częstotliwości”**

Autor rozprawy: **Paweł Błaszczuk**

1. Wstęp i aktualność tematyki

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Błaszczuka została przygotowana w języku angielskim, obejmuje 206 stron wraz ze spisem literatury i załącznikami i jest poświęcona zagadnieniom przetwarzania energii elektrycznej w bezpośrednich przekształtnikach wielopoziomowych AC/AC. Przekształtniki takie są budowane z modułów zawierających mostek energoelektroniczny z kondensatorem (w pracy wykorzystano mostek w pełni sterowalny). Topologia przekształtnika nie zawiera wydzielonego obwodu pośredniczącego DC łączącego część prostownikową oraz falownikową przekształtnika. Magazyny energii w postaci kondensatorów modułów mostkowych wraz z tranzystorami tych modułów pełnią rolę układów kształtujących przebiegi prądów i napięć wyjściowych przekształtnika. W zaprezentowanym rozwiązaniu moduły mostkowe mogą sprzęgać dwie sieci zasilające lub jedną sieć i obciążenie. Topologia przekształtnika opiera się o konstrukcję matrycowych przekształtników wielopoziomowych M3C o zredukowanej liczbie gałęzi, w których ograniczono możliwość „bezpośredniego” przekazywania energii pomiędzy dowolnymi fazami zasilania i obciążenia. Modyfikacja ta tworzy nową grupę wielopoziomowych przekształtników modułowych, które w literaturze anglojęzycznej nazywane są Hexverterami.

Rozwiązanie zaprezentowane w rozprawie dotyczy koncepcji wprowadzenia dodatkowego obwodu (wspomniana w tytule rozprawy topologia gwiazdowa „Y”), którego zadaniem jest wspomaganie sterowaniem rozkładem napięcia na kondensatorach falownika typu Hexverter (co w wielu wypadkach jest warunkiem koniecznym poprawnej pracy takiego przekształtnika). Nazwa Hex-Y obejmuje więc przekształtnik „Hexverter” z dodatkowym obwodem w postaci w pełni sterowanych mostków H połączonych w gwiazdę (Y), umożliwiającym sterowanie rozkładem napięcia na kondensatorach przekształtnika. Wspomniany przekształtnik należy do grupy falowników

wielopoziomowych – poszczególne jego gałęzie (zarówno części „Hex” jak i „Y” tworzą połączone szeregowo mostki H).

Tematyka omawiana w rozprawie jest aktualna, interesująca i ważna z punktu widzenia przemysłu. Falowniki wielopoziomowe są bardzo często wykorzystywane w aplikacjach (głównie) średnich i dużych mocy w zakresie średnich, ale również niskich napięć. Napięcia wyjściowe przekształtnika wielopoziomowego są większe od napięć blokowania łączników energoelektronicznych. Ciągły rozwój energoelektroniki zwiększa co prawda dostępność modułów tranzystorowych o coraz wyższych parametrach wyjściowych (napięcia blokowania i przewożone prądy) jednakże ich zastosowanie w topologii przekształtnika wiąże się z koniecznością ograniczania częstotliwości przełączania tranzystorów z uwagi na straty – co w efekcie podnosi koszty filtracji wyższych harmonicznych. Falowniki wielopoziomowe dają możliwość kształtowania napięcia wyjściowego zbliżonego do sinusoidy, co ogranicza wymagania dotyczące parametrów i jednocześnie koszt filtracji. W przypadku falowników modułowych dodatkową korzyścią jest zwiększona niezawodność, uzyskana dzięki możliwości kontynuacji pracy w przypadku awarii. W takim przypadku niektóre z mostków falownika mogą zostać wyłączone (pracują w trybie „by-pass”) nie biorąc udziału w kształtowaniu napięć wyjściowych.

Jak wspomniano wyżej, przekształtniki wielopoziomowe znajdują również zastosowanie w aplikacjach niskich napięć. W takim przypadku w konstrukcji przekształtnika stosuje się tańsze tranzystory o niższych napięciach blokowania, zaś kształt napięcia wyjściowego zbliżony do sinusoidy umożliwia konstruowanie przekształtników wielopoziomowych będących realną konkurencją cenową dla przekształtników dwupoziomowych z filtrem. Mnogość zastosowań przekształtników wielopoziomowych powoduje, że tematyka rozprawy jest aktualna i dotyczy ważnego obszaru elektrotechniki. Pewien niedosyt budzi jednak brak uzasadnienia wyboru topologii bazowej przekształtnika (Hexvertera) – analizując literaturę techniczną można odnieść wrażenie, że chętniej i częściej wykorzystywane są falowniki w topologii mostkowej z wydzielonym obwodem pośredniczącym (jak przekształtniki NPC) czy przekształtniki kaskadowe (CHB).

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa została podzielona na 10 rozdziałów. We wstępie Autor nie podaje w sposób jasny tezy pracy, ale określa jej cel jako zaprezentowanie i analizę nowej topologii wielopoziomowego przekształtnika modułowego MMC (ang. Modular Multilevel Cascade converter). Przedstawione rozwiązanie bazuje na idei znanych z literatury Hexverterów. Ten typ przekształtników jest spokrewniony z przekształtnikami M3C (wielopoziomowy modułowy przekształtnik matrycowy) w których liczba gałęzi została zredukowana o 3. Autor proponuje jednak, aby do topologii przekształtnika typu HEX wprowadzić dodatkowe 3 gałęzie połączone w gwiazdę i przyłączone do jego zacisków wyjściowych. W ten sposób uzyskuje się bezpośredni przekształtnik kaskadowy o nowej topologii oraz liczbie gałęzi (jak i modułów mostkowych) równej liczbie gałęzi (liczbie modułów mostkowych) przekształtnika M3C. Można więc uznać, że zaproponowane rozwiązanie wypełnia lukę pomiędzy topologiami wielopoziomowych kaskadowych przekształtników typu Hexverter (zaproponowane rozwiązanie jest rozszerzeniem tej topologii) oraz wielopoziomowych kaskadowych przekształtników matrycowych (z uwagi na identyczną liczbę gałęzi).

W rozdziale 2 Autor dokonuje przeglądu znanych topologii kaskadowych falowników wielopoziomowych. Jako uzasadnienie rosnącej popularności przekształtników tego typu podaje ich modułowość – co obniża koszty masowej produkcji, redundancję – możliwość kontynuacji pracy w przypadku awarii modułu mostkowego i niski koszt jego wymiany, jak również wysoką jakość napięcia

Ł. A.

wyjściowego (o kształcie zbliżonym do sinusoidy). Ostatnia z tych cech charakteryzuje wszystkie typy falowników wielopoziomowych, natomiast modułowość jest cechą charakterystyczną również innych topologii przekształtników. Pewien niedosyt budzi więc brak uzasadnienia wyboru topologii bazowej, opartej na strukturze przekształtników matrycowych. Autor odnosi się natomiast do ograniczonych możliwości pracy bezpośrednich przekształtników AC/AC w zakresie niskich częstotliwości – co wiąże się z koniecznością przewymiarowania tych przekształtników. Zaproponowane rozwiązanie rozszerza zakres pracy przekształtników typu Hexverter, jednakże ograniczenia te w mniejszym stopniu dotyczą przekształtników innych typów. Niestety w pracy nie wskazano, w jaki sposób wprowadzenie dodatkowych gałęzi połączonych w gwiazdę do topologii Hexavertera ogranicza konieczność jego przewymiarowania.

Rozdział drugi poświęcono również omówieniu typów celek (mostków oraz półmostków) jak również opisowi modułów energoelektronicznych „Power Electronics Building Blocks” firmy ABB zawierających dwa pełne mostki wraz z kondensatorami. Moduł ten jest konfigurowalny – mostki mogą być połączone szeregowo lub równolegle. Również w dalszych częściach pracy Autor odnosi się do rozwiązań firmy ABB. Jest to swego rodzaju pułapka, w którą Autor wpadł, gdyż w części opisującej wyniki badań zabrakło informacji o sposobie konfiguracji modułów mostkowych (celki połączone równolegle czy szeregowo), również nie sprecyzowano czy to te właśnie moduły są wykorzystane w dalszej analizie. W jednej z tabel podano tylko parametry pojedynczego mostka wchodzącego w skład modułu, bez deklaracji wykorzystanej podczas badań konfiguracji modułu.

W rozdziale drugim opisano również podstawowe topologie przekształtników bezpośrednich i pośrednich. Autor odniósł się do pośrednich przekształtników MMC, bezpośrednich przekształtników matrycowych M3C i Hexverterów, wskazując sposób mapowania napięć i prądów sieciowych do poszczególnych gałęzi przekształtnika. Metoda ta została również wykorzystana do analizy zaproponowanej w rozprawie topologii przekształtnika Hex-Y, szerzej opisanej w rozdziale 3 rozprawy.

Rozdział 3 zawiera szczegółową analizę pracy nowej topologii falownika. Autor pokazuje sposób wyliczenia prądów i napięć poszczególnych gałęzi. Wskazuje, że prąd płynący wewnątrz pętli falownika (circulating current) może zostać wykorzystany do sterowania napięciami na kondensatorach poszczególnych celek oraz, że prąd ten nie ma bezpośredniego wpływu na wartości prądów i napięć wyjściowych. Liczba obwodów prądów „wewnętrznych” (circulating currents) jest zgodna z liczbą pętli utworzonych przez gałęzie przekształtnika, co w przypadku układu Hex-Y daje możliwość sterowania prądami w 3 pętlach (a nie jak ma to miejsce w przypadku Hexavertera – 1 pętli). Właściwość ta jest wykorzystana do sterowania falownikiem bezpośrednim, zwłaszcza podczas formowania napięć o bardzo niskiej bądź zerowej częstotliwości podstawowej harmonicznej.

W rozdziale 4 przeprowadzono analizę energii mocy i energii poszczególnych gałęzi przekształtnika Hex-Y. Autor wykazał, że w przypadku zerowej wartości prądu „wewnętrznego” przebiegi mocy poszczególnych gałęzi zawierają składową stałą – co powoduje, że energia zgromadzona w poszczególnych gałęziach dąży do nieskończoności. Z przedstawionej analizy wynika, że sytuacja taka może wystąpić w przypadku zerowej częstotliwości napięcia zasilającego, zerowej wartości napięcia formowanego jak również w przypadku identycznych częstotliwości obu tych napięć. Autor wyjaśnił, że aby problem ten nie występował, konieczna jest wymiana energii pomiędzy gałęziami Hexavertera a dodatkowym obwodem gwiazdowym w konfiguracji Hex-Y. Rozdziały 4.2-4.7 dotyczą analizy zachowania przekształtnika dla normalnego punktu w pracy, w którym zarówno częstotliwość napięcia zasilającego jak i częstotliwość napięcia wyjściowego jest różna od zera, oraz dla specyficznych punktów pracy, w których częstotliwości te są identyczne oraz częstotliwość napięcia wyjściowego jest zerowa. Dla normalnego punktu pracy autor dokonał analizy możliwości stabilizacji rozkładu mocy w poszczególnych gałęziach w przypadku kształtowania wyłącznie składowej stałej prądu

wewnętrznego, poprzez kształtowanie dodatkowej składowej zmiennej o częstotliwości równej częstotliwości napięcia zasilającego jak również poprzez wprowadzenie dodatkowych częstotliwości prądu wewnętrznego różnej od częstotliwości prądu zasilania i obciążenia. Jak wykazano w pracy – wartości składowej stałej oraz amplituda składowej zmiennej o częstotliwości różnej od częstotliwości sieci zasilającej są równe zeru. Składowa stała jest niezerowa podczas ładowania magazynów energii falownika. W przypadku gdy formowane jest napięcie wyjściowe o zerowej częstotliwości (przekształtnik pełni rolę prostownika) stabilizacja rozkładu mocy/energii w poszczególnych gałęziach następuje poprzez wykorzystanie prądu wewnętrznego zawierającego również składową o częstotliwości różnej od częstotliwości napięcia zasilania. W rezultacie wskazano, że prąd wewnętrzny (circulating current) powinien zawierać składową stałą, składową o częstotliwości zasilania oraz składową o częstotliwości różnej od częstotliwości prądów wejściowych/wyjściowych przekształtnika, zaś udział poszczególnych składowych w procesie stabilizacji pracy przekształtnika zależy od jego trybu pracy. Analiza przedstawiona w pracy jest istotna z punktu widzenia określenia możliwości pracy przekształtnika (stabilizacji rozkładu energii zgromadzonej w poszczególnych jego gałęziach) dla wszystkich możliwych trybów pracy. Nie odniesiono się jednak do możliwości pracy przekształtnika w trybie falownikowym, gdy częstotliwość napięcia zasilającego jest równa zeru.

Rozdział 5 obejmuje przedstawienie sposobu sterowania przekształtnikiem Hex-Y. W rozdziale tym Autor przedstawia konfigurację sprzętową sterownika, a właściwie zespołu sterowników, gdyż przekształtnik Hex-Y (jak większość przekształtników kaskadowych) jest sterowany w strukturze hierarchicznej. Oznacza to, że algorytmy sterowania są fizycznie realizowane przez różne procesory, z różną częstotliwością wywołania algorytmów oraz konieczne jest zapewnienie odpowiedni szybkiej wymiany informacji pomiędzy kolejnymi warstwami sprzętowymi sterownika. Rozdział ten nie ma może wielkiej wartości naukowej, niemniej jednak stanowi cenna wskazówkę dla osób rozpoczynających prace konstrukcyjne nad falownikami kaskadowymi, niekoniecznie o strukturze pokazanej w rozprawie. Z punktu widzenia samej rozprawy – rozdział mógłby być skrócony bez utraty jej wartości naukowej. Rozdział 5 zawiera również schematy blokowe poszczególnych fragmentów układu sterowania. Zabrakło co prawda prezentacji całego schematu blokowego układu sterowania na pojedynczym rysunku, jednakże nie stanowi to wady pracy, a co więcej – zwiększa jej czytelność. Rozdział ten jest powiązany z przeprowadzoną ze wcześniejszym rozdziałem analizą prądu wewnętrznego (circulating current) przekształtnika, umożliwiającą sterowanie rozkładem energii na kondensatorach. Prąd ten jest wyznaczony zgodnie z zależnościami przedstawionymi w rozdziale 4.

Cały algorytm sterowania jest realizowany w mikroprocesorze, wydaje się więc, że możliwe jest uproszczenie zaprezentowanych schematów (a tym samym sterowań) – jak w przypadku schematu przedstawionego na rysunku 5.12, gdzie wejściem do regulatora PI jest różnica wartości energii referencyjnej i zmierzonej (na podstawie energii zgromadzonej w kondensatorach), zaś wyjściem jest moc. Wydaje się, że znając częstotliwość wywoływania algorytmu sterowania, wspomniana moc można wyznaczyć dzieląc energię przez czas – w tym przypadku czas związany z częstotliwością próbkowania tych zmiennych.

Do balansowania rozkładu energii na szeregowo połączonych modułach (celkach) energoelektronicznych wykorzystano metodę, w której zmieniane są wartości współczynników wypełnienia dla pary tranzystorów mostka H. Wartość współczynnika wypełnienia poszczególnych mostków wyznaczana jest jako iloczyn odchyłki napięcia danego mostka od średniej wartości napięć na kondensatorach oraz zmiennej zależnej od kierunku prądu. Iloczyn tych dwóch wartości pomnożony przez wzmocnienie regulatora P (rys 5.2) służy do zmian wartości współczynników wypełnienia. Metoda ta jest dość chętnie wykorzystywana do balansowania napięć na kondensatorach falowników kaskadowych i daje praktycznie identyczne napięcia w obwodach pośredniczących. Jednakże należy

ŁWA

zauważyć, że w efekcie jej działania wartości wszystkich współczynników wypełnienia nie osiągają wartości skrajnych (w których mostek pracuje z jednostkową wartością współczynnika wypełnienia i jego kondensator jest przeładowywany w całym okresie impulsowania oraz w których prąd przekształtnika nie płynie przez kondensator mostka (zerowa wartość współczynnika wypełnienia)). Stany te – pomimo pozornie większych fluktuacji napięcia na kondensatorach falownika – dają możliwość ograniczenia strat energii związanych z komutowaniem tranzystorów. Samą fluktuację napięcia można w prosty sposób zredukować – poprzez cykliczną zmianę mostków które będą pracowały z jednostkowym i zerowym współczynnikiem wypełnienia.

W rozdziale 5 Autor porusza również problematykę sterowania prądem gałęzi. Przedstawia topologię układu sterowania z której wynika konieczność różniczkowania wartości prądu. Rezygnuje z tej operacji uzasadniając to, że pętla „feed-forward” wprowadzi dodatkowe zakłócenia. Jest to podejście „inżynierskie” – dość często stosowane w praktyce.

Rozdział 6 pracy obejmuje opis przyjętego modelu symulacyjnego. Modelując przekształtnik (a właściwie jego celki) Autor zastosował uproszczenie polegające na przyjęciu źródeł napięcia i prądu sterowanych za pomocą współczynników wypełnienia. Wartości współczynników wypełnienia pomnożone przez wartość napięcia na kondensatorze umożliwiają wyliczenia napięć dołączanych do obwodu przekształtnika, zaś wartości współczynników wypełnienia pomnożone przez wartość prądu gałęzi umożliwiają wyznaczenie prądu przeładowującego kondensatory. Zastosowanie tego uproszczenia jest w pełni uzasadnione – znacznie redukuje czas realizacji symulacji układu, zaś uzyskane wyniki w pełni odpowiadają wynikom pozyskanym z badań eksperymentalnych (co potwierdza wiele publikacji dotyczących sterowania falownikami kaskadowymi). Dodatkowo – dokładność tak uzyskanych wyników jest wyższa niż w przypadku symulacji wykorzystujących modulację szerokości impulsów – gdzie – z uwagi na niepoprawnie dobrany krok całkowania – może dojść do destabilizacji układu symulacyjnego przekształtnika i niekontrolowanych zmiany napięć na jego kondensatorach, co z kolei nie ma miejsca podczas pracy w warunkach rzeczywistych. Tym samym dobór metody symulacji jest w pełni uzasadniony i uzyskane wyniki odzwierciedlają, a właściwie powinny odzwierciedlać wyniki uzyskane podczas badań eksperymentalnych.

„Powinny odzwierciedlać”, gdyż w pracy nie przedstawiono wyników badań eksperymentalnych. Autor argumentuje to tym że przekształtniki MMC są budowane w zakresie dużych mocy, dla których nie ma możliwości przeprowadzenia testów rzeczywistych. Jednakże w wielu publikacjach pokazywane są wyniki przekształtników pracujących ze zredukowaną mocą, z ograniczoną wartością napięcia zasilającego, zaś sama implementacja algorytmu sterowania i konieczność „zmierzenia się” z warunkami rzeczywistymi stawia kolejne, konieczne do rozwiązania problemy. Z kolei symulacja zawiera wyłącznie te stany, które zostały przewidziane jej scenariuszem. Nie oznacza to jednak, że wyniki przedstawione w pracy są bezwartościowe. Autor skorzystał z systemu czasu rzeczywistego, w którym zamodelował działanie przekształtnika w aplikacji zawierającej turbinę wiatrową napędzającą generator PMSM oraz wspomniany przekształtnik, który za pośrednictwem transformatora oddaje energię do sieci średniego napięcia, co opisano w rozdziale 7. Należy przyznać, że przetestowanie całej tej aplikacji w warunkach rzeczywistych byłoby trudne, a zastosowanie systemu czasu rzeczywistego dało możliwość sprawdzenia działania rozwiązania w warunkach nieosiągalnych w laboratorium. Przedstawione wyniki badań pokazują stabilne działanie rozwiązania podczas różnych scenariuszy testowych. Przebiegi napięć pokazują, że tranzystory przekształtnika (w modelu Real Time) są przełączane. Nie ma natomiast informacji o opóźnieniach w czasie załączania tranzystorów (opóźnienia wprowadzane przez sterowniki bramkowe, czasy martwe i inne), rezystancjach rozładowczych kondensatorów. Autor odnosi się do publikacji, gdzie innego rodzaju przekształtnika uzyskano zbliżone wyniki z modelu Real-time i wyniki badań eksperymentalnych. Tym samym uzasadnia celowość

K.A.

zamiany badań na układzie rzeczywistym na badania modelowe, chociaż – zdaniem niżej podpisanego – zamieszczenie przebiegów uzyskanych z modelu eksperymentalnego w skali $1/n$ (n jest dowolne) – dałoby szansę zmierzenia się z innymi – niepisywanymi w pracy problemami (jak problem nierównomiernego rozładowania kondensatorów obwodu DC w przypadku przestoju przekształtnika, przy zerowej wartości mocy biernej i czynnej. Należy jednak uznać, że przedstawione wyniki badań dowodzą poprawnego działania przekształtnika, zaś wspomniany przypadek może (ale nie musi – w pracy tego nie pokazano) zostać ograniczony za pomocą prąd wewnętrzny (circulating current), lub cyklicznego ładowania/rozładowywania wszystkich kondensatorów falownika).

Rozdział 8 zawiera wyniki porównania przekształtnika Hex-Y z przekształtnikiem matrycowym M3C. Wybór przekształtnika, z którym dokonano porównania, jest uzasadniony. Przekształtnik Hex-Y stanowi rozszerzenie Hexvertera, do którego topologii wprowadzono dodatkowy obwód gwiazdowy. Ograniczenia przekształtnika Hexverter są opisywane w literaturze technicznej oraz niwelowane poprzez zaproponowaną w rozprawie zmianę topologii. Zmiana ta wymaga wprowadzenia do topologii dodatkowych mostków H, w efekcie liczbę mostków H w topologii przekształtnika Hex-Y i M3C jest jednakowa. Zmiana topologii (z M3C na Hex-Y) umożliwia uzyskanie mniejszych fluktuacji napięcia na kondensatorach, niestety jest to okupione większą wartością prądów gałęziowych (a więc i stratami), co słusznie zauważono w podsumowaniu pracy. Dynamika przekształtnika o zaproponowane w pracy topologii jest lepsza niż dynamika przekształtnika matrycowego zbudowanego z tych samych elementów. Należy więc uznać, że zaproponowane rozwiązanie jest interesującą alternatywą dla wielopoziomowych przekształtników matrycowych.

Od kilku lat od farm wiatrowych wymaga się własności określanej jako LVRT (Low Voltage Ride Through), co oznacza brak wyłączania farmy przy bliskich zwarcia, w trakcie których napięcie w punkcie przyłączenia spada do wartości bliskiej zeru. Rozdział 9 pracy obejmuje analizę pracy przekształtnika z siecią zasilającą w takim właśnie przypadku. Przedstawione symulacje pokazują, że przekształtnik ma możliwość dostarczania mocy biernej, napięcie na kondensatorach poszczególnych gałęzi nie przekracza 1.2 p.u.

W rozdziale 10 pracy zawarto jej podsumowanie.

3. Uwagi ogólne

Przedłożona do oceny rozprawa tworzy logiczną i wewnętrznie spójną całość. Jednakże podczas przygotowywania recenzji rozprawy nasuwają się ogólne i dyskusyjne uwagi, które częściowo zostały wymienione w opisie zakresu i ogólnej charakterystyki rozprawy, wśród których można wskazać:

1. W pracy nie uzasadniono wyboru topologii bazowej przekształtnika (Hexvertera) – analizując literaturę techniczną można odnieść wrażenie, że chętniej i częściej wykorzystywane są falowniki w topologii mostkowej z wydzielonym obwodem pośredniczącym (NPC) czy falowniki kaskadowe (CHB). Wyniki badań przedstawione w rozdziałach 7 i 9 sugerują, że Autor widzi zastosowanie przekształtnika w energetyce wiatrowej, jednakże nie zostało to w sposób jawny wskazane w rozprawie. Przedstawione wyniki badań symulacyjnych obejmują model elektrowni wiatrowej z transformatorem. Brak transformatora wymusza przewymiarowanie przekształtnika – jak podano na str 148 rozprawy. Dodatkowo, w wielu rozwiązaniach konieczne jest użycie separacji galwanicznej za pomocą transformatora – co jest wymuszone przez odbiorców rozwiązania jak również przez przepisy. Znane są rozwiązania falowników kaskadowych z transformatorem wysokiej częstotliwości (które są mniejsze i tańsze od tych 50 Hz). Celowe byłoby uzasadnienie wyboru topologii bazowej przekształtnika oraz wskazanie aplikacji, w której jego zastosowanie przyniosłoby największe korzyści.

2. W pracy (w rozdziałach opisujących badania symulacyjne oraz z wykorzystaniem Real Time) nie podano parametrów zamodelowanego przekształtnika (ani też nie wskazano jakie parametry przekształtnika zostały w symulacji uwzględnione (jak różne wartości rezystancji rozładowującej kondensatory, różne wartości rezystorów bramkowych (co przekłada się na szybkość przełączania tranzystorów). Autor w początkowych rozdziałach pracy odnosi się do modułów energoelektronicznych firmy ABB, które mają możliwość rekonfiguracji (mostki są połączone szeregowo lub równolegle). Nie podano jaką konfigurację wykorzystano do testów.
3. Wydaje się, że możliwe jest uproszczenie układu sterowania przedstawionego na rysunku 5.12, gdzie wejściem do regulatora PI jest różnica wartości energii referencyjnej i zmierzonej (na podstawie energii zgromadzonej w kondensatorach), zaś wyjściem jest moc. Znając częstotliwość wywoływania algorytmu sterowania, wspomniana moc można wyznaczyć dzieląc energię przez czas.
4. Nie jest uzasadniony sposób balansowania kondensatorów połączonych szeregowo mostków, który pokazano na rysunku 5.20. Wydaje się, że zmiana sposobu sterowania (wymuszanie jednostkowych wartości współczynnika wypełnienia dla kolejnych mostków poza ostatnim) powinno dać możliwość zmniejszenia strat komutacyjnych w falowniku.
5. Na rysunku 5.15 Autor odnosi się do zależności z której wyznacza tzw circulating current. Analiza przedstawiona w rozdziale 4 odnosi się do prądu o konkretnym kształcie (składowa stała, składowa o częstotliwości napięcia zasilającego, składowa o wielokrotności tejż częstotliwości). Nie wyjaśniono, w jaki sposób z punktu widzenia algorytmu sterowania identyfikowana jest konieczność użycia poszczególnych składowych prądu do sterowania energią zgromadzoną w kondensatorach falownika oraz jak należy dobierać poszczególne częstotliwości prądu balansującego.
6. Wyjaśnienia wymaga w jaki sposób zachowa się przekształtnik w przypadku znacznej zawartości wyższych harmonicznych w sieci zasilającej?, czy konieczna jest zmiana kształtu prądu „circulating current”?
7. W rozprawie Autor nie odniósł się do możliwości pracy falownikowej przekształtnika (tryb DC/AC). Czy tak praca wymaga zmiany sposobu sterowania prądem „circulating current”?
8. W rozdziale 2 Autor odnosi się do ograniczonych możliwości pracy bezpośrednich przekształtników AC/AC w zakresie niskich częstotliwości – co wiąże się z koniecznością przewymiarowania tych przekształtników. W pracy nie wskazano, w jaki sposób wprowadzenie dodatkowych gałęzi Y do topologii Hexawertera wpływa na ograniczenie konieczności jego przewymiarowania.
9. Podczas przestoju falownika (zerowa moc bierna i czynna) w falownikach kaskadowych pojawia się problem nierównomiernego rozładowania kondensatorów obwodu DC. W jakiś sposób problem ten można rozwiązać w zaproponowanym przekształtniku

Należy podkreślić, że powyższe uwagi i pytania, w żaden sposób nie umniejszają pozytywnej wartości merytorycznej rozprawy. Zaproponowane w niej rozwiązanie jest interesującą koncepcją

przekształtnika wielopoziomowego, zaś powyższe uwagi wynikają wyłącznie z braku zamieszczenia stosownych informacji w samej rozprawie.

4. Uwagi szczegółowe

Redakcja rozprawy doktorskiej jest staranna, zaś Autor stara się w sposób klarowny pisać o dość skomplikowanych zjawiskach. W pracy występuje stosunkowo niewiele pomyłek edytorskich – Recenzentowi udało się odnaleźć 2 pomyłki w numeracji odnośników do tabel. Biorąc pod uwagę objętość pracy jest to bardzo mała liczba. Największą wadą pracy jest formatowanie rysunków. Do opisów osi wykorzystano czcionkę różnej wielkości – nie byłoby to zauważalne, gdyby czcionka ta była czytelna. Przykładowo – rysunek 9.4 – opisy osi wykonane czcionką o szacunkowej wielkości 6 punktów, rys 8.18 – wielkość czcionki wynosi ok. 5 punktów (można to uznać za granicę „czytelności”, zaś rys 8.16 – wielkość 2-3punktu.

5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia rozważania na temat nowej topologii wielopoziomowych kaskadowych przekształtników bezpośrednich. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością przedstawianych problemów. W rozprawie przedstawił cykl badawczy – od analizy matematycznej, poprzez badania symulacyjne do badań z wykorzystaniem modelu real-time. Pewien niedosyt budzi brak wyników badań eksperymentalnych, jednakże zakres przeprowadzonych badań z wykorzystaniem modelu real-time w pełni rekompensuje ten niedostatek. Dodatkowo należy wspomnieć, że przedstawiono wyniki testów rozwiązania w warunkach quasi-rzeczywistych w aplikacji przemysłowej (elektrownia wiatrowa) – co byłoby trudne bądź niemożliwe do uzyskania w warunkach laboratoryjnych. Dodatkowo przeprowadzono szereg testów warunkujących implementację rozwiązania w rzeczywistych aplikacjach przemysłowych. Tym samym można uznać, że brak wyników badań na układzie rzeczywistym w żaden sposób nie ujemnie wartości recenzowanej rozprawy.

Za osiągnięcia własne Autora rozprawy uznaje:

- ✓ Rozszerzenie topologii przekształtnika typu Hexverter o dodatkowe gałęzie umożliwiające sterowanie rozkładem napięcia na kondensatorach falownika również w specyficznych punktach pracy – jak podczas pracy prostownikowej;
- ✓ Przeprowadzenie analizy dotyczącej doboru prądów balansujących rozkład napięć na kondensatorach przekształtnika;
- ✓ Zaproponowanie układu sterowania przekształtnikiem;
- ✓ Przeprowadzenie testów symulacyjnych oraz szerokiego zakresu testów z wykorzystaniem modelu czasu rzeczywistego,
- ✓ Porównanie nowej topologii przekształtnika z przekształtnikiem matrycowym M3C wraz ze obiektywną analizą właściwości obu przekształtników.

6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Błaszczyka pt. „**Hex-Y – a modular multilevel converter topology. Feasibility study for direct-drive low frequency application**” zawiera istotne wartości naukowe związane z problematyką konstrukcji i sterowania bezpośrednimi kaskadowymi przekształtnikami wielopoziomowymi. Zaproponowana w rozprawie modyfikacja przekształtnika typu

Hexverter tworzy przekształtnik o nowej topologii i właściwościach. Przedstawiona analiza pracy przekształtnika, zaprezentowane wyniki badań (również z uwzględnieniem specyfiki sieci zasilających) oraz obiektywna analiza porównawcza zaproponowanego rozwiązania z przekształtnikiem zbudowanym z tej samej liczby mostków świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta i wysokim poziomie merytorycznym rozprawy.

Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 13 ust 1 Ustawy o stopniach i tytule naukowym. Rozprawa może być dopuszczona do publicznej obrony i stanowić podstawę nadania mgr inż. Pawłowi Błaszczkowi stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika.

Arkadiusz Lewicki

