

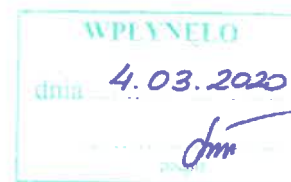
dr hab. inż. Arkadiusz Lewicki, prof. uczelni

Gdańsk, 01.03.2020

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 rozprawy: „**Energoelektroniczne rezonansowe przekształtniki mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach podwyższające napięcie**”

Autor rozprawy: **Adam KAWA**

1. Wstęp i aktualność tematyki

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Adama Kawy zatytułowana „Energoelektroniczne rezonansowe przekształtniki mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach podwyższające napięcie” obejmuje 181 stron i jest poświęcona zagadnieniom przetwarzania energii elektrycznej w niezolowanych przekształtnikach DC-DC typu „boost”. Przekształtniki tego typu – dotychczas wykorzystywane w układach elektronicznych – coraz częściej znajdują zastosowanie w aplikacjach energoelektronicznych. Recenzowana praca przedstawia możliwości zastosowania układów rezonansowych do podnoszenia napięcia wyjściowego w przekształtnikach energoelektronicznych, cechujących się znacznie większymi wartościami przetwarzanej energii niż ich odpowiedniki stosowane w aplikacjach elektronicznych. Zwiększenie wartości przetwarzanych napięć i prądów wymaga uwzględnienia zjawisk, które w technice elektronicznej mogą zostać pominięte.

Przetwornice napięcia stałego wykorzystują zasadę sekwencyjnego przekazywania energii elektrycznej z wejścia na wyjście, dokonując jednocześnie jej konwersji poprzez zmianę (zwiększenie lub zmniejszenie) wartości napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego. Rozwiązania, które są omawiane w recenzowanej rozprawie obejmują swoim zakresem beztransformatorowe przetwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem tzw. przełączanych kondensatorów. Pojęcie kondensatorów przełączanych (powszechnie używane, chociaż nie oddające specyfiki wykorzystywanych zjawisk) obejmuje kondensatory cyklicznie dołączane do poszczególnych komórek przekształtnika za pomocą łączników półprzewodnikowych w taki sposób, aby następowało naprzemienne magazynowanie energii w kondensatorach i przekazywanie jej do kolejnych komórek układu. W rezultacie napięcie wyjściowe jest sumą napięć na poszczególnych kondensatorach przekształtnika.

Przekształtniki energoelektroniczne są powszechnie budowane z wykorzystaniem łączników półprzewodnikowych oraz elementów pasywnych gromadzących energię w polu elektrycznym i magnetycznym. Gwałtowny rozwój w dziedzinie technologii łączników półprzewodnikowych oraz związane z nim wprowadzenie na rynek nowych łączników energoelektronicznych umożliwia wzrost częstotliwości kluczowania a tym samym redukcję wymagań dotyczących parametrów nominalnych

elementów pasywnych przekształtnika. Rozwój w dziedzinie elementów pasywnych, zwłaszcza indukcyjnych, jest znacznie wolniejszy niż rozwój półprzewodników. W efekcie ze wzrostem częstotliwości przełączania tranzystorów wzrasta również poziom strat mocy i energii w przekształtniku, przy czym w dużym stopniu straty te są wytwarzane przez elementy pasywne. W przypadku przekształtników wykorzystujących elementy indukcyjne, zwiększenie częstotliwości kluczkowania skutkuje wzrostem poziomu strat między innymi w rdzeniu. Biorąc pod uwagę ograniczenia stosowalności elementów indukcyjnych w zakresie wysokich częstotliwości oraz powszechną dostępność kondensatorów dedykowanych do aplikacji wysokoczęstotliwościowych naturalnym następstwem jest powstawanie układów energoelektronicznych wykorzystujących pojemnościowe magazyny energii. W trend ten wpisują się badania nad przetwornicami DC-DC, w którym do konwersji energii wykorzystuje się kaskady tzw. „przełączanych kondensatorów”. W świetle powyższych faktów należy uznać, że badania prowadzone przez Pana mgr inż. Adama Kawę dotyczą ważnego i aktualnego obszaru elektrotechniki.

Wagę oraz aktualność przyjętej tematyki badawczej podkreślają artykuły, których Autor niniejszej rozprawy jest współautorem, a które zostały opublikowane renomowanych czasopismach, jak *IEEE Transaction on Power Electronics* czy *Bulletin of the Polish Academy of Science* oraz materiałach konferencyjnych konferencji o zasięgu międzynarodowym.

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Praca została podzielona przez jej Autora na dwie części. Pierwsza z nich dotyczy przekształtników tyrystorowych SCVM (Switched Capacitor Voltage Multiplier), zaś druga przekształtników MRSCC (Multilevel Resonant Switched Capacitor Converter). W obu częściach pracy zawarto kompletną analizę działania tego typu przekształtników, wliczając w to analizę matematyczną, symulacyjną oraz badania eksperymentalne.

Autor rozprawy nie sformułował tezy pracy, natomiast określił główne jej cele jako:

1. „Wykazanie specyficznych własności techniki przełączanych kondensatorów w przekształtnikach mocy i analiza właściwości wybranych energoelektronicznych rezonansowych przekształtników mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach”;
2. „Określenie możliwości zastosowania łączników tyrystorowych i tranzystorowych w układach o przełączanych kondensatorach”;
3. „Analiza strat energii w obwodach mocy i układach sterowania w wybranych topologiach przekształtników DC-DC o kondensatorach przełączanych”;
4. „Eksperymentalne badania wybranych złożonych topologii przekształtników DC-DC podwyższających napięcie o przełączanych kondensatorach”.

Cele te zostały osiągnięte dla obu analizowanych przekształtników, przy czym na podkreślenie zasługuje fakt dużej zbieżności wyników analizy matematycznej, badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Można więc uznać, że przedstawione w pracy obliczenia zostały zweryfikowane dwukrotnie (za pomocą symulacji i badań eksperymentalnych).

Na początku rozprawy Autor przedstawił streszczenie, wykaz symboli i skrótów. W pierwszym rozdziale (Wstęp) omawia ogólną zasadę przetwarzania energii w przetwornicach DC-DC oraz uzasadnia wybór topologii przetwornic o „przełączanych kondensatorach” odnosząc się do ograniczeń zakresu stosowalności elementów pasywnych. W rozdziale 1 (a właściwie w podrozdziałach 1.1 i 1.2) przedstawia również cele prowadzonych prac badawczych oraz omawia przedstawiane w literaturze



rozwiązania przetwornic DC-DC. Podrozdział 1.3 obejmuje skrótowy opis zawartości kolejnych rozdziałów rozprawy.

W rozdziale 2 Autor przedstawił pierwsze z analizowanych rozwiązań przetwornic DC-DC – tyrystorowy powielacz napięcia zbudowany w topologii SCVM. Przedstawia model matematyczny układu oraz opisuje (z wykorzystaniem aparatu matematycznego) poszczególne tryby jego pracy. Przedstawiona analiza matematyczna pozwala na wyznaczenie wartości maksymalnych prądów i napięć poszczególnych elementów układu energoelektronicznego oraz na wyznaczenie strat i sprawności w funkcji częstotliwości, czasu przerwy pomiędzy pulsami prądu ładowania i rozładowania (czas ten obejmuje między innymi czas odzyskiwania zdolności blokowania tyrystorów wykorzystanych w układzie). Przedstawiona analiza umożliwi dobór elementów urządzenia. Przykład takiego doboru przedstawiono w rozdziale 2.2, gdzie Autor podjął się zaprojektowania przetwornicy w oparciu o wyprowadzone wcześniej zależności. Wykorzystując modele łączników półprzewodnikowych i elementów pasywnych, Autor przeprowadził badania symulacyjne urządzenia, których wyniki zaprezentował w rozdziale 2.3. Rozdział 2.4 obejmuje pomiary laboratoryjne zbudowanego przekształtnika SCVM i prezentuje zarejestrowane przebiegi napięć na tyrystorach i diodach, prądu wejściowego przekształtnika i napięć kondensatorów przełączanych. Zaprezentowano również wykresy dokumentujące zmiany napięcia wyjściowego oraz sprawność przetwornicy w szerokim spektrum zmian mocy obciążającej urządzenie, w tym również podczas pracy w zakresie przeciążenia. Część pracy dotycząca przekształtnika SCVM kończy się podsumowaniem (rozdział 2.5), w którym Autor przedstawił również prognozowane kierunki dalszych prac nad przekształtnikami tego typu.

Druga część pracy (rozdział 3 i kolejne) obejmuje analizę struktury przetwornicy DC-DC o przełączanych tranzystorach zbudowanej zgodnie z koncepcją przekształtnika MRSCC (Multilevel Resonant Switched Capacitor Converter). Również ta część pracy obejmuje kompletną analizę przekształtników tego typu – od analizy matematycznej poprzez dobór elementów modelu, badania symulacyjne i eksperymentalne. Rozdział 3 rozpoczyna się opisem aktualnego stanu wiedzy dot. rozwiązań tego typu oraz opisem zasady działania przetwornicy. W podrozdziale 3.3 Autor przedstawia analizę matematyczną w stanie ustalonym, z przybliżeniem podstawowa harmoniczna. Jednym z założeń upraszczających jest przyjęcie zerowej długości czasów martwych, które są wprowadzane do sygnałów sterujących bramkami tranzystorów, jednakże w kolejnych rozdziałach przeanalizowano również wpływ niezerowej długości czasów martwych na pracę przekształtnika. Przedstawiona analiza matematyczna obejmuje wyznaczenie obciążenia prądowego poszczególnych gałęzi przekształtnika, wyznaczenie obciążeń prądowych łączników energoelektronicznych, ocenę stopnia redukcji efektywności napięciowej w funkcji rezystancji wykorzystanych łączników półprzewodnikowych MOSFET, analizę strat energii i sprawności. Rozdział 3.4 obejmuje obliczenia projektowe przetwornicy, w których Autor wykorzystał wyprowadzone wcześniej zależności. W rozdziale 3.5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanej przetwornicy MRSCC. W tym rozdziale Autor dokonuje również analizy wpływu czasów martwych, koniecznych do prawidłowej pracy urządzenia, na wyznaczone wcześniej wartości prądów gałęzi rezonansowych. Dokonuje również analizy zachowania układu w przypadku odstrojenia częstotliwości impulsowania przekształtnika od częstotliwości rezonansowej, wynikającej z doboru elementów LC urządzenia. Analiza ta jest istotna w związku z rozrzutem parametrów elementów pasywnych przekształtnika, jak również w związku z nieprecyzyjnym taktowaniem przekształtnika przez układy zegarowe. Autor wykazał, że korzystniejszym jest przypadek, w którym częstotliwość impulsowania jest większa od częstotliwości rezonansowej, gdyż w mniejszym stopniu wpływa to na efektywność napięciową przetwornicy i wartości skuteczne prądów gałęzi rezonansowych niż w przypadku, w którym częstotliwość kluczowania jest niższa od częstotliwości rezonansowej. Jest to istotna informacja z punktu widzenia projektowania takich układów – gdyż daje możliwość zabezpieczenia układu w przypadku rozrzutu



parametrów wykorzystanych elementów pasywnych (a tym samym niejednoznacznie określonej częstotliwości rezonansowej). W podrozdziale 3.5.3 dokonano analizy wpływu wartości początkowej prądu oscylacji na pracę gałęzi rezonansowej. Wykazano, że w przypadku, gdy częstotliwość kluczkowania jest większa od częstotliwości rezonansowej, w mniejszym stopniu wpływa to na wartości maksymalne prądów oraz zdolność wyrównywania napięć gałęzi poziomych niż w przypadku częstotliwości kluczkowania niższej od rezonansowej.

Podrozdział 3.5.4 obejmuje analizę zjawisk zachodzących w interwale czasu martwego. Autor przyjął uproszczony model łączników energoelektronicznych, w których pominięto obecność pojemności wyjściowej. Tym samym, w chwili wyłączenia tranzystorów prąd gałęzi natychmiast zamyka się przez diodę przeciwrównoległą. W tym rozdziale dokonano również analizy wpływu prądu obciążającego przekształtnik, napięcia zasilającego (napięcia „strony niskiej” – jak podano w rozprawie) oraz długości czasu martwego na prądy i efektywność napięciową przy różnych wartościach odstrojenia częstotliwości kluczkowania od częstotliwości rezonansowej.

W podrozdziale 3.5.5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przekształtnika z uwzględnieniem pojemności pasożytniczych. Autor pisze, że wykorzystał modele tranzystorów pozyskane od producentów półprzewodników, które uwzględniają pojemności nieliniowe tranzystorów. Nie podaje jednak żadnych szczegółowych informacji nt. wykorzystanych modeli. W schemacie pokazanym na rys. 3.28 wprowadzono pojemności wejściowe pomiędzy bramką a źródłem (Source) tranzystorów o wartościach 1 nF i 500pF. Nie wskazano przy tym, czy przyjęte wartości pojemności mają za zadanie modelować pojemności wejściowe C_{gs} (gate-source) tranzystorów C3M0065090D i SCT3030A (wartości katalogowe to (odpowiednio) 0.5 nF i 1500 pF). Schemat przedstawiony na rys. 3.28 nie obejmuje pojemności wyjściowych tranzystorów (pojemność na złączu dren-źródło), przy czym Autor komentując odmienny kształt przebiegów przedstawionych na rys. 3.29 stwierdza, że jest on efektem oscylacyjnego ładowania pojemności wyjściowych. Pisze również, że do symulowanego obwodu wprowadził modyfikacje związane ze specyfiką narzędzia wykorzystanego do modelowania (PSpice). Są to indukcyjność połączeń tranzystorów, rezystancje szeregowe kondensatorów i rezystancja źródła zasilającego. Obecność pasożytniczych rezystancji i indukcyjności można w łatwy sposób uzasadnić. Komentarza wymaga natomiast konieczność dołączenia obwodu RC (20pF i 1 k Ω) równoległe do gałęzi rezonansowej.

W rozdziale 3.6 przedstawiono opis i zdjęcia modelu eksperymentalnego przetwornicy. Z uwagi na ograniczenia sprzętowe (wysokie napięcie wyjściowe i związane z tym ograniczone możliwości jego pomiaru), Autor wykorzystał dwie identyczne przetwornice pracujące w trybie układu podwyższającego i obniżającego napięcie. Pierwsza z nich podnosi napięcie do poziomu 2kV, zaś druga obniża je do poziomu 500V – czyli do poziomu napięcia zasilającego pierwszą z przetwornic. Wyniki pomiarów zrealizowanych podczas prac eksperymentalnych charakteryzuje dużą zbieżność z wynikami pozyskanymi w wyniku badań symulacyjnych zrealizowanych w programie PSpice. Przedstawiono również wyniki testów dla przypadków odstrojenia częstotliwości kluczkowania od częstotliwości rezonansowej, jak również dla przypadku znacznego obniżenia napięcia wejściowego przetwornicy.

W analizowanym rozwiązaniu przełączenia tranzystorów odbywają się przy zerowej wartości prądu gałęzi rezonansowej. Skutkuje to utrzymaniem rozkładu napięć na pojemnościach wyjściowych tranzystorów w okresie czasu martwego i zwiększonymi stratami związanymi z przeładowaniem tych pojemności w chwili komutacji. W celu ograniczenia tych strat zaproponowano wykorzystanie dodatkowych obwodów komutacyjnych, składających się z dwóch szeregowo połączonych kondensatorów w pierwszym stopniu kaskady, dławika dołączonego pomiędzy punkt środkowy tych kondensatorów a szeregowo połączone tranzystory oraz dodatkowych obwodów RC dołączonych do pozostałych stopni kaskady. Dodatkowe obwody komutacyjne umożliwiają zwiększenie wartości prądu tranzystorów w okresie czasu martwego, a tym samym dają możliwość przeładowania pojemności wyjściowych tranzystorów przed ich załączeniem. Ponieważ prąd w okresie czasu martwego zamyka

K.A.

się przez pojemności wyjściowe wyłączonych tranzystorów, uzyskuje się przebiegi prądów i napięć odpowiadające niewystępującej w rzeczywistości sytuacji, w której długość czasów martwych równa jest zeru. W efekcie można uznać, że wpływ czasów martwych na pracę przekształtnika jest skompensowany, zaś uzyskane w wyniku badań eksperymentalnych przebiegi napięć i prądów odpowiadają założeniom przeprowadzonej w pracy analizie matematycznej pracy przekształtnika z przybliżeniem pierwszą harmoniczną. Zmodyfikowaną topologię przekształtnika poddano testom eksperymentalnym, w których badano jego pracę podczas odstrojenia częstotliwości kluczkowania od częstotliwości rezonansowej. Nie pokazano przebiegów dla częstotliwości kluczkowania wyższej od rezonansowej (Autor pisze tylko, że „gałęzie rezonansowe nie są istotnie przeciążone”), natomiast przedstawiono przebiegi prądów gałęzi rezonansowych i napięć dren-źródło tranzystorów dla przypadków pracy z częstotliwością kluczkowania mniejszą od rezonansowej oraz równą rezonansowej. Autor zauważył, że ograniczenie strat w przekształtniku zostało jednakże okupione zwiększoną wrażliwością na odstrojenie częstotliwości kluczkowania od częstotliwości rezonansowych i zmniejszeniem efektywności napięciowej. Tym samym wyznaczył sobie kierunek dalszych prac badawczych mających na celu zwiększenie efektywności napięciowej przy jednoczesnym ograniczeniu strat.

W rozdziale 4 zawarto podsumowanie głównych osiągnięć Autora zaprezentowanych w rozprawie, zaś rozdział 5 to spis wykorzystanej literatury obejmujący 122 pozycje.

3. Uwagi ogólne

Przedłożona do oceny rozprawa tworzy logiczną i wewnętrzną spójną całość. Jednakże podczas przygotowywania recenzji rozprawy nasuwają się ogólne i dyskusyjne uwagi, wśród których można wymienić:

1. Na stronie 33 Autor pisze, że „wartość szczytowa pulsów ładowania i rozładowania w przebiegu prądu i_{in} zależy od mocy pobieranej ze źródła obciążenia (...)”. Wypowiedź ta wydaje się być nieprecyzyjna – to moc pobierana ze źródła zależy od wartości prądu wejściowego i_{in} przekształtnika i napięcia źródła zasilania (zależność 2.30 uzależnia uśrednioną wartość mocy czynnej od wartości średniej tego prądu), a nie odwrotnie. Zależność 2.32 określa co prawda wartość maksymalną prądu i_{in} w funkcji pobieranej mocy, ale biorąc pod uwagę zależność 2.30, jest to w praktyce zależność wiążąca wartości maksymalne i średnie prądu wejściowego.
2. Badania laboratoryjne przekształtnika SCVM przeprowadzono dla modelu o mocy 1kW. Autor pisze, że dalsze prace nad przekształtnikami tego typu będą obejmowały studium możliwości i korzyści zastosowania SCVM dużych mocy (kilkaset kilowatów), z uwzględnieniem dostępnych na rynku elementów. Wydaje się, że studium możliwości budowy takich układów można przeprowadzić już na obecnym etapie prac, wykorzystując dane katalogowe łączników energoelektronicznych oraz wyznaczone w pracy zależności. Wydaje się to istotne, gdyż jednym z celów pracy jest „określenie możliwości zastosowania łączników tyrystorowych i tranzystorowych w układach o przełączanych kondensatorach” co implikuje konieczność wskazania (przynajmniej szacunkowego) zakresu mocy, w których analizowane topologie znajdują zastosowanie.
3. Na str. 47 Autor pisze, że napięcie maksymalne występujące na poszczególnych półprzewodnikach zamieszczono w tabeli 2.2, w tym także dla skrajnego przypadku, gdy $U_{out}=0$. Analiza schematu pokazanego na rys. 2.1 wskazuje, że warunek $U_{out}=0$ może być spełniony wyłącznie w dwóch przypadkach – zwarty kondensator wyjściowy lub wyłączone zasilanie przekształtnika. Jednocześnie w opisie Tabeli 2.2 podano, że kolorem zaznaczono napięcia na

Anto.

- tyrystorach nieparzystych z uwzględnieniem stanu awaryjnego, w którym napięcie wyjściowe jest równe wejściowemu. W rozprawie nie wskazano jaka awarię Autor pracy miał na myśli.
4. Przedstawione w pracy przebiegi prądów i napięć przekształtnika SCVM przeprowadzono dla znamionowej mocy obciążenia oraz dla sytuacji, w której przekształtnik został przeciążony. Nie określono natomiast warunków pracy takiego przekształtnika przy obciążeniu mniejszym od znamionowego. Jak wyglądają przebiegi prądów i napięć przetwornicy w przypadku pracy z obciążeniem znacząco mniejszym od znamionowego?
 5. Dla przetwornicy SCVM, charakterystyka napięcia wyjściowego w funkcji mocy wejściowej została przedstawiona na rys 2.12. Zdjęto ją poprzez wielokrotne powtórzenie badań symulacyjnych dla różnych rezystancji obciążenia (w rezultacie dla różnych mocy obciążenia). W rozprawie nie wskazano czy należy zmieniać sposób sterowania (czy może wykorzystano układ regulacji) aby możliwe było uzyskanie napięcia wyjściowego niezależnego od rezystancji obciążającej przekształtnik.
 6. Pokazany na rys 2.15 prąd wejściowy przekształtnika SCVM zależy od mocy obciążenia. W przypadku przeciążenia jest widoczne wydłużenie czasu trwania pulsu rozładowania. Czy w związku z tym konieczne jest opóźnienie kolejnego cyklu pracy układu, tak aby kolejny impuls prądu wejściowego rozpoczął się od zerowej wartości tego prądu?
 7. We wstępie pracy (str. 19) Autor pisze, że „powyżej (częstotliwości) 200kHz tendencja (zmniejszenia gabarytów dławików) słabnie ze względu na zjawiska wysokiej częstotliwości w uzwojeniu i rdzeniach.” Pisze również, że zwiększenie częstotliwości pracy wymusza zwiększenie gabarytu elementów indukcyjnych w celu utrzymania strat mocy na akceptowalnym poziomie. Przekształtnik MRSCC omawiany w rozprawie pracuje z częstotliwością 258 kHz (str. 136), przy czym w analizie strat energii (str. 80) uwzględniono wyłącznie straty związane pracą elementów półprzewodnikowych. Dlaczego pominięto straty w dławikach, skoro zjawiska, o których Autor rozprawy pisze, pojawiają się w zakresie częstotliwości dla której projektowano przekształtnik MRSCC?
 8. W rozdziale 3.5.4 Autor omawia pracę przekształtnika MRSCC z uwzględnieniem czasu martwego. W okresie czasu martwego następuje wyłączenie tranzystorów sterowanych sygnałami S_E i S_O , zaś prąd gałęzi zamyka się przez diodę przeciwrównoległą. Przedstawiona analiza pomija obecność pojemności wyjściowych tranzystorów (C_{ds}). W przypadku niezerowych prądów najpierw następuje przeładowanie tych pojemności, a dopiero potem prąd zamknie się przez diodę przeciwsobnie równoległą. Uwzględnienie tych pojemności wydaje się być istotne w świetle faktu, że prąd tranzystorów w okresie czasu martwego jest zbliżony do zera i czas przeładowania pojemności wyjściowych ulega wydłużeniu.
 9. W rozdziale 3.3.5 przeprowadzono symulację układu przekształtnika z uwzględnieniem pojemności pasożytniczych w programie PSpice. Autor pisze, że wykorzystał modele tranzystorów pozyskane od producentów półprzewodników, które uwzględniają pojemności nieliniowe tranzystorów. W schemacie pokazanym na rys. 3.28 uwzględniono kondensatory pomiędzy bramką a źródłem (source) tranzystorów o wartościach 500pF i 1 nF. Nie wskazano, czy kondensatory te mają modelować pojemności wyjściowym C_{gs} (gate-source) tranzystorów C3M0065090D i SCT3030A. Schemat z rysunku 3.28 nie obejmuje pojemności wyjściowych tranzystorów (pojemność na złączu dren-źródło – dla powyższych tranzystorów). Czy zmiany widoczne w przebiegach pokazanych na rysunku 3.29 są efektem obecności pojemności wyjściowych (przeładowywanie pojemności C_{DS} w okresie czasu martwego) czy efektem obecności ok. 10 krotnie większych od nich pojemności wejściowych?
 10. Autor pisze również, że do symulowanego obwodu wprowadził modyfikacje związane ze specyfiką narzędzia wykorzystanego do modelowania (PSpice). Są to indukcyjność połączeń tranzystorów, rezystancje szeregowo kondensatorów i rezystancja źródła zasilającego.

B. A.

Obecność pasywnych rezystancji i indukcyjności można w łatwy sposób uzasadnić. Komentarza wymaga natomiast konieczność dołączenia obwodu RC (20pF i 1 kΩ) równolegle do gałęzi rezonansowej.

11. Model półmostka z tranzystorami MOSFET pokazany na rys. 3.3 jest nieprecyzyjny. Pojemność wyjściową C_{oss} zaznaczono jako pojemność pomiędzy drenem a źródłem tranzystora. W rzeczywistości pojemność C_{oss} jest sumą pojemności C_{Ds} (dren-źródło) i C_{GD} (bramka – dren) ^{1,2}. Biorąc jednak pod uwagę wartość pojemności dla tranzystora C3M0065090D wynoszące: $C_{oss}=60\text{pF}$ i $C_{Ds}=56\text{pF}$ (dla $C_{GD}=C_{rss}=4\text{pF}$) popełniony błąd jest pomijalny i nie wpływa na uzyskane wyniki.

¹<https://www.infineon.com/dgdl/mosfet.pdf?fileId=5546d462533600a4015357444e913f4f>

²X. Li et al., "A SiC Power MOSFET Loss Model Suitable for High-Frequency Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 10, pp. 8268-8276, Oct. 2017. doi: 10.1109/TIE.2017.2703910;

12. Na str. 65 Autor pisze, że „dla znamionowego punktu pracy układu straty rezystancyjne jak i te od napięć złączowych mają zbliżoną wartość, odpowiednio 20W i 23W. Umiarkowany rozkład strat wskazuje na podstawową poprawność wykonanej konstrukcji.”. Powyższe stwierdzenie nie jest jednoznaczne – co należy traktować jako umiarkowany rozkład? Czy te zbliżone wartości obu typów strat, czy ich wartości?
13. Na str. 105 Autor pisze, że „w przebiegach napięć gałęzi rezonansowych, w interwałach czasu martwego, występują impulsy o dużej wartości szczytowej powodujące szybki zanik prądu gałęzi rezonansowych”. Wydaje się, że impulsy napięcia są raczej skutkiem a nie przyczyną szybkich zmian prądu dławika, spowodowanych rekonfiguracją układu po przełączeniu tranzystorów. Czy przepięcia te stanowią zagrożenie dla łączników energoelektronicznych?

Należy podkreślić, że powyższe uwagi i pytania, w żaden sposób nie umniejszają pozytywnej wartości merytorycznej rozprawy.

4. Uwagi szczegółowe

Redakcja rozprawy doktorskiej jest staranna, zaś Autor stara się w sposób klarowny pisać o skomplikowanych zjawiskach. Należy jednak podkreślić, że śledzenie toku myślowego nie jest proste. Wynika to głównie z charakteru pracy, w której Autor wykorzystuje aparat matematyczny, zmuszając czytelnika do śledzenia poszczególnych zależności, zaś w rysunkach (schematach), które mają ułatwić śledzenie toku myślowego, Autor wykorzystał zbyt małą czcionkę. Autor nie ustrzegł się również pomyłek edytorskich, które zestawiono poniżej, a które nie umniejszają wartości rozprawy:

1. Str 14, k_u – teoretyczne **wzmocnienie** napięciowe;
2. Str 15, t_q – parametr **katalogowy**;
3. Str 15, U_{CmaxN} – wartość napięcia **na kondensatorze przełączanych** (to samo U_{CminN});
4. Str 16, f_{sRDT} – częstotliwość **rezoanansowa**;
5. I_N , I_w prądy **strony niskiej i wysokiej przekształtnika** – określenie nie jest precyzyjne – kojarzy się raczej z gabarytami przekształtnika
6. U_{CRmax} – napięcie **maksymalne**;
7. Str 27 – W podrozdziale 3.6.5 **zamieszono....**
8. Str 103. Autor odwołuje się do nieistniejącej zależności 142.2;

9. Str 106. Przebiegi pokazane na rys 3.12 – 3.14 są przebiegami o częstotliwości ok 500kHz (ok 2x większej niż deklarowana rezonansowa częstotliwość impulsowania 264kHz (str 104). Prawdopodobnie jest to efekt pomyłki edycyjnej przy skalowaniu przebiegów.
10. Str 114. Autor odwołuje się do nieistniejącej zależności 3.127;
11. Str. 114 - ...zgodny z wartościami przyjętymi w **popędzających** symulacjach...;
12. Str 117, rys 3.19 b i c – przyjęto uproszczony sposób prezentacji konfiguracji gałęzi rezonansowych bez zastrzałkowania kierunków przepływu prądów. Autor pisze, że konfiguracje b) i c) zachodzą ze względu na prądy o znacznych wartościach płynące w gałęziach sąsiednich, nie pokazując tych prądów. W efekcie można odnieść wrażenie, że ten sam prąd w analizowanym obwodzie płynie jednocześnie w obu kierunkach. Podobna uwaga dotyczy rys. 3.21.
13. Str 121 – (prawdopodobnie) błędne odwołanie do wzoru 3.114;
14. Str 123, rys 3.24b powinien odnosić się do zależności 3.148, zaś rys 3.24a do zależności 3.149;
15. Str 126, rys 3.25. Przyjęcie jednakowej skali na osi Y dla przebiegów strumieni ułatwiłoby ich analizę. Dla tych przebiegów nie podano, co oznaczają poszczególne kolory.
16. Na str. 140 Autor pisze, że pomiar mocy wejściowej i wyjściowej wykonano w układzie poprawnie mierzonego napięcia. Nie uzasadniono takiego wyboru układu pomiarowego.

5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i przedstawia interesujące rozważania na temat układów rezonansowych. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością przedstawianych problemów. W rozprawie przeprowadził pełen cykl badawczy – od analizy matematycznej, poprzez badania symulacyjne do badań eksperymentalnych. Należy podkreślić, że wyniki uzyskane w każdym z tych etapów charakteryzują się dużym podobieństwem – tym samym można stwierdzić, że analiza teoretyczna przedstawiona w rozprawie została dwukrotnie zweryfikowana – za pomocą badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Na uwagę zasługuje fakt, że Autor ma świadomość ograniczeń w konstrukcji analizowanych przez siebie układów, wynikających chociażby z rozrzutu parametrów indukcyjności i pojemności tworzących kaskadowe obwody rezonansowe. W przypadku kondensatorów ceramicznych klasy 1 dopuszcza się 1% tolerancję pojemności, w przypadku klasy 2 dopuszczalne odchyłki pojemności sięgają 20% co odpowiada ok 11% rozrzutowi częstotliwości (przyjmując parametry obwodów LC podane w tabeli 3.7). Tym samym w kaskadzie MRSCC pojawi się kilka zbliżonych, ale nie identycznych częstotliwości rezonansowych. W rozprawie dokonano analizy zachowania układu w przypadku odstrojenia częstotliwości impulsowania przekształtnika od częstotliwości rezonansowej. Charakterystyki na rys. 3.9, 3.15, 3.16, 3.18 oraz przebiegi na rys. 3.12-3.14 pokazano dla częstotliwości impulsowania przekształtnika większych i mniejszych od częstotliwości rezonansowej. Autor wykazał, że korzystniejszym jest przypadek, w którym częstotliwość impulsowania jest większa od częstotliwości rezonansowej, gdyż w mniejszym stopniu wpływa to na efektywność napięciową przetwornicy i wartości skuteczne prądów gałęzi rezonansowych niż w przypadku, w którym częstotliwość kluczenia jest niższa od częstotliwości rezonansowej. Wnioski zawarte w pracy stanowią cenne wskazówki dla osób zajmujących się projektowaniem układów rezonansowych o omawianych w pracy konfiguracjach.

Recenzowana praca składa się z dwóch części. Prace badawcze, których wyniki przedstawiono w pierwszej części pracy (dotyczącej przekształtników tyrystorowych) były realizowane zespołowo. Badania wykonane przez Autora w tej części pracy obejmują przede wszystkim weryfikację eksperymentalną, co wiąże się z koniecznością zaprojektowania, wykonania i uruchomienia przekształtnika, przeprowadzeniem badań eksperymentalnych i analizą uzyskanych wyników. Druga


część pracy – dotycząca przekształtnika tranzystorowego MRSCC, została wykonana przez Autora samodzielnie. Za **osiągnięcia własne Autora rozprawy** uznaję:

- ✓ Rozszerzenie metod doboru elementów LC przekształtnika SCVM o analizę współczynników znamionowego obciążenia względnego;
- ✓ Zaprojektowanie, uruchomienie i testy przekształtnika tyrystorowego SCVM oraz analizę i interpretację uzyskanych wyników;
- ✓ Analizę matematyczną przekształtników MRSCC z wykorzystaniem przybliżenia pierwszą harmoniczną. Wyznaczenie zależności określających wartości prądów gałęzi rezonansowych;
- ✓ Opracowanie procedur doboru elementów przekształtnika w oparciu o analizę z przybliżeniem pierwszą harmoniczną;
- ✓ Analizę wpływu rezystancji elementów tworzących przekształtnik MRSCC na jego efektywność napięciową;
- ✓ Przeprowadzenie analizy objętości elementów składowych gałęzi rezonansowej (indukcyjność i pojemność) w funkcji względnego tętnienia napięcia na każdym z kondensatorów przełączanych oraz maksymalnego prądu dławików (analiza taka umożliwia redukcję gabarytów przekształtnika – co jest szczególnie istotne w aplikacjach komercyjnych);
- ✓ Wykazanie niedokładności analizy z przybliżeniem pierwszą harmoniczną w przypadku odstrojenia częstotliwości impulsowania od częstotliwości rezonansowych;
- ✓ Analizę pracy przekształtnika w interwałach czasu martwego;
- ✓ Modyfikacje układu MRSCC umożliwiającą ograniczenie strat energii związanych z obecnością pojemności wyjściowych tranzystorów MOSFET;
- ✓ Badania symulacyjne, projekt i uruchomienie prototypu przekształtnika MRSCC, jego testy oraz analizę i interpretację uzyskanych wyników;

6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Adama Kawy pt. „**Energoelektroniczne rezonansowe przekształtniki mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach podwyższające napięcie**” zawiera istotne wartości naukowe związane z problematyką projektowania przekształtników napięcia stałego z obwodami rezonansowymi, zaś przedstawiona analiza i wyniki badań mają dużą wartość także dla praktyki technicznej. Przedstawione w niej rozważania dowodzą dojrzałości naukowej Doktoranta, zaś **poziom merytoryczny przedstawionej rozprawy kwalifikuje ją do wyróżnienia.**

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. Adamowi Kawie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika.


Arkadiusz Lewicki