

Dr hab. inż. Robert Stala, prof. nadzw. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im S. Staszica w Krakowie,
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 26 września 2018

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej pt. „Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania”, której autorem jest mgr inż. Bartosz Rozegnał, a promotorem jest dr hab. inż. Witold Mazgaj, prof. PK. Recenzja zrealizowana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej pismem z dnia 28.06.2018 roku nr E-0/4/272/2018.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawę stanowi dzieło pt. „Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania”. Praca zawiera 8 rozdziałów, 2 dodatki, bibliografię oraz spis ważniejszych symboli i oznaczeń. W bibliografii wymieniono 96 pozycji literatury związanej tematycznie z tematyką rozprawy. Praca w całości zajmuje 143 strony, w czym 115 stron przeznaczono na rozdziały 1 do 8.

Po przedstawieniu rozdziału uzasadniającego podjęcie tematyki związanej z ograniczeniem strat przełączania w falownikach dużej mocy, Autor charakteryzuje cel i zakres pracy. Jako główny cel do osiągnięcia Autor wymienia „przedstawienie układu miękkiego przełączania tranzystorów w trójfazowych, dwupoziomowych falownikach napięcia, w którym nie występuje zagrożenie udarowego rozładowania kondensatorów przez przewodzące tranzystory falownika napięcia oraz nie ma możliwości przerwania prądu dławików, skutkującego powstaniem przepięć powodujących uszkodzenie tranzystorów układu miękkiego przełączania.” Z dalszej części pracy wynika, że „przedstawienie układu” obejmuje analizę koncepcji i zasady działania układu miękkiego przełączania w wersji podstawowej, oraz 2 wersjach alternatywnych określenie zasad doboru parametrów układu miękkiego przełączania, uzyskanie wyników analitycznych, obliczeń numerycznych oraz eksperymentalnych dotyczących pracy analizowanych falowników napięcia oraz analizę wpływu dodatkowych obwodów falownika, na jego podstawowe parametry.

Rozdział drugi zawiera informacje dotyczące strat energii występujących w elementach falowników napięcia. Jest to zwarte zestawienie możliwych strat energii w elementach półprzewodnikowych z uwzględnieniem znanych z cytowanej literatury modeli odwzorowujących rzeczywiste zjawiska, które umożliwiają wykazanie wpływu parametrów pracy przekształtnika na straty energii. Autor w tym rozdziale analizuje straty przewodzenia i straty łączeniowe tranzystorów IGBT i diod, a także elementów ochrony przepięciowej i obwodów bramkowych.

Za wprowadzenie do tematyki miękkiego przełączania można uznać również rozdział trzeci pracy. Po przedstawieniu ogólnej koncepcji zmniejszenia strat Autor bardziej szczegółowo omawia koncepcje proponowane w cytowanej literaturze. Jest to istotne, ponieważ pozwala właściwie uzasadnić i scharakteryzować cechy proponowanej przez Autora topologii. Autor przedstawia w pracy istotne wnioski z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w tematyce rozwiązań miękkiego przełączania falowników napięcia. Uwidocznione są wady proponowanych w literaturze rozwiązań związane głównie ze zwiększoną liczbą elementów układu dla realizacji obwodów pomocniczych dla miękkiego przełączania, komplikacją sterowania wymagającą przełączania tranzystorów w obwodach pomocniczych, a także ze zwiększonym zagrożeniem

awarii falownika wynikającej z nieprawidłowej pracy i sterowania elementów pomocniczych. Autor również słusznie zauważa i wymienia korzyści stosowania poszczególnych rozwiązań związane ze zmniejszeniem strat energii w tranzystorach głównych falownika, zmniejszeniem szybkości ich nagrzewania i obniżeniem przepięć powodowanych przepływem prądów o dużej stromości. Obszerna dyskusja z licznymi odniesieniami do przykładów z literatury krajowej i światowej jaka pojawia się w tym miejscu rozprawy jest to bardzo istotna, ponieważ świadczy o dogłębnym zbadaniu przez Autora stanu wiedzy w badanej tematyce. W kontekście cytowanej literatury podjęcie tematyki badawczej w obszarze układu falownika z miękkim przełączaniem o spodziewanych korzystnych własnościach w stosunku do znanych rozwiązań jest jak najbardziej uzasadnione.

W rozdziale czwartym wprowadzono podstawową koncepcję analizowanego falownika, publikowanego jako dwupoziomowy falownik napięcia z miękkim przełączaniem tranzystorów, odporny na zakłócenia sterowania. Jest to układ dwupoziomowy z dodatkowymi indywidualnymi obwodami dla pracy z miękką komutacją tranzystorów. W kolejnych fragmentach rozdziału 4 szczegółowo omówiona została zasada miękkiego przełączania w tym układzie w cyklu przełączania tranzystora głównego T1 przy stałym prądzie wyjściowym o biegunowości typowej dla dodatniej chwilowej mocy wyjściowej. Falownik sterowany jest analogicznie jak w przypadku podstawowego układu mostkowego, a sterowanie tranzystorów pomocniczych zsynchronizowane jest ze sterowaniem tranzystorów głównych, co nie wprowadza istotnej komplikacji dla sterowania proponowanym układem i jest zaletą analizowanego układu.

W rozdziale czwartym poruszono również problematykę doboru elementów dla układu falownika z miękkim przełączaniem. Głównym problemem jest tu dobór elementów pasywnych obwodów rezonansowych. Kondensator pomocniczy powinien ładować się z odpowiednią stromością dla zmniejszenia strat wyłączenia tranzystora głównego. Szybkość ładowania kondensatora pomocniczego zależy początkowo od prądu obciążenia, a w dalszej części tego procesu energia dostarczona do kondensatora zależy od wartości indukcyjności dławików rezonansowych. W procesie tym, kondensator ładuje się do większej wartości niż napięcie wejściowe. Autor nie wskazuje w tym miejscu wartości optymalnej napięcia na kondensatorze rezonansowym, ale analizuje możliwość redukcji strat dla przypadku kiedy wartość tego napięcia osiąga dwu i pół krotną wartość napięcia wejściowego. Napięcie na kondensatorze rezonansowym determinuje maksymalną wartość napięcia na tranzystorze głównym i pomocniczym. Stres napięciowy tranzystorów głównych jest znacznie większy w proponowanym układzie niż w przypadku klasycznego falownika napięcia. Tranzystory te są również bardziej obciążone prądowo ze względu na przeładowania w obwodzie rezonansowym. Są to wady analizowanego układu, jak słusznie stwierdza Autor, ponieważ, szczególnie w przypadku zwiększonego stresu napięciowego wymagany jest dobór odpowiednio przewymiarowanych tranzystorów w stosunku do napięcia wejściowego. W rozdziale tym analizowana jest również problematyka doboru wartości indukcyjności pomocniczych falownika. Jest to złożony proces, ponieważ wymaga założenia wartości szybkości narastania prądu tranzystora głównego w przedziale czasu opadania napięcia na tranzystorze. Wartości indukcyjności wpływają również na wartość napięcia na kondensatorach pomocniczych. Rozdział 4.2 zawiera końcowe wytyczne dotyczące procedury doboru elementów LC z uwzględnieniem założeń, co do wartości prądu i napięcia tranzystora w czasie jego przełączenia. Dobór elementów analizowanego układu jest znacznie bardziej złożony niż w przypadku klasycznego falownika dwupoziomowego, dlatego przedstawione w pracy sposoby wyznaczania parametrów elementów należy zaliczyć do istotnych osiągnięć Autora. Nowatorskim i oryginalnym zagadnieniem, które pojawia się w tym rozdziale jest również propozycja alternatywnych wersji układu miękkiego przełączania tranzystorów. W pierwszym

rozwiązaniu mgr inż. Bartosz Rozegnał proponuje układ z tyrystorami pomocniczymi. Zasada działania tego układu jest analogiczna jak w podstawowym przypadku, jednak znacznie upraszcza się sterowanie obwodami pomocniczymi, które wymaga jedynie załączenia tyrystorów. Autor bardzo słusznie wskazuje, że zastosowanie tyrystorów wpływa na ograniczenie częstotliwości pracy układu i wskazuje na konieczność zastosowania tyrystorów o krótkim czasie wyłączenia. Propozycje tego układu można uznać za korzystną dla falowników pracujących przy dużym napięciu.

Kolejną nowatorską koncepcją układu rezonansowego jest układ z alternatywnym włączeniem dławików. Układ ten wymaga niewielkiej rozbudowy w stosunku do podstawowej koncepcji przez dodanie dwóch diod w jednej fazie falownika, ale niweluje przepływ prądu przez tranzystor główny przy rozładowaniu kondensatora pomocniczego. Autor szczegółowo analizuje poszczególne etapy pracy układu i wykazuje poprawność jego działania.

Propozycja układów z tyrystorowym układem ładowania kondensatora pomocniczego, oraz z przeniesionym dławikiem poza gałąź tranzystora głównego można uznać za nowatorskie i oryginalne osiągnięcie Autora, podobnie jak przeprowadzoną analizę tych rozwiązań.

W rozdziale piątym omówiono badania symulacyjne układu zrealizowane z wykorzystaniem modelu dla programu PSpice. Badania wykonano dla uproszczonego modelu łącznika IGBT dla falowników w miękkim wyłączaniu w wersji podstawowej oraz z dławikiem w dodatkowym obwodzie rezonansowym. Falownik w badaniach symulacyjnych pracował z obciążeniem czynno-indukcyjnym, przy niewielkim przesunięciu pomiędzy prądem i napięciem wyjściowym w dziedzinie częstotliwości 50Hz, oraz z obciążeniem w postaci silnika indukcyjnego. Wyniki przedstawione w tym rozdziale są istotne ponieważ potwierdzają koncepcję miękkiego przełączania tranzystorów IGBT, a także pozwalają na przedstawienie zjawisk zachodzących w stanach przejściowych i wartości prądów oraz napięć w czasie. W rozdziale tym Autor porusza również ponownie zagadnienia projektowe badanego falownika.

Wyniki badań symulacyjnych demonstrują przebiegi w stanie ustalonym przy mocy chwilowej o wartości dodatniej. Wyniki te odzwierciedlają analizowane procesy związane z miękkim przełączaniem tranzystorów falownika. Autor analizuje tu dwa rodzaje obciążeń w postaci maszyny indukcyjnej o mocy 3kW i 800kW. Uzupełnienie badań symulacyjnych o przypadek silnika o mocy 800kW jest uzasadniony możliwością wykorzystania analizowanego falownika w systemach dużych mocy przy zastosowaniu łączników IGBT.

Ważnym etapem badań nad falownikiem z miękkim przełączaniem, jakie zostały przedstawione w pracy, jest analiza przypadków działania układu przy niewłaściwie dobranych jego parametrach zawarte w rozdziale 5.4. Autor rozważa tu przypadek niewłaściwego doboru indukcyjności i pojemności obwodów pomocniczych, a także pracę w przypadku wystąpienia zakłóceń w sygnałach sterujących. Na podstawie przedstawionych przebiegów Autor dochodzi do istotnego wniosku, że zbyt duże wartości tych parametrów nie uniemożliwiają pracy układu z miękkim przełączaniem, ale zmniejszają liczbę cykli, w których miękkie przełączanie zachodzi. Jest to istotny wniosek, ponieważ warunki analogiczne do omawianych w tym punkcie rozprawy mogą wystąpić we fragmentach półokresów prądu wyjściowego, gdzie jego wartość jest odpowiednio niska.

W tej części pracy analizowano również przypadki nieprawidłowego sterowania tranzystorów pomocniczych oraz pracy ze zbyt wysoką wartością częstotliwości przełączeń lub współczynnika głębokości modulacji amplitudy. Z analizowanych przypadków, popartych przedstawionymi przebiegami wynika, że nie stanowią one zagrożenia obwodu mocy falownika wynikającego z przeciążenia tranzystorów głównych, jednak zmniejszają skuteczność ich miękkiego przełączania, co prowadzi do zwiększenia energii strat wydzielanej w tych elementach.

W rozdziale piątym Autor zamieścił liczne nowatorskie i oryginalne wyniki i analizy. Można do nich zaliczyć budowę modeli symulacyjnych, przedstawienie wyników symulacyjnych, a także analizę projektową i wyniki liczbowe dotyczące szczególnie układów o zmodyfikowanych topologiach. Idea układu bazowego falownika z miękkim przełączaniem oraz niewielka część wyników publikowane były wcześniej w artykułach, których mgr inż. Bartosz Rozegnał był współautorem. Zakres tych publikacji był jednak znacznie ograniczony w stosunku do zawartości rozprawy doktorskiej. Również wyniki w obszarze badań falownika z nieprawidłowo dobranymi elementami oraz niewłaściwym sterowaniem, czy przypadki dotyczące wpływu zakłóceń sterowania obwodów pomocniczych to istotny oryginalny wkład Autora.

Stosując do symulacji bardziej zaawansowane modele tranzystorów, dokładniej odzwierciedlające proces przełączania rzeczywistych elementów oraz uzupełniając model o elementy pasożytnicze, badania symulacyjne mogły zostać rozszerzone o analizę komutacji w elementach falownika, co pozwoliłoby uzyskać już na tym etapie badań wiarygodne wyniki porównawcze dotyczące strat energii w układach z miękkim oraz twardym przełączaniem. Nawet w układzie miękkiego przełączenia cykl wyłączenia zachodzi przy zerowej wartości początkowej napięcia na tranzystorze jedynie w części przełączeń.

Koncepcja realizacji miękkiego przełączania łączników falownika w analizowanym układzie została przez Autora zweryfikowana eksperymentalnie. Jest to bardzo istotna i odpowiedzialna część badań. Badania przeprowadzono na modelu z tranzystorami głównymi IGBT, dla dwóch zestawów parametrów elementów pasywnych obwodów pomocniczych. Sterowanie falownikiem zrealizowano z wykorzystaniem układu FPGA z odpowiednio zaprojektowanym algorytmem dla sprzętowej implementacji w tym układzie.

Wyniki eksperymentalne w postaci przebiegów prądów i napięć w układzie wykazują zbieżność z założonym przez Autora działaniem układu. Szczegółowo przedstawiono również proces przełączania tranzystora w falowniku z miękkim przełączaniem (rys. 6.4). Przedstawiane przebiegi potwierdzają również zwiększoną wartość napięcia na tranzystorze głównym wynikająca z wartości napięcia na kondensatorze pomocniczym. Jest to wada układu analizowana przez Autora w poprzednich rozdziałach. Autor wskazuje również związek pomiędzy liczbą pełnych cykli miękkiego przełączania, a parametrami elementów pasywnych obwodów pomocniczych. Przystawiono, w tym rozdziale, również wyniki eksperymentalne dla pracy falownika przy zasilaniu silnika indukcyjnego, gdzie, jak podsumowuje Autor „nie stwierdzono wpływu rodzaju odbiornika na przebieg procesów przełączania tranzystorów głównych i pomocniczych”. Podsumowując tę część pracy należy uznać za istotne przedstawienie w pracy wyników eksperymentalnych, potwierdzających udział Autora w badaniach eksperymentalnych i możliwość porównania z zakładaną koncepcją działania układu.

W rozdziale siódmym przedstawiono zagadnienia dotyczące wpływu obwodów miękkiej komutacji na parametry pracy falownika.

Ze względu na wymagany minimalny czas dla procesów rezonansowych wyznaczony zostaje maksymalna wartość współczynnika głębokości modulacji amplitudy, przy której falownik będzie pracował z miękkim przełączaniem. Analogiczne ograniczenie dotyczy maksymalnej wartości częstotliwości impulsowania falownika. O ile wymagania dotyczące zapewnienia odpowiednich przedziałów czasu dla procesów rezonansowych są oczywiste, jednak Autor przedstawia tu również istotną oryginalną analizę wpływu współczynnika k_{max} oraz prądu odbiornika na minimalną, dopuszczalną wartość czasu nieprzewodzenia tranzystorów głównych, zakres współczynnika głębokości modulacji amplitudy, oraz maksymalną, dopuszczalną wartość częstotliwości fali nośnej.

Istotne wyniki analiz zestawiono w podrozdziale 7.2, gdzie Autor przedstawia straty w falowniku napięcia z układem miękkiego przełączania oraz ich porównanie ze stratami w falowniku bez miękkiego przełączania. Porównanie to wymaga wyznaczenia strat energii w poszczególnych elementach falownika, co w przypadku układu z miękkim przełączaniem wymaga zarówno analizy strat w elementach głównego obwodu mocy jak i pomocniczych. W przypadku tranzystorów głównych różnice strat będą wynikały głównie ze strat łączeniowych, ale również strat przewodzenia, ponieważ w układzie z miękkim przełączaniem przedziały czasu przewodzenia są krótsze niż w przypadku klasycznego falownika. Autor w tej części pracy bardzo czytelnie przedstawia obliczone wartości strat załączania i wyłączania tranzystora głównego w postaci liczbowej i wykresów.

Wyliczenie strat elementów obwodów pomocniczych jest również istotną i oryginalną częścią pracy, ze względu na ich nietypową topologię. Autor w pracy wylicza poszczególne składniki strat w obwodach pomocniczych, czyli straty przewodzenia i przełączania tranzystorów pomocniczych, strat przewodzenia diod oraz straty energii w dławikach. W przypadku dławików wyliczane są jedynie straty wynikające z rezystancji wewnętrznej, co stanowi jedynie część strat dławików z rdzeniem magnetycznym. Istotnym oryginalnym wynikiem prezentowanym w pracy jest porównanie obliczonych całkowitych strat mocy falownika klasycznego oraz układu z miękkim przełączaniem. W pracy zestawiono wyniki obliczeń całkowitych strat mocy oraz ich komponentów w obu przypadkach falowników. Wyniki liczbowe określono w punktach odpowiadających trzem wartościom częstotliwości oraz wartości mocy znamionowej falownika. Podano również wartości sprawności obu rodzaju falowników dla mocy 100KW i 1MW, z których wynika niewielka przewaga falownika z miękkim przełączaniem w stosunku do układu klasycznego. Przy porównaniu sprawności przekształtników istotne byłoby również przedstawienie charakterystyk sprawności w funkcji mocy, co pozwoliłoby na oszacowanie maksymalnej wartości sprawności obu falowników oraz różnic sprawności w zakresie mocy, dla którego projektowany jest przekształtnik. Ostateczną weryfikacją analizy strat energii byłby oczywiście wynik eksperymentalny pomiaru sprawności.

Na uwagę zasługuje również bardzo obszerna liczba pozycji literaturowych, których Autor zawarł 96 w bibliografii. Świadczy to o znaczeniu naukowym i praktycznym analizowanego problemu realizacji układu falownika dużej mocy z redukcją strat łączeniowych w tranzystorach IGBT oraz zagadnień związanych z wyznaczaniem strat mocy w łącznikach półprzewodnikowych.

Proponowany układ i wyniki badań wpisują się w dyskusję w obszarze falowników z miękkim przełączaniem ponieważ posiada istotne zalety. Autor w rozdziale podsumowującym pracy wyszczególnia korzyści stosowania układu z dodatkowymi obwodami miękkiego przełączania, ale również rzetelnie analizuje wady związane z występowaniem większych wartości napięć na tranzystorach głównych w porównaniu z układem bez dodatkowych elementów, czy ograniczenia częstotliwości impulsowania i współczynnika głębokości modulacji.

W podsumowaniu wymieniono również kierunki dalszych badań falownika z miękkim przełączaniem, będącego przedmiotem pracy, w aplikacjach takich jak FACTS lub zasilanie silnika indukcyjnego ze serowaniem wektorowym.

2. Wartość naukowa pracy

Mgr inż. Bartosz Rozegnał przeprowadził badania naukowe i opracował rozprawę doktorską w obszarze bardzo istotnej i aktualnej tematyki. Badania naukowe wykazały skuteczność zastosowania obwodów miękkiego przełączania w dwupoziomowym falowniku napięcia dla ograniczenia strat łączeniowych w tranzystorach głównych układu, a także pozwoliły na określenie wpływu parametrów obwodów pomocniczych, ich sterowania i topologii na pracę przekształtnika. Autor zrealizował badania analityczne, symulacyjne oraz eksperymentalne. Badania eksperymentalne potwierdzają wyniki analityczne, ale także wykazują możliwość praktycznej implementacji analizowanego falownika. Praca zawiera opis oryginalnych rozwiązań problemów naukowych projektowych i konstrukcyjnych i Autora rozprawy, z których najistotniejsze to:

- analiza sposobów wyznaczania wartości elementów analizowanego układu wraz z elementami obwodów miękkiego przełączania,
- propozycja i analiza działania dwóch alternatywnych wersji układu miękkiego przełączania tranzystorów, układu z tyrystorowym obwodem ładowania kondensatora pomocniczego, oraz z przeniesionym dławikiem poza gałąź tranzystora głównego,
- budowa modeli symulacyjnych, przedstawienie i dyskusja wyników symulacyjnych,
- analiza przypadków pracy falownika z nieprawidłowo dobranymi elementami, niewłaściwym sterowaniem, oraz wpływu zakłóceń sterowania obwodów pomocniczych na pracę układu,
- realizacja badań eksperymentalnych, opracowanie i dyskusja wyników dla układu falownika z miękkim przełączaniem ze sterowaniem FPGA.
- analiza wpływu maksymalnego napięcia na kondensatorze pomocniczym, oraz prądu odbiornika na minimalną, dopuszczalną wartość czasu nieprzewodzenia tranzystorów głównych, zakres współczynnika głębokości modulacji amplitudy, oraz maksymalną, dopuszczalną wartość częstotliwości fali nośnej.
- zestawienie i porównanie wyników strat energii falowników z miękkim oraz twardym przełączaniem.

3. Wniosek końcowy

Z przedstawionej przez mgr inż. Bartosza Rozegnała rozprawy pt. „Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania” wynika, że Autor przeprowadził oryginalne badania naukowe i uzyskał oryginalne wyniki badań analitycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych dla trójfazowego falownika z ograniczoną mocą strat łączeniowych. Autor wprowadził również nowe koncepcje układów dla realizacji miękkiego przełączania stanowiące modyfikację koncepcji bazowej. Każdy z etapów badań został w pracy szczegółowo i obszernie przedstawiony.

Cel pracy został osiągnięty, ponieważ zostały przedstawione zarówno koncepcje układu jak i wyniki jego badań.

Zawarte w recenzji uwagi nie wpływają w znaczącym stopniu na moją ogólną pozytywną ocenę pracy, ale są elementem dyskusji z Autorem.

Stwierdzam, że rozprawa pt. „Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania”, której autorem jest mgr inż. Bartosz Rozegnał spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882) w odniesieniu do dyscypliny elektrotechnika i wnoszę o dopuszczenia mgr inż. Bartosza Rozegnała do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

UWAGI DYSKUSYJNE:

1. Autor wielokrotnie akcentuje korzystną właściwość badanego układu jaką jest odporność na zakłócenia i zabezpieczenie przed udarowym zwarcie kondensatorów wejściowych. Należałoby jednak przedstawić ograniczenia również w tym przypadku ze względu na energię gromadzoną w dławikach podczas zwarcia gałęziowego, a następnie w kondensatorach pomocniczych.
2. W rozdziale 5.4.2. analizowane są przypadki pracy falownika w warunkach zakłóceń sterowania, takich jak zbyt krótkie oraz ciągle załączenie tranzystorów pomocniczych. Wydaje się, że należałoby również rozważyć czy przypadek kiedy tranzystor pomocniczy nie zostaje załączany w kolejnych cyklach pracy umożliwia działanie układu. Jest to przypadek bardziej prawdopodobny do stanu ciągłego załączenia tranzystora pomocniczego, ponieważ zwykle w przekształtnikach stosowane są tranzystory normalnie otwarte. Jak słusznie jednak zauważa Autor w podsumowaniu w układzie „wymagana jest kontrolna napięcia kondensatorów układu miękkiego przełączania”.
3. W pracy nie przedstawiono zdjęcia stanowiska laboratoryjnego. Nie podano również parametrów sprzętu pomiarowego, takiego jak sondy prądowe, napięciowe czy oscyloskopy oraz parametrów przetwarzania sygnałów pomiarowych. Ma to istotne znaczenie ze względu na analizę stanów łączeniowych, gdzie opóźnienia sond i dokładność pomiaru istotnie wpływają na wynik pomiaru mocy strat. Należałoby podać, szczególnie opóźnienia sond prądowych użytych do pomiaru, i przedstawić wyniki pomiarów prądu i napięcia tranzystorów w stanach łączeniowych w odpowiedniej skali w postaci zdjęcia ekranu oscyloskopowego.
4. Na rysunkach wyjaśniających zasadę działania układu (np. rys. 4.2 – rys. 4.7) nie pokazano przebiegu napięcia wyjściowego. Wiąże się to z problematyką generowania zakłóceń elektromagnetycznych, filtrowania prądu wyjściowego oraz możliwości wykorzystania źródła napięcia stałego w porównaniu do klasycznego dwupoziomowego układu falownika napięcia.
5. Na rysunkach wyjaśniających zasadę działania układu (np. rys. 4.2 – rys. 4.7) istotne byłyby również sygnały związane z pracą drugiego łącznika w gałęzi, a także prądy diod DIS i D2Z.
6. W pracy zastosowano uproszczony model tranzystora IGBT do symulacji falownika. Czy porównywano przebiegi prądu i napięcia tranzystora w przypadkach jego przełączeń pozyskane w wyniku badań symulacyjnych i laboratoryjnych?
7. Przedstawienie w pracy charakterystyk sprawności w funkcji mocy dla analizowanych falowników pozwoliłoby na porównanie ich sprawności maksymalnych, a także sprawności w pozostałych przedziałach.
8. Na stronie 111 przedstawiono dyskusję dotyczącą strat w dławikach układu miękkiego przełączania. Nie wymieniono jednak wszystkich czynników pozwalających na wyznaczenie strat w dławikach. W ogólnym przypadku nie jest również prawdziwe stwierdzenie znajdujące się na stronie 112 rozprawy, że straty w dławikach w niewielkim stopniu zależą od częstotliwości przełączeń.
9. Sformułowanie zamieszczone na str. 9 „Obecnie najważniejszą grupą przekształtników są falowniki napięcia” nie wydaje się wprowadzać właściwej klasyfikacji przekształtników energoelektronicznych.

Kraków, 26 września 2018

Dr hab. inż. Robert Stala

