

Zielona Góra 29 sierpnia 2018 r.

dr hab. inż. Marcin Jarnut
Instytut Inżynierii Elektrycznej
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Adama Krupy pt. „Izolowane przekształtniki podwyższające DC/DC zasilane z niskonapięciowych źródeł energii”

Recenzja została przygotowana na podstawie Uchwały nr 47/2018 Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej z dnia 27 czerwca 2018 r. oraz umowy o dzieło nr 28/WE-300/2018 z dnia 29 czerwca 2018 r. zawartej pomiędzy Politechniką Białostocką reprezentowaną przez Dziekana WE PB dr hab. inż. Mirosława Świercza, prof. PB a dr hab. inż. Marcinem Jarnutem.

Tematyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa, przygotowana pod opieką merytoryczną dr hab. inż. Jakuba Dawidziuka, prof. PB oraz dr inż. Mariana Gilewskiego, dotyczy wybranych metod poprawy efektywności energetycznej izolowanych przekształtników DC/DC o wysokim współczynniku wzmocnienia napięciowego. Przekształtniki takie wykorzystywane są w układach sprzęgających miejscowe, stałonapięciowe źródła energii elektrycznej z obwodami prądu stałego przekształtników sieciowych lub z mikrosieciami prądu stałego o napięciu pracy powyżej 350 V. Wzrost popularności tego typu źródeł energii, stymulowany regulacjami promującymi rozproszone źródła niskoemisyjne oraz rozwiązania wysokosprawne w energetyce, wymaga także rozwoju wysokosprawnych układów przekształtnikowych. Z przeglądu literatury przedmiotu, przygotowanego przez Doktoranta w rozdziałach wstępnych dotyczących aktualnego stanu wiedzy wynika, że tematyka ta jest aktualna i wymaga prowadzenia dodatkowych badań nad rozwiązaniami charakteryzującymi się jednocześnie wysoką sprawnością energetyczną (powyżej 94%) oraz wysokim współczynnikiem wzmocnienia napięciowego (powyżej 10). Z racji wysokich wartości prądów występujących po stronie pierwotnej izolowanych przekształtników podwyższających w topologiach „klasycznych” tj. zawierających elementy półprzewodnikowe wykonane w „klasycznej” technologii krzemowej i nie wyposażonych w układy i metody sterowania zmniejszające straty komutacyjne często jest to warunkiem trudnym do spełnienia, szczególnie przy mocach obciążenia przekraczających 1 kW. **Z tego punktu widzenia podjęcie badań w tym temacie uznać należy za zasadne.**

W pracy doktorskiej Autor zgodnie z postawioną tezą, że izolowane przekształtniki podwyższające DC/DC zasilane niskim napięciem wejściowych i pracujące przy dużych prądach wejściowych mogą osiągać wysoką sprawność energetyczną i duży współczynnik wzmocnienia napięcia poprzez równoległe połączenie przekształtników oraz usprawnienie konstrukcji elementów magnetycznych wysokiej częstotliwości, skupił swoje badania na modyfikacji wybranej w rozdziale 1 topologii izolowanego przekształtnika półmostkowego z wejściowym źródłem prądowym oraz na opracowaniu opisanego w rozdziale 3 rozwiązania zintegrowanych elementów magnetycznych występujących po stronie pierwotnej takiego przekształtnika. Wybór takiego kierunku zmniejszania strat w przekształtnikach energoelektronicznych, biorąc pod uwagę także przeprowadzoną przez Autora w rozdziale 3.6 analizę struktury strat w przekształtniku, uznać można za dyskusyjny, zwłaszcza, że podobny efekt, a może nawet lepszy, osiągnąć można poprzez zastosowanie elementów półprzewodnikowych wykonanych w coraz powszechniej stosowanej już technologii z węglikiem krzemu (SiC) lub poprzez zastosowanie układów ich „miękkiego” przełączania. Uwzględnienie, jednak ograniczeń zakresu pracy oraz wyższej złożoności

układów miękkoprzełączalnych jak również zastosowanie kryterium kosztów przekształtnika pozwala uznać przyjęty kierunek za uzasadniony.

Postawiony na podstawie tezy cel pracy Autor osiągnął poprzez analizę właściwości energetycznych i funkcjonalnych trzech topologii izolowanych układów przekształtnikowych na drodze rozważań teoretycznych, symulacji komputerowej i badań eksperymentalnych, które zostały opisane w rozdziałach 2, 3 i 4. Najszerszy zakres analiz został zawarty w rozdziale 3 dotyczącym metody projektowania i badań właściwości izolowanego przekształtnika półmostkowego ze zintegrowanymi, wejściowymi elementami magnetycznymi. Oprócz propozycji szczegółowej metodologii projektowania takich układów Autor przedstawił także analizę struktury strat mocy występujących w przekształtniku podwyższającym zawierającym takie elementy. Wydaje się, że z punktu widzenia oceny ilościowej wpływu integracji elementów magnetycznych na redukcję strat mocy w przekształtniku analizy przeprowadzone przez Doktoranta dobrze byłoby przeprowadzić również dla układu opisanego w rozdziale 2. W rozdziale 4 zaproponowane zostało rozwiązanie o topologii quasi-równoległej, gdzie po stronie pierwotnej „zrównoleglone” zostały dwa przekształtniki półmostkowe opisane w rozdziale 3, a po stronie wtórnej połączone zostały dwa uzwojenia wtórne dla uzyskania wyższego współczynnika wzmocnienia napięciowego. Po lekturze rozdziału 3, pewien niedosyt pozostawia fakt, że dla tej topologii zostały przeprowadzone jedynie badania symulacyjne i eksperymentalne właściwości energetycznych i funkcjonalnych bez bardziej szczegółowej analizy struktury strat mocy w poszczególnych elementach. Rozprawę kończy porównanie wybranych właściwości energetycznych i funkcjonalnych badanych przekształtników przedstawione w rozdziale 5, wzbogacone o zestawienie tych właściwości z właściwościami przekształtników znanych z literatury i lektury rozdziałów wstępnych. W rozdziale 6 Autor sformułował wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz. Większość z nich uznać należy za uzasadnione.

Uwagi ogólne i szczegółowe

Lektura rozprawy nasuwa kilka **uwag ogólnych wymagających wyjaśnienia:**

1. We wstępnych rozdziałach pracy doktorskiej Autor dokonał porównania właściwości przekształtników znanych z literatury i spełniających określone parametry elektryczne (str. 22). W analizie brak jest jednoznacznej informacji, czy wszystkie analizowane układy posiadały wszystkie przyrządy półprzewodnikowe wykonane w tej samej technologii np. klasycznej krzemowej i czy elementy wyłączalne były tego samego typu (MOSFET, IGBT). Może mieć to znaczenie przy porównaniu ich właściwości z właściwościami rozwiązań proponowanych przez Autora zwłaszcza, że w badanych układach zastosował on diody wykonane w technologii SiC.
2. Jednym z kryteriów wyboru topologii układu do badań, które zastosował Autor była liczba łączników energoelektronicznych, której wzrost, zdaniem Autora, wpływa na pogorszenie niezawodności i sprawności układu. Dlaczego więc zaproponowana topologia quasi-równoległa posiadająca podobnie jak klasyczna topologia mostkowa cztery łączniki energoelektroniczne jest zdaniem Autora pod tym względem lepsza?
3. We wnioskach na str. 125 Autor stwierdza, że zaproponowana przez niego struktura równoległa ma sprawność niewiele gorszą od układów pojedynczych. Czy z tezy, postawionej w pracy nie wynika, że tego typu układ miał charakteryzować się wyższą efektywnością energetyczną?
4. W tabelach 3.7 do 3.9 zostały przedstawione wyniki analizy bilansu strat mocy w przekształtniku w funkcji napięcia wejściowego. Dlaczego Autor wybrał metodę ze stałym współczynnikiem wypełnienia (także i stałym współczynnikiem wzmocnienia) zamiast np. metody ze stałym napięciem wyjściowym, zwłaszcza, że na wykresie z rys. 3.30 zamieścił wykresy poszczególnych komponentów strat całkowitych w funkcji mocy wejściowej?

5. Autor nie wyjaśnia jednoznacznie, jakie wartości napięć wejściowych i wyjściowych wykorzystywał do obliczenia współczynnika wzmocnienia napięciowego (maksymalne, średnie czy skuteczne), szczególnie, że na zamieszczonych oscylogramach widoczne są pulsacje napięć wejściowych.
6. Wydaje się, że wyznaczone charakterystyki sprawności przekształtników w rozdziałach 2, 3 i 4 powinny być przedstawione w funkcji mocy relatywnej P/P_n tzn. mocy odniesionej do mocy znamionowej (projektowej) przekształtnika. W przypadku przekształtnika o topologii quasi-równoległej, którego moc projektowa jest dwukrotnie większa od mocy pozostałych przekształtników, pozwoliłoby to na bardziej wiarygodne porównanie ich właściwości na jednym wykresie (rys. 5.1).
7. W wynikach badań laboratoryjnych przekształtnika o topologii quasi-równoległej brak jest oscylogramów prądów i napięć wejściowych i wyjściowych, co utrudnia potwierdzenie wyników przedstawionych na rys. 4.8 i rys. 4.9.

Na podstawie analizy tekstu sformułować można także kilka **uwag szczegółowych** o charakterze edycyjnym, które nie wpływają znacząco na wartość merytoryczną pracy:

1. Na str. 122 Autor wnioskuje „porównując wzory opisujące współczynnik wzmocnienia”. Jeżeli jest to porównanie układów zestawionych w tabeli 5.1, w której niestety nie dla wszystkich układów ten wzór został przywołany, wydaje się to nie do końca uprawnione.
2. W rozdziałach 2, 3 i 4 w częściach tych rozdziałów dotyczących projektowania Autor nie stosuje jednolitej metody przedstawienia wyniku projektowania tzn. niekiedy przy równaniach (pomimo nawet braku podstawienia wartości wejściowych) pojawiają się wyniki obliczeń, a w innych miejscach nie.
3. Autor używa zwrotów i wyrażeń, które z różnych względów wydają się być niepoprawne (kolokwializmy, skróty myślowe oraz wyrażenia nieprecyzyjnie opisujące zjawiska w obwodach elektrycznych) np. „przetworzenie mocy” (str. 8), „gęstość upakowania mocy” (str. 9), „do współpracy z szyną DC” (str. 12), „przełożenie zwojów powinno być wystraszające” (str. 16), „napięcie na drenie tranzystora” (str. 24), „szpilki prądowe” (str. 47), „mocy dostarczonej ze źródła” (str. 107) „wartość maksymalna przepięcia w piku” (str. 116) „zglobione badania” (str. 127).
4. W pracy Autor używa różnych separatorów dziesiętnych np. w opisie równania 2.1 na str. 40 „ $(0,5 < D < 1)$ ” a już na str. 41 „ $(19,5 \text{ kHz})$ ”.
5. Podobnie nie jest jednolite piśmiennictwo wartości i jednostek, raz jednostki oddzielone są przyjętą w tego typu pracach spacją (nie dotyczy wartości procentowych i symbolu %) a raz nie. Niejednokrotnie dotyczy to wartości występujących w jednej tabeli np. „62,5A” oraz „350 V” w tabeli 2.1.
6. Na rysunkach przedstawiających schematy ideowe nie wszystkie punkty węzłowe są oznaczone np. rys. 2, rys. 5, rys. 7, rys. 10, rys. 11, rys. 1.1, rys. 1.6.
7. W równaniu 1.1 Autor zdefiniował sprawność układu jako wartość relatywną (niemianowaną) mocy wyjściowej i wejściowej, w pozostałej części pracy używa natomiast wartości procentowych. Należałoby ujednoczyć sposób przedstawiania tej wielkości.
8. Na str. 50 i na str. 129 Autor zamiennie stosuje wyrazy „driver” i „drajwer”. Należałoby ujednoczyć opis tego typu elementu.
9. W pracy występuje szereg „literówek” (brak liter i wyrazów, zamienione litery i niepoprawne końcówki wyrazów) np. „porównania izolowanych podwyższających przekształtnikach” zamiast porównania izolowanych podwyższających przekształtników (str. 24), „wykorzystanie urządzeń” zamiast wykorzystanie w urządzeniach (str. 30), „osiągną” zamiast osiągnął (str. 49), „starty” zamiast straty (ostatni akapit na str. 104), „kilki” zamiast kilku (ostatni akapit na str. 105)

Ocena osiągnięć naukowych i warsztatu naukowego Doktoranta

Na podstawie treści pracy **za osiągnięcia własne Autora** uważam:

- opracowanie koncepcji zmniejszenia strat mocy w izolowanych przekształtnikach podwyższających napięcie poprzez modyfikację topologii półmostkowego przekształtnika izolowanego DC/DC polegającą na równoległym połączeniu stron niskonapięciowych dwóch przekształtników półmostkowych oraz szeregowe połączenie stron wtórnych transformatora izolującego (wg autora topologia quasi-równoległa);
- opracowanie koncepcji zmniejszenia strat mocy w izolowanych przekształtnikach podwyższających napięcie poprzez zastosowanie zintegrowanych elementów magnetycznych po stronie pierwotnej przekształtnika tj. transformatora wyrównawczego zintegrowanego z dławikiem wejściowym;
- opracowanie metodologii projektowania wejściowych, zintegrowanych elementów magnetycznych do przekształtników półmostkowych podwyższających napięcie, uwzględniającej także pracę tych elementów z prądami niesinusoidalnymi;
- opracowanie modeli analitycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych półmostkowych przekształtników izolowanych DC/DC o połączeniu quasi-równoległym i zawierających zintegrowane elementy magnetyczne oraz wykonanie analiz teoretycznych, badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych w opracowanych modelach.

Wymienione wyżej osiągnięcia Doktorant uzyskał poprzez analizę starannie wyselekcjonowanej i w większości bieżącej literatury przedmiotu, zdefiniowanie problemu naukowego i jego rozwiązanie na drodze analizy zjawisk zachodzących w obwodach izolowanych przekształtników energoelektronicznych DC/DC, modelowanie, symulację komputerową a także, co warte podkreślenia, wykorzystanie techniki eksperymentu. **Świadczy to o dobrym przygotowaniu teoretycznym Doktoranta w dziedzinie elektrotechniki oraz umiejętności planowania i przeprowadzania samodzielnych badań naukowych w tej dziedzinie.**

Wyniki prac, przedstawione w rozprawie, były poddane wcześniejszej ocenie merytorycznej i opublikowane przez Doktoranta w kilku czasopismach recenzowanych o zasięgu krajowym i międzynarodowym, co **świadczy o jego dobrym przygotowaniu do działalności popularyzatorskiej.** W rozprawie Autor powołuje się na 4 artykuły samodzielne i 5 współautorskich.

Z treści rozprawy wynika, że część prac badawczych była prowadzona w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki oraz w ramach dwóch prac własnych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej, co wymaga wcześniejszego, odpowiedniego przygotowania wniosków grantowych podlegających ocenie merytorycznej i formalnej. **Potwierdza to umiejętność formułowania przez Doktoranta zadań badawczych oraz odpowiedniej organizacji pracy badawczej.**

Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę powyższą **pozytywną ocenę osiągnięć naukowych** Doktoranta jak również wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz tryb i warunki przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, jakie określa Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku (Dz. U., poz. 261), **wniosuję o przyjęcie przedstawionej pracy, jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

