

Zielona Góra 8 października 2025 r.

dr hab. inż. Marcin Jarnut, prof. UZ
Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Kamila Jana Możdżyńskiego pt. „Fault-tolerant and resistant to grid voltage distortion 4-leg DC/AC converter applied to Power Electronics Transformer”

Recenzja została przygotowana na podstawie Uchwały nr 164/III/2025 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 30 września 2025 r..

Tematyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa, przygotowana pod opieką merytoryczną prof. dr hab. inż. Mariusza Malinowskiego oraz dr inż. Sebastiana Styńskiego, dotyczy opracowania i badań właściwości modułowego przekształtnika DC/AC przeznaczonego do pracy w transformatorkach energoelektronicznych i sterowanego wg strategii oraz algorytmów umożliwiających stabilną pracę z częściowym uszkodzeniem a także uodporniających na odkształcenia napięcia w sieci dystrybucyjnej lub odkształcenia prądu obciążenia.

We współczesnych systemach elektroenergetycznych, szczególnie na poziomie niskich napięć, widoczny jest znaczny wzrost liczby implementowanych przekształtników energoelektronicznych AC/DC oraz DC/AC. Przyczyną tego stanu rzeczy jest szybki rozwój odnawialnych źródeł energii, bateryjnych systemów magazynowania energii a także systemów ładowania pojazdów elektrycznych. Szczególne właściwości współczesnych przekształtników energoelektronicznych w zakresie elastycznego sterowania przepływem energii spowodowały, że są one także rozważane w aplikacjach sieciowych takich jak transformatory energoelektroniczne (Power Electronics Transformer - PET), które mają częściowo zastąpić tradycyjne układy transformowania napięć przemiennych oparte na transformatorkach konwencjonalnych (Conventional Power Transformer - CPT). Z przeglądu literatury sporządzonego przez Doktoranta w pierwszych rozdziale rozprawy wynika, że jest to tematyka wciąż aktualna a rozwiązania oparte na transformatorkach energoelektronicznych PET chociaż oferują dużą szerszą funkcjonalność niż te tradycyjne oparte na transformatorkach konwencjonalnych CPT to wymagają jednak prowadzenia dalszych badań, szczególnie w obszarze, na którym skupił się Doktorant tj. niezawodności. W systemach energetycznych w coraz większym stopniu opieranych na źródłach rozproszonych niezawodność urządzeń energetycznych pracujących w układach transformowania napięć jest jednym z podstawowych parametrów wpływającym obecnie nie tylko na wypełnienie zobowiązań wynikających ze standardów jakości obsługi odbiorców ale także wpływających na szeroko rozumiane bezpieczeństwo energetyczne. Wspomniane standardy jakości obsługi odbiorców, które są obecnie częścią instrukcji eksploatacji sieci dystrybucyjnych, definiują także inne parametry związane z jakością napięć w sieciach dystrybucyjnych i w pewien sposób uzależniają ją od oddziaływania odbiorników i źródeł rozproszonych na tą sieć. Oznacza to, że podjęta przez Doktoranta tematyka badań związana z redukcją wpływu odkształceń napięć sieci dystrybucyjnej i odkształceń prądów odbiorników na warunki pracy PET jest ważna i aktualna. W pierwszym rozdziale pracy Autor, na podstawie analizy stanu wiedzy, zidentyfikował problemy badawcze, których rozwiązanie jego zdaniem ma pozwolić na rozwój obszaru wiedzy związanego z transformatorkami energoelektronicznymi. **Biorąc pod uwagę powyższe podjęcie przez Doktoranta badań we wskazanych w pracy obszarach uznać należy za zasadne i mieszczące się w obszarze wiedzy objętym dyscypliną naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**



W pracy doktorskiej zgodnie z postawioną tezą, że zastosowanie wielu, równolegle połączonych przekształtników DC/AC z rozproszonym układem sterowania pozwala na niezawodną pracę z częściowym uszkodzeniem w trybie współpracy z siecią i w trybie formowania sieci, Autor skupił swoje badania na rozwiązaniu oryginalnego problemu naukowego polegającego na opracowaniu nowej topologii wielomodułowego, rekonfigurowalnego przekształtnika DC/AC z uwzględnieniem architektury układu komunikacyjnego pozwalającego na niezawodne sterowanie w czasie rzeczywistym oraz na opracowaniu strategii i algorytmów sterowania uodporniających pracę przekształtnika DC/AC zarówno na jego częściowe uszkodzenie jak i na wpływ odkształceń napięcia sieci w trybie współpracy z siecią i odkształceń prądów odbiornika w trybie formowania sieci. **Obrany kierunek badań uznać należy za właściwy a biorąc pod uwagę treść pracy i zamieszczone w niej wyniki badań, sformułowany przez Autora, w rozdziale 6 wniosek o udowodnieniu postawionej tezy uznać należy za prawdziwy.**

Wynikające z tezy cele pracy Autor osiągnął poprzez:

- przeprowadzoną w rozdziale 2 wielokryterialną analizę niezawodności transformatora energoelektronicznego zakończoną wyborem optymalnej zdaniem Autora topologii przekształtnika DC/AC;
- opracowanie opisanych w rozdziale 3 strategii i algorytmów sterowania wielomodułowym przekształtnikiem DC/AC zdolnym do pracy ciągłej z częściowym uszkodzeniem, w dwóch trybach pracy tj. w trybie współpracy z siecią i w trybie formowania sieci a także odpornym na odkształcenia napięcia w sieci dystrybucyjnej i odkształcenia oraz asymetrię prądów odbiornika;
- opracowanie opisanego w rozdziale 4 układu komunikacyjnego pozwalającego na szybkie i niezawodne sterowanie wielomodułowym przekształtnikiem DC/AC w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem synchronizacji pracy poszczególnych modułów DC/AC;
- opracowanie modelu symulacyjnego i modelu eksperymentalnego oraz przeprowadzenie opisanych w rozdziale 5 wielokryterialnych badań symulacyjnych i eksperymentalnych opracowanego wielomodułowego przekształtnika DC/AC potwierdzających jego zdolność do pracy z częściowym uszkodzeniem w dwóch trybach pracy tj. w trybie współpracy z siecią i w trybie formowania sieci a także odporność na odkształcenia napięcia w sieci dystrybucyjnej i odkształcenia oraz asymetrię prądów odbiornika;

Uwagi ogólne i szczegółowe

Lektura rozprawy nasuwa kilka **uwag ogólnych wymagających wyjaśnienia lub komentarza ze strony Doktoranta:**

1. W rozdziale drugim Autor zawarł opis metodyki oceny niezawodności transformatora energoelektronicznego i na jej podstawie sformułował rekomendacje dotyczące topologii wielomodułowego przekształtnika DC/AC pozwalającej na ciągłą pracę z częściowym uszkodzeniem w trybie współpracy z siecią i w trybie formowania sieci. Z lektury pracy nie wynika w sposób bezpośredni wybrana do badań symulacyjnych i eksperymentalnych liczba modułów przekształtnikowych DC/AC. Czy wybrana konfiguracja oparta na 4 równoległych modułach jest konfiguracją optymalną z punktu widzenia założonej funkcjonalności? Jeżeli tak to proszę o krótkie uzasadnienie tego wyboru.
2. W analizach i badaniach opracowanego wielomodułowego przekształtnika DC/AC Autor pominął zupełnie zjawiska zachodzące w obwodzie DC wielomodułowego przekształtnika DC/AC i skupił się wyłącznie na stronie AC. Czy jest to zabieg celowy wynikający z założenia stałości napięcia w obwodzie DC, czy może wynika z obserwacji poczynionych w trakcie badań? Czy w układach rzeczywistych opartych na strukturach typu „back to back” pulsacje i

zmiany napięcia w obwodzie DC w stanach dynamicznych będą miały wpływ na skuteczność opracowanych metod sterowania? Proszę o krótki komentarz uzasadniający przyjęte założenia.

3. Badania opracowanego układu zostały przeprowadzone przy obniżonym napięciu po stronie AC. Z czego wynika przyjęta w badaniach wartość napięcia strony AC i w jaki sposób została zamodelowana sieć o takim napięciu w badaniach eksperymentalnych?
4. Rozdział 5 Autor zatytułował jako analiza wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Zamieszczone w rozdziale wyniki badań opierają się głównie na przebiegach czasowych i w wybranych przypadkach widmach częstotliwościowych. Na ich podstawie Autor wyciąga wnioski dotyczące jakości pracy opracowanego układu w różnych stanach pracy. Czy na potrzeby oceny jakości pracy opracowanego układu, chociażby w stanach ustalonych, można zastosować kryteria oparte na wartościach liczbowych parametrów jakościowych napięcia takich jak wartość skuteczna, współczynnik zawartości wyższych harmonicznych THD, amplituda poszczególnych harmonicznych parzystych i nieparzystych, współczynnik asymetrii? Wartości tych parametrów są zdefiniowane w instrukcjach ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnych i wynikają z wymagań normatywnych. Czy Autor celowo nie skorzystał z tych kryteriów ze względu na nienormatywną wartość napięcia po stronie AC przyjętą w układzie badawczym?
5. Autor założył, że opracowana topologia pozwoli na akcje serwisowe na odstawionym w wyniku awarii module DC/AC w trybie „hot-swap” bez przerywania pracy pozostałych modułów przekształtnikowych DC/AC i całego transformatora energoelektronicznego. Z opisów zamieszczonych w rozdziale 3.6.3 ani ze schematów zastępczych układu nie wynika natomiast w jaki sposób odstawiany moduł DC/AC jest odłączany od wspólnego obwodu DC. Brak jest również opisu procesu ponownego załączania sprawnego modułu DC/AC do wspólnego obwodu DC pracującego transformatora energoelektronicznego. Czy taki proces był rozpatrywany w ramach badań? Jeżeli tak to czy po stronie DC poszczególne moduły DC/AC są przyłączane do wspólnego obwodu DC za pomocą dwukierunkowych układów łącznikowych podobnie jak po stronie AC są łączone do wspólnego obwodu AC?
6. W pracy zamieszczone zostały wyniki badań opracowanego układu w stanach dynamicznych związanych z symulowaną awarią wewnątrz transformatora energoelektronicznego a zjawiska związane z zaburzeniami zewnętrznymi ograniczono głównie do odkształceń napięcia, odkształceń i asymetrii prądu. Czy badano zachowanie układu w stanie pracy niepełnofazowej sieci lub w stanie zwarcia poza transformatorem energoelektronicznym?

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

1. Wydaje się, że dla czytelności przekazu wyjaśnienia wymaga czerwony znak „X” pojawiający się w niektórych komórkach tabeli z rysunku 19 na stronie 45.
2. W równaniach, w całej pracy, Autor stosuje niejednolity zapis iloczynu w zapisie zależności matematycznych raz stosując operator mnożenia w postaci „gwiazdki” a w innych przypadkach go pomijając. Dodatkowo wybór tego operatora do zapisu operacji mnożenia jest dość niefortunny gdyż za jego pomocą Autor oznacza także sygnały referencyjne.
3. W tekście oraz w równaniach Autor stosuje niejednolity zapis wartości wraz z jednostkami, w niektórych miejscach stosując spację pomiędzy wartością a jednostką a w innych ją pomijając (np. na stronach 89 i 90).
4. Autor stosuje także niejednolite nazewnictwo angielskie stosując w dwóch sąsiadujących komórkach (np. tabela 17 na stronie 144) „asymmetrical load” zaraz po „asymmetrical load” czy „asymmetrical load” zaraz po „symmetric load”. W drugim przypadku oczywiście obie formy końcówki wyrazu są poprawne jednak w tekście należałoby to ujednolicić.
5. W rozdziale 5, na rysunkach przedstawiających wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, Autor stosuje niejednolity opis osi czasu oraz oznaczenie jednostek czasu (np. rysunek 92 i rysunek 93 na stronie 140 i stronie 141).

Wskazane wyżej uwagi stanowią jedynie przykład zauważonych niedociągnięć edycyjnych, nie wpływają na wartość pracy oraz jej odbiór przez czytelnika i należy je raczej traktować w charakterze wskazówek edytorskich do zastosowania w kolejnych pracach Autora.

Ocena osiągnięć naukowych i warsztatu naukowego Doktoranta

Na podstawie treści pracy **za osiągnięcia własne Autora** uznać można:

- opracowanie wielomodułowej i rekonfigurowalnej topologii przekształtnika DC/AC przeznaczonego do pracy w ramach transformatora energoelektronicznego pozwalającej na pracę z częściowym uszkodzeniem w dwóch trybach pracy tj. współpracy z siecią i formowania sieci;
- opracowanie metody sterowania wielomodułowym i rekonfigurowalnym przekształtnikiem DC/AC pozwalającej na ciągłą i stabilną pracę z częściowym uszkodzeniem a także w warunkach odkształconego napięcia sieci lub odkształconego i asymetrycznego prądu odbiornika;
- opracowanie rozproszonego układu sterowania wielomodułowym i rekonfigurowalnym przekształtnikiem DC/AC pozwalającego na szybką i niezawodną komunikację i sterowanie w czasie rzeczywistym;
- uzyskanie wyników analiz oraz badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdzających odporność opracowanych rozwiązań na częściowe uszkodzenie a także na odkształcenia napięcia sieci oraz odkształcenia i asymetrię prądów odbiornika.

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 przekształtników energoelektronicznych DC/AC, poprzez modelowanie, symulację komputerową a także, co warto podkreślić, wykorzystanie techniki eksperymentu. **Świadczy to o bardzo dobrym przygotowaniu teoretycznym Doktoranta w obszarze wiedzy objętym dyscypliną naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz o umiejętności planowania i przeprowadzania samodzielnych badań naukowych w tej dyscyplinie.**

Wyniki prac, przedstawione w rozprawie, były poddane wcześniejszej ocenie merytorycznej i opublikowane przez Doktoranta w czasopiśmie recenzowanym o zasięgu międzynarodowym. Były też przedstawiane na międzynarodowych konferencjach naukowo-technicznych co **świadczy o jego dobrym przygotowaniu do działalności popularyzatorskiej.** W tym obszarze działalności naukowej, w rozprawie Autor wymienił 9 artykułów współautorskich w tym 4 dotyczące bezpośrednio tematyki pracy doktorskiej.

Z treści rozprawy wynika, że część prac badawczych Autora była prowadzona w ramach grantu Team Tech/2016-1/5 finansowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej oraz w ramach czterech innych grantów bezpośrednio niezwiązanych z tematyką rozprawy. Podkreślić należy, że wymaga to 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 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z dnia 20 lipca 2018 r. **wnioskuję o przyjęcie przedstawionej pracy, jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

