



RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Barteckiej
p.t. „Analiza dwukierunkowych, rezonansowych przekształtników DC/DC przeznaczonych do
współpracy bateryjnych zasobników energii z mikrosieciami prądu stałego”**

- opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej,
w piśmie z dnia 25.05.2022 r.

1. Podstawowe dane o Kandydatce

Mgr inż. Magdalena Bartecka ukończyła studia pierwszego i drugiego stopnia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej na kierunku Elektrotechnika, specjalność Elektroenergetyka, w roku 2014. W latach 2014-2020 odbyła studia doktoranckie na tym samym wydziale w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (d. Elektrotechnika). Od roku 2015 pracuje w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej na stanowisku asystenta, a od roku 2017 także w Grupie IEN, Warszawa jako audytor energetyczny.

Doktorantka zdobywała doświadczenie zawodowe jako pracownik naukowy w European Academy of Bolzano, Włochy, w latach 2016-2017. W chwili obecnej uczestniczy w realizacji dwóch projektów badawczych na macierzystej Uczelni, w tym projektu UE POWERSKIN w ramach programu Horyzont 2020. Jest autorką 17 publikacji naukowych, w tym 3 publikacji w czasopiśmie indeksowanych w bazie JCR, jest także współautorką patentu.

2. Wybór tematyki rozprawy

Wraz ze wzrostem mocy zainstalowanej rozproszonych źródeł energii zmienia się struktura oraz funkcjonowanie elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych, a w szczególności sieci niskiego napięcia. Integracja źródeł stwarza szereg problemów związanych z utrzymaniem wymaganego poziomu jakości energii elektrycznej, ale też daje nowe możliwości w zakresie zwiększenia niezawodności zasilania odbiorców. Lokalne bilansowanie mocy i energii oraz możliwość intencjonalnej pracy wyspowej wydzielonego układu stają się pożądaną cechą sieci z generacją rozproszoną, która w istniejących warunkach jest trudna do uzyskania. Źródła sterowane są jako prądowe, a przy utracie połączenia z siecią zasilającą wymagane jest ich wyłączenie.

Od wielu lat prowadzone są na świecie intensywne badania dotyczące funkcjonowania sieci z generacją rozproszoną, roli zasobników energii w procesie integracji źródeł oraz funkcjonowaniu inteligentnych mikrosystemów (*ang. smart microgrid*) energetycznych, które mogą pracować w trybie połączenia z nadrzędną siecią zasilającą oraz w trybie



wyspowym. Uzyskanie takich funkcjonalności wymaga odpowiedniego doboru urządzeń wytwórczych, urządzeń magazynujących energię oraz układów pomiarowo-kontrolnych i sterujących. Szczególną uwagę poświęca się strategiom zarządzania oraz algorytmom sterowania pracą źródeł i zasobników. Literatura dotycząca tematu jest bardzo obszerna. Na świecie wdrażane są rozwiązania pilotażowe mikrosystemów o różnym charakterze i różnej funkcjonalności. Szereg prac w tym zakresie prowadzonych jest także w Polsce.

Do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej powszechnie stosowane są układy prądu przemiennego (AC). Technologie urządzeń generacji rozproszonej, tj. źródeł i zasobników energii wymagają zastosowania przekształtników energoelektronicznych do integracji tych urządzeń z istniejącymi sieciami AC. W sytuacji, gdy liczba takich urządzeń jest znacząca, uzasadnione może być połączenie ich we wspólnej sieci prądu stałego (DC) i zastosowanie jednego przekształtnika DC/AC do integracji z siecią AC. Wprowadzeniu odrębnej sieci DC w układach zasilania odbiorców sprzyjać może także obecność odbiorników prądu stałego, które przy zasilaniu z sieci AC wymagają interfejsu AC/DC, czy też – w przyszłości – samochodów elektrycznych.

W badaniach poświęconych rozwojowi systemu elektroenergetycznego wykorzystanie układów DC do przesyłu energii elektrycznej staje się coraz częściej podejmowanym tematem, nie tylko w odniesieniu do przesyłu mocy na duże odległości, ale także do zasilania odbiorców bytowo-komunalnych i przemysłowych. Projektowanie takich układów pod kątem doboru współpracujących ze sobą urządzeń, jak również strategii i algorytmów sterowania, jest stosunkowo nowym i złożonym zagadnieniem, w którym można poszukiwać nowych lub ulepszonych rozwiązań oraz nowych narzędzi badawczych.

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Magdaleny Barteckiej dotyczy zagadnień wykorzystania bateryjnych zasobników energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia z generacją rozproszoną i dobrze wpisuje się w aktualny nurt badań poświęconych systemowi elektroenergetycznemu. Przedmiotem pracy jest projektowanie dwukierunkowych przekształtników energoelektronicznych DC/DC do integracji takich zasobników w układach DC mikrosieci elektroenergetycznych¹.

Tematyka pracy jest interesująca, nowoczesna i bardzo aktualna, a w kontekście powyższych rozważań wybór tematu rozprawy uważam za całkowicie uzasadniony.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 145 stron, została zredagowana w 9 rozdziałach i uzupełniona wykazem najważniejszych oznaczeń, spisem rysunków oraz tablic.

Pierwsze dwa rozdziały pracy można uznać za uzasadnienie podjęcia tematu. W rozdziale 1 podano ogólny opis mikrosieci prądu przemiennego i stałego oraz wskazano na rolę systemów magazynowania energii. Rozdział 2 zawiera przegląd topologii dwukierunkowych przekształtników rezonansowych DC/DC. Cel rozprawy, teza i zakres pracy zostały sformułowane w rozdziale 3. Rozdział 4 poświęcony został

¹ Autorka posługuje się występującym w literaturze polskiej określeniem *mikrosieci* (z ang. *microgrids*), definiując je jako lokalne struktury elektroenergetyczne, w których obok odbiorów występują źródła i magazyny energii elektrycznej, połączone wspólną siecią i wyposażone w odpowiednie układy pomiarowo-kontrolne, które mogą pracować w dwóch trybach, tj. w połączeniu z nadrzędną siecią zasilającą oraz w trybie pracy wyspowej. Zdaniem recenzentki dla układów tego typu znaczeniowo lepsze jest określenie *mikrosystem*, ze względu na ich cechy i funkcjonalności podobne do tych, które występują w dużych systemach elektroenergetycznych (*power grids*), oczywiście w stosownej do rozmiaru skali.

metodom stosowanym w analizie sygnałów w przekształtnikach rezonansowych. Kolejne dwa rozdziały pracy poświęcono odpowiednio opisowi zjawisk zachodzących w przekształtnikach rezonansowych LLC/CLLC (rozdział 5) oraz algorytmom sterowania takimi przekształtnikami (rozdział 6). W rozdziale 7 zawarto analizę procesu projektowania przekształtników rezonansowych typu CLLC oraz opis proponowanej przez Autorkę metodyki. W rozdziale 8 zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Podsumowanie i wnioski końcowe wskazujące kierunek dalszych badań, sformułowała Autorka w rozdziale 9. Rozprawa zakończona jest obszernym, liczącym 134 pozycje, spisem literatury.

W mojej ocenie praca tworzy logiczną całość i zawiera wszystkie elementy istotne dla rozprawy doktorskiej.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana rozprawa stanowi interesujący wkład do rozważań nad możliwością wykorzystania zasobników energii i układów DC przy wdrażaniu mikrosystemów elektroenergetycznych niskiego napięcia. Celem pracy określonym przez Doktorantkę jest *„zapropozowanie praktycznej metody projektowania i budowy dwukierunkowych przekształtników rezonansowych DC/DC umożliwiających integrację magazynów energii małych mocy z mikrośieciami prądu stałego”*. Cel pracy jest jasny i jest konsekwentnie przez Doktorantkę realizowany.

Przegląd topologii dwukierunkowych przekształtników rezonansowych DC/DC został przygotowany na podstawie literatury, pod kątem zastosowań do współpracy z magazynami energii. Autorka wskazuje na wynikającą z rozwoju technologii łączników półprzewodnikowych coraz większą popularność przekształtników rezonansowych, które umożliwiają zwiększenie częstotliwości łączeń, zmniejszenie strat łączeniowych i zmniejszenie rozmiarów urządzenia. Zaprezentowano układy szeregowo i równoległe, opisy zawierają odpowiednie schematy, parametry charakterystyczne, tj. pulsację, impedancje falową, dobroć układu, a także uzyskane z symulacji zależności graficzne prądu i napięcia odbioru w funkcji częstotliwości źródła zasilania, dla różnych dobroci i impedancji falowej. Na podstawie przeprowadzonej analizy Autorka dokonała podsumowania istotnych właściwości topologii przekształtników i ze względu na wymagane do planowanych zastosowań cechy przekształtnika zdecydowała się na wybór topologii podwójnego mostka z obwodem rezonansowym CLLC. Wybór ten jest przekonujący i nie budzi zastrzeżeń.

W podsumowaniu przeglądu topologii przekształtników rezonansowych Autorka zwraca uwagę na problemy techniczne jakie stwarza projektowanie i budowa takich przekształtników przy wykorzystaniu technologii nowych, szybkich łączników, np. z azotku galu. Problemy te wynikają m.in. z podatności urządzenia na wpływ zjawisk pasożytniczych i wskazują na kluczowe znaczenie projektowania elementów magnetycznych transformatora wysokiej częstotliwości dla uzyskania właściwej pracy, wysokiej sprawności, z jednoczesnym zachowaniem minimalnych wymiarów urządzenia. W tym kontekście i zgodnie z przedstawionym powyżej celem pracy, sformułowana jest teza rozprawy w brzmieniu: *„Możliwe jest zaprojektowanie i budowa przekształtnika dwukierunkowego CLLC, integrującego transformator wysokoczęstotliwościowy z obwodem rezonansowym, na podstawie kryterium minimalnego rozmiaru elementów magnetycznych, bazującego na iloczynie powierzchniowym A_p ”*.

Sformułowanie tezy jest jasne, ale nie wskazuje wyraźnie na oryginalność proponowanego rozwiązania. Czytelnikowi mniej zorientowanemu w problematyce projektowania przekształtników trudno to ocenić na podstawie ogólnych informacji zamieszczonych we wcześniejszych rozdziałach (także uwaga 1 w p. 5).

Zadania badawcze jakich realizację postawiła przed sobą Doktorantka dla udowodnienia tezy pracy obejmują kolejno: rozważania teoretyczne i analizy prowadzące do identyfikacji zjawisk, określenia

zależności i wpływu poszczególnych elementów na pracę przekształtnika, zdefiniowanie wymaganych cech przekształtnika i założeń projektowych, opracowanie metodyki projektowania, zbudowanie modelu symulacyjnego przekształtnika według proponowanego algorytmu i przeprowadzenie odpowiednich badań symulacyjnych, wreszcie zbudowanie prototypu urządzenia. Podejście takie jest właściwe, a jego komplementarność zasługuje na podkreślenie.

Prezentowana w rozprawie metodyka projektowania dotyczy przekształtników rezonansowych dwukierunkowych DC/DC o topologii CLLC sterowanych metodą modulacji częstotliwością impulsów PFM. W proponowanym podejściu proces projektowania rozpoczyna się od założeń konstrukcyjnych, wyboru łączników i zaprojektowania transformatora wysokoczęstotliwościowego. Przy wykorzystaniu wskaźnika iloczynu powierzchniowego A_p wyznacza się minimalne wartości elementów indukcyjnych obwodu rezonansowego. Po zbudowaniu transformatora można pomierzyć rzeczywiste wartości parametrów indukcyjnych, które stanowią część obwodu rezonansowego.

Ważnym elementem procesu projektowania jest wyznaczenie charakterystyk pracy przekształtnika. Do tego celu Autorka opracowała schemat zastępczy przekształtnika, w którym zostały uwzględnione elementy pasożytnicze. Charakterystyki pracy wyznaczono na podstawie analizy FHA transmitancji widmowej schematu zastępczego dla różnych wartości impedancji charakterystycznych, dobroci i współczynników m określających stosunek indukcyjności szeregowej do indukcyjności magnesowania. Na ich podstawie określono możliwości regulacji napięcia oraz obszary pracy przekształtnika w dopuszczalnym zakresie przełączania.

W podsumowaniu rozważań dotyczących projektowania przekształtników Autorka przedstawia proponowaną metodykę projektowania za pomocą algorytmu. Z formalnego punktu widzenia algorytm dotyczy raczej metody, a nie metodyki projektowej (zgodnie ze słownikiem języka polskiego, metodyka – zbiór zasad, a metoda – sposób postępowania), ale w tym przypadku jest dobrym sposobem pokazania kolejnych kroków postępowania. Algorytm jest zwięzły i w zasadzie jasny, chociaż moim zdaniem korzystne byłoby umieszczenie w blokach procedur obliczeniowych odwołania do wzorów, według których obliczenia są wykonywane.

Zgodnie z przedstawionym algorytmem projektowania Autorka wyznaczyła parametry przekształtnika dedykowanego do współpracy z zasobnikiem energii w mikrosieci DC, opracowała model symulacyjny, a następnie zbudowała prototyp urządzenia. Eksperymenty przeprowadzone z udziałem zbudowanego przekształtnika miały na celu analizę właściwości układu przy ładowaniu i rozładowaniu zasobnika, przy różnej częstotliwości łączeń. Wyniki badań opisane w rozdziale 8 pokazały, że zaprojektowany przekształtnik posiada cechy wymagane do współpracy z zasobnikiem bateryjnym. Zbliżone wyniki symulacji i pomiarów rzeczywistych, co nie zostało pokazane w pracy, ale sprawdzone przez Autorkę, stanowią dowód poprawności opracowanego modelu i weryfikację proponowanej metody projektowania.

Stwierdzam, że zadania badawcze sformułowane przez Doktorantkę zostały zrealizowane przy wykorzystaniu właściwych metod analizy, tym samym teza rozprawy została udowodniona. Autorka wykazała się umiejętnością poprawnego przedstawiania uzyskanych wyników i prawidłowym wnioskowaniem. Przegląd literatury dotyczącej tematu jest wyczerpujący, a analiza źródeł jest rzetelna.

Za główne osiągnięcia Autorki i oryginalne elementy rozprawy uważam:

- wszechstronną i krytyczną analizę właściwości przekształtników rezonansowych typu CLLC,
- opracowanie schematu zastępczego i modelu przekształtnika wraz z układem sterowania z uwzględnieniem elementów pasożytniczych,
- opracowanie autorskiej metodyki projektowania przekształtników na podstawie kryterium minimalizacji rozmiaru elementów magnetycznych

- zbudowanie prototypu przekształtnika zaprojektowanego według opracowanej metodyki.

Pod względem językowym praca jest napisana dobrze, redakcja pracy jest staranna, a usterki językowe i formalne są nieliczne; pomijam je w recenzji.

5. Uwagi i pytania merytoryczne

Poniżej przedstawiam główne uwagi i pytania merytoryczne, jakie nasuwają się po lekturze pracy.

1. Proszę o odniesienie proponowanej metodyki projektowania dwukierunkowych przekształtników rezonansowych DC/DC do istniejącej praktyki projektowej. Jakie istniejące obecnie problemy projektowania rozwiązuje lub rozwiązywanie jakich problemów ułatwia?
2. Proszę o wyjaśnienie, na ile ogólna jest przedstawiona w rozprawie metodyka projektowania dwukierunkowych przekształtników rezonansowych z transformatorami wysokiej częstotliwości, ewentualnie jakie są ograniczenia dla jej stosowania.
3. Jakie narzędzie zastosowała Doktorantka do przeprowadzenia badań symulacyjnych?
4. W rozdziale 8.6 brak jest informacji o sposobie wyznaczenia strat badaniach symulacyjnych i w układzie rzeczywistym. W jaki sposób uzyskano krzywe sprawności przedstawione na rysunku 8.21?
5. Dla jakich częstotliwości słuszny jest wzór 5.11 określający współczynnik zwiększenia rezystancji przewodu F_r występujący we wzorze 7.4? (F_R czy F_r ?)
6. Wyniki zaprezentowane w rozdziale 8.5 dotyczą stanów ustalonej pracy przekształtnika. W rzeczywistej sieci z odnawialnymi źródłami energii zmienność mocy generowanej jest duża, a więc przekształtnik może pracować przy szybkich zmianach wartości i kierunku mocy, szczególnie przy pracy wyspowej mikrosystemu. Jaka będzie jakość pracy w takich warunkach? Czy takie badania były prowadzone?
7. Na str. 16 rozprawy (p.1.5) Autorka pisze: *„Koła zamachowe mogą oddawać duże ilości energii w krótkim czasie, jednak w dłuższym horyzoncie czasu są nieużyteczne, ze względu na dużą bezwładność i samorozładowanie”*. Koła zamachowe zaliczane są do kategorii zasobników mocy, a ich rolą jest podtrzymanie zasilania kosztem energii zgromadzonej w masach wirujących. W tym przypadku duża bezwładność daje w efekcie użyteczność i nie jest wadą. Takich zasobników nie można porównywać z zasobnikami energii takimi jak baterie akumulatorów, których rola jest inna.
8. Nazewnictwo wymaga uporządkowania. W odniesieniu do wielkości takich jak napięcia, prądy, moce Autorka używa wymiennie pojęć „parametry energii elektrycznej” (np. str. 16, str. 23) i „sygnały elektryczne” (str. 20). Parametr jest wielkością charakterystyczną dla urządzenia/układu i przyjmuje wartość stałą, a sygnał niesie informacje o danej wielkości.
9. Analiza w dziedzinie czasu należy do metod stosowanych zarówno w stanach ustalonych, jak i nieustalonych, zależnie od wymuszeń, a nie jak podano na str. 46 do metod analizy w warunkach ustalonych.

6. Wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter dyskusyjny oraz wyjaśniający i nie kwestionują zasadniczych wyników rozprawy oraz oryginalnych osiągnięć Autorki, które oceniam bardzo pozytywnie.

Wyniki zawarte w rozprawie są interesujące i wartościowe z naukowego oraz praktycznego punktu widzenia. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, znajomością metod badawczych, wiedzą szczegółową w zakresie przekształtników energoelektronicznych oraz ogólną wiedzą w zakresie elektrotechniki. Uzyskane wyniki mają potencjał aplikacyjny.

W mojej ocenie na podkreślenie zasługuje konsekwentne, dojrzałe podejście Doktorantki, łączące kompleksową i wnikliwą analizę złożonych zależności i zjawisk fizycznych z umiejętnością wykorzystania wyników tej analizy do stworzenia narzędzi dla praktyki inżynierskiej.

Osiągnięcia Kandydatki mieszczą się całkowicie w dawnej dyscyplinie elektrotechnika, a tym samym w aktualnej dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Barteckiej z nadmiarem spełnia wymagania Ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw z dnia 21.06.2016 r., poz. 882). Wnioskuje o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów postępowania przewidzianego w przewodach doktorskich.

Inna Waszka