

Gdańsk, dnia 29.09.2022 r.

dr hab. inż. Marek Turzyński, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 04.10.2022
nr 30 zał.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Zellnera pt. "Wybrane zagadnienia układów bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z silnym sprzężeniem magnetycznym"

Podstawą recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ nr RDAEE.512.9.2022 z dnia 25.07.2022 r. z informacją o powołaniu mnie na recenzenta wymienionej powyżej rozprawy doktorskiej.

1. Merytoryczna ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Zellnera została napisana w języku polskim, łącznie liczy 134 strony i obejmuje osiem rozdziałów, spis 88 pozycji bibliograficznych, załączniki zawierające rozwiązania rozpatrywanych zależności analitycznych oraz schematy obwodów głównych i układów sterowania układu eksperymentalnego.

1.1. Jaki jest problem naukowy (teza) i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

W swojej rozprawie doktorskiej mgr. inż. Michała Zellner postawił tezę:

Możliwe jest konstruowanie prostych układów bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z silnym sprzężeniem magnetycznym, które bez zastosowania sprzężeń zwrotnych zapewniają znaczną sztywność napięcia wyjściowego.

Przedstawiony problem dotyczy możliwości skonstruowania układu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z wykorzystaniem sprzężenia magnetycznego przy jednoczesnym ograniczeniu liczby elementów składowych układu i eliminacji sprzężenia zwrotnego służącego stabilizacji napięcia wyjściowego. Stabilizacja napięcia wyjściowego przy zmianach obciążenia od wartości znamionowej do stanu jałowego w takim układzie jest wówczas zapewniona w sposób naturalny dzięki przyjęciu odpowiedniej topologii przekształtnika oraz właściwemu doborowi parametrów elementów składowych. W rezultacie podejście takie prowadzi do uproszczenia konstrukcji układów m.in. poprzez eliminację złożonych układów sterowania przy jednoczesnej optymalizacji przekształtnika pod kątem uzyskania możliwie wysokiej sprawności.

Teza postawiona jest poprawnie, aczkolwiek użycie wyrażenia "znaczna" może wprowadzać pewną nieścisłość ze względu na niejednoznaczność sformułowania.

1.2. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny i dotyczy zagadnień związanych z doбором topologii oraz optymalizacją układów do indukcyjnego przesylu energii elektrycznej (IPT). Zasadniczą i wnoszącą największy wkład część rozprawy stanowią rozdziały 5 - 7, w których Autor uzasadnia wybór przyjętej topologii układu w konfiguracji S-S, a następnie poddaje analizie analitycznej i badaniom symulacyjnym rozwiązania układu pośredniczącego złożonego ze sprzężonych magnetycznie cewek wraz z dodatkowym elementem kompensującym w postaci kondensatora umieszczonego po stronie wtórnej tj. w obwodzie wejściowym prostownika. Dodatkowo Autor wyprowadził warunki oraz założenia projektowe dla rozpatrywanego układu skompensowanego oraz przeprowadził analizę porównawczą dla układu nieskompensowanego bez elementów kompensujących. W ramach przeprowadzonych badań symulacyjnych Autor opracował modele numeryczne, a następnie na ich podstawie sprawdził wpływ reaktancji cewek i przekładni kompensującej na sprawność układu oraz stabilność napięcia wyjściowego i wartości współczynnika THD prądu po stronie pierwotnej i wtórnej. W podsumowaniu rozdziału 6 Autor stwierdził, iż do doboru parametrów i optymalizacji rozważanego układu IPT większą przydatność wykazuje metoda symulacyjna bazująca na opracowanych modelach numerycznych niż metoda symboliczna opierająca się na rozważaniach analitycznych. W rozdziale 7 Autor przedstawił wyniki badań eksperymentalnych opracowanego układu IPT ze skompensowanym obwodem pośredniczącym i współczynnikiem sprzężenia magnetycznego $k > 0.7$ oraz zweryfikował rezultaty uzyskane z wykorzystaniem metody numerycznej oraz symbolicznej.

Na podstawie przedstawionych wyników i analiz stwierdzam, iż dobrane metody badawcze są poprawne a postawiony problem rozwiązany w sposób zadowalający. Wykonane prace i przeprowadzone pomiary eksperymentalne rozpatrywanego układu dowodzą umiejętności Autora w zakresie metodyki i metodologii prowadzenia badań naukowych.

1.3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł i stanu wiedzy? Czy tematyka rozprawy jest aktualna i dostatecznie ważna?

Analiza źródeł i aktualnego stanu wiedzy została przeprowadzona poprawnie. Bibliografia obejmuje 88 pozycji, z których zdecydowana większość została opublikowana po roku 2000, przy czym 36 pozycji w ostatnim pięcioleciu. Autor odnosi się do aktualnych doniesień literaturowych, wykazuje wady i zalety prezentowanych rozwiązań, co świadczy o właściwym rozpoznaniu tematu i odpowiednim przygotowaniu merytorycznym. Kwestia rozwoju układów bezprzewodowego przesylu energii jest szeroko poruszana w najnowszych publikacjach naukowych, co potwierdza wagę i aktualność tematu. Należy zatem stwierdzić, iż tematyka rozprawy doskonale odpowiada aktualnym kierunkom rozwoju energoelektroniki i układów przekształtnikowych.

1.4. Na czym polega oryginalny dorobek Autora?

Oprócz rozprawy, wyniki prac Autora zostały przedstawione w trzech artykułach, z których dwa zostały opublikowane w czasopiśmie *Przegląd Elektrotechniczny/Electrotechnical Review* w 2019 oraz 2020 r. natomiast jeden w trakcie konferencji *IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)* w Gliwicach w 2021 r.. Wskazana jest zatem publikacja prac Autora na szerszym forum międzynarodowym. Ponadto na podstawie przygotowanej rozprawy, jako osobisty i oryginalny dorobek Autora należy wymienić:

- przeprowadzenie analizy stabilności napięcia wyjściowego układu IPT w konfiguracji S-S,
- opracowanie metod analizy i optymalizacji układów IPT w oparciu o podejście analityczne i symulacyjne (numeryczne),
- opis własności układów IPT z naturalną stabilizacją napięcia wyjściowego,
- opracowanie metod doboru parametrów układów IPT z silnym sprzężeniem magnetycznym,
- weryfikacja zaproponowanej koncepcji w oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne autorskiego prototypu układu IPT.

2. Struktura rozprawy.

Rozprawa składa się z ośmiu głównych rozdziałów poprzedzonych "*Spisem treści*" oraz "*Wykazem ważniejszych oznaczeń*". W rozdziale 1 Autor przedstawia definicję układów do bezprzewodowego przesyłu energii ze szczególnym uwzględnieniem układów IPT. Następnie rozważa główne źródła strat układów IPT oraz prezentuje i porównuje charakterystyki przykładowych układów IPT w konfiguracji S-S o parametrach dobranych w sposób klasyczny z proponowanym układem o sztywnym napięciu wyjściowym. W rozdziale 2 Autor dokonuje przeglądu aktualnego stanu wiedzy, prezentuje podstawowe topologie układów IPT wraz z ich wadami i zaletami. Niestety można odnieść wrażenie, iż w tej części rozprawy opis przytaczanych rozwiązań jest szczątkowy, bez głębszej ich analizy. Odczucie to pogłębia jeszcze brak schematów prezentowanych topologii, co szczególnie widoczne jest w podrozdziale 2.2, w którym Autor rozważa konfiguracje przekształtników wykorzystywanych w układach IPT. Rozdział 2 kończy podrozdział 2.3, w którym Autor prezentuje tematykę rozprawy, własne osiągnięcia potwierdzone publikacjami oraz konfrontuje inne rozwiązania układów IPT z naturalną stabilizacją napięcia wyjściowego z zaprezentowanym w rozprawie podejściem autorskim. W rozdziale 3 Autor przedstawia motywację do podjęcia prac nad układami IPT z naturalną stabilizacją napięcia wyjściowego, tezę rozprawy, cel oraz zakres, założenia i strukturę rozprawy. Uważam, iż w celu uzyskania lepszej przejrzystości byłoby korzystniej, aby rozdział ten został umieszczony zaraz po "*Wstępie*", czyli rozdziale 1, tym bardziej, iż w podrozdziale 3.6. Autor streszcza zawartość wcześniejszych rozdziałów tj. 1 oraz 2. Ponadto zdaniem Recenzenta, wydaje się, iż bardziej właściwe byłoby przedstawienie tematyki rozprawy w rozdziale pt. "*Wprowadzenie*" niż w dalszej części rozprawy tj. w podrozdziale 2.3.

W rozdziale 4 Autor przedstawił koncepcję wprowadzenia schematów zastępczych (dla metody symbolicznej) i modeli numerycznych (dla podejścia symulacyjnego) topologii falownika i prostownika wykorzystywanych w dalszych pracach nad rozwijanym układem IPT. Należy zauważyć, iż w swoich rozważaniach Autor całkowicie pomija wpływ strat komutacyjnych koncentrując się jedynie na stratach przewodzenia. W rozdziale 5 zostały opisane wyniki prac dotyczących optymalizacji proponowanego układu IPT z wykorzystaniem metody symbolicznej (analitycznej) dla układu skompensowanego i nieskompensowanego. W oparciu o zaprezentowane podejście Autor prezentuje szereg charakterystyk obrazujących właściwości rozważanych układów oraz przedstawia założenia i metodę projektowania układu skompensowanego. W rozdziale 6 Autor przedstawia założenia metody doboru parametrów i optymalizacji układu IPT w oparciu o podejście symulacyjne. Na podstawie równań stanu Autor wyprowadza modele numeryczne rozpatrywanych układów, które następnie poddaje badaniom symulacyjnym. W swoich rozważaniach Autor koncentruje się na poszukiwaniu wartości prądów napięć dla stanu ustalonego pomijając stany dynamiczne występujące np. przy szybkich zmianach obciążenia bądź w momencie rozruchu układu. Ze względu na złożoność i długotrwałość procesu numerycznego podstawowego algorytmu obliczeniowego Autor zaproponował algorytm zmodyfikowany o zredukowanej liczbie etapów cyklu. Na podstawie przedstawionych wyników badań Autor wykazuje większą zasadność stosowania metody numerycznej ze względu na większą dokładność uzyskiwanych rezultatów. W rozdziale 7 Autor prezentuje wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych autorskiego układu IPT. Uzyskane rezultaty badań eksperymentalnych zostały zestawione z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem metody symbolicznej oraz numerycznej potwierdzając słuszność prezentowanego rozwiązania i przyjętej tezy. Podsumowanie rozprawy zamieszczono w rozdziale 8 pt. "Wnioski".

Podsumowując, oceniam, że struktura rozprawy jest poprawna i spełnia kryteria stawiane tego typu pracom. Rysunki są przejrzyste.

3. Komentarze, pytania i uwagi.

Proszę o stosowny komentarz Autora do prezentowanych poniżej uwag i pytań.

- Rozdział 1 - brak ciągłości numeracji równań.
- Str. 5 - Autor używa sformułowania "*pierwszej harmonicznej*", powinno być "*podstawowej harmonicznej*".
- Przyjęta w tekście rozprawy odmiana słowa "*dobroć*" jest niepoprawna.
- Str. 11 - zdanie: "*Kolejnym podzespołem układu IPT...służące do zwiększenia efektywności przesyłu energii*" wymaga komentarza bądź przeredagowania. W świetle powyższego należy wyjaśnić, w jaki sposób wprowadzenie dodatkowych elementów biernych ma służyć podniesieniu efektywności układu?
- Str. 25 - stwierdzenie "*falowniki klasy EF_2 lepiej wykorzystują parametry tranzystora*" jest dalece niejasne.
- Str. 25 - "*Falowniki te wytwarzają w przybliżeniu*". Falownik (napięcia) jest układem przekształtnikowym, wobec czego nie wytwarza, lecz przekształca napięcie stałe na przemiennie.

- Str. 25 - "zapewniającymi korzystniejszy kształt napięcia - bardziej zbliżony do prostokątnego" - powinno być "sinusoidalnego".
- Str. 44 - "rezystancje..., które odpowiadają za straty" - zdanie to jest nieprecyzyjne. Za pomocą wskazanych rezystancji modelowane są straty mocy.
- Str. 45 - proszę o wyprowadzenie zależności (5.19).
- Str. 72 - Zdanie "Jak pokazały wstępne badania laboratoryjne..." - niestety do tego miejsca w rozprawie Autor nie przytoczył jakichkolwiek wyników badań laboratoryjnych.
- Str. 95 i 96 - jest "zwoi" powinno być "zwojów".
- Str. 95 - określenie "wycinek z projektu" jest niepoprawne.
- Str. 99 - Akapit "Wcześniej opracowane...tym samym zwiększyć sprawność" - co oznacza stwierdzenie, iż "prototypy nie uzyskiwały wysokich sprawności" oraz jakie Autor podjął działania, aby na etapie projektowania falownika podwyższyć efektywność energetyczną przekształtnika?
- Str. 104 - rys.7.10 na osi poziomej jednostka zapisana jest w [] natomiast na osi pionowej przyjęto inny sposób oznaczeń.
- Str. 109 - "widoczne są oscylacje związane z występowaniem parametrów pasożytniczych" - powinno być np. "elementów".
- Str. 111 - "Jednocześnie potwierdzono, że... indukcyjny charakter obciążenia." - Zdaniem Recenzenta stwierdzenie to nie zostało dostatecznie udowodnione, ponieważ Autor nie przedstawił stosownych oscylogramów obrazujących przebiegi prądów i napięć tranzystorów przełączanych w warunkach ZVS, które zostały uzyskane w trakcie badań laboratoryjnych prototypu układu.
- Str. 112 - "Stworzono", powinno być "opracowano".
- W tekście rozprawy Autor często wykorzystuje odwołania do wcześniejszych lub dalszych fragmentów rozprawy, co nie ułatwia jej lektury. Przykładowo na str. 84 Autor odwołuje się jednocześnie do rys. 5.14 oraz 6.7 (i analogicznie w przypadku rys. 5.17 oraz 6.8).
- Zdaniem Recenzenta, należy mieć na uwadze, aby w pracach naukowych odwołania w tekście rozprawy do rysunków znalazły przed ich prezentacją.
- W tekście manuskryptu rozprawy występują nagminnie liczne błędy stylistyczne np. str. 8 "energię przesyła się", str. 10 "Generalnie dwucewkowe układy IPT zawierają podzespoły widoczne na ...", str. 13 "Układ... zawiera w sobie..", lub str. 40 "odbiornikiem zastępuje się", które znacząco obniżają jakość rozprawy. Ponadto należy zwrócić uwagę na częste błędy interpunkcyjne oraz tzw. "literówki".
- Czy w oparciu o zbudowany i opisany w rozprawie prototyp układu IPT z naturalną stabilizacją napięcia wejściowego Autor dokonał eksperymentalnego porównania charakterystyk sprawności i wartości napięcia wyjściowego w funkcji obciążenia z układem IPT zaprojektowanym w sposób klasyczny (analogicznie jak w przypadku charakterystyk przedstawionych na rys.1.4)?
- Czy Autor dokonał weryfikacji dokładności rezultatów uzyskiwanych z wykorzystaniem "podstawowego algorytmu obliczania stanu ustalonego" (rys.6.3) oraz jego wersji zmodyfikowanej (rys.6.4)? Czy uzyskane wyniki symulacji zostały

skonfrontowane z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem dostępnych symulatorów układów przekształtnikowych (np. PLECS)?

- W swoich rozważaniach w rozdziałach 4 - 6 Autor zestawia koncepcję i analizuje właściwości układu skompensowanego oraz nieskompensowanego. Czy w celu potwierdzenia uzyskanych rezultatów Autor przeprowadził również badania laboratoryjne układu nieskompensowanego?
- Należy zauważyć, iż w przypadku układu skompensowanego, wprowadzenie dodatkowych elementów kompensujących w postaci kondensatorów sprawia, że indukcyjności wraz z pojemnościami formują obwód rezonansowy analogicznie jak ma to miejsce w przypadku przekształtników DC-DC typu Series Resonant Converter (SRC) umożliwiając tym samym miękką komutację łączników energoelektronicznych. Ponadto maksymalne wzmocnienie napięcia w takim układzie obserwowane jest, gdy częstotliwość pracy odpowiada częstotliwości rezonansowej. Czy w swoich rozważaniach Autor rozpatrywał opracowany układ pod kątem wpływu częstotliwości przełączania oraz właściwości obwodu rezonansowego?
- W układzie prototypowym Autor przyjął współosiowość cewek. Jak zmienia się właściwości układu, jeśli cewki w układzie prototypowym nie będą ułożone współosiowo (tzn. dojdzie do przesunięcia w osi prostopadłej do osi cewek)?
- W rozdziale 7 Autor przedstawia wyniki badań eksperymentalnych układu jedynie dla stanu ustalonego. Brak jest natomiast wyników badań w stanach dynamicznych tj. np. w trakcie rozruchu układu lub przy szybkich zmianach obciążenia.
- Teoretyczna oraz symulacyjna charakterystyka sprawności (rys.7.10) wskazują na ok. 10% wyższą sprawność niż zmierzona dla układu eksperymentalnego. Należy jednak wyraźnie podkreślić, iż w swoich rozważaniach Autor pominął kwestie strat komutacyjnych wynikających z procesów łączeniowych tranzystorów i diod. Straty te natomiast rosną wraz z częstotliwością przełączeń, stąd dla wyższych częstotliwości przełączeń rozbieżności pomiędzy charakterystykami rzeczywistymi a uzyskanymi z wykorzystaniem omawianych w rozprawie metod będą jeszcze bardziej znaczące. Stąd pojawia się pytanie o możliwość modyfikacji prezentowanych w rozprawie metod pod kątem uwzględnienia strat komutacyjnych?
- Autor dokonał pomiaru sprawności metodami oscyloskopowymi z wykorzystaniem sond pomiarowych. Należy jednak zaznaczyć, iż taki sposób pomiaru wymaga bardzo dobrej kompensacji sond, szczególnie w przypadku pomiarów przeprowadzanych w obwodzie pośredniczącym układu IPT przy wysokich częstotliwościach przebiegów prądów i napięć. W związku z powyższym, czy Autor zweryfikował uzyskane rezultaty strat mocy falownika, prostownika i w układzie pośredniczącym z wykorzystaniem innych narzędzi lub metod pomiarowych?
- Str. 105 - rys. 7.11. Przedstawiony rozkład strat mocy powinien również obejmować podział na straty przewodzenia i komutacyjne generowane w falowniku oraz prostowniku jak również należy rozróżnić straty w rdzeniach i uzwojeniach cewek.
- Str. 108 - Czy Autor głębiej przeanalizował wpływ czasu martwego oraz poszczególnych komponentów pasożytniczych na właściwości operacyjne omawianego układu IPT?

- Opis pozycji bibliograficznych [8], [15], [16], [82],[83] jest niekompletny.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy.

Do mocnych stron rozprawy zaliczam kompleksową analizę i przedstawienie metod projektowania układów IPT o naturalnej stabilizacji napięcia wyjściowego. W rezultacie rozprawa może stać się swoistym kompendium dotyczącym zasad projektowania układów IPT w konfiguracji S-S oraz stanowić punkt wyjścia do dalszych prac nad innymi topologiami układów IPT. Niemniej jednak do słabych stron rozprawy należy zaliczyć kwestie edytorskie.

Tematyka pracy w pełni odpowiada zakresowi tematycznemu dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Reasumując, pomimo przedstawionych uwag i zastrzeżeń ocena rozprawy jest pozytywna. Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Marek Turzyński

Marek Turzyński