

Warszawa, dn. 12-07-2023 r.

dr hab. inż. Krzysztof Zymmer prof. IEL.

Instytut Elektrotechniki

ul. Pożaryskiego 28

04-703 Warszawa

Opinia

o pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Stawczyka pt. „Analiza metod sterowania maszyny typu BLDC w stanie pracy generatorowej”.

Niniejsza rozprawa dotyczy istotnej aktualnie tematyki, dotyczącej zwrotu energii hamowania używanych obecnie masowo pojazdów elektrycznych, takich jak rowery, hulajnogi oraz inne pojazdy o niewielkiej mocy, a także elektronarzędzia. Uzyskiwana w tych rozwiązaniach oszczędność energii elektrycznej, pozwala na zwiększenie czasu użytkowania sprzętu między kolejnymi ładowaniami baterii akumulatorów oraz zasięgu, a także ogranicza potrzebę używania hamulców mechanicznych, co zwiększa trwałość urządzeń.

Wobec masowego użytkowania omawianego sprzętu dzięki hamowaniu odzyskowemu, uzyskuje się oszczędność energii nie tylko w odniesieniu do odnośnego elementu, ale w skali obszaru, na którym jest on użytkowany, to znaczy przedsiębiorstwa, miasta czy kraju. Należy tutaj dodać, że w pojazdach większej mocy, (o których wspomina doktorant) jak samochody elektryczne, stosowane są silniki z magnesami trwałymi PMSM, ale synchroniczne.

Cel pracy sformułowany przez autora, brzmi następująco: „Celem niniejszej rozprawy jest analiza strat mocy, występujących w przekształtniku współpracującym z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej.

Autor sformułował również następującą tezę pracy: „Zastosowanie algorytmów przewodzenia wstecznego polowych tranzystorów mocy, umożliwia istotne obniżenie strat przekształtnika współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej”.

We wstępie doktorant omawia (na podstawie literatury) układy energoelektroniczne adresowane do współpracy z maszynami elektrycznymi prądu stałego i przemiennego, ze szczególnym uwzględnieniem silników z magnesami trwałymi BLDC. W wyniku przeprowadzonych dociekań doktorant ocenia, że w dostępnych publikacjach brak jest szerszej analizy zagadnienia w jaki sposób metody sterowania wpływają na straty mocy w odnośnych przekształtnikach, a więc na sprawność tych układów.

Rozdział 1 zawiera wykonany na podstawie analizy literatury przegląd topologii przekształtników, adresowanych do współpracy z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej. Przedstawiono tutaj przekształtniki diodowe, tyrystorowe, w tym dwukierunkowe, a także stosowane współcześnie układy tranzystorowe. Omawianie przekształtników diodowych, a także tyrystorowych, ma tutaj charakter informacyjny, ponieważ są one adresowane obecnie, głównie do rozwiązań dużej mocy i nie znajdują zastosowania we współpracy z silnikami BLDC.

W rozdziale 2 przedstawiono przegląd algorytmów sterowania przekształtników w postaci trójfazowych mostków tranzystorowych oraz tranzystorowo-diodowych dla następujących rozwiązań układowych: z jednym przełączanym tranzystorem, dwoma, trzema oraz sześcioma przełączanymi elementami, a także z dwoma sterowanymi przyrządami w jednej gałęzi mostka. Omówiono także, odpowiedni algorytm dla topologii z międzyfazowymi łącznikami dwukierunkowymi. Uwypuklono zalety i wady poszczególnych metod, jak sprawność układu, zakres użytecznej prędkości obrotowej oraz asymetria prądów fazowych. Przedstawiono możliwość wykorzystania zjawiska wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych. Podane przebiegi napięć fazowych maszyny BLDC mają charakter sinusoidalny, a więc charakterystyczny dla silników synchronicznych PMSM, stosowanych w układach o większej mocy jak napędy samochodów elektrycznych. Tak więc zaciera się tutaj różnica między maszynami z magnesami trwałymi – BLDC oraz synchroniczną.

W rozdziale 3 przeprowadzona została analiza matematyczna przekształtnika w pełni sterowanego współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej. Odpowiednie obliczenia wykonano na podstawie wartości średnich dla metod sterowania-klasycznej oraz z wykorzystaniem wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych. W oparciu o wyznaczone zależności matematyczne przeprowadzono analizy symulacyjne dla przekształtników o określonych parametrach, w wyniku których uzyskano wartości mocy wyjściowej, strat mocy w tranzystorach, diodach przeciw równoległych, sprawności układu w funkcji współczynnika wypełnienia modulowanych przebiegów napięcia i prędkości obrotowej maszyny BLDC.

Należy podkreślić, że przy wyznaczaniu zależności charakteryzujących właściwości układu przekształcającego energię wytwarzania w maszynie BLDC, doktorant wykazał zwracającą uwagę umiejętność w operowaniu aparatem matematycznym. Jako autorskie dokonanie doktoranta, należy uznać opracowanie algorytmu sterowania dwoma tranzystorami przekształtnika w jednej gałęzi mostka.

W obliczeniach strat mocy generowanych w przyrządach półprzewodnikowych nie uwzględniono strat łączeniowych, przyjmując a priori, że w elementach polowych i częstotliwości modulacji 20 kHz są one pomijalne. Uzasadnienie tego założenia wymagało podania, deklarowanych zwykle w materiałach firmowych, łączeniowych strat energii dla danego prądu i napięcia w przyrządzie. Pozwoliło by to określić jednoznacznie czy przyjęte założenie jest poprawne.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przekształtników współpracujących z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej dla w/w metod sterowania. Analizy wykonano na podstawie opracowanych przez autora w środowisku Matlab-Simuling, modeli obwodowych, przy uwzględnieniu przewodzenia diod przeciw równoległych oraz wykorzystaniu wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych. Przeprowadzone wnikliwe analizy symulacyjne układu w zakresie wyznaczania strat mocy i sprawności układu przekształcającego energię wytwarzaną w maszynie BLDC, wykazały korzystniejsze właściwości w przypadku topologii z wykorzystaniem wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych. Szczególnie wyraźne uzyski w zakresie poprawy sprawności przekształtnika uzyskano dla algorytmów sterowania z dwoma oraz sześcioma przewodzącymi tranzystorami. Przyjęte założenia upraszczające, jak liniowy przebieg charakterystyki przewodzenia diod i tranzystorów czy idealne źródło napięcia stałego, nie powinny mieć znaczącego wpływu na wyniki badań symulacyjnych. Wątpliwości budzi jedynie, pomijanie strat łączeniowych bez uzasadnienia tego założenia.

Doktorant wykazał tutaj istotne umiejętności w zakresie opracowywania modeli symulacyjnych układu przekształcania energii elektrycznej, a także wyróżniającą sprawność w efektywnym prowadzeniu odpowiednich analiz.

W rozdziale 5 opisano układ pomiarowy, przedstawiono poglądowe wyniki porównawczych badań eksperymentalnych uzyskane dla omówionych w rozdziałach 3 i 4 konfiguracji przekształtników AC/DC oraz metod sterowania.. Charakter przebiegów w zakresie strat mocy, sprawności układu przekształcania energii w funkcji prądu fazowego, prędkości obrotowej i współczynnika wypełnienia, odpowiada charakterystykom uzyskanym w sposób analityczny. Twierdzenie to, odnosi się zarówno do rezultatów uzyskanych przy wykorzystaniu diod przeciw równoległych, jak i wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych. Badania eksperymentalne, analogicznie jak analizy symulacyjne, wykazały mniejsze wartości strat mocy w przekształtniku współpracującym z maszyną BLDC dla rozwiązania o wstecznym przewodzeniu tranzystorów polowych.

Można w tym przypadku wskazać na brak korelacji ilościowej między wynikami uzyskanymi w sposób analityczny oraz eksperymentalny bowiem obliczenia i badania wykonano dla układów o różnych parametrach elektrycznych.

Podsumowanie

W ramach rozprawy przeprowadzono szczegółowe analizy matematyczne oraz symulacyjne systemów sterowania pracy trójfazowego, mostkowego sterowanego przekształtnika AC/DC współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej. Odnośne analizy i badania wykonano dla różnych konfiguracji przekształtnika - z jednym, dwoma oraz trzema i sześcioma przewodzącymi tranzystorami, w układzie z przewodzącymi diodami przeciw równoległymi oraz w stanie przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych (rozdz. 3 i 4 rozprawy). Analizy te oraz uzyskane na ich podstawie rezultaty badań symulacyjnych, stanowią w ocenie recenzenta główny dorobek niniejszej rozprawy.

W wyniku przeprowadzonych rozważań wykazano, że zastosowanie przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych w miejsce odpowiedniej funkcji diod przeciw równoległych, istotnie poprawia właściwości przekształtnika w zakresie obniżenia generowanych w tym układzie strat mocy, a więc zwiększa sprawność układu o kilkanaście procent.

Badanie laboratoryjne wykonane w układzie małej mocy potwierdziły jakościowo wykazaną analitycznie zależność w zakresie ograniczenia strat mocy w przekształtniku, przy zastosowaniu przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych.

Oceniając rozprawę doktorską mgr inż. Pawła Stawczyka, stwierdzam co następuje:

- Autor w pełni wywiązał się z realizacji zadań wynikających ze sformułowanego we wstępie celu pracy. Ponadto, udowodnił swoimi badaniami poprawność postawionej tezy.
- Praca stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego w zakresie analizy modelowania i potencjalnej aplikacji wysokosprawnych przekształtników AC/DC z tranzystorami polowymi.
- Doktorant wykazał istotną umiejętność stosowania aparatu matematycznego do prowadzenia analiz metod sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi.

- Uzyskane podczas realizacji rozprawy wyniki, mają znaczenie poznawcze, a także aplikacyjne.
- Doktorant jest współautorem trzech publikacji z zakresu rozprawy, w tym jednej w renomowanym periodyku o zasięgu światowym.
- Rozprawa jest napisana poprawnym językiem polskim.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć autora zaliczam:

1. Opracowanie algorytmu sterowania przekształtnika z dwoma przełączalnymi tranzystorami w jednej gałęzi mostka. Umożliwia to stosowanie układu o znacznie uproszczonej topologii.
2. Opracowanie szeregu algorytmów sterowania trójfazowego przekształtnika o strukturze mostkowej, z wykorzystaniem wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych.
3. Opracowanie modeli matematycznych trójfazowego przekształtnika o strukturze mostkowej, współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej dla algorytmów sterowania klasycznych oraz z wykorzystaniem wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych.
4. Opracowanie obwodowych modeli symulacyjnych trójfazowego przekształtnika o strukturze mostkowej, współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej.
5. Budowę stanowiska pomiarowego (małej mocy) oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych, które potwierdziły, korzystniejsze właściwości w zakresie strat mocy i sprawności przekształtnika o wstecznym przewodzeniu tranzystorów polowych, w stosunku do rozwiązania klasycznego.

Uwagi dyskusyjne:

1. Rozdział 2 – brak rozróżnienia między maszynami z magnesami trwałymi – BLDC o trapezowym przebiegu napięcia fazowego a PMSM o sinusoidalnym charakterze tej wartości. Podobne niejasności występują także we wstępie do rozprawy.
2. Str. 50 Oszczędnie podano parametry modułów tranzystorowo-diodowych przekształtników. Brak jest wartości prądu i napięcia elementów, a także łączeniowych strat energii. Dane te, pozwoliłyby ocenić czy przyjęte założenie o pominięciu strat komutacyjnych jest poprawne.

3. Badania eksperymentalne przeprowadzono w układzie małej mocy, przy innych parametrach układu niż przyjętych dla analiz teoretycznych. Ogranicza to możliwość eksperymentalnej weryfikacji wyników analiz teoretycznych.

Wniosek

Praca mgr inż. Pawła Stawczyka pt. „Analiza metod sterowania maszyny typu BLDC w stanie pracy generatorowej” stanowi samodzielne rozwiązanie aktualnego zadania naukowego w obszarze teorii, projektowania i aplikacji układów energoelektronicznych. W moim przekonaniu, praca spełnia warunki określone w obowiązujących przepisach odniesionych do rozpraw doktorskich. Proponuję przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Pawła Stawczyka do jej publicznej obrony.