

## **Streszczenie rozprawy doktorskiej**

pt. „Analiza metod sterowania maszyny typu BLDC w stanie pracy generatorowej”

Niniejsza rozprawa poświęcona jest analizie strat mocy różnych typów przekształtników współpracujących z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej, w zależności od zastosowanego algorytmu sterowania. W szczególności skoncentrowano się na algorytmach, w których zastosowano zjawisko przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych mocy. Jak wykazano teoretycznie i eksperymentalnie zastosowanie przewodzenia wstecznego prowadzi do znacznego ograniczenia strat mocy w trójfazowych przekształtnikach o strukturze mostkowej, zwłaszcza dla niskich napięć zasilania.

Niniejsza praca składa się z następujących rozdziałów:

### **1. Przegląd przekształtników zapewniających generatorową pracę maszyny BLDC**

W rozdziale dokonano przeglądu przekształtników napięcia umożliwiających pracę generatorową maszyny BLDC. Przekształtniki zostały pogrupowane w zależności od rodzaju zastosowanych łączników: diody, tyrystory oraz tranzystory. Zaproponowany podział ilustruje rozwój struktur przekształtnikowych związany z postępem technologicznym w obszarze przyrządów półprzewodnikowych, który dokonał się na przestrzeni ostatnich lat: od niesterowanych przekształtników diodowych po w pełni sterowane przekształtniki tranzystorowe. W ramach układów tranzystorowych wyszczególniono przekształtnik z dwoma przełączanymi tranzystorami - układ zaproponowany przez autora niniejszej rozprawy, który zalicza się do przekształtników o zredukowanej liczbie tranzystorów. Przekształtnik ten (podobnie jak pozostałe mostki sterowane) umożliwia w pełni kontrolowany odzysk energii z obwodu elektromagnetycznego maszyny do baterii - koszt budowy tego układu w porównaniu do pozostałych przekształtników tranzystorowych o strukturze mostkowej jest najniższy;

### **2. Przegląd algorytmów sterowania**

Rozdział zawiera przegląd obecnie stosowanych algorytmów sterowania trójfazowych przekształtników tranzystorowych o strukturze mostkowej, umożliwiających pracę generatorową maszyny BLDC. Przedstawiono również autorski algorytm sterowania umożliwiający zastosowanie uproszczonego przekształtnika składającego się z dwóch tranzystorów przełączanych w jednej gałęzi mostka. W algorytmie tym zastosowano predykcję czasu wyzwolenia tranzystorów polowych na podstawie bieżącej prędkości obrotowej wirnika oraz sygnałów z czujników Halla - same czujniki Halla nie dostarczają wymaganej informacji o położeniu wirnika;

### **3. Analiza matematyczna przekształtnika w pełni sterowanego na podstawie modelu wartości średnich**

W tej części pracy przedstawiono analizę matematyczną trójfazowego przekształtnika w pełni sterowanego o strukturze mostkowej, współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej, przy pomocy modelu wartości średnich. Dla każdego z algorytmów sterowania opracowano modele matematyczne, opisujące średnią wartość prądu płynącego przez przekształtnik, maszynę oraz akumulator dla stanu załączenia oraz wyłączenia tranzystorów. Na podstawie średniej wartości prądu, wyznaczono zależności analityczne opisujące poszczególne składniki strat występujące w przekształtniku, moc oddawaną do akumulatora oraz sprawność dla algorytmów

klasycznych oraz algorytmów z zastosowaniem przewodzenia wstecznego. Uzyskane zależności matematyczne posłużyły do opracowania modeli symulacyjnych w środowisku *Matlab-Simulink*;

#### **4. Wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych na podstawie modeli obwodowych**

Dalszą analizę teoretyczną przekształtnika w pełni sterowanego współpracującego z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej przeprowadzono przy pomocy modeli obwodowych, zbudowanych w środowisku *Matlab-Simulink*. Modele uwzględniają znacznie więcej parametrów rzeczywistego układu eksperymentalnego (w porównaniu do modeli wartości średnich), składającego się z maszyny BLDC, przekształtnika oraz akumulatora. Na ich podstawie przeprowadzono szereg badań symulacyjnych, których celem było wyznaczenie sprawności przekształtnika oraz mocy oddawanej do akumulatorów, w zależności od skutecznej wartości prądu fazowego maszyny oraz prędkości obrotowej, przed i po zastosowaniu przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych mocy;

#### **5. Wyniki badań eksperymentalnych**

Oprócz zagadnień teoretycznych, w pracy przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych przekształtnika w pełni sterowanego dla klasycznych algorytmów sterowania oraz algorytmów wykorzystujących wsteczne przewodzenie tranzystorów polowych. Zbudowano w tym celu stanowisko badawcze składające się z: silnika prądu stałego pracującego na wspólnym wale z maszyną BLDC, trójfazowego przekształtnika mostkowego, akumulatora oraz układu sterowania zrealizowanego z zastosowaniem procesora sygnałowego DSP. Poszczególne algorytmy sterowania zostały zapisane w postaci kodu programu, co umożliwiło przeprowadzenie wielowariantowych badań eksperymentalnych. Następnie poddano weryfikacji eksperymentalnej sprawność przekształtnika oraz moc oddawaną do akumulatora z zachowaniem tego samego zakresu zmian prądów obciążenia i prędkości obrotowych maszyny, którymi posłużono się w przypadku analizy teoretycznej.

#### **6. Wnioski**

Uzyskane w ten sposób dane pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych pozwala znacząco poprawić sprawność przekształtnika mostkowego w szerokim zakresie zmian prędkości obrotowej oraz prądu fazowego maszyny BLDC pracującej w zakresie pracy generatorowej,
- zaproponowana przez autora metoda sterowania z zastosowaniem dwóch przełączanych tranzystorów w jednej gałęzi mostka zapewnia wysoką sprawność przekształtnika przy zachowaniu efektywnego ładowania baterii akumulatorów podczas hamowania odzyskowego maszyny BLDC,
- w przypadku trójfazowych przekształtników o strukturze mostkowej, pracujących przy niskim napięciu znamionowym ( $24\div 48V$ ), zastosowanie wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych pozwala radykalnie ograniczyć straty mocy związane z przewodzeniem diod przeciwnoległych,
- sprawność trójfazowych przekształtników mostkowych o zredukowanej liczbie tranzystorów jest nieznacznie niższa od przekształtników w pełni sterowanych,
- modele teoretyczne (modele wartości średnich oraz modele obwodowe) pozwalają na prognozę wzrostu sprawności przekształtnika po zastosowaniu przewodzenia wstecznego tranzystorów polowych jak również oszacowanie użytecznego zakresu zmian współczynnika wypełnienia, dla którego możliwa jest praca generatorowa maszyny BLDC.