



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Krzysztof Siembab

Politechnika Poznańska

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej

Stypendysta projektu pt. „Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski”, Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki

Sterowanie tolerujące uszkodzenia dla napędów z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych

Celem naukowym pracy doktorskiej jest opracowanie i krytyczna analiza metod sterowania, które zapewnią niezawodne działanie układów napędu elektrycznego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych w warunkach uszkodzeń. Układy sterowania o takich właściwościach nazywane są układami tolerującymi uszkodzenia (ang. *fault tolerant control*). Dla osiągnięcia tak postawionego celu naukowego konieczna jest kompleksowa analiza i synteza układu napędowego, obejmująca silnik synchroniczny o magnesach trwałych (PMSM), przekształtnik energoelektroniczny oraz układy pomiarowe i sterowania.

Z danych statystycznych wynika, że zdecydowana większość energii konsumowanej przez przemysł to energia pobierana przez napędy elektryczne. Zdolność kontroli pozycji, prędkości obrotowej czy momentu elektromagnetycznego przy zmiennych parametrach układu sterowania oraz coraz to większych wymaganiach co do precyzji napędów wymuszają stosowanie złożonych napędów przekształtnikowych. Konieczność stosowania skomplikowanych w budowie napędów elektrycznych zwiększa prawdopodobieństwo ich awarii. Dodatkowo, obciążenia mechaniczne (wysoka dynamika) oraz elektryczne (gwałtowne zmiany wartości napięć i prądów) silników bezpośrednio wpływają na uszkodzenia samego silnika. Powyższe w połączeniu ze współczesną tendencją do zwiększania wydajności, a więc także ciągłości produkcji sprawia, że atrakcyjne stają się rozwiązania odporne na awarie (FTC). Atrybut odporności na awarię jest także kluczowy w instalacjach odpowiedzialnych za zdrowie i życie ludzkie (napędy w lotnictwie, górnictwie, energetyce atomowej, itp.).

Wzrost wymagań dotyczący niezawodności układów sterowania, wielu urządzeń przemysłowych i komunikacyjnych a w szczególności sterowania układów napędowych, w

systemach, w których bezpieczeństwo jest najważniejsze, wybiega poza zakres możliwości wielu tradycyjnych rozwiązań. Niezawodność napędów elektrycznych jest istotnym czynnikiem określającym konkurencyjność maszyn technologicznych, robotów i pojazdów. Na podstawie analizy przedstawionej w (IEEE Gold Book, IEEE Recommended Practice for Reliable Industrial and Commercial Power Systems) wyznaczono, że prawdopodobieństwo awarii przemysłowego napędu elektrycznego w okresie jednej godziny wynosi: 2×10^{-15} . Pomijając awarie mechaniczne związane z wadliwą pracą łożysk silników synchronicznych o wzbudzeniu magnetoelektrycznym (PMSM), te wynikające z uszkodzeń kluczy energoelektronicznych stanowią powyżej 50% wszystkich uszkodzeń. Kolejnym elementem napędu ulegającym awarii jest jego układ sterowania (17%). Z tej perspektywy wydaje się uzasadnione poszukiwanie rozwiązań minimalizujących awarie przekształtników.

Głównym celem podjęcia tematu sterowania napędem elektrycznym w warunkach uszkodzeń jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkownikowi, zabezpieczenie napędzanej maszyny przed uszkodzeniami oraz zabezpieczenie eksploatowanego materiału. W literaturze tematu opisywane są różne strategie sterowania tolerującego uszkodzenia. Strategie te przedstawiane są jednak z reguły w wyidealizowanych warunkach modeli symulacyjnych. Dostępne prace badawcze z zakresu sterowania odpornego na awarie napędów elektrycznych koncentrują się na napędach z silnikami indukcyjnymi. Niedostępne są natomiast prace prezentujące takie metody dla rzeczywistego napędu z silnikiem PMSM.

Silniki synchroniczne o magnesach trwałych (PMSM) znajdują szerokie zastosowanie w precyzyjnych napędach m.in. robotów i obrabiarek. Ich zaletami są duża moc przy niewielkich wymiarach, możliwość pracy w szerokim zakresie prędkości i bardzo dobre właściwości dynamiczne. Wysoka sprawność przetwarzania energii w maszynach o wzbudzeniu magnetoelektrycznym powoduje także, że coraz szerzej maszyny takie stosowane są do innych napędów przemysłowych i ze względu na swoją energooszczędność wypierają powszechnie stosowane silniki indukcyjne.

Układ sterowania tolerujący uszkodzenia powinien na bieżąco, w trakcie pracy systemu:

- prowadzić monitoring i diagnostykę układu napędowego, ukierunkowaną na detekcję i identyfikację określonej klasy usterek,
- poprzez wczesną identyfikację zgłaszać potrzebę dedykowanego serwisu do nadrzędnego układu sterowania,
- tak modyfikować realizowane procedury sterowania, by w warunkach zaistnienia uszkodzenia kontynuować pracę układu napędowego z zadawalającą jakością.

W trakcie badań uwzględnione zostaną typowe uszkodzenia, charakterystyczne dla analizowanych napędów:

- uszkodzenia elektryczne występujące w silniku synchronicznym, dotyczące przede wszystkim uzwojeń stojana;
- uszkodzenia elektryczne w przekształtniku energoelektronicznym polegające na nieprawidłowym działaniu lub trwałym uszkodzeniu kluczy energoelektronicznych.

W ramach pracy opracowane zostaną algorytmy sterowania odporne na awarię przy wykorzystaniu przekształtnika o zmodyfikowanej topologii, wyposażonego w redundantną gałąź kondensatorów oraz w redundantną gałąź tranzystorową. Po wystąpieniu dowolnego uszkodzenia jednej z gałęzi tranzystorowych przekształtnika lub fazy silnika, aby zapobiec dalszym uszkodzeniom i umożliwić dalszą pracę napędu, konieczna jest rekonfiguracja topologii przekształtnika. Proponowane rozwiązanie umożliwia połączenie jednej z faz silnika lub punktu neutralnego silnika do redundantnej gałęzi kondensatorów. Topologie te pozwalają na dowolne formowanie prądu stojana tak jak w przypadku podstawowej topologii, jednak wymagają także zmiany algorytmu sterowania, co wynika z faktu niesymetrycznego zasilania faz silnika oraz pojawienia się prądu w przewodzie. W związku z powyższym opracowane i zaimplementowane zostaną algorytmy sterowania wektorowego wykorzystujące modyfikację struktury SV-PWM (ang. *Space Vector Pulse Width Modulation*) oraz przeprowadzona zostanie analiza energooszczędności silnika PMSM w warunkach uszkodzeń.

Proponowane rozwiązania nie eliminują możliwości wystąpienia awarii układu napędowego, ale pozwalają na dalszą pracę układu z obniżonymi właściwościami, co eliminuje straty wynikające z dalszych uszkodzeń układu napędowego oraz nieplanowanych przerw w produkcji (praca maszyny po wystąpieniu uszkodzenia może być kontynuowana ze zmniejszoną prędkością lub zmniejszonym momentem obrotowym). Rozwiązania stosowane obecnie w aplikacjach krytycznych wyposażone są zazwyczaj w dodatkowe przekształtniki, układy sterowania lub czujniki. Wiąże się to jednak z kilkukrotnym wzrostem ceny oraz masy takiego układu. Wyniki badań mają posłużyć do budowy przekształtnika z układem sterowania tolerującym uszkodzenia dla silnika PMSM bez znacznej i niepotrzebnej rozbudowy układu o elementy redundantne.

Uzyskane wyniki zrealizowanych prac badawczych będą miały duże znaczenie dla rozwoju metod sterowania napędami elektrycznymi oraz będą stanowiły podstawę do rozwoju nowych zaawansowanych metod sterowania odpornego i tolerującego uszkodzenia. Krytyczna weryfikacja metod sterowania tolerującego uszkodzenia stworzy podstawę teoretyczną do dalszej praktycznej implementacji oraz stanowić będzie materiał wyjściowy dla zaprojektowania prototypu przemysłowego i wdrożenia opracowanych w pracy układów przekształtnikowych oraz metod sterowania do stosowania w urządzeniach o podwyższonych wymaganiach, co do niezawodnej i bezpiecznej pracy.