

prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt.

„Praca maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z bezpośrednią regulacją momentu w układzie wytwarzania napięcia stałego”

autorstwa mgr inż. Pawła Maciejewskiego

wykonana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej

1. UMIEJSCOWIENIE TEMATU, AKTUALNOŚĆ I ZAKRES ROZPRAWY

Wraz z wzrostem wymagań stawianych przed układami generacyjnymi pracującymi w mikrosieciach oraz układach autonomicznych, w tym wymagań cenowych, eksploatacyjnych i niezawodnościowych, a także możliwymi w nieodległej przyszłości barierami w dostępie do magnesów ziem rzadkich, niezawodna i tania maszyna indukcyjna staje się znów coraz częstszym obiektem badań i aplikacji. Szczególna rola przypada tutaj maszynie dwustronnie zasilanej (MDZ), której zasadnicza wada - problematyczna praca przy niesymetrycznym napięciu sieci - może być względnie łatwo skompensowana we wskazanych obszarach zastosowań. Główną przewagą MDZ jest zredukowana moc falownika podłączonego do wirnika maszyny pierścieniowej, a co za tym idzie jego nieduże gabaryty. Tą zaletę można też połączyć z możliwością wytwarzania stabilnego napięcia DC za pomocą prostego prostownika diodowego w obwodzie stojana. Rozwiązanie takie jest atrakcyjne także ze względu na możliwość regulacji napięcia wyjściowego DC i utrzymywania częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia stojana niezależnie od prędkości obrotowej wału generatora. Stąd też wynika coraz większa rola metod sterowania MDZ, wpływających nie tylko na dynamikę i dokładność regulacji, ale również na warunki pracy maszyny.

Opiniowana rozprawa, opierająca się na trzech podstawach:

- a) analizie i teoretycznym uzasadnieniu postawionych dwóch tez, w brzmieniu:
 - Bezpośrednia regulacja momentu elektrycznego pozwala na zmniejszenie tętnień momentu elektrycznego prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej pracującej w układzie wytwarzania napięcia stałego w stosunku do połowo zorientowanej metody regulacji prądu wirnika.
 - Zastosowanie sześciofazowego stojana zmniejsza tętnienia momentu elektrycznego w prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej pracującej w układzie wytwarzania napięcia stałego w stosunku do maszyny o trójfazowym stojanie.
- b) badaniach symulacyjnych na modelach uproszczonych i pełnych,
- c) weryfikacji eksperymentalnej.

ściśle mieści się we wskazanych wyżej aktualnych kierunkach działań badawczych. W rozprawie pokazano, w jaki sposób można zastosować, jak racjonalnie sterować, i jak poprawić parametry pracy maszyny dwustronnie zasilanej w autonomicznym układzie zasilania napięciem stałym. Przede wszystkim porównano symulacyjnie i eksperymentalnie różne metody sterowania w warunkach obciążenia nieliniowego i jego dynamicznych zmian. Ze względu na istotny wpływ harmonicznych generowanych przez takie obciążenie rozpatrzono również możliwości zmniejszenia jego oddziaływania. W ramach tego problemu zaproponowano i zbadano własne oryginalne rozwiązanie autonomicznego układu zasilania prądem stałym z

wykorzystaniem MDZ o 6-fazowym stojanie i 3-fazowym wirniku. W ten sposób doprowadzono do obciążenia stojana MDZ ekwiwalentnym prostownikiem 12-pulsowym o znacznie mniejszej zawartości harmonicznych w wypadkowym prądzie AC niż w przypadku prostownika 6-pulsowego. Godnym podkreślenia i jednocześnie potwierdzającym nowatorstwo rezultatów oraz pośrednio aktualność badań jest również też fakt uzyskania wskazane powyżej rozwiązanie 3 patentów RP.

Rozprawa liczy 112 stron łącznie ze streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści, bibliografią zawierającą 67 pozycje, listą symboli, spisem rysunków oraz załącznikiem zawierającym najważniejsze parametry obwodów symulowanych, eksperymentalnych i silnika. Zasadniczą część składającą się z 8 rozdziałów zawarto na 87 stronach. W rozdziale 1 - wprowadzeniu zostały sformułowane tezy i cel oraz omówiony zakres pracy. W rozdziale 2 przedstawiono model matematyczny maszyny dwustronnie zasilanej w układzie wytwarzania napięcia DC, wykorzystany do badań symulacyjnych. Rozdział 2 oraz kolejny 3, w którym opisano metody sterowania maszyną dwustronnie zasilaną w układach sieciowych i autonomicznych ze wskazaniem metody połowo-zorientowanej jako bazowej dla porównań, są wstępnymi do następującej po nich części zasadniczej, którą rozpoczyna rozdział 4. W tym rozdziale przedstawiono oraz porównano symulacyjnie trzy metody bezpośredniego sterowania momentem w układzie autonomicznego generatora z MDZ i wyjściem DC. W pierwszych dwóch metodach następuje bezpośrednie zadawaniem częstotliwości napięcia stojana, natomiast w trzeciej ta częstotliwość jest wynikiem regulacji amplitudy strumienia stojana. Rozdział 5 dotyczy z kolei zagadnień związanych z zastosowaniem metod bezczujnikowego sterowania MDZ-DC w wariantach dla dla sterownia połowo zorientowanego jak i dla bezpośredniego sterowania momentem. W rozdziale 6 przedstawiono model matematyczny maszyny pierścieniowej o sześciofazowym stojanie, stanowiącej interesujące rozwiązanie z punktu widzenia zmniejszenia pulsacji momentu. Dla tej MDZ przedstawiono również odpowiednie metody sterowania w wariantach z czujnikiem położenia wału i bez czujnika. Rozdział 7 zawiera rezultaty testów laboratoryjnych badanych rozwiązań stanowiących praktyczne dopełnienie wyników symulacyjnych. Ostatni rozdział 8 podsumowuje wyniki pracy i przedstawia osiągnięcia jej autora.

2. OCENA OGÓLNA ROZPRAWY

Rozprawa, choć napisana w sposób zbyt skrótowy i sprawiająca wrażenie nieco chaotycznej, zawiera bardzo wartościowe wyniki nowych i oryginalnych badań teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych, tj. w całości te wszystkie ważne elementy, które powinny być uwzględniane w rozprawach doktorskich. Przede wszystkim za kluczowe uważam samo postawienie problemu i podejście do wykorzystania MDZ w układach autonomicznych zasilania prądem stałym. W ten sposób autor wskazał też na jeden z ważnych kierunków rozwoju układów poprawiających bezpieczeństwo zasilania w mikro sieciach DC. Na uwagę zasługuje przy tym fakt przeprowadzenia wnikliwych badań porównawczych (symulacyjnych i eksperymentalnych) różnych metod sterowania układem MDZ-DC, pozwalających na wybór najbardziej skutecznego i niezawodnego rozwiązania z punktu widzenia praktyki. Istotne znaczenie dla wysokiej oceny rozprawy mają również uzyskane patenty autora, dotyczące zastosowania 6-fazowej MDZ w badanych aplikacjach. Patenty te mają duże znaczenie praktyczne. Aspekt praktyczny przejawia się także we wszystkich innych działaniach naukowych autora związanych z rozprawą. W tym kontekście na podkreślenie zasługuje ogromny nakład umiejętności prowadzonej pracy eksperymentalnej oraz praktyczna przydatność uzyskanych wyników badań laboratoryjnych. W kontekście powyższego, do głównych wymiernych osiągnięć autora rozprawy zaliczam:

- implementację metod bezpośredniego sterowania momentem autonomicznym układzie zasilania napięciem stałym z maszyną dwustronnie zasilaną i falownikiem w obwodzie wirnika.
- realizację eksperymentalnego stanowiska laboratoryjnego do weryfikacji praktycznej badanych układów zasilania autonomicznego DC z MDZ
- porównanie metod sterowania bezpośredniego ze sterowaniem połowo zorientowanym w warunkach symulacyjnych i eksperymentalnych.
- analizę oraz implementację bezczujnikowej metody bezpośredniego sterowania momentem dla maszyny trójfazowej.
- analizę pracy badanych układów w stanach ustalonych i dynamicznych, w tym stanów nie rozpatrywanych w literaturze jak całkowite odłączenie obciążenia oraz przeciążenie.
- zaproponowanie oraz modelowanie autonomicznego układu wytwarzania napięcia stałego z wykorzystaniem sześciofazowej maszyny dwustronnie zasilanej, w tym przeprowadzenie weryfikacji symulacyjnej i eksperymentalnej
- porównanie maszyny trójfazowej z prostownikiem sześciopulsowym i sześciofazowej z prostownikiem dwunastopulsowym pod względem tętnień momentu elektrycznego

Podsumowując stwierdzam, że wydzielony przez doktoranta cel ogólny rozprawy został osiągnięty, teza udowodniona, a wymagane do udowodnienia tezy zadania zrealizowane. Uzasadnione, choć może zbyt powierzchowne są także podane w zakończeniu wnioski. Rozprawa została zredagowana zasadniczo poprawnie, zawiera istotne wyniki badań i osiągnięcia aplikacyjne, uzyskane właściwymi metodami i narzędziami badawczymi. Autor wykazał się dobrą znajomością problematyki rozprawy. Na podkreślenie zasługuje ogromny nakład pracy eksperymentalnej oraz praktyczna przydatność uzyskanych w ten sposób wyników badań.

3. UWAGI

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Pawła Maciejewskiego pt. „Praca maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z bezpośrednią regulacją momentu w układzie wytwarzania napięcia stałego”, oprócz drobnych zastrzeżeń natury ogólnej, sformułowanych wyżej, nasuwają się następujące dyskusyjne uwagi krytyczne:

1. W rozprawie brakuje szerszego przeglądu metod zmniejszania pulsacji momentu MDZ, a w tym kontekście uzasadnienia wyboru 6-fazowej MDZ (asymetrycznej z 3-fazowym wirnikiem). Krótko tylko omówiono zastosowanie klasycznego prostownika 12-pulsowego z transformatorem gwiazd/trójkąt. Pominięte zostały układy wielopulsowe z dławikami bądź autotransformatorem, układy PFC (np. prostownik Vienna) i wiele innych rozwiązań. Nie wyjaśniono przy tym czy i na ile dalsza poprawa kształtu prądu stojana (lub strumienia stojana) ma uzasadnienie praktyczne
2. Jak wynika z zależności (2.26) oraz (2.27) w każdej gałęzi prostownika zawsze będzie przewodzić jedna z diod, tj. zawsze będą przewodzić 3 diody 3-fazowego mostka diodowego. Taka sytuacja (permanenty proces komutacyjny), występująca dla bardzo dużych indukcyjności rozproszenia uzwojeń stojana MZD (np. patrz rys. 2.8), prowadzi jednocześnie do znacznego zmniejszenia wartości średniej napięcia wyprostowanego. W przypadku mniejszych indukcyjności rozproszenia procesy komutacji diod zachodzą szybciej i występują przedziałami czasu, w których przewodzi tylko 2 diody mostka trójfazowego. Uwzględniając powyższe należy stwierdzić, że przyjęta funkcja (2.27) jest błędna.

- Zamiast (2.27) powinna być stosowana funkcja Heaviside'a o wartości $\frac{1}{2}$ dla $i_x = 0$. Ten błąd został nieświadomie skorygowany poprzez przyjęcie funkcji wygładzającej (2.28).
3. Niejasna jest potrzeba opracowania modelu prostownika diodowego w języku C. Trójfazowy mostkowy prostownik diodowy występuje w każdym znanym recenzentowi pakiecie symulacyjnym. Żadnego problemu nie stwarza połączenie mostków 3-fazowych po stronie DC. Wydaje się, że trudniejszym zagadnieniem była implementacja w pakiecie symulacyjnym modelu maszyny 6-fazowej asymetrycznej, opisanej równaniami przedstawionymi w podrozdziale 6.2
 4. W rozdziale 4, w którym autor omawia metody DTC w układzie MDZ-DC, w tym problemy syntezy sterowań odpowiednich, brakuje jednoznacznych rekomendacji dotyczących nastaw regulatorów. Ponadto w rozprawie nie ukazano wartości nastaw regulatorów przyjętych w badaniach symulacyjnych i zaimplementowanych w sterowniku modeli laboratoryjnych. Te wartości należało chociażby zestawić w załączniku, razem z parametrami MDZ. Wskazano by również sprecyzowanie metody PWM. Można się przy tym tylko domyślać, że parametry obwodu DC zastosowane w symulacji są również parametrami obwodu DC modeli laboratoryjnych.
 5. Autor porównywał metody DTC oraz FOC pod kątem pulsacji momentu oraz napięcia w obwodzie DC, a także charakteru procesów przejściowych przy załączaniu, wyłączaniu oraz zmianach obciążenia. Przedstawione przebiegi symulacyjne i eksperymentalne pozwalają jednak tylko na ocenę ogólną rozpatrywanych metod. Brakuje natomiast wskaźników ilościowych, np. w postaci odpowiedniej zbiorczej tabeli, pozwalających porównywać badane rozwiązania pod kątem technicznym. Takie parametry jak wibracje/drgania wału oraz straty lub nagrzewanie maszyny (lub sprawność) w zależności od zastosowanej metody stanowiłyby istotną wartość pod kątem eksploatacyjnym.
 6. Na str 73 autor pisze *"Tak znaczne różnice między wynikami symulacyjnymi i eksperymentalnymi są spowodowane nieidealnością maszyny rzeczywistej, w tym przede wszystkim nieliniowością i asymetrią obwodu magnetycznego, co powoduje, że kąty komutacji diod prostownika diodowego w każdym okresie i każdym pulsie nie są dokładnie te same jak ma to miejsce w symulacji. Jest to szczególnie widoczne w postaci tętnień podharmonicznych w przebiegach momentu oraz napięcia dc."* W tym przypadku powstaje pytanie, dlaczego w modelu MDZ nie uwzględniono nieliniowości i asymetrii obwodu magnetycznego, co np. jest możliwe w typowym pakiecie PSIM ver.10. Recenzent zgadza się przy tym, że kąty komutacji w każdym pulsie będą różne, jednakże wydaje się, że w stanie ustalonym kąty powinny się powtarzać co okres napięcia stojana.
 7. Proponowane w literaturze [25] odpowiednie sterowanie falownikiem od strony wirnika w celu kompensacji harmonicznych strumienia wywołanych nieliniowością prostownika w obwodzie stojana wydaje się ciekawym uzupełnieniem rozwiązań proponowanych w dysertacji, w tym z zastosowaniem asymetrycznej 6-fazowej MDZ. Ponieważ w tym przypadku falownik od strony wirnika przejmuje dodatkową funkcję równoległego filtra aktywnego podłączonego do odbioru nieliniowego (prostownika) poprzez wirujący transformator (MZD), to rozwiązanie nie wymaga dodatkowych obwodów mocy. Wskazane więc byłoby krytyczne omówienie właściwości rozwiązania na podstawie [25] w porównaniu z rozwiązaniami autora omawianymi w rozprawie.
 8. W podrozdziale 6.2 na rys.6.6 (str 62) pokazano model MDZ inny niż wykorzystano w pracy. W kontekście całej pracy nie widzę celu przedstawienia tego modelu.
 9. Literatura rozprawy licząca ogółem 67 pozycji, zawiera tylko 4 pozycje polsko-języczne, w 3 patenty autora rozprawy. Może to świadczyć o słabym rozpoznaniu środowiska krajowego w zakresie MDZ. Np.

w 2007 roku na Politechnice Śląskiej została obroniona rozprawa doktorska pt. „Bezpośrednie sterowanie momentu i mocy biernej maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej”. Choć ta rozprawa nie dotyczy pracy autonomicznej na odbiór DC, to część zagadnień wydają się zbieżna. Zdaniem recenzenta brakuje również odniesienia do prac dr hab. inż. Elżbiety Bogaleckiej

W rozprawie zauważono również niedostatki natury językowej (pojęciowej, stylistycznej itp.) oraz edycyjnej, w tym:

1. Na str. 3, w pierwszym zdaniu 3-go akapitu autor pisze „Zaprezentowani trzy warianty algorytmu ...”, natomiast dalej jest „W dwóch z prezentowanych metod W trzeciej zaś ...”. W tym kontekście potrzebne jest wyjaśnienie dotyczące zamienności pojęć „algorytm” oraz „metoda”
2. Sformułowanie „... , ze względu na nieliniowy charakter komutacji diod stojanowego prostownika diodowego PD ...” (str 9, akapit 1) nie można zaliczyć do udanych. Pominięcie słów „komutacji”, oraz „stojanowego” nie zmniejsza precyzji zdania, a wręcz przeciwnie.
3. Indukcyjności rozproszenia pokazane w modelu MDZ na rys.2.2, zostały wykazane tylko w spisie oznaczeń na końcu rozprawy i nie występują w żadnym równaniu matematycznym w całej pracy.
4. W niektórych miejscach autor używa dziwnie brzmiące nazewnictwo. W szczególności rażą takie sformułowania jak wspomniany wyżej „prostownik stojanowy” czy też „falownik wirnikowy” lub „przekształtnik wirnikowy (str 78) .
5. Sformułowanie (str 78) „W przypadku braku obciążenia rozładowanie kondensatora dc następuje przez pobór energii przez falownik wirnikowy na pokrycie strat przekształtnika wirnikowego i strat wzbudzonej maszyny elektrycznej” wydaje się co najmniej dziwne. Sądzę, że autorowi rozprawy chodziło w tym przypadku o straty własne falownika.
6. Trudno zaakceptować nazwę „układ odciążania” oraz termin „odciążanie” (str 42), choć są zrozumiałe i niekiedy używane w żargonie matematycznym.
7. Na str. 12 pierwsze 2 zdania brzmią: „Maszyna indukcyjna pierścieniowa posiada uzwojenia wirnika, które poprzez pierścienie ślizgowe wyprowadzone są na tablicę zaciskową maszyny. Pozwala to na zasilanie maszyny zarówno poprzez uzwojenia stojana jak i wirnika.” Takie sformułowanie może w pierwszej chwili zasugerować, że zasilanie maszyny jest niemożliwe bez tablicy zaciskowej, co oczywiście jest nieprawdą
8. Na str 63 (3 akapit) mamy „W maszynie symetrycznej o przesunięciu kątowym $\pi/6$ między fazami, ...”. Zdaniem recenzenta powinno być „...o przesunięciu kątowym $\pi/3$ między fazami”
9. Na wszystkich oscylogramach przedstawionych w podrozdziale 7.2 (z wyjątkiem lup wydzielonych na 3 ostatnich) nie oznaczono skali czasu. Utrudnia to ocenę przedstawianych przebiegów
10. Na str 17 we wzorze (2.28) występuje funkcja „atan”, natomiast na str 45 we wzorze (5.1) funkcja „atan2”. Obie funkcje stanowią jednak tylko zapis funkcji „arctg” dla kompilatora (atan2 - podwójna dokładność obliczeń) . Dlatego właściwiej byłoby zastosować matematyczną nazwę funkcji - „arctg” .
11. Na str 45, drugi akapit od dołu jest „Inną metodą kata transformacji jest...”, a powinno chyba być „Inną metodą wyznaczania kąta transformacji jest...”,
12. Brak bezpośredniego wyjaśnienia skrótu MDZ-DC

W tekście występują również inne drobne literówki, nie utrudniające jednak jego zgłębienia

WNIOSEK KOŃCOWY

- 1) Doktorant wykazał się dużą wiedzą i bardzo dobrym merytorycznym przygotowaniem do pracy badawczej oraz odpowiednimi umiejętnościami analitycznymi i eksperymentalnymi.
- 2) Uzyskane w rozprawie wyniki w pełnym zakresie zweryfikowane eksperymentalnie mają bardzo dużą wartość poznawczą i praktyczną.
- 3) Rozprawa charakteryzuje się należyтым poziomem edytorskim.
- 4) Uwagi krytyczne wyszczególnione w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku i pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Uważam, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Pawła Maciejewskiego pt. „Praca maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z bezpośrednią regulacją momentu w układzie wytwarzania napięcia stałego” , spełnia kryteria i wymagania stawiane w obowiązującej Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

