

dr hab. inż. Andrzej Kapłon, prof. PŚk
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki
Politechnika Świętokrzyska
25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
akaplon@tu.kielce.pl, tel. 41 3424205

Kielce, 18 listopada 2020 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Gennadiy'a Dauksha

"Sterowanie bezszczotkowej prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej w warunkach asymetrii napięcia sieciowego"

opracowana dla Rady Naukowej Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej

1. Tematyka, cel i zakres pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. *Sterowanie bezszczotkowej prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej w warunkach asymetrii napięcia sieciowego*.

Przedłożona praca ma 107 stron, w tym 93 strony tekstu głównego, Wykaz skrótów i symboli, Wykaz rysunków, Wykaz tablic oraz Bibliografię obejmującą 86 pozycji.

Tematyka rozprawy dotyczy konstrukcji, modelowania oraz badań symulacyjnych i laboratoryjnych bezszczotkowej prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej, szczególnie w warunkach asymetrii napięcia sieciowego. Lokuje się ona zatem w obszarze Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, z wyraźnym udziałem automatyki.

W układach generowania energii elektrycznej, zarówno pracujących na sieć energetyczną jak i wyspowo, istotne jest utrzymywanie stałości częstotliwości i napięć fazowych bez względu na zakłócenia zewnętrzne, jakimi w głównej mierze są niesymetryczne odbiory oraz pulsacje dostarczanej do generatora mocy mechanicznej. Dopuszczalne wartości asymetrii napięcia oraz wahań częstotliwości sieci energetycznej określają obowiązujące w Polsce oraz Unii Europejskiej stosowne normy.

Wzajemne oddziaływanie układu sieć energetyczna – generator jest dwukierunkowe a stopień i kierunek tego oddziaływania zależy w głównej mierze od stosunku ich mocy. Zagadnienie to szczególnie jest istotne w przypadku energetyki wiatrowej ze względu na rozproszony charakter

instalacji, jak również stosunkowo niewielką moc pojedynczej jednostki generującej (średnio $2 \div 5$ MW) oraz zmienną prędkość turbiny.

W energetyce wiatrowej najczęściej stosowane są dwa typy turbin wiatrowych: pierwsza z indukcyjną maszyną pierścieniową zasilaną dwustronnie oraz druga z maszyną synchroniczną o magnesach trwałych.

Do cech korzystnych rozwiązania z maszyną pierścieniową zasilaną dwustronnie można zaliczyć stosunkowo niskie koszty zakupu samej maszyny elektrycznej, jak i stosowanie przekształtnika energoelektronicznego o zredukowanej mocy, odpowiadającej mocy poślizgu stanowiącej 25-30% całkowitej mocy układu. Do cech niekorzystnych należy zaliczyć konieczność stosowania pierścieni ślizgowych i szczotek będących najczęstszą przyczyną awarii układu napędowego. Ze względu na bezpośrednie połączenie generatora z siecią istnieje także niebezpieczeństwo niekorzystnego oddziaływania sieci energetycznej na pracę generatora, objawiające się pulsacjami momentu elektromagnetycznego prowadzącymi w konsekwencji do uszkodzenia jego podzespołów przeniesienia napędu.

Tego typu problemy nie występują w przypadku stosowania maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi ze względu na brak aparatu ślizgowego. Podłączenie maszyny elektrycznej do sieci poprzez przekształtnik energoelektroniczny z pośrednim członem prądu stałego skutkuje z kolei brakiem oddziaływania sieci na pracę generatora oraz praktycznie eliminuje prawdopodobieństwo uszkodzenia mechanicznego zarówno generatora jak i układu przeniesienia napędu turbiny wiatrowej. Cechą niekorzystną tego rozwiązania jest konieczność zastosowania przekształtnika o pełnej mocy układu, co znacząco podraża koszt instalacji.

Alternatywą dla powyższych rozwiązań jest zastosowanie bezszczotkowego generatora indukcyjnego zasilanego dwustronnie. Można wyróżnić dwie konstrukcje tego typu maszyny różniące się usytuowaniem uzwojeń głównego i sterującego. W pierwszej konstrukcji uzwojenia te ułożone są w oddzielnych stojanach (układ kaskadowy), a w drugiej są ułożone centrycznie we wspólnym stojanie. W obu przypadkach uzwojenia pracują na wspólny wirnik. Oba rozwiązania nie posiadają aparatu ślizgowego, co stanowi zaletę ich konstrukcji. Poza tym, podobnie jak w klasycznej maszynie pierścieniowej wykorzystuje się moc poślizgu dla celów sterowania. Z cech niekorzystnych warto wymienić niższą sprawność w porównaniu do maszyny synchronicznej o magnesach trwałych oraz maszyny pierścieniowej dwustronnie zasilanej. Poza tym, podobnie jak w przypadku klasycznej maszyny pierścieniowej, cechą niekorzystną jest duży

wpływ jakości napięcia sieci na pracę tego typu generatorów ze względu na bezpośrednie podłączenie jednego ze stojanów maszyny do sieci. Zakłócenia napięcia sieci skutkują pojawieniem oscylacji momentu elektromagnetycznego maszyny, zwiększając prawdopodobieństwo uszkodzenia mechanicznego generatora oraz układu przeniesienia napędu turbiny wiatrowej.

Współczesne napędy elektryczne prądu przemiennego dla zapewnienia stabilnej oraz niezawodnej pracy jednostki w szerokim zakresie zmienności warunków: zmiennej prędkości, zmian parametrów napięcia sieci, zmian obciążenia wymagają stosowania zamkniętych układów regulacji oraz wektorowych metod sterowania. Z obecnie stosowanych metod sterowania należy wymienić następujące: bezpośrednie sterowanie momentem (*ang. DTC – Direct Torque Control*) [40][41], bezpośrednie sterowanie mocą (*ang. DPC – Direct Power Control*) [42][43], sterowanie wektorowe maszyną z orientacją względem napięcia sieci (*ang. VOC – Voltage Oriented Control*) bądź z orientacją względem strumienia (*ang. FOC – Flux Oriented Control*). Wymienione wyżej metody sterowania dają możliwość kontroli nad wytwarzaną przez jednostkę generującą mocą elektryczną w szerokim zakresie prędkości obrotowej przy jednoczesnej redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny elektrycznej

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania układami bezszczotkowej prądnicy dwustronnie zasilanej w warunkach pracy na sieć o asymetrii napięcia oraz opracowanie i przedstawienie skutecznych metod sterowania kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną, będących w stanie zapewnić poprawną pracę zespołu prądotwórczego przy wybranej strategii sterowania.

Tematyka podjęta przez Autora rozprawy wpisuje się w nurt powyższych badań. Analizowane strategie sterowania układem kaskadowej bezszczotkowej prądnicy dwustronnie zasilanej w warunkach pracy na sieć o asymetrii napięcia dotyczą prototypu zbudowanego w zespole badawczym na Politechnice Warszawskiej.

Mgr inż. Gennadiy Dauksha postawił do zrealizowania następujący cel rozprawy, jakim jest *analiza właściwości układu bezszczotkowej prądnicy dwustronnie zasilanej w warunkach pracy na sieć o asymetrii napięcia oraz opracowanie i przedstawienie skutecznych metod sterowania*

kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną, będących w stanie zapewnić poprawną pracę zespołu prądowórczego przy czterech rozłącznych strategiach sterowania, a także wybór optymalnej strategii.

Niestety dla realizacji powyższego celu Autor nie postawił jednoznacznie sprecyzowanej tezy badawczej.

Rozprawa doktorska zawiera siedem rozdziałów, wykaz ważniejszych symboli i skrótów, wykazy rysunków i tabel, bibliografię oraz streszczenia w językach polskim i angielskim.

We *Wprowadzeniu* (rozdział 1) omówiono zagadnienia związane z energetyką wiatrową oraz w jej kontekście przedstawiono trzy typy turbin wiatrowych. Omówiono konstrukcję oraz wskazano zalety i wady poszczególnych typów generatorów, ze szczególnym uwzględnieniem ich pracy na sieć energetyczną przy asymetrii napięć fazowych. W sposób opisowy przedstawiono cele do zrealizowania w rozprawie. Omówiono cztery strategie sterowania, którymi są: redukcja tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny elektrycznej w warunkach pracy na sieć asymetryczną; symetryzacja prądów fazowych płynących do sieci w warunkach asymetrii napięcia sieciowego; symetryzacja prądów sterujących maszyną elektryczną w warunkach asymetrii napięcia sieciowego; generacja jednakowej wartości mocy czynnej we wszystkich fazach przy asymetrii napięcia sieciowego. Dokonano przeglądu literatury przy omawianiu powyższych zagadnień

W rozdziale 2 (*Model bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej*) przedstawiono model matematyczny w ujęciu fazorowym dla układu współrzędnych związanego z uzwojeniem głównym kaskadowej bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej. W rozdziale 3 (*Sterowanie kaskadowej bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej przy symetrycznym napięciu sieci*) opisano strukturę oraz układy sterowania dla trzech metod: sterowanie wektorowe zorientowane względem wektora strumienia/napięcia stojana maszyny głównej; pośrednie sterowanie mocą; pośrednie sterowanie momentem elektromagnetycznym w przypadku pracy maszyny z siecią o napięciu symetrycznym. Rozdział 4 (*Sterowanie bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej w warunkach asymetrii napięcia sieci*) poświęcono omówieniu sterowania wektorowego oraz pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym w warunkach asymetrii napięcia sieciowego.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie dla dwóch algorytmów sterowania przy symetrii i asymetrii napięć sieci zasilającej. Rozdział 6 poświęcono badaniom eksperymentalnym kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie. Rozdział 7 zawiera podsumowanie osiągnięć Autora rozprawy.

Sposób podejścia do przedstawionego problemu w zakresie wyboru metod i analizy należy uznać za poprawny. Przedstawiono zarówno badania symulacyjne, jak i laboratoryjne zaproponowanych struktur sterowania. Tematykę rozprawy należy uznać za zagadnienie dalej aktualne.

2. Istotne osiągnięcia i wyniki oraz krytyczne uwagi merytoryczne i dyskusyjne.

Najistotniejszymi z punktu widzenia tematu pracy są rozdziały 4, 5 i 6, które Autor poświęcił opracowaniu i badaniom symulacyjnym oraz laboratoryjnym zaproponowanych struktur sterowania kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie.

Implementację opracowanych przez mgra Gennadij'a Dauksha algorytmów pośredniego sterowania momentem w warunkach asymetrii napięcia sieciowego w sterowaniu kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie uważam za istotne osiągnięcie Autora.

Zarówno opisane w Rozprawie konstrukcje bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie, jak i algorytmy sterowania wektorowego, również w warunkach asymetrii napięcia sieci są znane i szeroko opisane w literaturze, na co wskazuje także Autor powołując się na szereg pozycji zamieszczonych w bibliografii. Nie mniej jednak implementacja algorytmu pośredniego sterowania momentem, szeroki zakres badań symulacyjnych oraz laboratoryjna weryfikacja zbudowanego układu napędowego zasługują na uwagę.

W rozdz. 3 omówiono obie konstrukcje bezszczotkowych maszyn indukcyjnych zasilanych dwustronnie. Przy opisie maszyny ze wspólnym stojanem dla uzwojenia głównego i sterującego Autor używa sformułowania: *Jednak taka konstrukcja stojana skutkuje pojawieniem się niekorzystnej cechy, tj. powstaniem **prostego sprzężenia magnetycznego** pomiędzy stojanem głównym a stojanem sterującym.* Proszę o wyjaśnienie w jakim kontekście użyto tego

sformułowania i jak ono rzutuje na zjawiska elektromagnetyczne w maszynie i może zostać uwzględnione w schemacie zastępczym maszyny. (**uwaga A**).

Do badań wybrano model maszyny z odsprzęgniętymi uzwojeniami głównym i roboczym. Na Rys. 2.6 pokazano rozkład mocy czynnej obu uzwojeń. Z analizy teoretycznej oraz z tego rysunku, a także z podobieństwa tego typu maszyny do klasycznej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej wynika, że dla zapewnienia stałej mocy generowanej przez uzwojenie główne przy zmiennej prędkości wirnika jest niezbędna odpowiednio mniejsza moc uzwojenia sterującego, tzw. moc poślizgu. Zarówno w badaniach symulacyjnych jak i w zbudowanej maszynie moc maszyny sterującej jest większa od mocy maszyny głównej. W obu przypadkach liczba par biegunów obu maszyn składowych jest taka sama. O ile w badaniach symulacyjnych obie maszyny składowe mają po jednej parze biegunów, to w zbudowanym modelu po dwa bieguny. Czy nie byłoby korzystniejsze w zbudowanym modelu wybranie liczby par biegunów maszyn składowych np. w stosunku 3:1 na korzyść maszyny głównej (tzw. prędkość pseudosynchroniczna w obu przypadkach jest jednakowa). Czy można mówić o optymalnym z punktu widzenia sprawności układu czy mocy sterującej doborze liczby par biegunów maszyn głównej i sterującej? (**uwaga B**).

Badania symulacyjne przeprowadzono dla połączonych kaskadowo maszyn dużej mocy. Badania symulacyjne wykonano dla sterowania wektorowego i dla pośredniego sterowania momentem dla różnych warunków obciążenia i parametrów sieci energetycznej. Wyniki badań symulacyjnych nie budzą zastrzeżeń. Autor nie podaje skąd zaczerpnął dane silników przedstawione w Tab. 5.1. Interesującym byłoby wykonanie części badań symulacyjnych dla parametrów rzeczywistego układu napędowego, zbudowanego dla celów dysertacji (**uwaga C**).

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku badawczym dla kaskadowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej małej mocy (2.5 kW). W przedstawionej konstrukcji brak dwukierunkowego falownika w obwodzie maszyny sterującej powoduje ograniczenie zakresu zmian prędkości układu do wartości poniżej prędkości synchronicznej. Na Rys. 6.6 przedstawiono przebiegi zmierzonych wybranych wielkości dla pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym przy zmianie prędkości obrotowej wirnika w zakresie 500 ÷ 750 obr/min. Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność pracy układu dla założonej strategii sterowania ze stabilizacją składowej biernej mocy q_s maszyny głównej. Mało precyzyjne jest sformułowanie dotyczące np. Rys. 6.5, który *przedstawia przebiegi uzyskane na stanowisku*

eksperymentalnym dla pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym **przy pracy symulowanej** kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej ze stałą prędkością podsynchroniczną (500 obr/min). Czy rysunek ten jak i pozostałe w tym rozdziale (poza Rys. 6.6) przedstawiają wyniki symulacji dla rzeczywistego układu napędowego, czy pomiarowe (**uwaga D**). Uwaga ta wiąże się częściowo z uwagą C.

Za oryginalny dorobek mgr inż. Gennadij'a Dauksha należy niewątpliwie uznać:

- implementację wybranych, znanych z literatury, metod sterowania kaskadową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną oraz analiza pracy tych struktur w warunkach symetrycznego oraz asymetrycznego napięcia sieci,
- analizę strategii sterowania maszyną w warunkach zakłóconej symetrii napięcia sieciowego,
- opracowanie metody pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym umożliwiającą pracę kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie w warunkach pracy na sieć asymetryczną,
- badania symulacyjne kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej zasilanej dwustronnie sterowanej wektorowo
- badania laboratoryjne układu kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z wykorzystaniem metody pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym.

W bibliografii znalazłem jedną publikację współautorstwa Autora. Zawarte w niej treści stanowią część wyników rozprawy. Szkoda, że Autor w Rozprawie nie zaakcentował tego faktu w kontekście nowych/uzupełniających osiągnięć.

Odczuwa się brak we wnioskach jasno sprecyzowanych przez Autora dalszych celów badawczych (**uwaga E**).

3. Uwagi dodatkowe

Poniżej uwagi związane bezpośrednio z wydrukowaną rozprawą lub te, które nie znalazły się w części 2 Recenzji (*Istotne osiągnięcia i wyniki oraz krytyczne uwagi merytoryczne i dyskusyjne*) związanej z dyskusją.

Uwagi redakcyjne

1. Autor używa symboli p i q , jako składowych mocy: czynnej i biernej. Nie znalazło to jednoznacznego zaznaczenia w *Wykazie skrótów i symboli*.
2. Na Rys. 2.3 zwroty prędkości Ω_m dla maszyny głównej i sterującej powinny być takie same.
3. Autor używa sformułowania *przez manipulację prądem stojana*. Jest ono mało precyzyjne technicznie.
4. W kilku miejscach Autor używa języka potocznego, np. *patrz na charakterystykę, pokonanie strat*.
5. Na stronie 69, drugi wiersz od góry – sterowanie wektorowe dotyczy zapewne Rys. 5.6, a nie Rys. 5.5.
6. Na stronie 71 błędna numeracja rysunków.
7. Nagminne pozostawianie samogłosek (i, w, z) na końcu wiersza – mało dokładna korekta redakcyjna.

Pomimo powyższych uwag należy stwierdzić, że praca napisana jest poprawnie. Przedstawione wyżej uwagi dyskusyjne i dodatkowe mają w głównej mierze charakter porządkujący oraz dyskusyjny i nie umniejszają głównych wyników rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Mgr inż. Gennadiy Dauksha w przedłożonej pracy pt. *Sterowanie bezszczotkowej prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej w warunkach asymetrii napięcia sieciowego* wykazał, że umie postawić i samodzielnie rozwiązać oryginalny problem badawczy.

Rezultaty pracy, będące wynikiem analizy teoretycznej, obszernego i kompleksowego programu badań symulacyjnych oraz badań laboratoryjnych mogą zostać wykorzystane dla celów projektowych. Osiągnięcie tych rezultatów wymagało pogłębionej wiedzy Doktoranta z zakresu elektrotechniki i automatyki. Tym samym potwierdził, że posiada kwalifikacje do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Cele rozprawy, które Autor sobie postawił zostały osiągnięte. Uwagi krytyczne związane z Rozprawą doktorską nie zmniejszają jej wartości, a tym samym nie wpływają na końcową pozytywną moją ocenę w kontekście art. 13, pkt. 3 Ustawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r., a w szczególności art. 13, pkt. 3 oraz w artykule 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. 2018 poz. 1668), i przedstawiam Radzie Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej wniosek o dopuszczenie mgra inż. Gennadiy'a Dauksha do publicznej obrony pracy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kaptel', is positioned in the center of the page.