

dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski
em. prof. Politechniki Gdańskiej
Politechnika Gdańska
Wydz. Elektrotechniki Automatyki
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych
e-mail: mieczyslaw.ronkowski@pg.edu.pl
tel. kom. 604 69 69 15

Gdańsk, dnia 28 października 2023 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dariusza Cholewy, pt. „Analiza pracy i sterowanie wielofazowych generatorów indukcyjnych klatkowych”

Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Karkowskiej (pismo z dnia 29.06.2023 r.).
Podstawa powołania na recenzenta: Uchwała nr 12/2023 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej PK, z dnia 21.06.2023 r.

1. Uwagi dotyczące wyboru tematów rozprawy

W ostatnich latach można zaobserwować rosnący wzrost zainteresowania nowoczesnymi odnawialnymi źródłami energii. Jednym z przykładów są systemy elektromechaniczne generacji energii elektrycznej o zmiennej prędkości obrotowej i zmiennym momencie napędowym, np. elektrownie wiatrowe i wodne.

W przeciwieństwie do zespołów konwencjonalnych, operujących ze stałą prędkością obrotową, systemy te są w stanie dopasowywać swoją prędkość obrotową do aktualnych warunków napędowych i obciążenia. Pozwala to na optymalne wykorzystanie źródła energii mechanicznej/kinetycznej (wiatru, wody). Stało się to możliwe dzięki wykorzystaniu współczesnych osiągnięć w dziedzinie konstrukcji maszyn elektrycznych, energoelektroniki, techniki mikroprocesorowej i metod sterowania. Najnowsze rozwiązania bazują na zastosowaniu zintegrowanego zespołu: turbina wiatrowa lub wodna, wielofazowa maszyna indukcyjna klatkowa, układ energoelektroniczny i układ sterowania. Takiemu źródłu energii elektrycznej nadaje się zwykle nazwę: „przekształtnikowy zespół prądotwórczy” (PZP) lub „zespół maszynowo-przekształtnikowy” (ZMP) (ang. „Variable Speed Integrated Generator set” – VSIG).

Wielofazowa maszyna indukcyjna klatkowa z przełączalną liczbą faz i kolejnością następstwa faz, układ energoelektroniczny i układ sterowania, tworzący zespół generacji energii elektrycznej, zapewnia standardowe parametry napięcia wyjściowego zespołu, takie jak: kształt, częstotliwość i amplituda, niezależnie od napięcia generatora energii elektrycznej.

Na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Karkowskiej od szeregu lat prowadzone są prace badawcze i wdrożeniowe nad układami maszynowo-przekształtnikowymi o zmiennej prędkości obrotowej.

Doktorant w rozprawie podejmuje zadanie opracowania koncepcji, sterowania, realizacji i weryfikacji teoretycznej i praktycznej w/w systemu generacji energii elektrycznej z wielofazowym generatorem indukcyjnym klatkowym.

W powyższym kontekście opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do najbardziej istotnych i nowoczesnych zagadnień wielofazowych maszyn indukcyjnych klatkowych, energoelektroniki i techniki sterowania zaawansowanych odnawialnych źródeł energii, w szczególności na polu mikroenergetyki, zgodnych z aktualnymi tendencjami nauki i techniki światowej.

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów, podsumowania, wykazu literatury (39 pozycji) i załączników. Liczba stron 135.

W rozdziale pierwszym "Wstęp" Autor przedstawił tematykę i zakres badań rozprawy. Przedmiotem badań są zagadnienia sterowania napięciem wytwarzanym przez wielofazowy generator indukcyjny klatkowy (MIM), o liczbie faz stojana większej niż 3, pracujący w szerokim zakresie zmienności prędkości obrotowej/kątowej i obciążenia. W praktyce źródłem energii kinetycznej/mechanicznej może być turbina wiatrowa lub turbina wodna. Przy czym, ważną cechą turbin wiatrowych jest względnie duża zmienność prędkości obrotowej, spowodowana obciążeniem turbiny i prędkością wiatru, podczas gdy turbiny wodne cechują się mniejszymi wahaniami prędkości.

Uzwojenie stojana generatora indukcyjnego (MIM), jest połączone z wielofazowym impulsowym falownikiem napięciowym (VSI), pracującym w trybie prostownika PWM, wytwarzający napięcie stałe i zasilający układ stałoprądowy, np., autonomiczny odbiornik/magazyn energii prądu stałego, przekształtnik zasilający odbiornik trójfazowy, przekształtnik połączony z systemem elektroenergetycznym lub generatorami farmy wiatrowej, układem fotowoltaicznym. Sterowanie rozważanego układu generacji energii elektrycznej wymaga opracowania i zbudowania odpowiedniego układu regulacji automatycznej (CTRL).

Kandydat dokonał przeglądu literatury dotyczącej problematyki sterowania wielofazowych generatorów indukcyjnych klatkowych, o liczbie faz stojana większej niż 3, pracujących w szerokim zakresie zmienności prędkości obrotowej/kątowej. Akcentuje zalety takich generatorów w porównaniu do rozwiązań konwencjonalnych z generatorami indukcyjnymi o uzwojeniu pierścieniowym wirnika. W szczególności podkreśla, że wielofazowe generatory indukcyjne klatkowe, charakteryzują się możliwością pracy przy większym zakresie zmienności prędkości obrotowej niż generatory indukcyjne konwencjonalne. Ponadto, mogą one pracować przy uszkodzonej fazie uzwojenia stojana generatora, są znacznie tańsze w budowie i podczas eksploatacji - brak zestyku ślizgowego w obwodzie uzwojenia wirnika.

W odniesieniu do istniejącego stanu rozważanego zagadnienia, Autor podał cel i zakres rozprawy oraz sformułował tezę rozprawy.

Jako główny cel w rozprawie, Kandydat stawia sobie opracowanie metody/prawa sterowania i realizację układu sterowania (CTRL) przekształtnika (VSI), współpracującego z wielofazowym generatorem indukcyjnym, zapewniającym uzyskanie napięcia stałego na wyjściu przekształtnika (VSI) o zadanej wartości, w warunkach pracy przy zmiennej prędkości obrotowej w szerokim zakresie $(0,25 - 1,5) \Omega_N$ i zmiennym obciążeniu generatora indukcyjnego (MIM).

Realizacja powyższego celu wymagała sformułowania i opracowania metody/prawa sterowania układu regulacji automatycznej (CTRL) falownika (VSI), budowy mikrokontrolerowego układu sterowania i przeprowadzenia badań analitycznych, symulacyjnych i doświadczalnych. Kandydat założył rozważenie dwóch metod sterowania maszyny indukcyjnej: sterowanie skalarne - jednoczesna regulacja napięcia i częstotliwości oraz sterowanie wektorowe - sterowanie połowo zorientowane, a także porównanie obu metod w aspekcie jakości sterowania.

W postawionej tezie rozprawy Autor stwierdza:

"Wielofazowa maszyna indukcyjna klatkowa sterowana za pomocą układu regulacji automatycznej może pracować jako prądnica, wytwarzając napięcie o żądanej wartości na zaciskach wyjściowych przekształtnika PWM włączonego na zaciski wielofazowego stojana, przy dużej zmienności prędkości napędzania oraz przy zmianach obciążenia."

Powyższa teza, brana dosłownie, sprawia wrażenie nieco trywialnej. Jeśli jednak wagę tezy mierzyć stopniem trudności jej udowodnienia w aktualnym/rozważanym kontekście technologicznym, to przedmiotowa teza nabiera istotności, zaś jej pełen dowód przekracza możliwości jednej pracy doktorskiej.

W rozdziale drugim "Właściwości wielofazowych maszyn indukcyjnych klatkowych"

Autor, na podstawie cytowanej literatury przedmiotu rozprawy (wykaz w zał. **"Spis literatury"**), omawia charakterystyki mechaniczne dla dwóch typów uzwojenia, charakterystyki mechaniczne i ustalony punkt pracy, siły magnetomotoryczne uzwojenia i napięcia indukowane na zaciskach uzwojenia stojana.

Na podstawie analizy właściwości dwóch typów uzwojenia wielofazowych maszyn indukcyjnych klatkowych:

- pierwszy typ uzwojenia ($S = 1$) - fazy uzwojenia są pojedynczymi cewkami;
- drugi typ uzwojenia ($S = 2$) - fazy uzwojenia składają się z pojedynczych cewek.

Autor przyjmuje do dalszych rozważań w rozprawie uzwojenie 9-cio fazowe ($M = 9$) 1-szego typu ($S = 1$), podając słuszne uzasadnienie.

Wielofazowa maszyna indukcyjna z uzwojeniem 2-giego typu ($S = 2$) może praktycznie pracować efektywnie przy zasilaniu o kolejności faz $m = 1$. Przy wyższych wartościach m współczynnik uzwojenia szybko maleje i wartości napięcia nie uda się w praktyce zmieniać za pomocą zmiany numeru kolejności faz m . Ponadto, maszyna może pracować przy ograniczonym zakresie zmiany prędkości obrotowej, w porównaniu z maszyną wielofazową z uzwojeniem 1-szego typu ($S = 1$). Zatem, maszyna wielofazowa z uzwojeniem 1-szego typu ($S = 1$) jest odpowiednia dla turbin wiatrowych. Cechą turbin wiatrowych jest stosunkowo duża zmienność prędkości obrotowej, powodowana zmianami obciążenia i prędkości wiatru.

W rozdziale trzecim "Model matematyczny wielofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej"

Autor, odnosząc się do literatury przedmiotu [11, 13] (zał. **"Spis literatury"**), opisuje model matematyczny rozważanej wielofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej. Przy opracowaniu modelu maszyny, opisanego w publikacji [13], pominięto zjawiska nasycenia obwodu magnetycznego i wypierania prądu w uzwojeniu klatkowym wirnika, przedyskutowano dopuszczalne uproszczenia dotyczące uwzględnienia liczby harmonicznych pola magnetycznego w szczelinie roboczej i ich wzajemnego oddziaływania. Na bazie tych założeń modelowania, opracowano uniwersalny model matematyczny wielofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej, odwołując się do publikacji [15]. Model ten uwzględnia najważniejsze właściwości maszyny, a w szczególności możliwość analizy pracy maszyny przy różnych kolejnościach faz zasilania oraz przy przerwach faz uzwojenia stojana.

Poprawność przyjętych założeń, przy opracowania uniwersalnego modelu wielofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej, wynika z weryfikacji doświadczalnej. Wyniki pomiarów opisano w publikacji [10], której współautorem jest Kandydat. Weryfikacja modelu dotyczyła pracy silnikowej wielofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej.

Równania różniczkowe, opisujące model uniwersalny wielofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej, stanowiły bazę do realizacji modelu symulacyjnego w środowisku MATLAB/Simulink, prezentowanego w publikacji [8], której współautorem jest Kandydat.

Opracowany model symulacyjny zastosowano do badania pracy silnikowej i generatorowej wielofazowej maszyny indukcyjnej, współpracującej z przekształtnikami energoelektronicznymi i systemem elektroenergetycznym. Ponadto, model ten zastosowano w recenzowanej rozprawie, jako podstawę do sformułowania prawa sterowania i do realizacji układu sterowania wielofazowym generatorem indukcyjnym klatkowym.

W rozdziale 4 ("Sterowanie dziewięciofazowego generatora indukcyjnego klatkowego"), Autor sformułował zasady kształtowania wyjściowych prądów fazowych przekształtnika (VSI) (uwzględniając funkcję filtracji aktywnej) oraz regulacji napięcia prądu stałego na wyjściu przekształtnika.

Autor rozważył dwie metody sterowania badanego w rozprawie dziewięciofazowego generatora indukcyjnego klatkowego:

- sterowanie skalarne z zachowaniem stałego stosunku napięcia do częstotliwości ($U/f = \text{const}$),
- sterowanie wektorowe - polowo zorientowane względem wektora strumienia wirnika (Field Oriented Control).

Metody te Autor z powodzeniem implementował do sterowania badanej dziewięciofazowej maszyny indukcyjnej. Ponadto Autor skomentował, że można je również zastosować do sterowania generatorów indukcyjnych klatkowych o innej liczbie faz niż 9.

Badania doświadczalne Autor wykonał dla dziewięciofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej, zbudowanej na bazie elementów trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego typu Sfl12M-4 o mocy znamionowej 4 kW. W silniku przezwojono uzwojenie stojana z 3 faz na 9 faz, zachowano wirnik klatkowy o 28 aluminiowych prętach. Parametry znamionowe zbudowanego 9-fazowego generatora indukcyjnego Autor zestawiał w rozprawie w Tabeli 4.3-2. Obliczone wartości parametrów modelu matematycznego generatora Autor podał w Tabeli 4.3-2. Do obliczenia wartości parametrów badanego generatora Autor zastosował zależności (3.2-30, 3.2-33, 3.2-35, 3.2-40) podane w rozdz. 3 rozprawy.

Autor w Tabeli 4.7-1 sporządził interesujące zestawienie obrazujące złożoność obliczeń obu metod sterowania: skalarne i wektorowe.

W redakcji rozdziału 5 ("Modelowanie układu generatora indukcyjnego w środowisku MATLAB/Simulink") Autor słusznie wyróżnił podrozdziały: 5.1 "Struktura badanego układu"; 5.2 "Model maszyny indukcyjnej klatkowej"; 5.3 "Modele pozostałych bloków"; 5.4 "Modele układu generacyjnego"; 5.5 "Podsystem sterowania skalarne"; 5.6 "Podsystem sterowania wektorowe".

Rozdział 5 Kandydat poświęcił koncepcji i realizacji modelu symulacyjnego rozważanego układu generacyjnego, zakładając opcję jego rozbudowy, celem badania współpracy rozważanego układu z systemem elektroenergetycznym.

Równania różniczkowe maszyny/generatora w postaci macierzowej Autor odwzorował w postaci diagramów/schematów blokowych, charakterystycznych dla środowiska pakietu Simulink/ MATLAB. Parametry modelu maszyny: rezystancja uzwojenia stojana, rezystancja klatki wirnika oraz indukcyjności wzajemne, mają formę macierzy i są obliczane skryptem MATLABa, na podstawie danych konstrukcyjnych maszyny, przedstawionych w tabeli 4.3-1 rozprawy.

Należy podkreślić, że takie podejścia Autora do budowy modelu generatora wnoszą istotne korzyści, np., daje możliwość integracji generatora z elementami środowiska pakietu Simulink/MATLAB, w szczególności z biblioteką „Simscape Electrical”, służącą do modelowania układów elektrycznych. Otwiera to także możliwości modelowania globalnego systemów złożonych z układu napędu, układów generacji/przetwarzania/użytkowania energii elektrycznej, zawierających przekształtniki energoelektroniczne, tory przetwarzania i kondycjonowania sygnałów oraz układy regulacji.

W skład biblioteki pakietu Simulink/MATLAB Autor dołączył szereg bloków pomocniczych, przeznaczonych do szybkiego i wielokrotnego wykorzystania w budowie modeli rozważanego systemu. Należy podkreślić, że Autor bibliotekę zbudował w sposób uniwersalny, umożliwiając jej zastosowanie (po odpowiednich modyfikacjach) do układów o dowolnej liczbie faz. W rozprawie Kandydat przedstawił wariant biblioteki przeznaczonej do modelowania układów z dziewięciofazowym generatorem indukcyjnym klatkowym.

Dla potrzeb modelowania i symulacji układów z dziewięciofazowym generatorem indukcyjnym klatkowym Autor opracował koncepcję i zrealizował następujące bloki:

- Dziewięciofazowa maszyna indukcyjna klatkowa w konfiguracji uzwojenia stojana połączonego w gwiazdę („9-phase Asynchronous Machine”);
- Selektor kolejności (następstwa) faz z nastawianą wartością histerezy przełączeń („9-phase Sequence Selector”);
- Tranzystorowy przekształtnik napięcia o topologii falownika („9-phase Voltage Source Inverter”);
- Modulator szerokości impulsów („9-phase PWM Modulator”);
- Transformacja wielkości naturalnych (fazowych) do stacjonarnego układu ortogonalnego („9-phase to alpha-beta”) oraz transformacja odwrotna („alpha-beta to 9-phase”).

Rozdział 6 "Model laboratoryjny układu generacyjnego" i rozdział 7 "Badania układu generacyjnego" są najistotniejszymi rozdziałami rozprawy.

W rozdziale 6 Autor opisał koncepcję struktury, elementy i realizację budowy kompletnego zaawansowanego stanowiska laboratoryjnego do badania układów wytwarzania energii elektrycznej przez wielofazowy generator indukcyjny. Napędem generatora jest silnik prądu stałego (DCM), połączony z wałem generatora za pośrednictwem momentomierza (TM). Obciążenie elektryczne stanowi układ sterowanego prostownika połączonego z rezystorem i elementem indukcyjnym (DCSYS). W rozprawie Autor przedstawił wykaz zastosowanych podzespołów w tabeli 6.1-1, a fotografię zbudowanego stanowiska laboratoryjnego wraz z oznaczeniem najważniejszych komponentów na rys. 6.1-2.

W rozdziale 7 Autor przedstawił wybrane wyniki badań oraz ich omówienie. Pominięto prezentację wyników dla kolejności faz $m = 4$, ponieważ dla założonych wartości mocy nie było możliwe osiągnięcie zadanego napięcia. Badana maszyna dla tego stanu pracy ma osiem biegunów i w konsekwencji pobiera prąd magnesujący o wartości porównywalnej z prądem znamionowym.

Pomiary Autor wykonał dla 23 punktów pracy, w warunkach regulacji napięcia obwodu prądu stałego do wartości $U_{dc} = 150$ V i zmiany obciążenia DCSYS na wyjściu stałoprądowym. W zależności od prędkości napędowej generatora wybrano odpowiednią kolejność faz zasilania m , według zasady przedstawionej w rozdziale 4.5. rozprawy. Pomiary dla prędkości odpowiadających granicy zmiany kolejności m (punkty 5 i 6 oraz 12 i 13 w tabeli 7.1-1 rozprawy) Autor wykonał dla dwóch kolejności faz m . Zmierzono wartości prędkości obrotowej n , momentu mechanicznego na wale generatora T_e , wartości średniej prądu rezystancji obciążenia I_{Rd} oraz wartości skutecznej prądu stojana I_s . Sygnał momentu mechanicznego T_e przetworzono za pomocą filtra dolnoprzepustowego, aby ograniczyć zawartość składowej zmiennej.

Na podstawie powyższych danych pomiarowych została obliczona moc mechaniczna P_1 , dostarczana za pośrednictwem wału generatora oraz moc elektryczna P_2 wydzielana w rezystorze obciążenia R_d . Autor, na podstawie tych wartości wyznaczył sprawność przetwarzania energii w badanym układzie generacyjnym.

Obliczona została również przybliżona wartość średnia prądu I_d w obwodzie prądu stałego płynącego pomiędzy przekształtnikiem VSI a obciążeniem układem DCSYS (wzór 7.1-) w rozprawie.

Obciążenie elektryczne badanego generatora Autor regulował układem obciążenia DCSYS w taki sposób, aby moc elektryczna oraz prąd stojana generatora były utrzymywane w zakresie nieprzekraczającym wartości znamionowych. Pomiary Autor wykonał dla sterowania wektorowego, pomijając sterowanie skalarne, gdyż wstanie ustalonym oba układy dały takie same wyniki.

Na podstawie wyników pomiarów zestawionych w tabeli 7.1-1, na rys. 7.1-1 i 7.1-2 7.1-3 7.1-4, 7.1-5 Autor przedstawił w rozprawie interesujące charakterystyki mocy, sprawności i prądów w funkcji prędkości badanego generatora.

Kolejne pomiary obejmowały badanie jakości stabilizacji napięcia obwodu prądu stałego przy zmianach obciążenia. Pomiary Autor wykonał dla dwóch układów sterowania, celem porównania ich właściwości regulacyjnych w stanie nieustalonym. Pomierzono i zarejestrowano przebiegi prędkości, momentu obrotowego, napięcia obwodu prądu stałego, mocy elektrycznej i prądu stojana badanego generatora. W rozprawie na rys. 7.2-1 przedstawiono wyniki pomiarów dla sterowania wektorowego, a na rys. 7.2-2 dla sterowania skalarnego.

Dalsze pomiary obejmowały Uruchomienie badanego układu, a w szczególności procesu wzbudzenie generatora.

Uruchomienie rozpoczęto rozpędzeniem generatora do zadanej prędkości oraz naładowaniem kondensatora obwodu prądu stałego do wartości początkowej napięcia $U_{dc0} = 30$ V. W chwili początkowej $t_{en} = 1$ s po załączeniu przekształtnika (VSI) rozpoczął się proces przejściowy wzbudzania generatora. Po pewnym czasie uzyskiwano stabilizację napięcia wyjściowego na zadanym poziomie $U_{ref} = 150$ V. Badanie wykonano przy braku obciążenia elektrycznego na wyjściu układu generacyjnego. Eksperyment wykonano dla trzech kolejności faz: $m = 1$, $m = 2$, $m = 3$. Wybrane wielkości elektryczne: napięcie obwodu prądu stałego, prąd fazowy stojana generatora, napięcie fazowe uzwojenia generatora przedstawiono w rozprawie na: Rys. 7.3-1, Rys. 7.3-2, Rys. 7.3-3.

Praca w rozważanego generatora w szerokim zakresie prędkości obrotowej napędu wymaga zmiany kolejności faz napięcia zasilania. Przełączenie kolejności faz zasilania wymusza stany nieustalone w układzie generacji: udary prądów stojana i momentu elektromagnetycznego oddziałującego na układ mechaniczny, które mogą przyspieszyć zużycie elementów eksploatacyjnych, np. łożysk. Dodatkowo, elektryczne stany nieustalone prądów stojana mogą prowadzić do zadziałania zabezpieczeń nadprądowych przekształtnika i w konsekwencji przerwania pracy układu generacyjnego. Aby uniknąć zadziałania zabezpieczeń nadprądowych przekształtnika, Autor do badania tych stanów zastosował model symulacyjny generatora opracowany w środowisku pakietu Matlab/Simulink (rozdz. 5 rozprawy).

W badaniach symulacyjnych obciążenie elektryczne generatora zależne było od prędkości obrotowej napędu (przyjęto $P_2 = \omega^{pu} P_N$). Autor rozważył dwa przypadki przełączeń: z kolejności $m = 1$ na $m = 2$, a następnie zmiana $m = 2$ na $m = 3$, przy malejącej prędkości napędzania. W tabelach 7.4-1 (dla $m = 1$) oraz 7.4-2 (dla $m = 2$) w rozprawie Autor zestawił wartości maksymalne napięcia, prądu i momentu generatora, występujące podczas stanów przejściowych układu spowodowanych przełączeniem kolejności faz. Natomiast na rys. 7.4-1 i rys. 7.4-2. Autor przedstawił przebiegi (w funkcji czasu): prędkości obrotowej, napięcia obwodu prądu stałego, prądu fazowego stojana, momentu elektromagnetycznego. Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły, że sterowanie generatora metodą wektorową zapewnia zmniejszenie wartości udarowej momentu elektromagnetycznego średnio o połowę w porównaniu ze sterowaniem skalarnym.

Następne badania symulacyjne dotyczyły przypadku pracy generatora z przerwana fazą. Dla potrzeb symulacji Autor dokonał modyfikacji modelu opracowanego w rozdz. 5 rozprawy. Modyfikację modelu Autor przedstawił na rys. 7.5-1.

Uszkodzenie fazy Autor zrealizował wtrąceniem szeregowo rezystancji pomiędzy przekształtnikiem a generatorem. Wartość rezystancji została dobrana na poziomie tysięcy krotności nominalnej rezystancji fazy stojana generatora. Generator obciążono mocą elektryczną zależną od wartości prędkości obrotowej napędu - przyjęto $P_2 = 0,5 (\omega^{p_m} P_N)$. Ze względu na pracę z uszkodzeniem fazy, maksymalna moc generatora została obniżona do połowy mocy znamionowej.

Wyniki symulacji: przebiegi prędkości, napięcia obwodu prądu stałego oraz mocy elektrycznej generatora Autor przedstawił w rozprawie na rys. 7.5-2, a przebiegi prądów fazowych generatora na rys. 7.5-3. Przerwę założono w fazie "pierwszej" generatora. Na podstawie wyników symulacji Autor stwierdza, że pomiędzy fazami aktywnymi występują pewne różnice w wartościach prądów. Pomimo uszkodzenia, generator wytwarza zadaną moc elektryczną, a układ regulacji stabilizuje napięcie obwodu prądu stałego. Dodając: praca maszyny wielofazowej dla rozważanego uszkodzenia została szerzej wyjaśniona na przykładzie pracy silnikowej w publikacji [12], której współautorem jest Kandydat.

Autor rozważania w rozdz. 7 rozprawy kończy porównaniem dziewięciofazowego fazowego generatora indukcyjnego klatkowego (MIM) z trójfazowym generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi (PMSG). W tym celu Autor opracował syntetyczny test porównawczy dwóch generatorów, zakładając stałą wartość strumienia głównego generatora synchronicznego, obliczył wartości przyjętych parametrów porównawczych. Wartości przyjętych parametrów podano w tabeli 7.6-1, a w tabeli 7.6-2 zestawiono wartości obliczonego wg. wzoru (7.6-1) prądu stojana generatora synchronicznego (PMSG) i wartości prądu 9-cio fazowego generatora indukcyjnego klatkowego (wyniki pomiarów w tabeli 7.1-1). Natomiast na rys. 7.6-1 pokazano charakterystykę wartości skutecznych prądów stojana dla obu generatorów w funkcji prędkości obrotowej napędu. Na podstawie wyznaczonych wartości parametrów porównawczych i charakterystyki wartości skutecznych prądów stojana obu generatorów, Autor konkluduje: w zakresie poniżej połowy znamionowej prędkości obrotowej, wielofazowy generator indukcyjny cechuje się niższymi wartościami prądów fazowych, dla tej samej wartości wytwarzanej mocy elektrycznej.

Należy podkreślić, że Autor zrealizował bardzo bogaty i rzetelny program badań doświadczalnych, zapewniający weryfikację rozważań teoretycznych przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach rozprawy.

W rozdz. 8 "Podsumowanie" Autor dokonał podsumowania wyników recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Rozprawa jest zredagowana w sposób bardzo zwięzły (85 stron tekstu głównego) i napisana na ogół poprawną polszczyzną. Praktycznie nie ma w rozprawie błędów gramatycznych, ortograficznych bądź typograficznych. Rozprawa jest też niemal całkowicie wolna od niezręczności stylistycznych.

Redakcja rozprawy w aspekcie graficznym (prezentacja wykresów, charakterystyk, schematów, wyników pomiarów i stanowiska do badań doświadczalnych) jest wzorowa. Ogólnie redakcję rozprawy należy ocenić jako dobrą.

3. Uwagi merytoryczne

W rozdz. 5 ("**Modelowanie układu generatora indukcyjnego w środowisku MATLAB/Simulink**") Autor opisał opracowanie modelu rozważanego układu z wielofazowym generatorem indukcyjnym klatkowym. Przyjęte podejście do modelowania opisał następująco(s. 44): "Model wielofazowej maszyny indukcyjnej w postaci struktury

właściwej dla Simulinka opiera się wprost na równaniach modelu matematycznego przedstawionych w rozdz. 3. Poprawność przedstawionego modelu została zbadana w [10] na przykładzie napędu z silnikiem dziewięciofazowym. We wspomnianej publikacji porównano rezultaty uzyskane za pomocą modelu symulacyjnego z wynikami pomiarów na stanowisku laboratoryjnym, zawierającym (identyczną z tą modelowaną) maszynę 9-fazową. Uzyskano wysoki poziom podobieństwa otrzymanych wyników. Na tej podstawie można orzec o poprawności prezentowanego modelu." Uważam, że to uzasadnienie nie wystarczy do oceny wiarygodności opracowanego modelu układu generatora indukcyjnego w środowisku MATLAB/Simulink". Należało przedstawić wybrane wyniki badań symulacyjnych układu, a następnie wyniki te porównać z wynikami badań doświadczalnych prezentowanych w rozdz. 7 rozprawy: "Badanie układu generacyjnego".

W podrozdz. 7.3 Autor opisał uruchomienie badanego układu, a w szczególności proces wzbudzenia generatora. Uruchomienie rozpoczęto rozpędzeniem generatora do zadanej prędkości oraz naładowaniem kondensatora obwodu prądu stałego do wartości początkowej napięcia $U_{dc0} = 30 \text{ V}$.

Uważam, że należało także zbadać ważny proces samowzbudzenia generatora, tzn. przy nie naładowanym kondensatorze, a także zbadać jaki poziom magnetyzmu szczątkowego jest konieczny do rozpoczęcia procesu samowzbudzenia generatora. Opisanie tego procesu metodą analityczną lub symulacyjną wymagać będzie uwzględnienia nieliniowości obwodu magnetycznego/nasylenia generatora indukcyjnego klatkowego, a także doboru odpowiedniej wartości pojemności kondensatora. Proszę Autora o komentarz, np. jak dobrać wartość kondensatora.

W rozdz. 6 "Model laboratoryjny układu generacyjnego" Autor opisał koncepcję struktury, elementy i realizację budowy kompletnego zaawansowanego stanowiska laboratoryjnego do badania układów wytwarzania energii elektrycznej przez wielofazowy generator indukcyjny. W budowanym stanowisku jak generator indukcyjny wykorzystano elementy seryjnie produkowanego trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego - typ Sf112M-4 (Rozdz. 4.3 "Parametry badanego generatora dziewięciofazowego" Dane w tabeli 4.3-1, 4.3-2). W procesie projektowania silnika indukcyjnego klatkowego trudnym problemem jest dobór uzwojenia klatkowego wirnika, a w szczególności dobór liczby prętów, ich wymiarów i kształtu. W rozprawie brak dyskusji tego problemu, tzn. pojawia się pytanie: czy klatka, seryjnie produkowanego trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego typ Sf112M-4, jest odpowiednio dobrana/zaprojektowana dla dziewięciofazowego generatora do warunków pracy w rozważanym systemie generacji energii elektrycznej?

Autor w rozdz. 7 "Badanie układu generacyjnego" przeprowadził analizę porównawczą badanego dziewięciofazowego fazowego generatora indukcyjnego klatkowego (MIM) z trójfazowym generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi (PMSG). Uważam, że w analizie należało uwzględnić aspekt ekonomiczny: koszt generatorów, koszt eksploatacji generatorów, niezawodność pracy generatorów. Proszę o komentarz Autora.

4. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Uwaga 1. Zbyt częste używanie skrótowych i niepoprawnych nazw, np.:

Jest: "2.1 Charakterystyki mechaniczne wielofazowych silników indukcyjnych dla dwóch typów uzwojenia".

Powinno być: "2.1 Charakterystyki mechaniczne wielofazowych silników indukcyjnych klatkowych dla dwóch typów uzwojenia stojana".

Jest: "2.3 Siła magnetomotoryczna uzwojenia wielofazowego".

Powinno być: "2.3 Siła magnetomotoryczna uzwojenia wielofazowego stojana".

Jest: "2.4 Indukowane napięcie generatora wielofazowego".

Powinno być: "2.4 Napięcie indukowane w uzwojeniu stojana generatora wielofazowego".

Jest: "6 Model laboratoryjny układu generacyjnego".

Powinno być: "6 Stanowisko laboratoryjne układu z 9-cio fazową maszyną indukcyjną klatkową do generacji energii elektrycznej".

Jest: "7 Badanie układu generacyjnego".

Powinno być: "7 Badanie układu z 9-cio fazową maszyną indukcyjną klatkową do generacji energii elektrycznej".

Uwaga 2: w rozdz. 8 "Podsumowanie". Uważam, że Autor powinien wypunktować: zrealizowane cele rozprawy i podać dalsze kierunki badań.

Uwaga 3. Dotyczy wspólnych publikacji [8, 10, 12, 16] (wg Spisu literatury rozprawy) Autora z Promotorem rozprawy. Uważam, że kandydat powinien w zał. do rozprawy podać własny wkład merytoryczny w opracowanie wspólnych publikacji.

5. Ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa jest świadectwem dużej dojrzałości badawczej Kandydata, Jego znacznych umiejętności analitycznych, samodzielności intelektualnej oraz bardzo dobrego rzemiosła inżynierskiego. Tematyka rozprawy dotyczy wielofazowych generatorów indukcyjnych klatkowych, a więc obiektów o bardzo dużym potencjale aplikacyjnym. Rozprawa jest wynikiem ogromnego, wielokierunkowego wysiłku badawczego, obejmującego gruntowne studia literaturowe, analizę symboliczną i numeryczną, badania symulacyjne, projektowanie i programowanie układu eksperymentalnego oraz badania laboratoryjne. Rozprawa wnosi istotny wkład do rozwoju wiedzy na temat właściwości i metod modelowania, badania i sterowania wielofazowych generatorów indukcyjnych klatkowych, pracujących w systemach elektromechanicznego przetwarzania energii o zmiennej prędkości obrotowej, w elektroenergetyce odnawialnych źródeł energii.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez Autora istotnego i niebanalnego zagadnienia naukowego i technicznego. Wykazuje Jego ogólną wiedzę w dziedzinie elektrotechniki, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i posługiwania się podstawowymi metodami pracy badawczej - analizą teoretyczną, symulacją i eksperymentem laboratoryjnym. Uzyskane rezultaty będą bardzo przydatne w dalszych pracach badawczych w obszarze elektromechanicznego przetwarzania energii, elektroenergetyki, energoelektroniki i automatyki w aspekcie transformacji energetycznej.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania określone przez obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

