

Częstochowa, dn. 16.12.2019 r.

Dr hab. inż. Andrzej Popenda, profesor uczelni
Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny
Katedra Elektroenergetyki
Al. Armii Krajowej 17
42-200 Częstochowa
Tel. 34-3250 873
E-mail: popenda@el.pcz.czyst.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Piotr Pura

*Bezpośrednie metody sterowania maszyny dwustronnie zasilanej
w warunkach sieci asymetrycznej*

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Iwański, profesor uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Marek Michalczuk

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej, wykonanej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr. hab. inż. Grzegorza Iwańskiego oraz dr. inż. Marka Michalczuka jest pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Lecha Grzesiaka z dnia 06.11.2019 r. informującego, że Rada Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej na posiedzeniu w dniu 06.11.2019 r. podjęła uchwałę powołującą mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Pury zatytułowanej *Bezpośrednie metody sterowania maszyny dwustronnie zasilanej w warunkach sieci asymetrycznej*.

2. Zagadnienie naukowe i jego sformułowanie

Ogólna charakterystyka rozprawy

Podstawowe zagadnienia rozprawy wpisują się w zakres nauk technicznych, w **dyscyplinę elektrotechnika odpowiadającą dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika**. Dotyczą sterowania pracą generatorową maszyny dwustronnie zasilanej współpracującej z siecią asymetryczną.

Rozprawa obejmuje 120 stron łącznie ze spisem literatury liczącym 72 pozycje, w tym 4 pozycje autorstwa lub współautorstwa mgr. inż. Piotra Pury, oraz zestawieniami użytych skrótów i symboli, rysunków i tabel. Została podzielona na pięć rozdziałów, przy czym zagadnienia o cechach oryginalnych zostały przedstawione w rozdziałach 2., 3. i 4..

Charakterystyka zagadnienia naukowego

Praca generatorowa maszyny dwustronnie zasilanej (MDZ) znajduje szerokie zastosowanie w energetyce wiatrowej. Przyczyną zainteresowania wyżej wymienionym zakresem pracy MDZ jest możliwość dostosowania częstotliwości napięcia stojana do stałej częstotliwości sieci, z którą maszyna współpracuje, przy zmiennej prędkości obrotowej wirnika. Cecha ta odróżnia maszynę dwustronnie zasilaną od maszyny synchronicznej, na której oparta jest większość konwencjonalnych systemów elektroenergetycznych. Prędkość obrotowa wirnika maszyny synchronicznej jest zdeterminowana częstotliwością generowanego napięcia, co ogranicza możliwości wyboru napędu tej maszyny lub skutkuje koniecznością włączenia pomiędzy generatorem a siecią przemiennika częstotliwości zaprojektowanego na pełną moc generatora. Nie w każdym przypadku jest możliwe albo celowe dostosowanie prędkości kątowej wału napędu maszyny do częstotliwości generowanego napięcia. Dotyczy to przede wszystkim elektrowni wiatrowych i wodnych. Uzasadnionym ekonomicznie rozwiązaniem jest wówczas zastosowanie maszyny dwustronnie zasilanej, sterowanej przekształtnikiem od strony wirnika. Maszynę dwustronnie zasilaną można również stosować w okrętowym systemie elektroenergetycznym, wykorzystującym rezerwy mocy napędu głównego.

Wybór metody sterowania MDZ zależy między innymi, podobnie jak w przypadku generatorów synchronicznych, od warunków pracy równoległej maszyny, tj. pracy na sieć sztywną, pracy na sieć elastyczną lub pracy indywidualnej. W przypadku współpracy MDZ z siecią sztywną częstym rozwiązaniem wykorzystywanym w układach sterowania pracą generatorową MDZ jest zastosowanie nadrzędnych regulatorów mocy czynnej i mocy biernej, wydawanych przez prądnicę do sieci. W źródłach literaturowych prezentowano też struktury z nadrzędną regulacją momentu elektromagnetycznego i kąta momentu, momentu i strumienia oraz momentu i mocy biernej. Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bezpośrednich struktur regulacji stosowanych w układach sterowania pracą generatorową MDZ współpracującej z siecią sztywną z uwzględnieniem niesymetrycznego układu napięć sieci, który może być przyczyną oscylacyjnego charakteru momentu elektromagnetycznego oraz niesinusoidalnych przebiegów prądów. Założonym przez Doktoranta celem regulacji jest uzyskanie pracy MDZ ze stałym w czasie momentem elektromagnetycznym i sinusoidalnym przebiegiem prądu.

Tytuł rozprawy

Mając na uwadze przedstawione w dysertacji badania recenzent uważa, że Autor podjął wysiłek w kierunku uszczegółowienia tematyki rozprawy w tytule. Tytuł rozprawy oddaje zatem treści w niej prezentowane.

3. Teza rozprawy i jej udowodnienie

Cel pracy

Cel pracy został sformułowany w rozdziale 1. *Wstęp* następująco (cytuję):

„*Celem niniejszej rozprawy jest analiza i sterowanie bezpośrednio maszyny dwustronnie zasilanej przyłączonej do sieci asymetrycznej.*”

Wobec tak postawionego celu ogólnego Autor formułuje cele szczegółowe:

- „*Analiza wpływu asymetrii napięcia sieci elektroenergetycznej na indukowane napięcie w obwodzie wirnika,*

- *Przedstawienie popularnych bezpośrednich metod sterowania mocą oraz momentem wykorzystujących regulatory histerezowe, oraz propozycja sposobu generacji sygnałów referencyjnych dla poszczególnych algorytmów,*
- *Przedstawienie koncepcji sterowania mocą chwilową stojana oraz sterowania momentem i jego komplementarnym skalarom pomocniczym, z wykorzystaniem regulatorów liniowych,*
- *Weryfikacja symulacyjna oraz eksperymentalna proponowanych algorytmów,*
- *Analiza wpływu odsprzężeń torów regulacji, sprzężeń w przód oraz dodatkowej informacji o prądzie wirnika na jakość regulacji.”*

Recenzent uważa, że formułując cel rozprawy Autor powinien wskazać na to co zamierza osiągnąć, jaki problem zamierza rozwiązać. Użycie sformułowania „*Celem niniejszej rozprawy jest [...] sterowanie bezpośrednio...*” ma zbyt ogólny charakter, natomiast zamierzeniem Autora było opracowanie i zbadanie nowych rozwiązań w zakresie układów sterowania MDZ opartych na bezpośrednich strukturach regulacji. Ogólnie można stwierdzić, że założone cele szczegółowe rozprawy zostały zrealizowane.

Teza rozprawy

Autor nie formułuje tezy rozprawy, chociaż można założyć związek ewentualnej tezy z postawionym celem regulacji, jakim jest praca MDZ ze stałym w czasie momentem elektromagnetycznym i sinusoidalnym przebiegiem prądu stojana w warunkach sieci asymetrycznej. Autor proponuje pewne rozwiązania w zakresie układów sterowania MDZ, takie jak sposób wyznaczania sygnałów referencyjnych czy wykorzystanie bezpośredniego sterowania mocą lub momentem i skalarom pomocniczym, które pozwalają zrealizować postawiony cel regulacji. Istnieje zatem możliwość realizacji wymienionego wyżej celu regulacji poprzez zastosowanie proponowanych rozwiązań w układach sterowania MDZ, co Autor udowadnia przedstawiając wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

4. Przegląd stanu wiedzy, charakterystyka doboru i wykorzystania źródeł

Spis literatury obejmuje 72 pozycje, w tym 65 pozycji angielskojęzycznych. Literaturę można podzielić na kilka grup: 14 pozycji to podręczniki i monografie dotyczące maszyn i napędów elektrycznych, energoelektroniki, teorii sterowania oraz ogólnych problemów elektroenergetyki, 55 artykułów w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, 1 rozprawa doktorska, 1 autoreferat rozprawy doktorskiej oraz 1 podręcznik użytkownika. Wśród wymienionych najliczniejszą grupę stanowi 36 pozycji dotyczących problematyki sterowania maszyny dwustronnie zasilanej. Z ostatnich 5-ciu lat (od 2014 roku) w spisie literatury znajduje się 20 pozycji, więc udział aktualnych pozycji jest znaczący.

W rozdziale 1. Autor dokonał przeglądu literatury w zakresie: (a) klasyfikacji maszyn elektrycznych oraz źródeł energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym, (b) wymagań dotyczących pracy odnawialnych źródeł energii, (c) wpływu zakłóceń napięcia sieci na pracę maszyny dwustronnie zasilanej oraz (d) sterowania pracą generatorową MDZ w warunkach występowania zakłóceń.

W konkluzji należy stwierdzić, że zaproponowane badania wpisują się w trend badań związanych z zastosowaniem odnawialnych źródeł energii do wytwarzania energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym. Analiza źródłowa jest przeprowadzona poprawnie.

5. Oryginalność rozwiązania zagadnienia naukowego

Oryginalnym wkładem deklarowanym przez Autora jest (cytuje):

- „Opracowanie sposobu wyznaczania modułu strumienia wirnika dla metody DTC z regulatorami histerezyowymi dla zachowania stałości momentu i sinusoidalnych prądów stojana,
- Opracowanie bezpośredniego algorytmu sterownia momentem i skalarem pomocniczym w wersji z regulatorami histerezyowymi,
- Opracowanie i implementacja na laboratoryjnym stanowisku badawczym bezpośredniego algorytmu sterowania momentem i skalarem pomocniczym w wersji z regulatorami liniowymi w przypadku sieci symetrycznej jak i asymetrycznej, zapewniająca pracę ze stałym momentem elektromagnetycznym jak i sinusoidalnym prądem stojana,
- Implementacja algorytmu bezpośredniej kontroli mocy w przypadku sieci symetrycznej jak i asymetrycznej, zapewniająca pracę ze stałym momentem elektromagnetycznym jak i sinusoidalnym prądem stojana,
- Rozszerzenie metod bezpośredniej kontroli mocy i momentu przez uwzględnienie odsprzężeń torów regulacji i sprzężeń w przód, a także uwzględnieniem informacji o aktualnym prądzie wirnika w sygnale wyznaczania składowych mocy i momentu, w celu zapewnienia stabilności w przypadku DPCPWM oraz skrócenia stanów przejściowych w przypadku DPCPWM oraz DTXCPWM.”

Konkluzja: zaproponowane przez Autora rozwiązania w układach sterowania MDZ zawierają elementy nowości.

6. Ocena dorobku przedstawionego w rozprawie przez Autora w dyscyplinie naukowej elektrotechnika odpowiadającej dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika

Autor wykazał się znajomością zarówno podstaw teoretycznych, jak i realiów funkcjonowania odnawialnych źródeł energii w zakresie energetyki wiatrowej, a w szczególności zagadnień sterowania pracą generatorową maszyny dwustronnie zasilanej.

W rozprawie, w spisie literatury znalazły się 4 pozycje autorstwa lub współautorstwa mgr. inż. Piotra Pury, bezpośrednio związane z tematyką rozprawy. Są to artykuły:

- [24] Iwanski, Grzegorz, Piotr Pura, Tomasz Luszczuk, i Mateusz Szypulski. 2013. „Harmonics and Unbalance Compensation of The Generated Voltage in a Standalone DFIG”. W *2013 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2013*. <https://doi.org/10.1109/EVER.2013.6521627>.
- [25] Iwanski, Grzegorz, Tomasz Luszczuk, Piotr Pura, i Mateusz Szypulski. 2016. „Indirect Torque and Stator Reactive Power Control of Doubly Fed Induction Machine Connected to Unbalanced Power Network”. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 31 (3): 1202–11. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2557959>.
- [47] Pura, Piotr, i Grzegorz Iwanski. 2016. „Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator Connected to Unbalanced Grid”. *Przegląd Elektrotechniczny* 1 (5): 42–46. <https://doi.org/10.15199/48.2016.05.08>.
- [48] Pura, Piotr, i Grzegorz Iwanski. 2019. „Direct Torque Control of a Doubly Fed Induction Generator Working with Unbalanced Power Grid”. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29 (4): 1–14. <https://doi.org/10.1002/etep.2815>.

Dorobek publikacyjny Autora wykorzystany w rozprawie należy ocenić jako satysfakcjonujący.

7. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Praca dotyczy trudnego zagadnienia naukowego, wymagającego wykorzystania wiedzy w zakresie teorii sterowania i sprzętowej implementacji algorytmów sterowania.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Autor:

- przeanalizował w sposób właściwy metody sterowania pracą generatorową MDZ, przyjmując w konsekwencji uzasadnione założenia w celu rozwiązania problemu naukowego,
- rozpoznał i zaadaptował właściwe metody badawcze,
- zaprogramował procedury (badania symulacyjne, stanowisko laboratoryjne), konieczne do rozwiązania zadania badawczego,
- skomentował uzyskane wyniki.

Pozwala to stwierdzić, iż Autor posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

8. Strona redakcyjno-wydawnicza

Układ pracy jest typowy dla rozpraw doktorskich. Praca składa się z pięciu rozdziałów. W rozdziale 1. *Wstęp* przedstawiono ogólne zagadnienia związane z wytwarzaniem energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem źródeł konwencjonalnych i odnawialnych (OZE) oraz wskazano na istotną rolę, jaką odgrywa maszyna dwustronnie zasilana (MDZ) wśród OZE jako generator energii elektrycznej w siłowniach wiatrowych. Przedstawiono układ pracy MDZ przyłączonej do sieci elektrycznej oraz rozprędy mocy w zależności od zakresu prędkości MDZ. Wskazano na istotny wpływ zakłóceń napięcia sieci, w szczególności asymetrii napięć, na pracę MDZ oraz przedstawiono wymagania stawiane OZE w warunkach występowania zakłóceń. Dokonano przeglądu metod sterowania pracą generatorową MDZ w warunkach sieci symetrycznej i asymetrycznej. Sformułowano cel i zakres pracy. W rozdziale 2. *Maszyna dwustronnie zasilana współpracująca z siecią* sformułowano modele matematyczne MDZ w stacjonarnym i wirującym synchronicznie układzie odniesienia, przedstawiono analizę wpływu asymetrii napięcia stojana na napięcia indukowane w obwodzie wirnika oraz zaproponowano sposoby wyliczenia sygnałów zadanych. Dokonano przeglądu metod sterowania MDZ opartych na bezpośrednich strukturach regulacji z zastosowaniem regulatorów histerezy oraz zaprezentowano koncepcje metod sterowania MDZ opartych na bezpośrednich strukturach regulacji z zastosowaniem regulatorów liniowych. Należy zauważyć, że w jednej z tych koncepcji Autor wykorzystał zmienne modelu multiskalarnego maszyny indukcyjnej, opracowanego przez Z. Krzemińskiego, przy czym jedną z tych zmiennych określił jako komplementarny skalar momentu elektromagnetycznego. Zmienne te wiele lat wcześniej były stosowane do celów sterowania MDZ przez twórcę modelu multiskalarnego, np.: Krzemiński Z., *Control systems of doubly fed induction machine based on multiscalar model*, IFAC 11-th World Congress on Automatic Control, vol. 8, Tallin 1990, s. 225-230. W rozdziale 3. *Badania symulacyjne maszyny dużej mocy* przedstawiono wyniki badań układów sterowania MDZ opartych na metodach opisanych w rozdziale 2., natomiast w rozdziale 4. *Wyniki badań laboratoryjnych maszyny małej mocy* zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych wykonanych na stanowisku laboratoryjnym dotyczące wybranych układów sterowania MDZ opisanych w rozdziale 2., tj. układów z regulatorami liniowymi. W rozdziale 5. Autor zamieścił *Podsumowanie i wnioski* na temat prezentowanych metod i wyników badań oraz przedstawił najważniejsze osiągnięcia własne. W końcowej czę-

ści pracy znalazły się: *Bibliografia, Lista użytych skrótów i symboli, Lista rysunków oraz Lista tabel.*

Praca została zredagowana prawidłowo pod względem staranności edycyjnej i poprawności językowej. Autor nie ustrzegł się kilku drobnych błędów, które nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy.

9. Uwagi

9.1. Uwagi dyskusyjne

Autor zaprezentował w rozprawie wyniki badań symulacyjnych układów sterowania MDZ, w których założył dostępną pomiarową położenia kąowego wirnika (rys. 20) oraz wyniki badań eksperymentalnych układów sterowania MDZ wyposażonych w przetwornik położenia kąowego wirnika – enkoder (rys. 57). Rozwiązanie polegające na zastosowaniu przetwornika położenia kąowego posiada szereg wad, związanych z eksploatacją ww. przetwornika, którego funkcjonalność w trudnych warunkach otoczenia (wysokie temperatury, wibracje, zapylenie i zawilgocenie) pozostawia wiele do życzenia. Znanym z literatury już od szeregu lat, alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie struktur bezczujnikowych, w których położenie kąowe wirnika jest odtwarzane na podstawie łatwo dostępnych pomiarów wielkości elektrycznych (prądów i napięć). Szczególnie dobre właściwości układu sterowania MDZ, podobne jak w układzie z zastosowaniem przetwornika położenia kąowego, można uzyskać w przypadku zastosowania pętli synchronizacji fazy o strukturze kaskadowo-równoległej, która była prezentowana w literaturze już wiele lat temu. W charakterze wielkości regulowanej można tu wykorzystać np. położenie kąowe przestrzennego wektora prądu wirnika w układzie odniesienia związanym z przestrzennym wektorem napięcia stojana, przy czym składowe przestrzennego wektora prądu wirnika można obliczyć na podstawie składowych przestrzennego wektora prądu stojana oraz prądu biegu jałowego. Z kolei do określenia położenia kąowego układu odniesienia związanego z przestrzennym wektorem napięcia stojana można wykorzystać impulsową pętlę fazową, której struktura, podobnie jak wcześniej wymienionej, została zaprezentowana w literaturze wiele lat temu. Innym sposobem jest oszacowanie położenia kąowego wirnika na podstawie różnicy kątów fazowych mierzonego prądu wirnika i prądu wirnika obliczonego na podstawie mierzonego prądu stojana. Czy Autor rozważał zastosowanie bezczujnikowej struktury sterowania MDZ i czy potrafiłby zaproponować takie rozwiązanie w zakresie układów sterowania MDZ opartych na bezpośrednich strukturach regulacji, które analizował, a jeśli tak, to czy wykonał przynajmniej badania symulacyjne takiej struktury? Oczekuję odpowiedzi na te pytania oraz ewentualnie zaprezentowania wyników badań symulacyjnych podczas publicznej obrony.

9.2. Uwagi szczegółowe

1. W schemacie zastępczym MDZ na stronie 17 (rys. 4) powinno być ψ_r zamiast ψ_{ir} .
2. Prędkości opisywane w pracy jako "kołowe" to w rzeczywistości prędkości kąowe. Oprócz recenzowanej pracy, z powyższym błędnym sformułowaniem można się spotkać najczęściej w odniesieniu do prędkości orbitalnej, czyli prędkości (liniowej), z jaką porusza się ciało po orbicie. Innym, tym razem prawidłowym sformułowaniem jest "częstość kołowa" lub "częstość kąowa", która oznacza pulsację.
3. We wzorze (2.7) na stronie 18 nie podano warunku początkowego oraz granic całkowania.

4. Na stronie 21 Autor napisał: "poślizg dla maszyny asynchronicznej jest definiowany jako względna różnica prędkości wirowania wektorów przestrzennych napięcia stojana i wirnika odniesiona do prędkości wirowania wektora przestrzennego napięcia stojana". Ta definicja byłaby zgodna z zależnością (2.18), gdyby dodano informację, że wirujący wektor przestrzenny napięcia stojana jest odniesiony do układu nieruchomego, a wirujący wektor przestrzenny napięcia wirnika do układu współrzędnych związanego z wirnikiem. Nie jest to oczywiste, ponieważ wcześniej Autor podaje równania wektorowe stojana i wirnika maszyny asynchronicznej, przy czym oba równania są sprowadzone do jednego z dwóch układów odniesienia, odpowiednio, nieruchomego (równania 2.1. i 2.2) lub wirującego z prędkością synchroniczną (równania 2.8 i 2.9).
5. Na tej samej stronie 21 Autor podaje w postaci wzoru (2.18) definicję poślizgu maszyny asynchronicznej jako względną różnicę prędkości synchronicznej, która ściślej rzecz ujmując powinna być interpretowana jako prędkość wirowania fazona strumienia skojarzonego stojana równa prędkości wirowania pola magnetycznego w maszynie skalowana liczbą par biegunów, i prędkości, którą Autor wcześniej definiuje (wzór 2.10) jako różnicę prędkości synchronicznej i skalowanej prędkości wirowania wirnika. Po podstawieniu zależności (2.10) do (2.18) i redukcji prędkości synchronicznej otrzymuje się: $s = \frac{\omega_m}{\omega_s}$. Zdefiniowana w ten sposób wielkość znana jest jako poślizg zredukowany i ma znaczenie w analizie hamowania silnika indukcyjnego prądem stałym. Tymczasem poślizg rozumiany jako względna różnica prędkości wirowania pola magnetycznego (synchronicznej) i prędkości wirnika jest definiowany jako: $s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$.
6. Na podstawie zależności (2.19) i (2.20) można wywnioskować, że przekładnia (napięciowa, zwojowa) maszyny asynchronicznej została zdefiniowana, odpowiednio, jako stosunek napięcia stojana do napięcia wirnika lub stosunek liczby zwojów stojana do liczby zwojów wirnika. Nie jest jasne z jaką przekładnią mamy do czynienia, ponieważ Autor określa wielkość oznaczoną n_v zarówno jako przekładnia napięciowa jak i zwojowa. Te dwie przekładnie nie są sobie równe, ponieważ przekładnia zwojowa jest równa stosunkowi napięć indukowanych w uzwojeniach stojana i nieruchomego wirnika, natomiast przekładnia napięciowa jest równa stosunkowi napięć na zaciskach stojana i pierścieniach ślizgowych nieruchomego wirnika. Przytoczonym wcześniej definicjom przekładni nie odpowiadają kolejne zależności (2.21) i (2.22) oraz schemat na następnej stronie (rys. 6). Ponadto jeśli na tym schemacie uwzględniono przekształcenie parametryczne (polegające na mnożeniu lub dzieleniu wielkości elektrycznych wirnika przez przekładnię lub jej kwadrat), to nie powinna się tam znaleźć wcześniej zdefiniowana przekładnia n_v , ponieważ po sprowadzeniu wielkości naturalnych wirnika na stronę stojana i zdefiniowaniu w ten sposób nowych wielkości obliczeniowych E_r , I_r , U_r , R_r i $L_{\sigma r}$, dla tego schematu i wielkości sprowadzonych obowiązuje nowa przekładnia równa 1. Należy jeszcze nadmienić w nawiązaniu do uwagi 5, że występujący na tym schemacie poślizg s powinien być zdefiniowany jako względna różnica prędkości synchronicznej i prędkości wirnika.
7. W równaniu (2.25) powinno być $L_{\sigma s}$, ponieważ L_s oznacza z reguły sumę wyżej wymienionej oraz L_m .
8. W zależności (2.28) indeks górny powinien być oznaczony "n".

9. Czy "poziom asymetrii równy 50%", o którym Autor napisał na str. 23, jest zdefiniowany w taki sam sposób jak współczynnik asymetrii (2.17), czyli jako stosunek wartości skutecznych składowej przeciwnej i zgodnej, i czy jest to zgodne z rysunkiem 7?
10. Do jakiego napięcia zostały odniesione napięcia indukowane w wirniku w celu obliczenia ich wartości względnych przedstawionych na rysunkach 7 i 9?
11. Z opisu na schemacie zastępczym maszyny asynchronicznej, pokazanym na rysunku 8, wynika że $\underline{E}_s = \underline{E}_r = n_p s \underline{E}_s$, czyli $n_p = \frac{1}{s}$. Czy Autor potrafiłby uzasadnić taki związek?
12. Z porównania danych w tabeli 1 wynika, że zamieszczone tam wartości dwóch wielkości dotyczą, odpowiednio, sprowadzonej rezystancji uzwojenia wirnika i sprowadzonej indukcyjności rozproszenia uzwojenia wirnika.
13. Charakterystyki przedstawione na rysunku 16 oraz zawarte w strukturach na rysunkach 13, 17, 18 itd. nie odpowiadają regulatorom histerezowym lecz komparatorom (bez histerezy), zaś wartości H_T oraz $-H_T$ zaznaczone na jednej z tych charakterystyk określają szerokość strefy środkowej $2H_T$. Zastosowanie komparatorów bez histerezy wiąże się z minimalizacją odkształceń wielkości regulowanych lecz jednocześnie z bardzo częstymi przełączeniami tych komparatorów a w konsekwencji również tranzystorów mocy falownika. Nie jest również dobrym rozwiązaniem użycie symbolu typu dX do oznaczenia stanu na wyjściu regulatora z uwagi na skojarzenie z różniczką. Znacznie lepszym jest oznaczenie typu d_X .
14. Równania (2.70) (2.71) przedstawiają składowe wektora napięcia wirnika a nie osie jak napisał Autor.

10. Konkluzja

Tematyka recenzowanej rozprawy z dyscypliny elektrotechnika odpowiadającej dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika jest bardzo aktualna zarówno w Polsce, jak też na świecie. Główna wartość pracy, zdaniem recenzenta, polega na rozwinięciu przez Autora badań prowadzonych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w zakresie sterowania pracą generatorową maszyny dwustronnie zasilanej, stosowanej w siłowniach wiatrowych jako odnawialne źródło energii. Osiągnięciem Autora jest opracowanie i zbadanie metod sterowania pracą generatorową MDZ, pozwalających zrealizować postawiony cel regulacji w warunkach występowania zakłóceń napięcia sieci, w szczególności asymetrii.

W przekonaniu recenzenta Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych.

W tym kontekście przedstawiona rozprawa odpowiada wymaganiom, sprecyzowanym w odnośnej ustawie i rozporządzeniach wykonawczych dotyczących stopni i tytułów naukowych.

Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Piotra Pury do publicznej obrony, w trakcie której oczekuję, że Pan mgr inż. Piotr Pura ustosunkuje się do uwag dyskusyjnych.



Podpis recenzenta