

Badania symulacyjne silnika BDFM

Streszczenie: W artykule zaprezentowane są wyniki badań symulacyjnych silnika BDFM. W oparciu o model matematyczny, przy wykorzystaniu programu Matlab/Simulink zbudowano schemat blokowy silnika BDFM oraz przeprowadzono badania. Uzyskano przebiegi czasowe prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego dla pracy na biegu jałowym w trybie indukcyjnym oraz przebiegi charakterystyczne dla trybu synchronicznego w stanie jałowym i przy obciążeniu silnika momentem

Abstract: The article presents the results of simulation research of Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM). Based on a mathematical model and using Matlab/Simulink software, there was devised a flowchart for BDFM and then the research was carried out. As a result, there were obtained time courses for rotational speed and electromagnetic torque in idle operation of an machine in induction mode, as well as courses typical for synchronic mode of an machine in idle operation and under torque. (**Simulation study of brushless doubly-fed machine (BDFM)**)

Słowa kluczowe: silnik BDFM, tryb pracy indukcyjny, tryb pracy synchroniczny, moment elektromagnetyczny.

Keywords: Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM), induction mode, synchronic mode, electromagnetic torque.

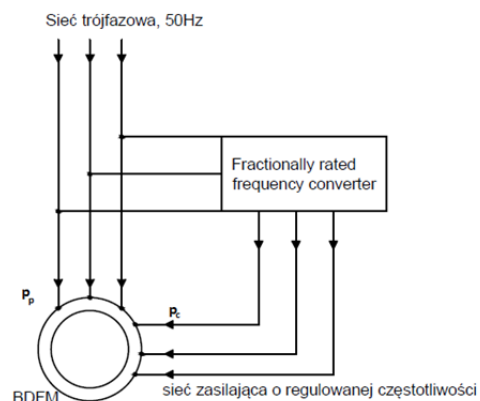
Wstęp

Początek stosowania technologii wykorzystanej w silniku BDFM datowany jest na wczesne lata XX wieku. Zanim zaczęto używać urządzeń elektronicznych do sterowania maszynami elektrycznymi, popularnym rozwiązaniem umożliwiającym sterowanie prędkością było kaskadowe połączenie dwóch pierścieniowych maszyn indukcyjnych. W roku 1907 [1] zaproponowano alternatywne rozwiązanie dla kaskadowej maszyny indukcyjnej, w którym zastosowano dwa uzwojenia stojana oraz wirnik o specjalnej konstrukcji, co pozwoliło na wyeliminowanie pierścieni ślizgowych i trzy tryby pracy w zależności od prędkości. Udowodniono, że przy odpowiednim zaprojektowaniu uzwojeń stojana i wirnika możliwe jest znaczne zredukowanie strat w miedzi. Pojedyncze uzwojenie wirnika zostało zaprojektowane tak, aby było powiązane z dwoma polami w szczelinie powietrznej i aby wymagało użycia przewodów miedzianych o mniejszym przekroju. Hunt pracował nad ulepszeniem maszyny od roku 1907 do 1914, w którym to opisał swoje osiągnięcia. Znaczny postęp w budowie silnika BDFM został osiągnięty przez Broadway'a i Burbridge'a w 1970 roku [2], na ich pracy opiera się teraźniejszy model silnika BDFM. W swoich badaniach powrócili do odkryć Hunt'a i poczynili postępy w budowie wirnika udowadniając, że obecność pierścieni prowadziła do większych strat i zmniejszonej żywotności maszyny. Dążyli do zaprojektowania wirnika klatkowego, który mógłby być wytworzony w takiej samej technologii jak wirnik silników klatkowych, i w którym nie występowałyby nadmierne straty wynikające z reaktancji rozproszenia. Największą zasługą Broadway'a i Burbridge'a było zaproponowanie modelu wirnika z „zagnieżdżonymi wiązkami prętów”, który został przyjęty i wykorzystywany w późniejszych pracach nad maszynami BDFM. Nazwa BDFM po raz pierwszy została użyta w połowie lat 80, kiedy na zlecenie Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych w Oregonie zostały wykonane dogłębne analizy prac Broadway'a i Burbridge'a. Obecnie maszyny BDFM mają zastosowanie jako generatory w turbinach wiatrowych pracujących w surowych warunkach, gdzie pożądane, a w niektórych przypadkach konieczne, jest ograniczenie wykonywania obsługi technicznej przez pracowników. Maszyny te stosuje się także w układach napędowych wielkiej mocy.

Idea silnika BDFM

Współczesny silnik BDFM to maszyna indukcyjna w jednej obudowie posiadająca na stojanie dwa zestawy uzwojeń, tworzące tak jakby dwa stojany (stąd podwójne

zasilanie). Stojany te zazwyczaj są zasilane napięciami o różnych częstotliwościach - jeden o stałej częstotliwości jest podłączony do sieci, a drugi, mający możliwość pracy przy różnej częstotliwości, zasilany pośrednio przez inwerter (rys.1).



Rys. 1 Schemat ideowy silnika BDFM

Silnik BDFM składa się z dwóch rodzajów uzwojeń trójfazowych o różnej liczbie par biegunów: uzwojenia zasilającego (Power Winding, zwane także PW) o liczbie par biegunów wynoszącej p_p oraz uzwojenia sterującego (Control Winding, zwane także CW) o liczbie par biegunów równej p_c . Zmodyfikowana konstrukcja wirnika przypomina konstrukcję wirnika klatkowego [3]. Liczba klatek wirnika jest równa sumie liczby par biegunów stojana, każda klatka składa się z 3 przewodów miedzianych (wewnętrzne, środkowe oraz zewnętrzne), zwartych przez pierścienie zwierające. Najbardziej interesującym trybem pracy jest tryb pracy synchronicznej, w którym kluczową cechą jest sprzężenie elektromagnetyczne pomiędzy uzwojeniami stojana za pośrednictwem wirnika. Uzwojenia stojana są rozmieszczone symetrycznie tak, że pomiędzy nimi celowo nie występuje zjawisko sprzężenia magnetycznego, jednak każde z nich może zostać sprzężone z wirnikiem. Prądy wirnika wytwarzają pola magnetyczne, które mogą indukować napięcia w uzwojeniach stojana – napięcie indukowane w uzwojeniu zasilającym pozwala kontrolować prądy w uzwojeniu sterującym i odwrotnie.

Tryby pracy silnika BDFM

Maszyna BDFM może pracować w dwóch trybach pracy: trybie maszyny indukcyjnej (Induction Mode, IM) oraz

w trybie pracy maszyny synchronicznej (Synchronous Mode, SM). Synchroniczny tryb pracy jest trybem najbardziej interesującym, ze względu na właściwości maszyny podczas pracy przy zmiennych prędkościach. W tabeli 1 przedstawione jest zestawienie trybów pracy realizowanych przez maszynę BDFM.

Tabela 1 Różne tryby pracy silnika BDFM w warunkach ustalonych

Tryb pracy		Uzwojenie zasilające (PW)	Uzwojenie sterujące (CW)
1	indukcyjny	częstotliwość sieciowa	rozwarne
2	indukcyjny	częstotliwość sieciowa	zwarte
3	indukcyjny	częstotliwość sieciowa	częstotliwość zmienna
4	synchroniczny	częstotliwość sieciowa	częstotliwość zmienna

Tryb 1 - uzwojenie sterujące rozwarte.

Uzwojenie zasilające wytwarza pole magnetyczne wirujące z prędkością kątową $\omega = 2\pi f_p / p_p$. Prędkość wirnika jest zbliżona do prędkości ω_p (prędkość synchroniczna), prąd indukowany w wirniku przez uzwojenie zasilające wytwarza napięcie w uzwojeniu sterującym. Uzwojenie sterujące pozostaje rozwarte, więc nie płyną w nim żadne prądy, maszyna zachowuje się jak silnik asynchroniczny zasilany z pojedynczego źródła o liczbie par biegunów równej p_p . Należy zwrócić uwagę na to, że indukcyjność wzajemna pomiędzy wirnikiem i uzwojeniem sterującym będzie działała jak indukcyjność rozproszenia. Silnik BDFM działający w tym trybie będzie charakteryzował się wyższymi wartościami tego parametru i w porównaniu do tradycyjnej maszyny asynchronicznej jego osiągi będą znacznie słabsze.

Tryb 2 - uzwojenie zasilające zwarte.

Prąd uzwojenia zasilającego jest sumą prądu indukowanego poprzez sprzężenie występujące pomiędzy PW i CW i pobieranego z sieci. Prędkość osiągnięta przez silnik w tym trybie pracy wynosi $\omega_c = -(\omega_p - (p_p + p_c) \omega_r)$. Maszyna pracująca w tym trybie zachowuje się jak maszyna asynchroniczna o liczbie par biegunów wynoszącej $p_p + p_c$.

Tryb 3 - podwójne zasilanie – tryb indukcyjny.

Zarówno uzwojenie zasilające, jak i uzwojenie sterujące wytwarzają dwa oddzielne pola magnetyczne, które wirują z prędkościami wynoszącymi odpowiednio: $\omega_p = 2\pi f_p / p_p$ i $\omega_c = 2\pi f_c / p_c$. Każde z tych pól indukuje w wirniku siły elektromotoryczne o częstotliwościach f_{rp} i f_{rc} , prąd wirnika indukuje napięcia o różnych częstotliwościach w uzwojeniach stojana. Ten typ pracy jest stanem przejściowym podczas synchronizacji silnika.

Tryb 4 - podwójne zasilanie – tryb synchroniczny.

Synchroniczny tryb pracy jest osiągnięty przez silnik, w momencie gdy częstotliwości prądów wirnika indukowanych przez pola magnetyczne pochodzące od uzwojeń stojana są sobie równe. W tym trybie oba zestawy uzwojeń zasilane są z osobnych źródeł o różnych częstotliwościach, a praca maszyny jest zależna od sprzężenia wzajemnego pomiędzy uzwojeniami stojana a uzwojeniem wirnika. Silnik BDFM jest zbudowany w sposób, który uniemożliwia wystąpienie zjawiska sprzężenia bezpośredniego pomiędzy uzwojeniami stojana; jest to osiągnięte poprzez różną liczbę biegunów uzwojeń stojana.

Model matematyczny silnika BDFM

Wychodząc od podstawowych równań opisujących silnik BDFM [3]-[8] można wyprowadzić opis matematyczny silnika w układzie współrzędnych dq . Z racji tego, że obwody wirnika są zwarte, napięcia na osiach d i q będą równe zero. Uproszczony model silnika BDFM w układzie

dq wirującym synchronicznie z prędkością wirnika przedstawia równanie macierzowe:

$$(1) \begin{bmatrix} u_{qp} \\ u_{dp} \\ u_{qc} \\ u_{dc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p + DL_{sp} & p_p \omega_r L_{sp} & 0 & 0 & DM_{pr} & p_p \omega_r M_{pr} \\ -p_p \omega_r L_{sp} & R_p + DL_{sp} & 0 & 0 & -p_p \omega_r M_{pr} & DM_{pr} \\ 0 & 0 & R_c + DL_{sc} & p_c \omega_r L_{sc} & -DM_{cr} & p_c \omega_r M_{cr} \\ 0 & 0 & -p_c \omega_r L_{sc} & R_c + DL_{sc} & p_c \omega_r M_{cr} & DM_{cr} \\ DM_{pr} & 0 & -DM_{cr} & 0 & R_r + DL_r & 0 \\ 0 & DM_{pr} & 0 & DM_{cr} & 0 & R_r + DL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qp} \\ i_{dp} \\ i_{qc} \\ i_{dc} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

gdzie R_p, L_{sp}, M_{pr} to parametry uzwojenia zasilającego takie jak: rezystancja, indukcyjność i wzajemna indukcyjność między uzwojeniem a wirnikiem R_c, L_{sc}, M_{cr} to parametry opisujące uzwojenie sterujące R_r, L_r, ω_r to rezystancja, indukcyjność i prędkość kątowa wirnika $u; i$ to wartości napięć i prądów, $D=d/dt$.

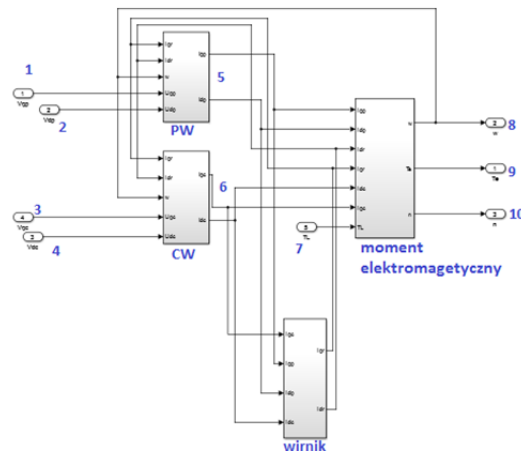
Równanie momentów silnika BDFM :

$$(2) J \frac{d(\omega_r)}{dt} = T_e - T_l - k \omega_r$$

gdzie J to moment bezwładności układu, T_e moment elektromagnetyczny, T_l moment obciążenia, k to współczynnik sztywności.

Moment elektromagnetyczny maszyny w układzie odniesienia związanym z położeniem wirnika przedstawia zależność:

$$(3) T_e = p_p M_{pr} (i_{qp} i_{dr} - i_{dp} i_{qr}) + p_c M_{cr} (i_{qc} i_{dr} + i_{dc} i_{qr})$$



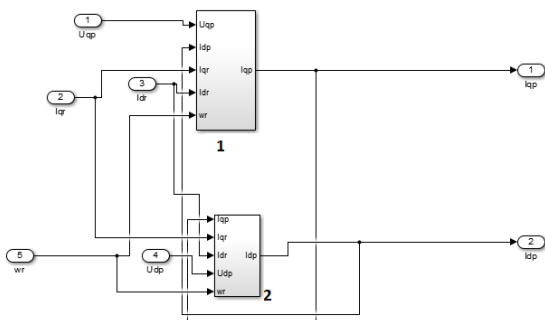
Rys.2. Schemat blokowy silnika BDFM wykonany w programie Matlab/Simulink

Model symulacyjny silnika BDFM w programie Matlab/Simulink

Model symulacyjny silnika powstał na podstawie modelu matematycznego w układzie współrzędnych dq opisanego równaniami (1), (2) i (3). Na rysunku 2 przedstawiony jest schemat blokowy silnika BDFM wykonanego w programie Matlab/Simulink. Składa się on z czterech podsystemów reprezentujących elementy silnika, powiązanych są ze sobą sygnałami wyjściowymi i wejściowymi. Model stojana składa się z dwóch podsystemów reprezentujących uzwojenia (bloki opisane PW i CW). Sygnałami wejściowymi dla tych podsystemów są napięcia zasilające ($U_{qp}, U_{dp}, U_{qc}, U_{dc}$), natomiast sygnały wyjściowe to prądy ($I_{dp}, I_{qp}, I_{dc}, I_{qc}$), które doprowadzone są do podsystemu reprezentującego wirnik. Prądy uzwojenia zasilającego, sterującego, indukowane w wirniku oraz moment obciążenia doprowadzone są do pod-

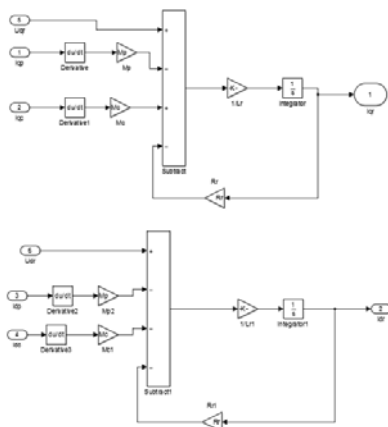
systemu oznaczonego moment elektromagnetyczny. W tym podsystemie zaimplementowano równanie momentów silnika (3).

Na rysunku 3 został przedstawiony podsystem PW. W dwóch podsystemach (oznaczonych numerami 1 i 2) realizowane są równania napięciowe uzwojenia zasilającego (wg równania macierzowego (1)).



Rys.3. Schemat połączeń w podsystemie PW

Analogicznie został wykonany model uzwojenia sterującego, zaś na rysunku 4 przedstawione zostały schematy blokowe odpowiadające równaniom napięciowym opisującym wirnik.



Rys.4. Równania napięciowe opisujące wirnik zaimplementowane w programie Matlab/Simulink

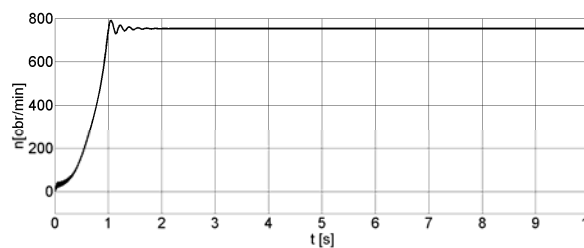
Badania symulacyjne

Korzystając z opracowanego modelu w programie Matlab/Simulink, przeprowadzono badania symulacyjne silnika o parametrach stojana: $p_p = 3$, $R_p = 1,73 \Omega$, $L_{sp} = 0,714 \text{ H}$, $M_{pr} = 0,242 \text{ H}$, $p_c = 1$, $R_c = 1,07 \Omega$, $L_{sc} = 0,121 \text{ H}$, $M_{cr} = 0,06 \text{ H}$, oraz wirnika: $R_r = 0,473 \Omega$, $L_r = 0,145 \text{ H}$, $J = 0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $k = 0$.

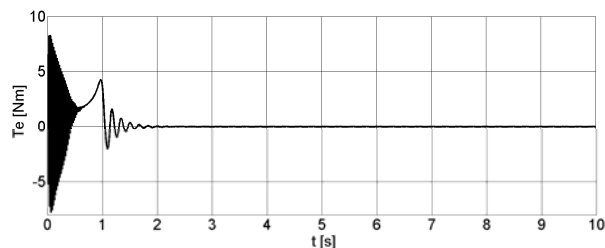
Przeprowadzono badania symulacyjne działania silnika dla dwóch trybów pracy:

- tryb indukcyjny – uzwojenie zasilające maszyny zasilane napięciem międzyfazowym 400 V o częstotliwości 50 Hz, uzwojenie sterujące zwarte.
- tryb synchroniczny – podwójne zasilanie BDFM, uzwojenie zasilające maszyny zasilane napięciem międzyfazowym 400 V o częstotliwości 50 Hz, uzwojenie sterujące podłączone do zewnętrznego źródła o regulowanej częstotliwości.

W trybie indukcyjnym zbadano pracę silnika bez obciążenia. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przebieg czasowy prędkości obrotowej oraz momentu elektromagnetycznego silnika. Zarówno krzywa prędkości jak i momentu są bardzo zbliżone do uzyskiwanych w konwencjonalnym silniku indukcyjnym.

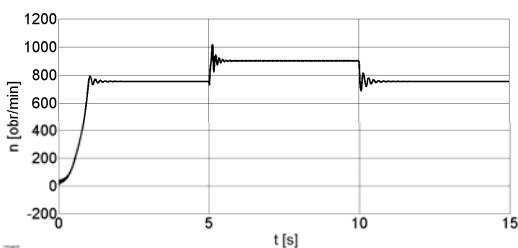


Rys.5. Prędkość obrotowa silnika BDFM w indukcyjnym trybie pracy

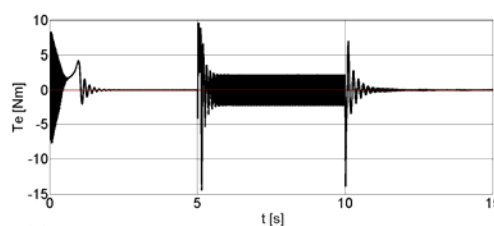


Rys.6. Moment elektromagnetyczny silnika BDFM w indukcyjnym trybie pracy

W przypadku trybu synchronicznego przeanalizowano zdolność sterowania silnikiem podczas zasilania uzwojenia sterującego zewnętrznym źródłem, z uwzględnieniem zależności $U_c / f_c = const$. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono zmiany przebiegu prędkości oraz momentu elektromagnetycznego silnika na biegu jałowym. Po 5 sekundach następuje załączenie zasilania uzwojenia sterującego, które uprzednio było zwarte. Uzwojenie sterujące zostaje zasilone napięciem o częstotliwości 10 Hz, a po upływie kolejnych 5 sekund uzwojenie to ponownie zostaje zwarte. Silnik w momentach zasilania uzwojenia sterującego osiąga prędkość nadsynchroniczną. Jest to związane z dodatnim znakiem częstotliwości zasilającej uzwojenie sterujące – w takim przypadku strumień magnetyczny wiruje zgodnie ze strumieniem pochodzącym od uzwojenia zasilającego.



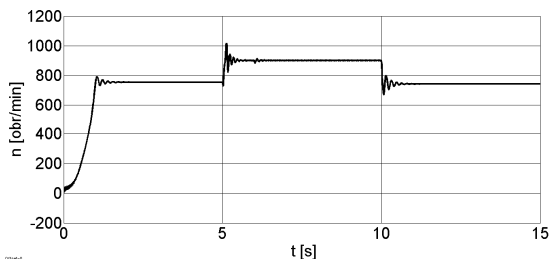
Rys.7. Przebieg prędkości obrotowej silnika BDFM podczas synchronicznego trybu pracy bez obciążenia



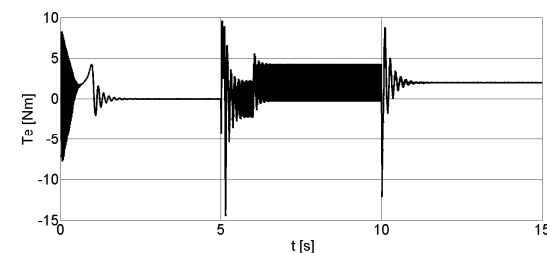
Rys.8. Przebieg momentu elektromagnetycznego silnika BDFM podczas synchronicznego trybu pracy bez obciążenia

Oscylacje, jakie można zaobserwować po załączeniu zasilania uzwojenia sterującego są związane z przejściem uzwojenia ze stanu zwarcia.

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przebieg prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego przy skokowej zmianie momentu obciążenia o 2 Nm podczas pracy synchronicznej, nadsynchronicznej, a także w momencie zmian napięcia zasilającego uzwojenie sterujące.



Rys.9. Przebieg prędkości obrotowej silnika BDFM przy zmianie obciążenia do 2 Nm w trybie pracy synchronicznej



Rys.10. Przebieg momentu obciążenia (kolor czerwony) oraz momentu elektromagnetycznego (kolor niebieski) silnika BDFM podczas synchronicznego trybu pracy

W pierwszym etapie silnik BDFM wszedł w tryb pracy synchronicznej, osiągając prędkość 78,8 rad/s. Po 5 sekundach uzwojenie sterujące zostało podłączone do zasilania, silnik pracował przy prędkości nadsynchronicznej, w trakcie przejścia pomiędzy dwoma stanami CW, wartość średnia momentu elektromagnetycznego maszyny nie zmieniła się. W 6 sekundzie silnik BDFM został obciążony momentem równym 2 Nm. Podobnie jak w przypadku maszyn synchronicznych, prędkość silnika nie uległa zmianie. W tym trybie pracy prędkość silnika zależna jest wyłącznie od częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie sterujące. W 10 sekundzie można zaobserwować reakcję silnika na

utrata zasilania uzwojenia sterującego, w momencie kiedy zostaje ono zwarte. Nagła zmiana nie spowodowała wejścia w stan awaryjny. Silnik zaczął pracować przy pojedynczym źródle zasilania i jest gotowy do synchronizacji.

Podsumowanie

Silnik BDFM to urządzenie o wielu zmiennych, w którym występują silne sprzężenia pomiędzy złożonymi elementami tworzącymi maszynę. W związku z tym stosowanie powszechnie znanych metod sterowania, takich jak metoda wektorowego sterowania silnika z orientacją wektora pola, bezpośrednie sterowanie momentem czy sterowanie napięciowe nie dają całkowitej kontroli nad maszyną. Konieczne jest opracowanie nowych metod kontroli bazujących na nietypowej budowie silnika BDFM oraz na jego właściwościach elektromagnetycznych.

Autorzy: mgr inż. Klaudia Kuczek, kuczek.kl@gmail.com; dr inż. Danuta Pliś, dplis@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2

LITERATURA

- [1] L. Hunt, *A new type of induction motor*, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 39, 1907
- [2] A. Broadway i L. Burbridge, *Self-cascaded machine: a low-speed motor or high frequency brushless alternator*, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 117, 1970.
- [3] R. Li, A. Wallace i R. Spee, *Two-axis model development of cage-rotor brushless double-fed machines*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991.
- [4] P. Roberts, R. McMahon, P. Tavner, J. Maciejowski i T. Flack, *Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification*, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2005.
- [5] O. Anaya-Lar, N. Jenkins, J. Ekanayke, P. Cartwright i M. Hughes, *Wind energy generation, modelling and control*, *John Wiley & Sons*, 2011
- [6] U. Shipurkar, *Brushless Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine Drivetrain under grid fault conditions*, *Delft University of Technology*, 2014.
- [7] E. Vilmarsson, *Control Algorithm for a BDFIG based wind Turbine Drivetrain including Rotor Position Estimation*, *Master of Science thesis, Delft University of Technology*, 2014
- [8] B. Li i S. Liu, *Study on Direct Torque Control Strategy of Brushless Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Generation*, *Journal of Computational Information System*, 2014.