

Symulator turbiny wiatrowej na bazie silnika prądu stałego

Streszczenie. W artykule opisano układ symulatora turbiny wiatrowej, do budowy którego wykorzystano silnik prądu stałego. Silnik ten jest sprzężony mechanicznie z maszyną asynchroniczną dwustronnie zasilaną (MDZ) i służy do badania układów sterowania MDZ w zastosowaniach generacyjnych. Układ zasilania silnika DC sterowany jest mikroprocesorowo i zapewnia generację momentu w zależności od prędkości silnika oraz dodatkowego parametru, jakim jest zadana prędkość wiatru. Charakterystyka symulatora odpowiada charakterystyce przykładowej turbiny wiatrowej. W artykule omówiono schemat układu połączeń i przybliżono ideę sterowania. Pokazano też wyniki badań laboratoryjnych układu.

Abstract. This paper describes the simulation system of the wind turbine, based on a DC motor. System composed of a doubly fed induction machine mechanically coupled with a DC machine is used to develop and test power control systems based on a wind turbine. Power electronics converter supplying DC motor is controlled by a microprocessor and provides generation of the torque depending on the speed of the machine and an additional parameter, which is the reference wind speed. Simulator characteristics correspond to the exemplary characteristics of the wind turbine. The article discusses the connection diagram and presents the idea of the control system. It also shows the results of laboratory tests. **(Simulation System of the Wind Turbine, based on a DC Motor).**

Słowa kluczowe: elektrownia wiatrowa, wiatrak, maszyna dwustronnie zasilana, MDZ, sterowanie wymuszające dynamikę

Keywords: wind power plant, simulator, doubly fed induction machine, DFIG, forced dynamics control

doi:10.12915/pe.2014.06.10

Wstęp

W obecnych czasach problematyka odnawialnych źródeł energii jest tematem licznych opracowań. W przypadku elektrowni wiatrowych, do pozyskiwania energii coraz częściej wykorzystuje się silnik pierścieniowy, który poprzez przekształtniki energoelektroniczne i transformator współpracuje z siecią zasilającą. Układ taki zwany jest maszyną asynchroniczną dwustronnie zasilaną (MDZ) i zapewnia możliwość pracy elektrowni przy niewielkich (rzędu 30%) zmianach prędkości obrotowej. Niewątpliwą zaletą MDZ jest konieczność zmiernowania prędkości na moc mniejszą niż moc znamionowa maszyny.

Do przeprowadzenia badań laboratoryjnych generatora opartego na MDZ konieczne jest posiadanie układu, który wytworzy moment na wale maszyny pierścieniowej zgodny z charakterystyką turbiny wiatrowej. Najwygodniej jest zrealizować to zadanie przy użyciu odpowiednio sterowanego silnika elektrycznego. Układ zasilania silnika powinien zapewniać możliwość regulacji momentu na wale przy zmiennej prędkości obrotowej, przy czym zmiana kierunku wirowania wału nie jest konieczna. Do tego celu nadaje się np. silnik obcowzbudny prądu stałego zasilany z przekształtnika tranzystorowego.

Turbina wiatrowa jest elementem o nieliniowej charakterystyce, wiążącej moc turbiny z jej prędkością obrotową i prędkością wiatru, którą opisuje zależność [1]:

$$(1) \quad P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} V_w^3,$$

gdzie:

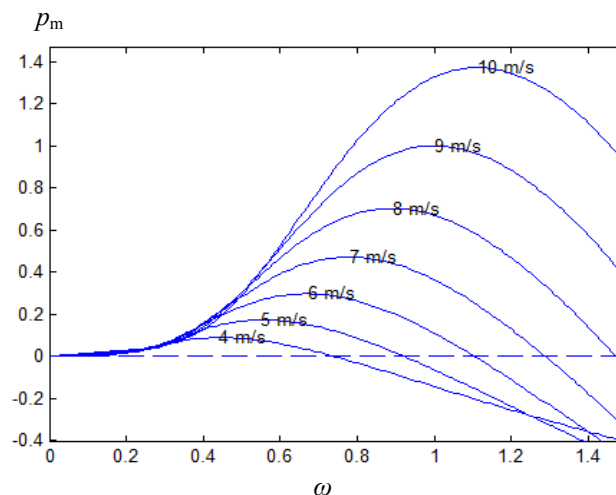
P_m - moc mechaniczna turbiny wiatrowej,
 ρ - gęstość powietrza,
 A - pole powierzchni przenikanej przez wiatr,
 V_w - prędkość wiatru,
 C_p - współczynnik mocy, będący funkcją kąta nachylenia łopaty turbiny β oraz współczynnika

szybkości λ , definiowanego jako:

$$(2) \quad \lambda = \frac{U}{V_w} = \frac{\omega R}{V_w},$$

gdzie: U - prędkość liniowa końca łopaty,
 ω - prędkość kątowna wirnika turbiny,
 R - promień wirnika (\approx długość łopaty).

Przykładowe charakterystyki turbiny wiatrowej w wartościach względnych dla różnych wartości prędkości wiatru zostały przedstawione na rysunku 1 [10].

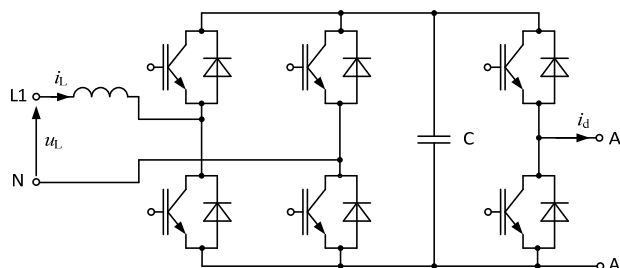


Rys.1. Rodzina charakterystyk turbiny wiatrowej

Schemat układu

Schemat układu zasilania silnika obcowzbudnego, pracującego w układzie symulatora turbiny wiatrowej, przedstawiono na rysunku 2.

Do budowy przekształtnika wykorzystano mostek tranzystorowy o topologii trójfazowego falownika napięcia. Zasada działania układu polega na wykorzystaniu jednej z gałęzi falownika do zasilania silnika obcowzbudnego, a dwóch pozostałych do współpracy z siecią zasilającą napięcia przemiennego. Taki sposób połączeń można



Rys.2. Schemat układu zasilania silnika obcowzbudnego

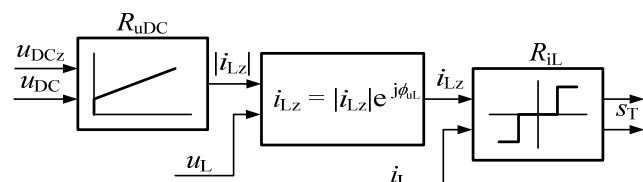
rozpatrywać jako dwa osobne przekształtniki – silnikowy oraz sieciowy. Przekształtnik silnikowy sterowany jest sygnałem PWM i wytwarza pożądaną wartość średnią napięcia na zaciskach silnika. Jego topologia umożliwia dwukierunkowy przepływ prądu przez silnik, a zatem możliwa jest rewersja momentu przy niezmienniej polaryzacji napięcia zasilającego silnik. Do podłączenia silnika prądu stałego konieczne jest wyprowadzenie ujemnego zacisku obwodu DC. Przekształtnik sieciowy zapewnia dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy obwodem napięcia stałego (kondensatorem) a siecią zasilającą przy zachowaniu quasi-sinusoidalnego kształtu prądu. Do jego poprawnej pracy konieczne było zastosowanie dławika sieciowego. W przypadku wykorzystania układu w charakterze symulatora turbiny wiatrowej praca układu ogranicza się do stanu napędowego (brak zwrotu energii do sieci).

Układ sterowania

Układ sterowania obu logicznych przekształtników został zrealizowany na bazie mikrokontrolera Texas Instruments o oznaczeniu TMS320F2812 i opiera się na pomiarze prądu i napięcia sieci, napięcia obwodu DC oraz prądu silnika obcowzbudnego.

Algorytm sterowania przekształtnikiem sieciowym

Zadaniem układu sterowania przekształtnikiem sieciowym jest stabilizacja napięcia w obwodzie DC przekształtnika oraz kontrola kształtu prądu sieciowego i jego przesunięcia względem napięcia. Najkorzystniejsza praca występuje przy prądzie quasi-sinusoidalnym, będącym w fazie z napięciem (bez poboru mocy biernej z sieci) i taki sposób sterowania zastosowano. Regulator R_{uDC} typu PI (rys.3) napięcia obwodu pośredniczącego (o ograniczonej dynamice wynikającej z naturalnych tętnień napięcia występujących w jednofazowych prostownikach PWM) generuje zadaną wartość amplitudy prądu sieci $|i_{Lz}|$. Wartość chwilowa prądu sieci jest określana w oparciu o zadaną wartość amplitudy prądu i mierzoną wartość chwilową napięcia sieci. Do realizacji zadanej chwilowej wartości prądu sieci zastosowano komparatorowy regulator prądu.

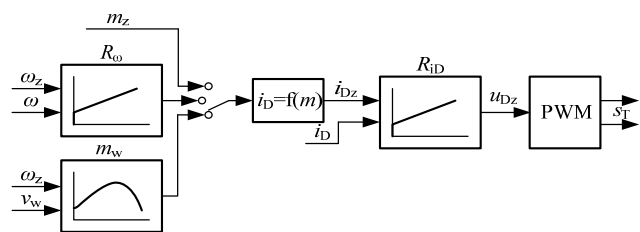


Rys.3. Schemat sterowania przekształtnikiem sieciowym

Algorytm sterowania przekształtnikiem silnikowym

Przekształtnik silnikowy realizuje generację napięcia średniego na zaciskach silnika metodą PWM. Ze względu na stosunkowo wysoką częstotliwość przełączeń zaworów, nie jest konieczne stosowanie dodatkowych dławików wygładzających w obwodzie DC. Z uwagi na uciążliwy hałas zdecydowano się na zastosowanie modulacji stochastycznej, polegającej na losowej zmianie (w niewielkich granicach) częstotliwości przełączeń układu PWM. W sterowniku istnieje możliwość wyboru trybu pracy ze stabilizacją prądu silnika (momentu), napięcia (prędkości obrotowej) oraz symulowania charakterystyki turbiny wiatrowej, którą można przedstawić w jednostkach względnych na podstawie (1):

$$(3) \quad p_m = k_p c_p(\lambda) v_w^3.$$

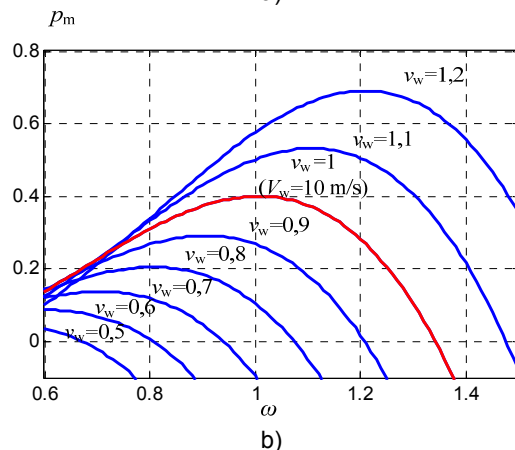
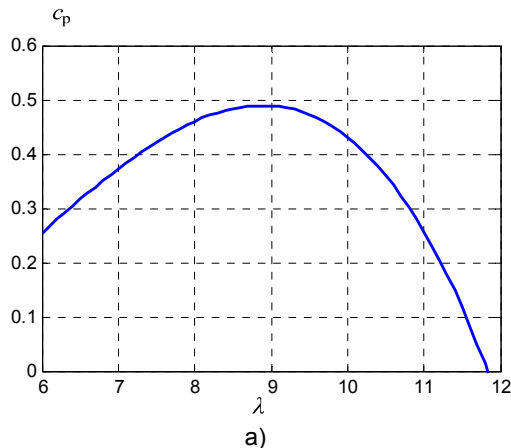


Rys.4. Schemat sterowania przekształtnikiem silnikowym

Wartość współczynnika k_p dobrano w taki sposób, aby przy prędkości wiatru i prędkości wirowania turbiny równych 1 w jednostkach względnych moc mechaniczna była równa 0,4. Przyjęto kąt nachylenia łopaty $\beta=0$ i funkcję $c_p(\lambda)$ aproksymowano wielomianem czwartego stopnia:

$$(4) \quad c_p(\lambda) = c_0 + c_1\lambda + c_2\lambda^2 + c_3\lambda^3 + c_4\lambda^4.$$

Wartości współczynników wielomianu dobrano w taki sposób, aby uzyskać kształt typowej charakterystyki turbiny wiatrowej. Wynoszą one: $c_0 = 0,39272061$, $c_1 = -0,32078486$, $c_2 = 0,07385674$, $c_3 = -0,00387074$, $c_4 = -0,00002671$. Na rysunku 5.a przedstawiono zależność współczynnika mocy c_p w funkcji współczynnika szybkobieżności λ , a na rysunku 5.b wykreślono rodzinę charakterystyk turbiny na podstawie zależności (3) i (4).



Rys.5. Charakterystyka współczynnika mocy (a) oraz rodzina charakterystyk mocy (b) przykładowej turbiny wiatrowej

Charakterystyka turbiny parametryzowana jest poprzez prędkość wiatru, którą można zadawać za pomocą potencjometru. W zależności od wartości prędkości wiatru oraz prędkości obrotowej obliczana jest wartość momentu, a na jej podstawie - wartość prądu, który jest następnie wymuszany w silniku. Prędkość obrotowa silnika mierzona

jest przy użyciu enkodera inkrementalnego przez sterownik MDZ i przesyłana za pomocą łącza szeregowego do sterownika realizującego algorytm symulatora turbiny.

Wyniki badań laboratoryjnych

Badania wykonano na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego, sprzężonym mechanicznie z silnikiem asynchronicznym pierścieniowym, pracującym w układzie maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej (MDZ). Na rysunku 6 przedstawiono schemat badanego układu, a w tabeli 1 zestawiono parametry maszyn. Sterownik MDZ realizuje algorytm sterowania wymuszającego dynamikę (FDC - *Forced Dynamics Control*). Jest to nowa metoda sterowania układami napędowymi z silnikami prądu przemiennego – synchronicznymi [2] i asynchronicznymi [3,6], wyróżniająca się możliwością bezpośredniego określania charakteru stanów przejściowych. Opracowano również wersję metody do sterowania prędkością i mocą bierną adaptacyjną asynchronicznej dwustronnie zasilanej [4,5,8] Adaptacja metody FDC do zastosowań generatorowych została opisana w [7]. Możliwe jest wówczas traktowanie układu MDZ jako obiektu o znanej odpowiedzi na skokową zmianę wartości zadanej mocy czynnej i biernej. Do opisu mocy wykorzystano teorię Akagięgo:

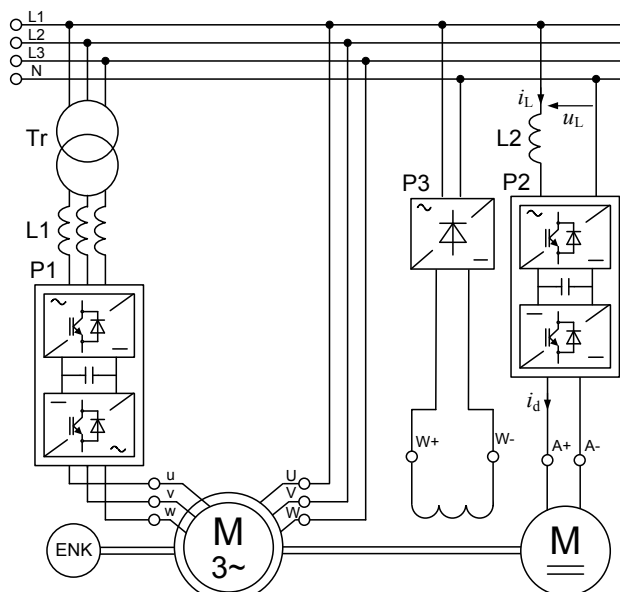
$$(5) \quad p = u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta},$$

$$(6) \quad q = u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta},$$

gdzie u_{α} , u_{β} , i_{α} , i_{β} to składowe wektorów przestrzennych napięć i prądów silnika w układzie współrzędnych związanych z stojanem.

Wyniki badań przekształtnika zasilającego maszynę DC zamieszczono w [9]. Na rysunku 7 zilustrowano dwie podstawowe zalety stosowania proponowanej struktury przekształtnika. Pierwszą jest duża dynamika zmian prądu twornika i_d – zmiana jego wartości z 15 A do -15 A trwa około 2,5 ms.

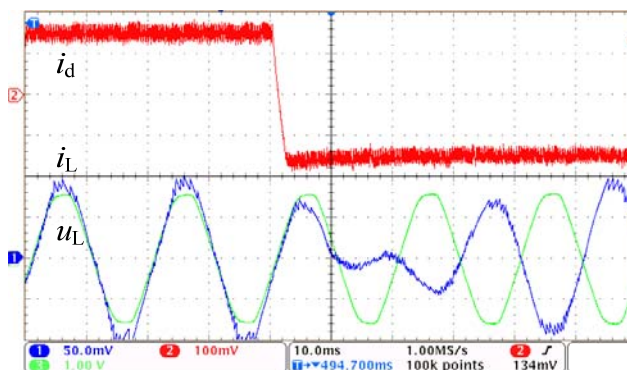
Drugą zaletą jest niskie negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą – prąd pobierany i_L ma kształt quasi-sinusoidalny, jest w fazie z napięciem u_L , a podczas pracy hamulcowej możliwy jest odzysk energii.



Rys.6. Schemat stanowiska laboratoryjnego

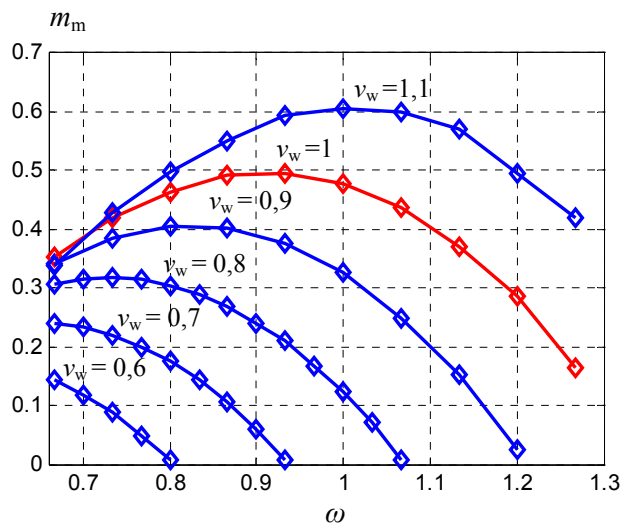
Tabela 1. Parametry znamionowe maszyn w badanym układzie

Maszyna AC	
Moc	$P_N = 3 \text{ kW}$
Prędkość	$n_N = 1390 \text{ obr./min.}$
Napięcie stojana	$U_{1N} = 3 \times 400 \text{ V}$
Prąd stojana	$I_{1N} = 6,5 \text{ A}$
Napięcie wirnika	$U_{2N} = 3 \times 120 \text{ V}$
Prąd wirnika	$I_{2N} = 18 \text{ A}$
Współczynnik mocy	$\cos\phi_N = 0,82$
Maszyna DC	
Moc	$P_N = 4,6 \text{ kW}$
Prędkość	$n_N = 2935 \text{ obr./min.}$
Napięcie twornika	$U_{dN} = 220 \text{ V}$
Prąd twornika	$I_{dN} = 23,5 \text{ A}$



Rys.7. Prąd twornika maszyny DC, napięcie i prąd przekształtnika sieciowego DC podczas skokowej zmiany momentu zadanej maszyny DC

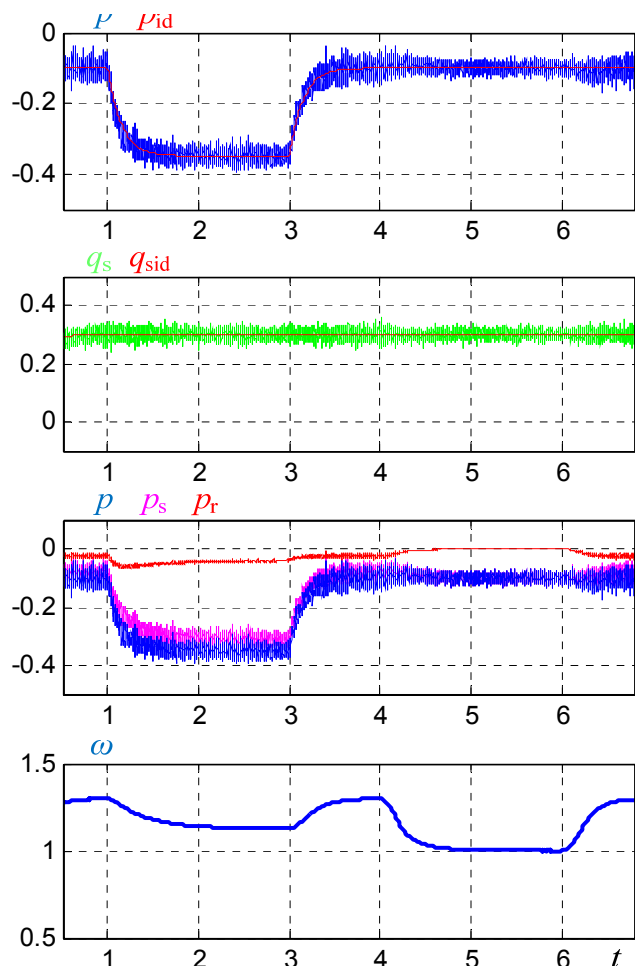
Na rysunku 8 zamieszczono wyznaczone pomiarowo charakterystyki momentu na wale symulatora turbiny wiatrowej m_m (silnika obcowzbudnego) w funkcji prędkości turbiny dla kilku wartości prędkości wiatru. Duża podatność na zmiany prędkości maszyny i wiatru (nachylenie charakterystyki na prawo od punktu maksymalnego) pozwala na badanie układu sterowania w szerokim zakresie zmian prędkości wiatru i turbiny.



Rys.8. Moment elektromagnetyczny zrealizowanego symulatora turbiny wiatrowej

W celu zaprezentowania działania symulatora turbiny wiatrowej przedstawiono wyniki badań układu laboratoryjnego dla dwóch przypadków. W pierwszym prędkość wiatru utrzymywana jest na stałym poziomie, a zmienia się wartość zadana całkowitej mocy czynnej

oddawanej do sieci. W drugim stała jest wartość zadana mocy czynnej, a zmienia się prędkość wiatru. Rysunek 9 przedstawia wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych z użyciem programu MATLAB - Simulink. Użyty model nie uwzględniał maszyny DC symulującej turbinę wiatrową, moment na wale zadano w postaci funkcji wyznaczonej z zależności na moc mechaniczną (3)-(4), przedstawionej na rysunku 5. Maszyna dwustronnie zasilana sterowana była wg metody FDC w trybie I rzędu. Oznacza to, że zmiana mocy następuje z inercją, odpowiadającą przyjętej stałej czasowej 150 ms. Przedstawiono oba badane cykle pracy: od $t = 0$ s do $t = 3,5$ s występują skokowe zmiany mocy czynnej zadanej o wartościach $0,1 \rightarrow 0,35 \rightarrow 0,1$ w jednostkach względnych, przy prędkości wiatru równej 10 m/s i mocy biernej równej 0,3, natomiast od $t = 3,5$ s do $t = 7$ s następują zmiany prędkości wiatru w zakresie 10 m/s \rightarrow 8 m/s \rightarrow 10 m/s przy stałej wartości zadanej mocy czynnej (0,1) i mocy biernej (0,3). Kolejne przebiegi czasowe prezentują całkowitą moc czynną: rzeczywistą p i idealną p_{id} , moc bierną obwodu stojana: rzeczywistą q i idealną q_{id} . Ujemne wartości mocy oznaczają moc oddawaną do sieci. Ponieważ maszyna pracowała z prędkością ω większą od synchronicznej, moc czynna oddawana do sieci p jest sumą mocy czynnych obwodów stojana p_s i wirnika p_r .

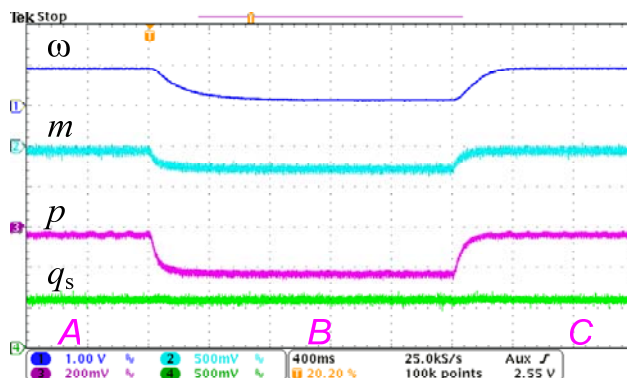


Rys.9. Wyniki badań symulacyjnych – odpowiedź MDZ na skokowe zmiany wartości zadanych: mocy czynnej i prędkości wiatru

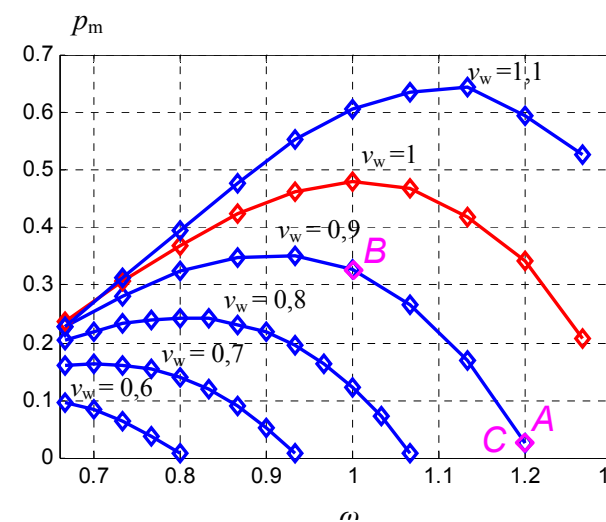
Cykl zmian wartości zadanej mocy czynnej, lecz przy zmienionych wartościach (przyjęto $0,022 \rightarrow 0,22 \rightarrow 0,022$) przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, z użyciem opisywanego symulatora turbiny wiatrowej. Wybrany zakres zmian mocy czynnej wynika z możliwych do uzyskania wartości dla prędkości wiatru przyjętej na poziomie 9 m/s.

Na rysunku przedstawiono zarejestrowane przebiegi prędkości wirowania wału ω , momentu elektromagnetycznego MDZ m , całkowitej mocy czynnej p oraz mocy biernej obwodu stojana q_s .

Rysunek 11 ilustruje przemieszczanie się punktu pracy na charakterystyce zewnętrznej (moc mechaniczna w funkcji prędkości wirowania wału) turbiny. Zwiększenie wartości zadanej obciążenia powoduje obniżenie prędkości wirowania i zbliżenie się do punktu maksymalnej mocy. Różnice wartości mocy mechanicznej i oddawanej mocy czynnej wynikają z występujących w układzie strat.

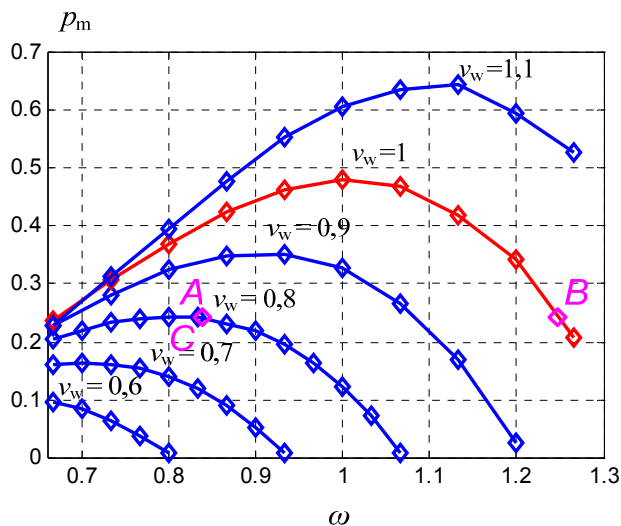


Rys.10. Odpowiedź MDZ na skokowe zmiany wartości zadanych: mocy czynnej

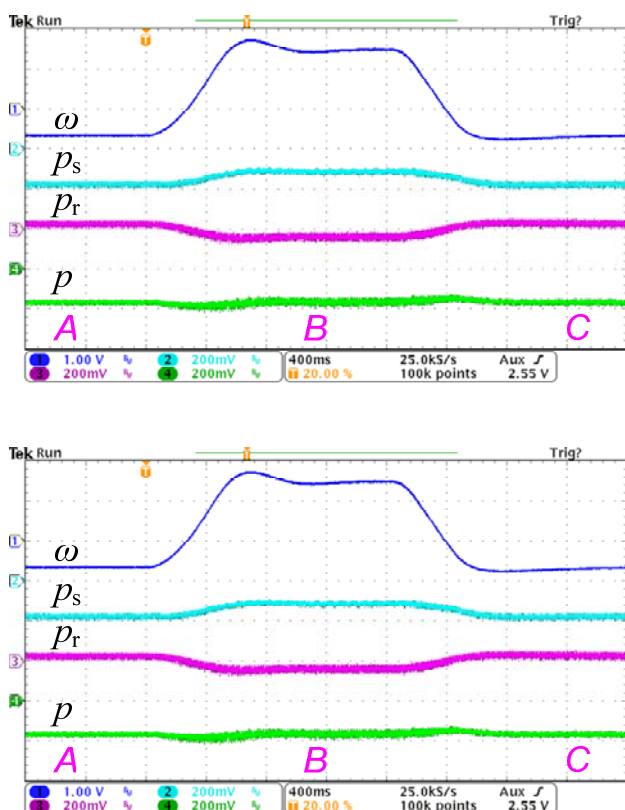


Rys.11. Położenie ustalonych punktów pracy na charakterystyce zrealizowanego symulatora podczas zmian wartości zadanej mocy czynnej przy stałej prędkości wiatru

Drugim przebadanym laboratoryjnie przypadkiem była reakcja na skokową zmianę prędkości wiatru. Wyniki zarejestrowane przy zadanej mocy czynnej o wartości $p=0,155$, i zmianach prędkości wiatru w cyklu 8m/s \rightarrow 10m/s \rightarrow 8m/s przedstawiono na rysunku 13. Zawierają one przebiegi czasowe prędkości ω , momentu elektromagnetycznego MDZ m , całkowitej mocy czynnej p z wyszczególnieniem mocy obwodu stojana p_s i wirnika p_r oraz mocy biernej obwodu stojana q_s . Z charakterystyk mocy badanej turbiny (rys.12) wynika, że dla mniejszej prędkości wiatru układ pracował blisko punktu mocy maksymalnej. Zwiększenie prędkości wiatru przy stałej wartości zadanej mocy generowanej prowadziło do zwiększenia prędkości obrotowej maszyny i przejście z pracy podsynchronicznej do nadsynchronicznej. Zmiany wartości mocy czynnej i biernej w stanach przejściowych spowodowane są traktowaniem jako wielkość sterowaną wartości mocy czynnej i biernej



Rys.12. Położenie ustalonych punktów pracy na charakterystyce zrealizowanego symulatora podczas zmian prędkości wiatru przy stałej wartości zadanej mocy czynnej



Rys.13. Odpowiedź MDZ na zmiany prędkości wiatru

w stanach przejściowych spowodowane są traktowaniem jako wielkość sterowaną całej mocy czynnej oddawanej do sieci. Ponieważ zmiana prędkości maszyny powoduje zmianę mocy czynnej obwodu wirnika p_r (rys.5a), moc

czynna oddawana przez obwód stojana p_s musi zostać skorygowana, co odbywa się z pewnym opóźnieniem.

Porównując wyniki laboratoryjne z symulacyjnymi można potwierdzić poprawne zachowanie maszynowego symulatora turbiny wiatrowej.

Podsumowanie

W artykule opisano układ symulatora turbiny wiatrowej, opartego na silniku prądu stałego zasilanym z przekształtnika tranzystorowego. Urządzenie zapewnia moment na wale badanej maszyny, będący funkcją prędkości obrotowej oraz zadanej prędkości wiatru. Symulator turbiny wiatrowej przetestowano przy współpracy z maszyną dwustronnie zasilaną, pracującą w pętli regulacji mocy czynnej i sterowaną wg metody FDC. Wyniki potwierdzają poprawność działania układu oraz przydatność do realizacji postawionego zadania.

Tematem dalszych badań będzie rozbudowa układu o możliwość symulowania momentu bezwładności turbiny.

LITERATURA

- [1] Lubośny Z., *Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (2006)
- [2] Dodds S.J., Vittek J., *Forced dynamics control of electric drives*, EDIS-Zilina University publisher (2003)
- [3] Vittek J., Altus J., Buday J., Rapsik M.: Indirect vector control of electric drives employing induction motor with forced dynamics, *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (2003), 107-112.
- [4] Jarek G.: Sterowanie wymuszające dynamikę prędkości i mocy biernej maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej, *Przegląd Elektrotechniczny* (2010), nr 2, 201-205
- [5] Gierlotka K., Jeleń M., Jarek G.: Sterowanie polowo zorientowane z wymuszeniem dynamiki maszyny dwustronnie zasilanej, *Przegląd Elektrotechniczny* (2010), nr 2, 164-168
- [6] Jarek G., Jeleń M., Gierlotka K., *Direct Torque Control-Based Forced Dynamics Control of Induction Motors*, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (2011), 568-572
- [7] Jarek G., Gierlotka K., *Bezczujnikowe sterowanie wymuszające dynamikę generatora dwustronnie zasilanego*, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 78 (2010), nr 12, 28-33
- [8] Jarek G., *Sterowanie wymuszające dynamikę maszyny asynchronicznej dwustronnie zasilanej, rozprawa doktorska*, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny (2012)
- [9] Jeleń M., Jarek G., Michalak J., Gierlotka K., *Przystosowanie trójfazowego przemiennika częstotliwości do zasilania silnika prądu stałego z sieci AC*, *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej*, 1/2012, Gliwice, 57-64
- [10] Wind Turbine (SimPowerSystems), *Matlab Help*

Autorzy: dr inż. Grzegorz Jarek, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Grzegorz.Jarek@polsl.pl;
 dr inż. Michał Jeleń, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Michal.Jelen@polsl.pl;
 dr hab. inż. Kazimierz Gierlotka, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Kazimierz.Gierlotka@polsl.pl