

Stanowisko laboratoryjne z generatorem klatkowym do emulacji turbiny wiatrowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono stanowisko laboratoryjne będące emulatorem turbiny wiatrowej. Emulator umożliwia odtwarzanie momentu mechanicznego wytwarzanego przez turbinę wiatrową dla określonej prędkości wiatru i prędkości obrotowej i napędzanie generatora elektrycznego w sposób analogiczny do turbiny wiatrowej. Zapewnienie powtarzalnych warunków testowych pozwala na porównywanie różnych algorytmów sterowania turbiną. W przedstawionym rozwiązaniu moment turbiny jest wytwarzany przez napęd AC z silnikiem klatkowym sprzęgniętym z generatorem klatkowym na wspólnym wale. Przebiegiem częstotliwości sterujący napędem emulatora pracuje w trybie sterowania momentem. Sygnał zadany dla przemiennika, proporcjonalny do emulowanego chwilowego momentu turbiny, jest obliczany jako wyjście z modelu matematycznego turbiny symulowanego w czasie rzeczywistym w środowisku Matlab-Simulink na komputerze PC. Przedstawiono wyniki eksperymentów zarejestrowane dla znormalizowanych podmuchów oraz losowego profilu wiatru.

Abstract. The paper presents a laboratory setup to be used as a wind turbine emulator. The emulator can be used for research investigation by reproducing the mechanical torque developed by a wind turbine for a given wind speed and angular velocity, thus driving an electrical generator in a similar way to a wind turbine. Ensuring repeatable testing conditions allows for comparison of different wind turbine control algorithms. In the presented solution, the turbine torque is reproduced by an AC drive with a squirrel cage motor coupled with the AC generator on the common shaft. A frequency converter that controls the emulator motor operates in the torque control mode. The command for the converter, proportional to the emulated instantaneous turbine torque, is calculated as the output from a wind turbine mathematical model running in the real time on PC in the Matlab-Simulink environment. Experimental results recorded for standardized wind gusts and a random wind profile are presented. (**Laboratory setup with squirrel-cage motors for wind turbine emulation**).

Słowa kluczowe: emulator turbiny wiatrowej, stanowisko laboratoryjne, silnik klatkowy, turbina o stałym kącie natarcia, śledzenie punktu mocy maksymalnej

Keywords: wind turbine emulator, laboratory setup, squirrel cage motor, fixed pitch wind turbine, maximum power point tracking

Wstęp

Elektrownie wiatrowe użytkowane do komercyjnego wytwarzania energii elektrycznej to jednostki o mocy sięgającej kilku MW. W większości posiadają poziomą oś obrotu i trójłatawą turbinę. Jako generatory stosowane są maszyny asynchroniczne klatkowe (IG) i pierścieniowe (DFM) oraz maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSG) wraz z przekształtnikami energoelektronicznymi i układami sterowania. W przypadku zastosowania generatorów asynchronicznych pierścieniowych moc przekształtnika włączonego w obwód wirnika stanowi tylko ok. 30% mocy całego generatora. Generatory klatkowe oraz synchroniczne wymagają podłączenia do sieci poprzez przekształtnik obliczony na pełną moc generatora. W przypadku maszyny asynchronicznej niezbędna dla pracy generatora moc bierna dostarczana jest przez przekształtnik energoelektroniczny. Współczesne turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu budowane na lądzie przystosowane są do pracy przy prędkości wiatru do 25m/s. Prędkości, przy których turbiny osiągają moc znamionową mieszczą się najczęściej w przedziale 10 – 15m/s. Biorąc pod uwagę stosunek koszt – efekt w elektrowniach małych mocy o dużej prędkości obrotowej stosuje się najczęściej generatory PMSG (wielobiegunowe, zbudowane głównie z magnesów neodymowych, a w elektrowniach o pionowej osi obrotu często w wykonaniu tarczowym), natomiast w większych jednostkach generatory indukcyjne z przekładnią mechaniczną [1, 2, 3, 4].

W obecnie budowanych turbinach wiatrowych stosuje się kilka sposobów regulacji prędkości obrotowej wirnika, a co za tym idzie mocy generatora w zależności od aktualnej prędkości wiatru. W dużych jednostkach stosuje się regulację kąta natarcia łopatek (*pitch control*). Zmiana kąta natarcia powoduje zmianę siły nośnej powstającej na płatach wirnika co sprawia, że przy silnych podmuchach można ją zredukować, a w konsekwencji zmniejszyć prędkość obrotową wirnika. W małych i średnich jednostkach stosuje się głównie pasywną regulację przez przeciągnięcie (*passive stall control*), gdzie zmiana siły

nośnej jest uzyskiwana przez odpowiedni profil łopatek wirnika. W tym rozwiązaniu zbędny jest układ mechaniczny zmieniający kąt natarcia łopatek [1, 2, 3, 4].

Sterowanie turbiną wiatrową

Przy założeniu, że koło wiatrowe (wirnik turbiny) ustawione jest prostopadle do kierunku wiatru, przechwytywana moc aerodynamiczna (moc mechaniczna wytwarzana przez turbinę) jest równa [1, 2, 3, 4]:

$$(1) \quad P_t = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 C_p(\lambda) V_w^3,$$

gdzie: ρ - gęstość powietrza, R - promień koła wiatrowego turbiny, V_w - efektywna, uśredniona prędkość wiatru oddziałującego na wirnik turbiny, $C_p(\lambda)$ - współczynnik wykorzystania mocy wiatru, przy czym λ - wyróżnik szybkobieżności (*tip-speed ratio*):

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

gdzie: ω_t - prędkość kątowa wirnika turbiny.

Zależność współczynnika wykorzystania mocy C_p od wyróżnika szybkobieżności λ jest właściwością konstrukcyjną wirnika turbiny. Przykładową zależność $C_p(\lambda)$ pokazano na rysunku 1.

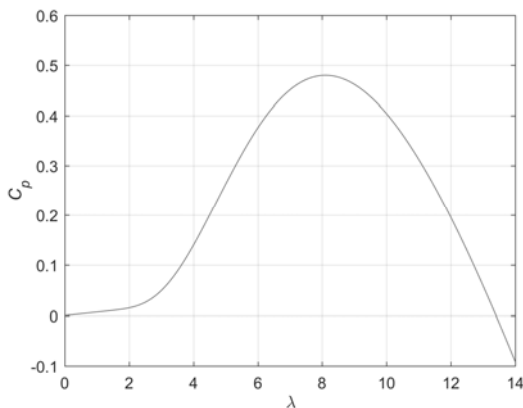
Moment aerodynamiczny (mechaniczny) wytwarzany przez turbinę):

$$(3) \quad T_t = \frac{P_t}{\omega_t} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \omega_t^2 = K \omega_t^2,$$

gdzie:

$$(4) \quad K = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3}$$

Maksymalna moc wytwarzana przez turbinę przy danej prędkości wiatru V_w jest osiągana dla maksymalnej wartości współczynnika wykorzystania mocy C_{pmax} odpowiadającego pewnej optymalnej wartości λ_{opt} wyróżnika szybkobieżności (rys.1).



Rys. 1. Przykładowa zależność $C_p(\lambda)$ wyznaczona doświadczalnie

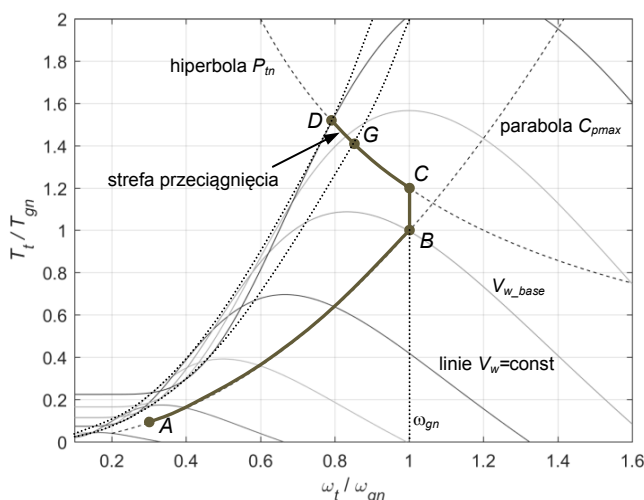
Moment mechaniczny turbiny T_t jest wynikiem oddziaływania wiatru o określonej prędkości na wirnik turbiny wiatrowej napędzający generator elektryczny. Zamiana energii mechanicznej w energię elektryczną powoduje wytworzenie momentu generatora T_g stanowiącego obciążenie turbiny.

Celem sterowania turbiną wiatrową w warunkach poniżej znamionowej prędkości wiatru jest produkcja maksymalnej mocy elektrycznej. Na rysunku 2 pokazano rodzinę charakterystyk momentu $T_t=f(\omega)$ dla różnych prędkości wiatru, z zaznaczeniem krzywej (paraboli) momentu $T_{topt}=f(\omega_t)$, dla której turbina wytwarza moc maksymalną P_{imax} – moment i prędkość kątową turbiny podano w jednostkach względnych. Optymalny moment mechaniczny jest opisany zależnością:

$$(5) \quad T_{topt} = \frac{P_{imax}}{\omega_{topt}} = K_{opt} \omega_{topt}^2,$$

gdzie optymalny współczynnik:

$$(6) \quad K_{opt} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3}$$



Rys. 2. Charakterystyki momentu aerodynamicznego turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla różnych prędkości wiatru

Dla każdej elektrowni wiatrowej z poziomą osią obrotu istnieje taka wartość wzmocnienia K_{opt} , dla której turbozespół pracuje na krzywej mocy ekstremalnej. W rzeczywistych obiektach wartość współczynnika wzmocnienia K ustala się na poziomie nieznacznie mniejszym niż wartość K_{opt} . Związane jest to z faktem, iż zmiana temperatury, gęstości powietrza czy nawet oblodzenie łopatek wpływają na kształt krzywych mocy, przez co elektrownia wiatrowa dla zbyt dużego współczynnika wzmocnienia K mogłaby się znaleźć w niestabilnym punkcie pracy.

W efekcie, optymalne sterowanie turbiną wiatrową jest osiągane poprzez śledzenie prędkości wiatru na podstawie znanej prędkości kątowej wału turbiny. Wymagana prędkość wiatru stanowi prędkość efektywną – uwzględniającą jej niejednostajny rozkład w powierzchni zakreślonej przez koło wiatrowe.

Na rysunku 2, krzywa od punktu A (start turbiny) do punktu B odpowiada pracy z C_{pmax} , czyli z punktem pracy położonym na krzywej mocy maksymalnej. Strefa pracy od punktu B do punktu C oraz strefa pracy na hiperboli mocy znamionowej (CDG) odpowiadają pracy turbiny w warunkach znamionowej prędkości wiatru oraz powyżej znamionowej prędkości wiatru. Problem sterowania turbiną w strefach III i IV (BCDG) nie jest przedmiotem rozważań w niniejszym artykule.

Uproszczony liniowy model dynamiczny obiektu

Do modelowania dynamiki turbiny wiatrowej stosuje się najczęściej tzw. model dwumasowy, uwzględniający sprężystość wału. Jednakże, dla małych jednostek można z powodzeniem zastosować model uproszczony.

Zależności modelu jednomasowego opisano równaniem:

$$(7) \quad J_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - T_g - B\omega_t,$$

gdzie: ω_t – prędkość obrotowa wirnika turbiny, T_t – moment aerodynamiczny, T_g – moment generatora, J_t – moment bezwładności, B – współczynnik tarcia opisujący straty energii.

Podstawowy sposób sterowania w strefie II pracy elektrowni (poniżej prędkości znamionowej wiatru) polega na wykorzystaniu naturalnej stabilności układu i wprowadzeniu sprzężenia zwrotnego wytwarzającego moment zadany generatora (z kompensacją momentu tarcia) w postaci:

$$(8) \quad T_{g_ref} = K_{opt} \omega_t^2 - B\omega_t$$

Jedyną wielkością mierzoną w tym przypadku, pomijając wielkości elektryczne, jest prędkość kątowa generatora ω_g . Jeżeli układ przeniesienia napędu jest sztywny, a przekładnia idealna, to prędkość obrotową turbiny można określić jako $\omega_t = \omega_g / G$, gdzie: G – przełożenie przekładni (dla uproszczenia przyjęto $G=1$).

Równanie dynamiki układu zamkniętego ma postać:

$$(9) \quad \frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2J_t} \pi \rho R^5 \left(\frac{C_p}{\lambda^3} - \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \right) \omega_t^2$$

Zachodzą następujące zależności:

- jeżeli $\lambda < \lambda_{opt}$, to $d\omega_t/dt > 0$ i turbina przyspiesza do osiągnięcia $\lambda = \lambda_{opt}$,
- jeżeli $\lambda > \lambda_{opt}$, to $d\omega_t/dt < 0$ i turbina zwalnia do osiągnięcia $\lambda = \lambda_{opt}$.

Wadą tego typu sterowania jest odchylenie punktu pracy na charakterystyce $P_T=f(\omega)$ od ekstremum podczas szybkich zmian prędkości wiatru, co spowodowane jest inercją turbiny.

Układ sterowania turbiny wiatrowej z odtwarzaniem efektywnej prędkości wiatru

Do pomiaru prędkości wiatru, której znajomość jest niezbędna dla prawidłowego funkcjonowania algorytmu sterowania, używa się anemometrów (najczęściej ultradźwiękowych). Pomiar wiatru na gondoli turbiny wiatrowej jest silnie zakłócony przez zawirowania strugi powietrza od łopatek wirnika, co wymaga specjalnych algorytmów przeliczeniowych i nie zawsze daje pożądaną dokładność. Efektywna prędkość wiatru występująca w równaniach nie jest wielkością mierzalną, ponieważ anemometry mierzą prędkość wiatru punktowo i w pewnej odległości od wirnika turbiny. W związku z tym stosuje się w wielu rozwiązaniach układy odtwarzające efektywną prędkość wiatru na podstawie dostępnych i estymowanych zmiennych stanu oraz znanej, dla danej konstrukcji wirnika, zależności $C_p(\lambda)$. Estymowana wartość efektywnej prędkości wiatru \hat{V}_w jest następnie użyta do wyliczenia optymalnej wartości prędkości obrotowej $\omega_{opt} = \lambda_{opt} \hat{V}_w / R$.

Na rysunku 3 pokazano schemat układu sterowania turbiny wiatrowej z obserwatorem momentu aerodynamicznego i numerycznym wyznaczeniem efektywnej wartości prędkości wiatru (pominięto kompensację momentu tarcia). Efektywna wartość prędkości wiatru jest wyznaczana numerycznie za pomocą algorytmu Newtona-Raphsona, jak w [3, 7], gdzie podano również szczegółowy opis problemu dwóch rozwiązań wartości V_w .

Liniowy model dynamiki turbiny w formie transmittancji:

$$(10) \quad G(s) = \frac{1}{2H_t s + B},$$

gdzie: stała inercji turbiny $H_t=1.02s$ (dla turbiny małej mocy), współczynnik tarcia $B=0.07$.

Zastosowany obserwator momentu aerodynamicznego (mechanicznego) turbiny T_t jest, przy założeniu modelu dynamicznego turbiny (10), układem liniowym (estymatorem zakłócenia) zawierającym dolnoprzepustowy filtr o transmittancji (rys. 3):

$$(11) \quad P(s) = \frac{1}{T_{obs}^2 s^2 + 2\zeta T_{obs} s + 1},$$

który należy zaprojektować. Przyjęto: $T_{obs}=50ms$ (stała czasowa obserwatora) oraz $\zeta=1$ (współczynnik tłumienia).

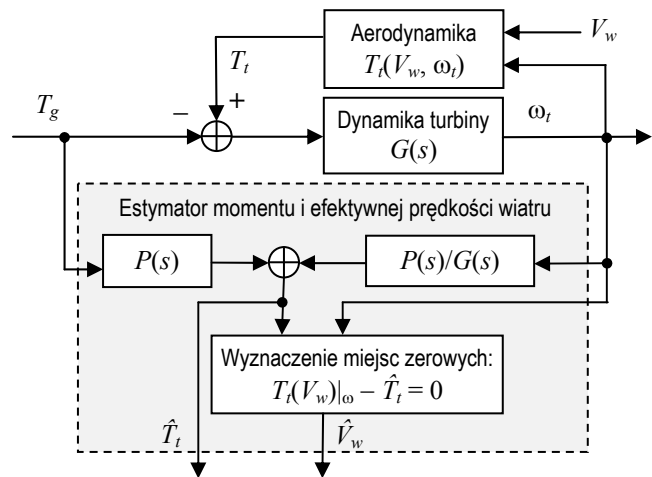
Estymata \hat{T}_t jest zbieżna do wartości rzeczywistej dla $T_t \rightarrow const$, lecz estymacja jest skuteczna również dla zakłóceń wolnozmiennych w porównaniu ze stałą czasową obserwatora T_{obs} , która stanowi parametr algorytmu i powinna być dużo mniejsza od okresów narastania/opadania prędkości wiatru. Estymacja momentu T_t umożliwia sterowanie dające lepsze wykorzystanie energii wiatru poprzez wyliczenie jego prędkości zbliżonej do prędkości efektywnej.

Stanowisko laboratoryjne do emulacji turbiny wiatrowej

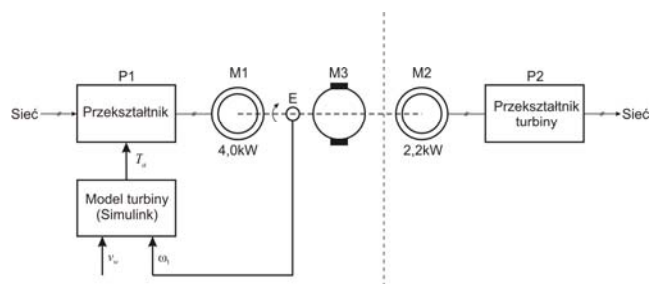
Schemat blokowy stanowiska badawczego pokazano na rysunku 4. Widok zestawu elektromaszynowego pokazano na rysunku 5. Stanowisko składa się z pięciu zasadniczych elementów:

1. silnik asynchroniczny klatkowy SZJe34b (M1) o

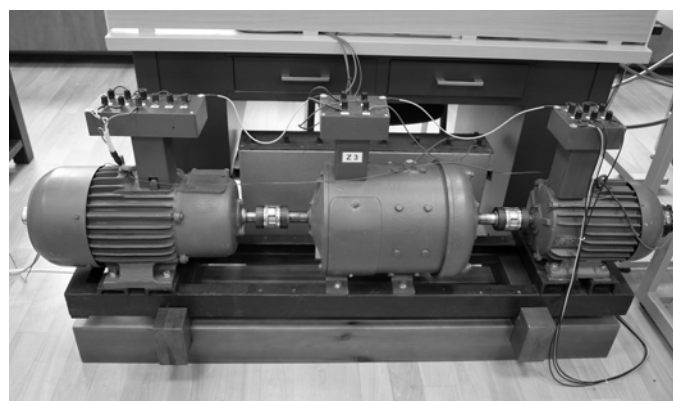
- następujących parametrach: 4.0kW, 380V, 8.5A, 1430rpm;
- przełącznik częstotliwości Schneider ALTIVAR 71 (P1) o mocy 11kW;
- silnik asynchroniczny SZUe46a (M2) o następujących parametrach: 2.2kW, 380V, 5.7A, 950rpm;
- przełącznik częstotliwości MMB 005 AC (P2) ze sterownikiem elektrowni wiatrowej;
- model turbiny wiatrowej w środowisku Matlab-Simulink.



Rys. 3. Schemat blokowy modelu turbiny z obserwatorem momentu i efektywnej prędkości wiatru; $G_m(s)$ – model transmittancji turbiny, $P(s)$ – filtr dolnoprzepustowy zaprojektowany tak, aby $P(s)/G_m(s)$ była realizowalna; jeżeli $T_t \rightarrow const$ i $G_m(s) = G(s)$, to $\hat{T}_t \rightarrow T_t$



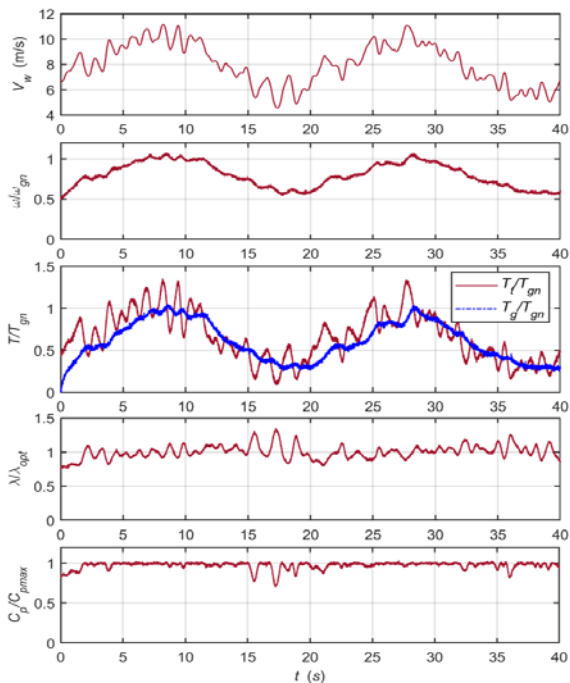
Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska badawczego



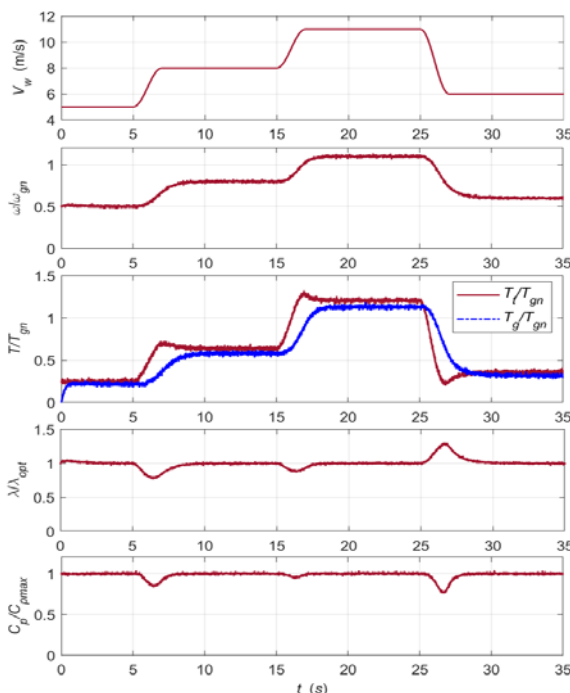
Rys. 5. Widok zestawu elektromaszynowego

Silnik asynchroniczny M1 wytwarza moment obrotowy, którego charakterystyka odpowiada momentowi pochodzącemu od rzeczywistej turbiny wiatrowej. Przełącznik częstotliwości P1 służy do sterowania silnikiem M1 w trybie zadawania momentu. W linii wału dodano maszynę prądu stałego M3, która umożliwia wytwarzanie dodatkowego momentu bezwładności zespołu.

Wielkość proporcjonalna do aktualnego momentu aerodynamicznego na wale turbiny wiatrowej jest wyliczana jako wielkość wyjściowa z modelu matematycznego turbiny wiatrowej w środowisku Matlab-Simulink i zadawana do przekształtnika P1 w postaci analogowej poprzez kartę z przetwornikiem DAC. Model turbiny wiatrowej zawiera nieliniową zależność $C_p(\lambda)$. Wielkościami wejściowymi do modelu turbiny są: chwilowa efektywna prędkość wiatru V_w , której profil jest zadawany wewnątrz modelu Simulinka oraz mierzona wartość prędkości obrotowej wału układu ω_r . Prędkość obrotowa wału mierzona jest przetwornikiem obrotowo-impulsowym E o rozdzielczości 3600 imp/obr.



Rys. 6. Przebiegi zmiennych dla profilu wiatru ze składową losową



Rys. 7. Przebiegi zmiennych dla kolejnych dwóch podmuchów koherentnych wg PN-EN 61400-2

Silnik asynchroniczny M2 pracuje jako generator elektrowni wiatrowej. Przemiennej częstotliwości P2 służy do sterowania generatorem M2 z zastosowaniem algorytmu śledzenia mocy maksymalnej MPPT [5, 7]. Moc elektryczna wytworzona przez generator M2 jest przekazywana do sieci elektroenergetycznej. Układ sterowania generatora opiera się na multiskalarnym modelu silnika asynchronicznego i jest wyposażony w algorytm lotnego startu (załączanie układu sterowania przy niezerowej prędkości obrotowej) [6].

Wyniki badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne układu sterowania przeprowadzono z zastosowaniem modelu wiatru opisanego w PN-EN 61400-2 [8], a także przyjmując model zmienności wiatru ze składową losową [7]. Na rysunku 6 pokazano przebiegi zmiennych dla zmienności wiatru ze składową losową nałożoną na przebieg sinusoidalny. Na rysunku 7 pokazano przebiegi zmiennych dla kolejnych dwóch podmuchów koherentnych według PN-EN 61400-2.

Wnioski

W artykule przedstawiono metodę regulacji prędkości obrotowej turbiny wiatrowej o stałym kącie ustawienia łopatek z zastosowaniem liniowego obserwatora momentu aerodynamicznego. Estymowany moment mechaniczny turbiny T_t jest traktowany jako zakłócenie w modelu obiektu. Efektywna prędkość wiatru wyliczana jest na podstawie estymowanego momentu aerodynamicznego turbiny oraz mierzonej prędkości kątowej wirnika. Pokazano wyniki badań eksperymentalnych na emulacji turbiny wiatrowej z generatorem asynchronicznym klatkowym, dla profilu zmienności wiatru ze składową losową oraz dla znormalizowanych podmuchów wiatru. Uzyskano poprawę dynamiki układu w porównaniu do układu opartego na średniej metodzie sterowania.

Autorzy:

dr inż. Janusz Baran, e-mail: baranj@el.pcz.czest.pl,
dr inż. Andrzej Jąderko, e-mail: aj@el.pcz.czest.pl,
Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny,
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

LITERATURA

- [1] Bianchi F., De Battista H., Mantz R., Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design (2007), Springer
- [2] Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S., Control Strategies for Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines, *Wind Power*, Ed. By S.M. Mueeen (2010), InTech, 209-232
- [3] Bourlis D., A Complete Control Scheme for Variable Speed Stall Regulated Wind Turbines, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Ed. By R.Carriveau (2011), InTech, 309-338
- [4] Kojabadi H.M., Chang L., Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 3, (2004), 547-552
- [5] Morimoto S., Nakayama H., Sanada M., Takeda Y., Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 41(2005), 60-67
- [6] Krzemiński Z., Mikroelektronie wiatrowe – projektowanie i sterowanie, *XII Krajowa Konferencja Naukowa "Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym", SENE 2015*, Łódź, 18-20 listopada 2015r., referat plenarny
- [7] Baran J., Jąderko A., Układ sterowania turbiny wiatrowej o regulowanej prędkości obrotowej i stałym kącie ustawienia łopatek z liniowym obserwatorem momentu aerodynamicznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93(2017), nr 12, 59-62
- [8] Jąderko A., Badania symulacyjne układu sterowania turbiną wiatrową z generatorem indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(2015), nr 12, 110-113