

Sterowanie elektrownią wiatrową z estymacją momentu aerodynamicznego przy dużych prędkościach wiatru

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję układu sterowania mikroturebiną wiatrową z odtwarzaniem momentu aerodynamicznego i efektywnej prędkości wiatru. W układzie sterowania zastosowano obserwator do estymacji niemierzalnych zmiennych stanu. Zaproponowano algorytm obliczania efektywnej prędkości wiatru. System sterowania umożliwia pracę turbiny wiatrowej dla prędkości wiatru w strefie pomiędzy prędkością nominalną a maksymalną, kiedy turbina wiatrowa jest odstawiana ze względów bezpieczeństwa, czyli w trzeciej i czwartej strefie pracy. Model symulacyjny został zbudowany w środowisku Matlab / Simulink przy użyciu biblioteki Simscape Electrical.

Abstract. A proposal of the control scheme for micro wind turbine with aerodynamic torque and effective wind speed estimation is presented in this paper. Observer system for the non-measurable state variables estimation is used in this control scheme. Algorithm of the effective wind speed calculation is proposed. The control system ensure work of the wind turbine for wind speed in the region between nominal speed and maximum speed, when wind turbine is shutdown due to safety reasons, i.e. in a third and fourth operating regions. The simulation model was built in the Matlab/Simulink environment using the Simscape Electrical toolbox. (**Wind Turbine Control with Aerodynamic Torque Estimation at High Wind Speed**).

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, obserwator momentu aerodynamicznego, nominalna i maksymalna prędkość wiatru

Keywords: wind turbine, aerodynamic torque observer, nominal and maximum wind speed

Wstęp

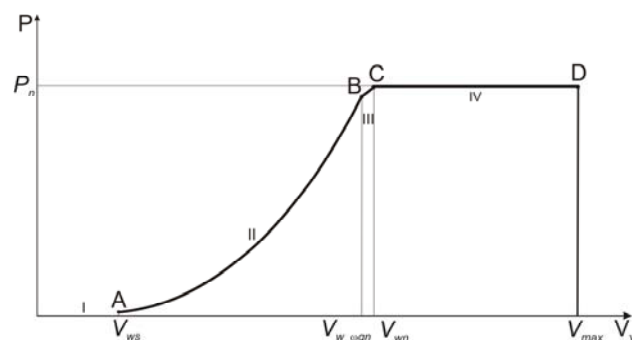
Współczesne elektrownie wiatrowe użytkowane do komercyjnego wytwarzania energii elektrycznej to jednostki w większości posiadające poziomą oś obrotu i trójłapatową turbinę (koło wiatrowe). Moc zainstalowanych w nich generatorów sięga kilku MW. Jako generatory stosowane są maszyny asynchroniczne klatkowe (SCIG) i pierścieniowe (DFIG) oraz maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSG) wraz z przekształtnikami energoelektrycznymi i układami sterowania.

Współczesne turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu ustawiane na lądzie przystosowane są do pracy przy prędkości wiatru nie większej niż 25m/s. Prędkości, przy których turbiny osiągają moc znamionową mieszczą się najczęściej w przedziale 10 – 15m/s. Budowane są również jednostki przystosowane do niższych prędkości wiatru przeznaczone do pracy na obszarach o gorszych warunkach wiatrowych. W takim przypadku stosuje się wirnik przewymiarowany w stosunku do mocy znamionowej generatora. Zapewnia to pracę elektrowni z mocą znamionową przy prędkościach wiatru rzędu 10 - 12m/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. Współczesne układy regulacji elektrowni wiatrowych pozwalają na pracę generatorów ze zmienną prędkością obrotową.

W małych i średnich jednostkach stosuje się głównie pasywną regulację przez przeciągnięcie (*passive stall control*). W tym rozwiązaniu zbędny jest układ mechaniczny zmieniający kąt natarcia łopaty. Ograniczenie momentu obrotowego przy prędkości wiatru powyżej wartości znamionowej odbywa się poprzez wykorzystanie efektu przeciągnięcia (oderwania laminarnej strugi powietrza) na krawędzi spływu łopaty wirnika. Zastosowanie odpowiedniej geometrii profilu łopaty wirnika zapewnia powstanie turbulencji na części łopaty, które ograniczają moment napędowy wirnika przy zbyt silnym wietrze. Stan przeciągnięcia postępuje od osi obrotu płyta [1].

Rozróżnia się cztery obszary (strefy) pracy turbiny wiatrowej w zależności od aktualnej prędkości wiatru. Pierwszą strefą pracy jest start turbiny przy minimalnej

prędkości wiatru. W drugiej strefie pracy, w zakresie średnich prędkości wiatru pomiędzy prędkością startu V_{ws} , a prędkością znamionową $V_{w,ogn}$, układ regulacji ma za zadanie sterowanie prędkością wału w sposób zapewniający maksymalną wartość możliwej do uzyskania energii (MPPT) [2]. Charakterystykę turbiny wiatrowej z podziałem na cztery strefy pracy pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Charakterystyka turbiny wiatrowej z podziałem na cztery strefy pracy: I – strefa rozruchu, II – strefa MPPT, III – strefa przejściowa - $\omega = \text{const}$, IV – strefa ograniczania mocy

W strefie trzeciej, przy prędkości wiatru bliskiej znamionowej, praca turbiny odbywa się ze stałą prędkością obrotową nieco mniejszą od optymalnej. W strefie czwartej turbina wiatrowa pracuje przy stałej mocy, równej mocy znamionowej, co wymaga od układu regulacji zwiększania lub zmniejszania prędkości obrotowej generatora przy zmianach prędkości wiatru [2].

W pracy przedstawiono propozycję układu sterowania mikroturebiną wiatrową z odtwarzaniem momentu aerodynamicznego za pomocą obserwatora stanu z algorytmem obliczania efektywnej prędkości wiatru. System sterowania umożliwia bezpieczną pracę turbiny w trzeciej i czwartej strefie.

Sterowanie turbiną wiatrową

Sterowanie dużych elektrowni wiatrowych o dużym momencie bezwładności opiera się na równaniach stanu ustalonego. Małe elektrownie o małym momencie bezwładności, szybko reagujące na wymuszenia, wymagają sterowania uwzględniającego dynamikę zarówno wiatru jak i wirnika turbiny wiatrowej. Przy prędkościach wiatru

większych od pewnej ustalonej wartości maksymalnej, układ regulacji powinien zapewnić ograniczenie prędkości i sprawności aerodynamicznej elektrowni poprzez wymuszenie wejścia w stan przeciągnięcia [3].

Przy założeniu, że wirnik turbiny ustawiony jest prostopadłe do kierunku wiatru, moment aerodynamiczny wywołowany przez przepływ wiatru, jest równy [2]:

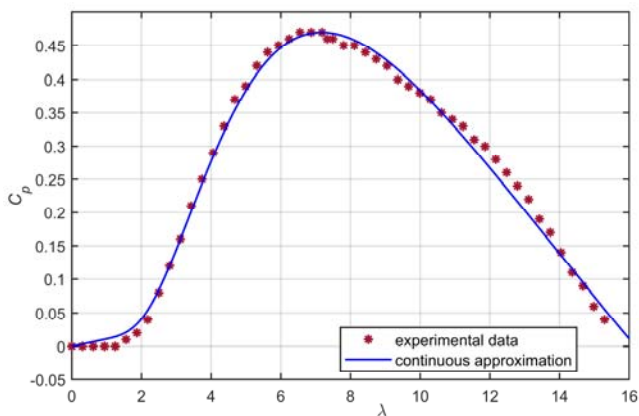
$$(1) \quad T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{V_w^3}{\omega_t} C_p(\lambda),$$

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 kątowna wirnika turbiny.

Przykład charakterystyki $C_p(\lambda)$, wyznaczonej eksperymentalnie dla mikroturbiny wiatrowej o stałym kącie natarcia łopat i mocy znamionowej 40 kW pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowa zależność $C_p(\lambda)$ wyznaczona doświadczalnie dla mikroturbiny wiatrowej o mocy 40 kW ($C_{pmax}=0.47$ dla $\lambda_{opt}=7.2$)

Charakterystyka sprawności aerodynamicznej turbiny wiatrowej jest wynikiem projektowania łopaty z uwzględnieniem wymagań wynikających ze sposobu regulacji turbiny wiatrowej. Zależność $C_p(\lambda)$ uzyskuje się kształtem, skręceniem wzdłużnym i profilem łopaty. Często na długości łopaty stosowanych jest kilka profili. Od pewnej prędkości wiatru, na skutek oderwania strugi powietrza od powierzchni łopaty, przy stałej prędkości kątowej turbiny występuje zmniejszenie momentu na wale. Ułatwia to kontrolę prędkości turbiny przy szybkim wzroście prędkości wiatru [3].

Celem sterowania w warunkach wiatrowych powyżej znamionowych jest regulacja z zachowaniem stałej mocy wytwarzanej, co odpowiada pracy elektrowni na odcinku paraboli stałej mocy CGD (rys. 3). Regulacja mocy na odcinku CGD oparta jest na estymowanej wartości efektywnej prędkości wiatru \hat{V}_w [4, 5]. Idea wyznaczenia efektywnej prędkości wiatru polega na wykorzystaniu estymowanej wartości momentu aerodynamicznego \hat{T}_w oraz przekształconej postaci równania (1):

$$(3) \quad T_w - \hat{T}_w = 0,$$

$$(4) \quad \frac{\pi}{2} \rho R^3 C_q V_w^2 - \hat{T}_w = 0,$$

gdzie:

$$(5) \quad C_q = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}, \quad V_w = \frac{\omega_t R}{\lambda},$$

w wyniku których otrzymuje się przekształconą zależność (4) jako funkcję parametru λ :

$$(6) \quad \hat{T}_w - \frac{\pi}{2} \rho R^5 \frac{\omega_t^2 C_p(\lambda)}{\lambda^3} = 0$$

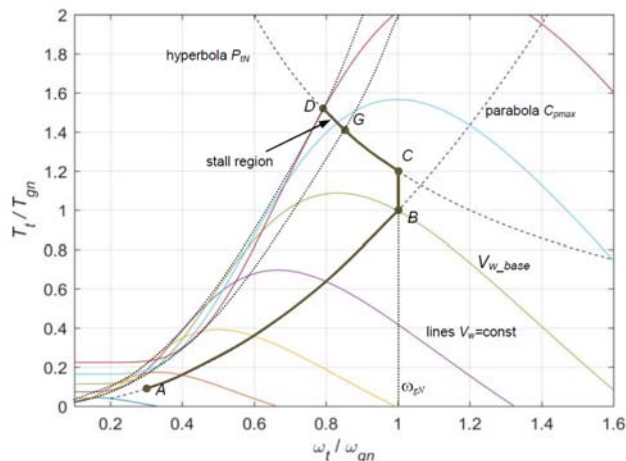
Równanie (6) może zostać dalej przekształcone do postaci, która umożliwi praktyczne wyznaczenie współczynników szybkobieżności na podstawie estymowanej wartości momentu aerodynamicznego \hat{T}_w oraz zmierzonej wartości prędkości obrotowej ω_t turbiny [4, 5]:

$$(7) \quad f(\lambda) - \frac{2}{\pi} \frac{\hat{T}_w}{\rho R^5 \omega_t^2} = 0,$$

gdzie:

$$(8) \quad f(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3}.$$

Na rysunku 3 pokazano charakterystyki momentu aerodynamicznego turbiny dla różnych prędkości wiatru – moment i prędkość kątowną turbiny podano w jednostkach względnych. Krzywa od punktu A (start turbiny) do punktu B odpowiada pracy z C_{pmax} , czyli z punktem pracy położonym na krzywej mocy maksymalnej (strefa II). Strefa pracy od punktu B do punktu C oraz strefa pracy na hiperboli mocy znamionowej (CDG) odpowiadają pracy turbiny w warunkach znamionowej prędkości wiatru (strefa III) oraz powyżej znamionowej prędkości wiatru (strefa IV).



Rys. 3. Charakterystyki momentu aerodynamicznego turbiny dla różnych prędkości wiatru

Regulacja prędkości turbiny z estymacją efektywnej prędkości wiatru

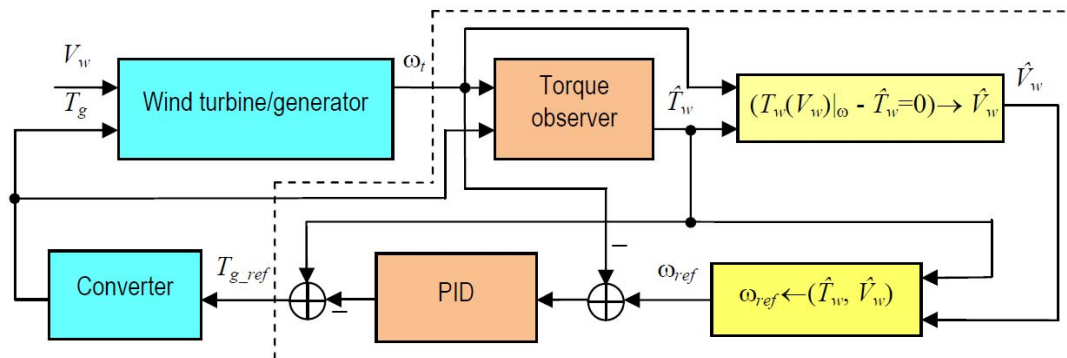
Jednym z głównych problemów w sterowaniu turbiną wiatrową jest brak możliwości dokładnego pomiaru prędkości wiatru oddziałującego na wirnik turbiny ze względu na rozmiary koła wiatrowego. Stosowany często pomiar prędkości wiatru na gondoli turbiny wiatrowej jest silnie zakłócony przez zawirowania (turbulencje) od łopat wirnika, co wymaga specjalnych algorytmów

przeliczeniowych i nie zawsze daje pożądaną dokładność. Często stosuje się układy odtwarzania niemierzalnych zmiennych [1, 6, 7].

Na rysunku 4 pokazano schemat układu sterowania turbiny wiatrowej z obserwatorem momentu i numerycznym wyznaczeniem efektywnej prędkości wiatru. Szczegółowy opis układu sterowania wraz z obserwatorem autorzy opisali w pracy [1]. W przypadku pracy turbiny wiatrowej w III i IV strefie prędkość zadana regulatora PID ω_{ref} jest określona zależnościami [2]:

$$(9) \omega_{ref} = f(\hat{V}_w) = \begin{cases} \omega_n, & \text{if } V_{w_ogn} \leq \hat{V}_w < V_{wn}, \\ \omega_g : \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left(\frac{R \omega_g}{\hat{V}_w} \right) \hat{V}_w^3 = P_n, & \text{if } \hat{V}_w \geq V_{wn}, \end{cases}$$

gdzie: V_{w_ogn} - prędkość wiatru odpowiadająca znamionowej prędkości generatora, V_{wn} - znamionowa prędkość wiatru, ω_g - prędkość generatora, ω_n - znamionowa prędkość turbiny.



Rys. 4. Schemat układu sterowania turbiny wiatrowej z obserwatorem momentu i numerycznym wyznaczeniem efektywnej prędkości wiatru

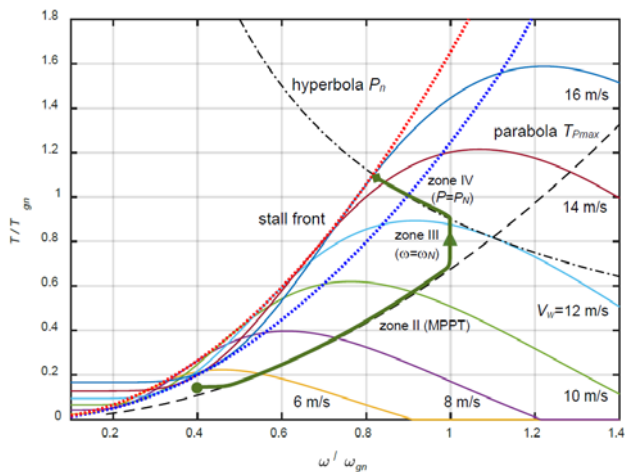
Wyniki badań symulacyjnych

Model symulacyjny został opracowany w środowisku programistycznym Matlab/Simulink z wykorzystaniem bloków biblioteki Simscape Electrical [8, 9].

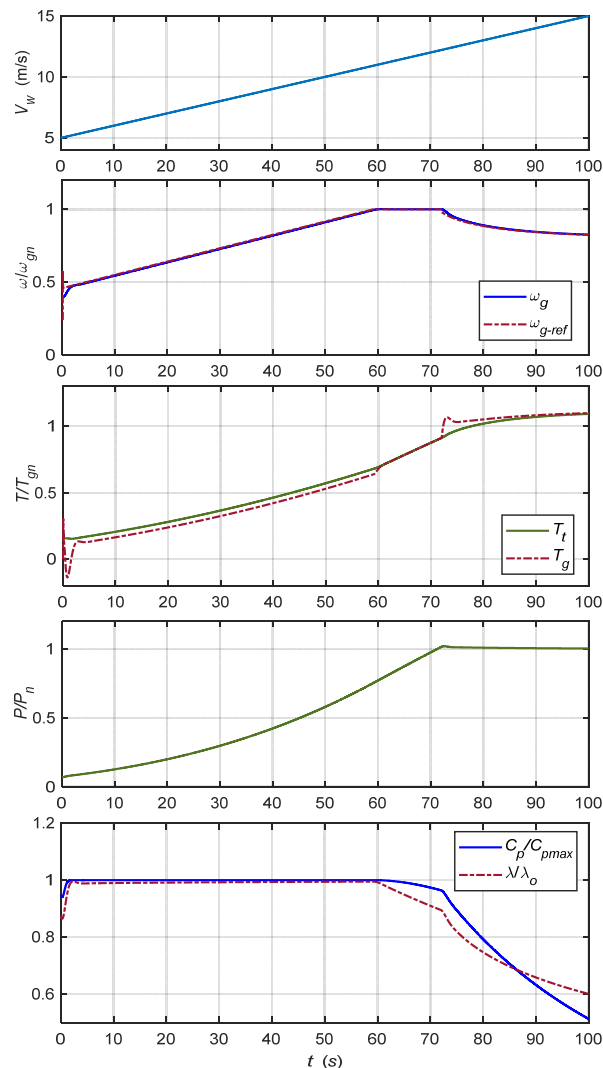
Do badań symulacyjnych użyto następujących parametrów układu turbina-generator:

- moc znamionowa turbiny $P_m=40$ kW,
- moc znamionowa generatora klatkowego $P_{gn}=44$ kVA,
- znamionowa prędkość turbiny $\omega_n=40$ rpm,
- znamionowa efektywna prędkość wiatru $V_{wn}=12$ m/s,
- prędkość znamionowa generatora $\omega_{gn}=1500$ rpm,
- przełożenie przekładni $G=39.27$,
- moment bezwładności wirnika $J=9685$ kg·m².

Na rysunku 5 pokazano quasi-statyczną trajektorię zmian stanu (ω_g, T) turbiny wiatrowej odpowiadającą przebiegom zmiennych w układzie turbina wiatrowa-generator dla powolnego liniowego narastania prędkości wiatru od $V_{w0}=5$ m/s do $V_{wf}=15$ m/s z nachyleniem 0.1 m/s² z rysunku 6. Trajektoria prawie pokrywa się z teoretyczną charakterystyką statyczną pracy turbiny o stałym kącie ustawienia łopatek wirnika



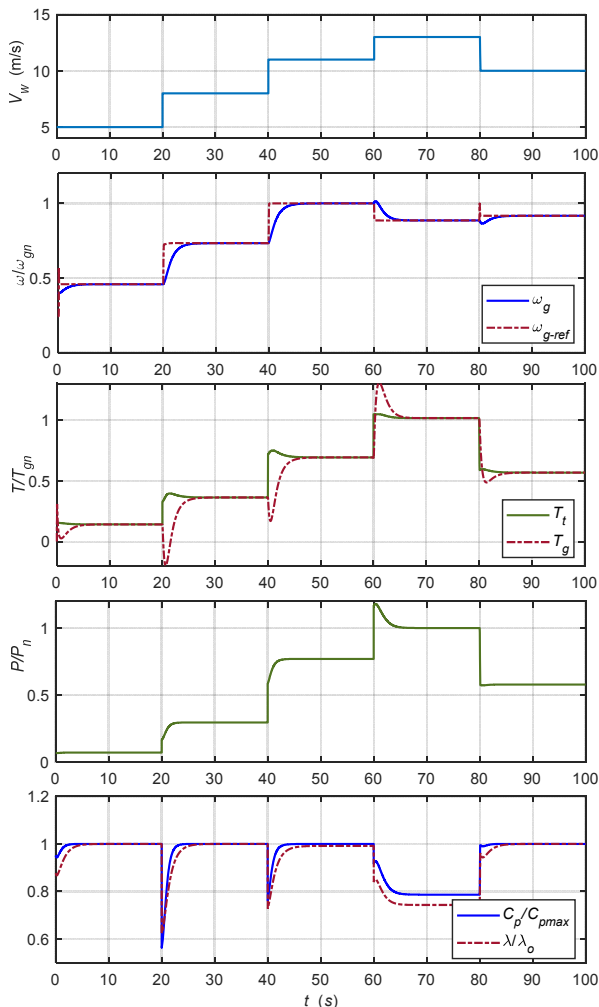
Rys. 5. Quasi-statyczna trajektoria zmian stanu (ω_g, T) turbiny wiatrowej dla powolnego liniowego narastania prędkości wiatru



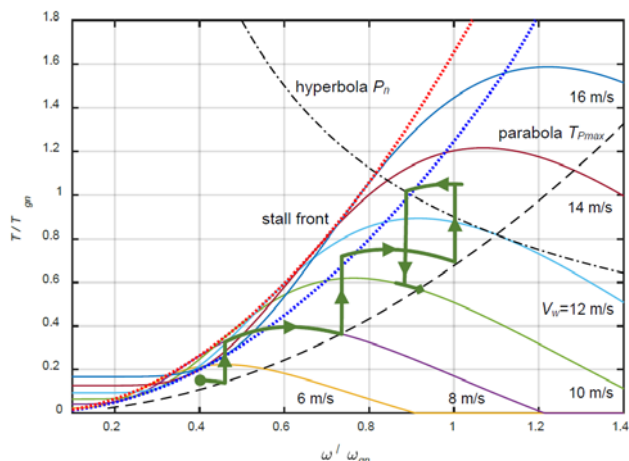
Rys. 6. Przebiegi zmiennych w układzie turbina wiatrowa-generator dla powolnego liniowego narastania prędkości wiatru

Nominalna prędkość wiatru $V_{wn}=12\text{m/s}$, dla której moc maksymalna jest równa mocy znamionowej. Prędkość wiatru, dla której prędkość obrotowa $\omega=\omega_{gn}$, $V_{w_ogn}=1/1.1 * V_{wn}=10.9\text{m/s}$. Przy czym $C_{pmax}=0.47$, $\lambda_o=7.2$.

Na rysunku 6 można zaobserwować prawidłowe działanie algorytmu w III i IV strefie pracy turbiny wiatrowej polegające na utrzymywaniu stałej prędkości obrotowej w strefie III oraz stałej mocy przy obniżaniu prędkości obrotowej w strefie IV.



Rys. 7. Przebiegi zmiennych w układzie turbina wiatrowa-generator dla teoretycznego skokowo zmiennego profilu prędkości wiatru



Rys. 8. Trajektoria dynamicznych zmian stanu (ω_g, T) turbiny dla teoretycznego skokowo zmiennego profilu prędkości wiatru

Widoczny jest również spadek sprawności przetwarzania energii wiatru w energię mechaniczną wirnika turbiny w III i IV strefie, co objawia się spadkiem wartości współczynnika wykorzystania mocy wiatru C_p oraz wyróżnika szybkobieżności λ .

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi zmiennych w układzie turbina wiatrowa-generator dla teoretycznego skokowo zmiennego profilu prędkości wiatru pokazujące właściwości dynamiczne układu sterowania. Na rysunku 8 pokazano trajektorię dynamicznych zmian stanu (ω_g, T) turbiny wiatrowej dla teoretycznego skokowo zmiennego profilu prędkości wiatru z rysunku 7. Dla poziomów prędkości wiatru równych $V_w = 5 \text{ m/s}$ i 8 m/s ustalony punkt pracy leży na paraboli T_{Pmax} , dla $V_w = 11 \text{ m/s}$ $\omega = \omega_{gn}$, dla $V_w = 13 \text{ m/s}$ punkt pracy leży na hiperboli $P = P_n$, natomiast dla $V_w = 10 \text{ m/s}$ powraca na parabolę T_{Pmax} .

Po zmianie prędkości wiatru, sterowanie jest zdolne do przesunięcia punktu pracy systemu do nowej mocy szczytowej, ale kosztem silnego "szarpnięcia" momentu obrotowego generatora spowodowanego zmianą prędkości $\omega_{g.ref}$. Gdy algorytm generuje np. dodatnią zmianę $\omega_{g.ref}$, moment obrotowy generatora jest najpierw szybko redukowany, aby umożliwić przyspieszenie układu mechanicznego. Prędkość kątowna osiąga nową wartość zadaną w ciągu jednego okresu iteracji algorytmu.

Wnioski

Przedstawione przykładowe wyniki badań symulacyjnych pokazują, że zaproponowany układ sterowania mikroinstalacją wiatrową z odtwarzaniem momentu aerodynamicznego za pomocą obserwatora stanu z algorytmem obliczania efektywnej prędkości wiatru umożliwia pracę turbiny w trzeciej i czwartej strefie. Algorytm utrzymuje stałą prędkość obrotową turbiny w III strefie pracy oraz ogranicza moc turbiny w strefie IV do wartości nominalnej.

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] 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
- [2] Bianchi F., De Battista H., Mantz R., *Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer, 2007
- [3] Krzemiński Z., Szewczyk J., Bogalecka E., Sterowanie małą elektrownią wiatrową z wykorzystaniem efektu przeciągnięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94(2018), nr 51, 104-11
- [4] Bourlis D., „Control algorithms and implementation for variable speed stall regulated wind turbines”, PhD thesis, Department of Engineering, University of Leicester, October 2010
- [5] Bourlis D., A Complete Control Scheme for Variable Speed Stall Regulated Wind Turbines, in: *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, (2011), Ed. by R.Carriveau, InTech, 309-338
- [6] Hu Z., Wang J., Ma Y., Yan X., Research on Speed Control System for Fixed-Pitch Wind Turbine Based on Disturbance Observer, (2009), *World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*, Nanjing, 221-225
- [7] Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S., Control Strategies for Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines, *Wind Power*, (2010), Ed. By S.M. Mueeen, InTech, 209-232
- [8] Perelmuter V., *Renewable Energy Systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems*, CRC Press, 2016
- [9] Simscape Electrical User's Guide, The Mathworks Inc., 2010