

Sterowanie turbiny wiatrowej o regulowanej prędkości obrotowej i zmiennym kącie ustawienia łopaty w pełnym zakresie prędkości wiatru

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki symulacyjne regulacji prędkości obrotowej, momentu i mocy elektrycznej generatora i kąta ustawienia łopat wirnika elektrowni wiatrowej z turbiną typu dużej mocy VSVP (variable-speed variable-pitch) w pełnym zakresie prędkości wiatru. Założono, że jedyną wielkością mierzoną jest prędkość obrotowa wału turbozespołu. Stwierdzono trudności w wyznaczaniu zadanego momentu generatora w strefie blisko poniżej znamionowej prędkości wiatru prowadzące do szybkich zmian momentu generatora i zakłóceń (wzrostów i spadków) generowanej mocy.

Abstract. The paper presents simulation results of regulating rotational speed, torque, generator electrical power and blade pitch angle of a wind power plant with a high-power VSVP (variable-speed variable-pitch) wind turbine over the full range of wind speeds. It was assumed that the only measured quantity was the rotational speed of the turbine. Difficulties in determining the correct reference generator torque in the zone close below the rated wind speed were found, leading to rapid changes in the generator torque and disturbances (growths and drops) in the generated power. (**Control of a variable-speed variable-pitch wind turbine in the entire range of wind speed**).

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa VSVP, sterowanie kątem natarcia łopat, układ regulacji

Keywords: VSVP wind turbine, pitch control, control system

Wstęp

Współczesne elektrownie wiatrowe do komercyjnego wytwarzania energii elektrycznej są w większości konstrukcjami z trójłapatowym wirnikiem (kołem wiatrowym) o poziomej osi obrotu. Moc generatorów zainstalowanych w dużych jednostkach sięga typowo kilku MW. Turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu budowane na lądzie przystosowane są do pracy przy prędkości wiatru do 25 m/s. Prędkości, przy których turbiny osiągają moc znamionową mieszczą się najczęściej w przedziale 10 – 15 m/s.

W turbinach wiatrowych, w zależności od strefy pracy, stosuje się kilka sposobów regulacji prędkości obrotowej wirnika, a co za tym idzie mocy wytwarzanej przez generator w zależności od aktualnej prędkości wiatru.

Przy silnym wietrze (powyżej prędkości znamionowej) w dużych jednostkach stosuje się regulację kąta natarcia łopat (*pitch control*). Zwiększenie kąta natarcia powoduje zmniejszenie siły nośnej powstającej na płatach wirnika, co sprawia, że w można zmniejszyć prędkość obrotową wirnika do bezpiecznej wartości.

Przy prędkości wiatru poniżej wartości znamionowej wirnik pracuje z prędkością umożliwiającą przechwycenie maksymalnej dla danej prędkości wiatru mocy aerodynamicznej. Ta moc i optymalna prędkość wynikają z charakterystyki konstrukcyjnej turbiny.

Gdy prędkość wiatru jest większa od nominalnej, moc i prędkość obrotowa wirnika są ograniczane na stałym poziomie, równym mocy i prędkości znamionowej. Kiedy wiatr osiągnie wartość maksymalną dla bezpieczeństwa turbiny następuje jej zatrzymanie i ustawienie łopat w tak zwaną „chorągiewkę”, czyli równoległe do kierunku wiatru. Na rysunku 1 pokazano wirnik turbiny z łopatami o zmiennym kącie ustawienia, natomiast na rysunku 2 turbinę z łopatami ustawionymi w „chorągiewkę” (kąta natarcia jest równy 90°).

Wyniki przedstawione w niniejszej pracy zostały uzyskane dla jednej z referencyjnych turbin wiatrowych opisanych w [8], która dalej nazywana jest turbiną WinPACT. Niezbędne do analizy parametry turbiny zostały zebrane w Tabeli 1. W analizie pominięto szczegóły generatora i przekształtników energoelektronicznych, tj. ich właściwości dynamiczne, ponieważ prędkość działania

części elektrycznej jest o 3 rzędy wielkości większa niż części mechanicznej.



Rys. 1. Wirnik turbiny z łopatami z regulowanym kątem natarcia



Rys. 2. Łopaty wirnika turbiny ustawione w „chorągiewkę”

Sterowanie turbiną wiatrową

Celem sterowania turbiną wiatrową jest generowanie maksymalnej mocy elektrycznej możliwej do osiągnięcia w danych warunkach wiatrowych, lecz bez przekraczania mocy znamionowej ze względu na wytrzymałość

mechaniczną samej turbiny oraz obciążalność komponentów energoelektronicznych.

Tabela 1. Podstawowe parametry turbiny wiatrowej WindPACT 1,5 MW przyjęte w obliczeniach

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa generatora, P_{gel}	1.5	MW
Sprawność generatora, η_g	0.95	-
Przełożenie przekładni, G	88	-
Moment wirnika turbiny wokół osi wolnoobrotowej LS, J_l	3×10^6	kg·m ²
Współczynnik tarcia lepkiego wału turbiny, D	120	N·m/(rad/s)
Moment generatora wokół osi szybkoobrotowej HS, J_g	56	kg·m ²
Prędkość nominalna HS generatora, ω_{gn}	1800	rpm
Promień wirnika turbiny, R	35	m
Znamionowa prędkość wiatru, V_{wn}	11.2	m/s
Maksymalny kąt natarcia łopat, β_{max}	30	°

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

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

gdzie: ρ - gęstość powietrza, R - promień koła wiatrowego turbiny, V_w - efektywna, uśredniona prędkość wiatru oddziałującego na wirnik turbiny, $C_p(\lambda, \beta)$ - współczynnik wykorzystania mocy wiatru, β - kąt ustawienia łopat turbiny (kąt natarcia, *blade pitch angle*), λ - tzw. wyróżnik szybkobieżności turbiny (*tip-speed ratio*, *TSR*):

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

gdzie: ω - prędkość kątowna wirnika turbiny.

Moc aerodynamiczna wytwarzana przez turbinę rośnie z trzecią potęgą prędkości wiatru. Zależność współczynnika wykorzystania mocy C_p od wyróżnika szybkobieżności λ i kąta ustawienia łopat β jest właściwością konstrukcyjną wirnika turbiny.

Moment aerodynamiczny (moment mechaniczny wytwarzany przez turbinę):

$$(3) \quad T_a = \frac{P_a}{\omega} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \omega^2.$$

Dla prędkości wiatru nie przekraczającej wartości znamionowej dla danej turbiny, optymalny kąt ustawienia łopat (kąt natarcia) β_{opt} jest mały (lub równy zero) i stały, co umożliwia przechwytywanie maksymalnej mocy wiatru. Jedną z metod ograniczania przechwytywanej mocy dla silnych wiatrów, powyżej prędkości znamionowej, jest wzrost kąta natarcia łopat, co powoduje spadek mocy odbieranej z turbiny. Jednak ze względu na koszty bardziej skomplikowanej konstrukcji, łopaty o zmiennym kącie ustawienia stosuje się w turbinach o dużej mocy, gdzie jest to opłacalne. W turbinach o mniejszej mocy instaluje się łopaty o stałym kącie ustawienia, lecz specjalnym kształcie, dzięki któremu przy wzrastającej prędkości wiatru występuje stopniowe samoczynne odrywanie się strugi powietrza powodujące redukcję przechwytywanej mocy aerodynamicznej i prędkości obrotowej wirnika (*passive stall*). Sterowanie turbiną tego typu jest przedstawione np. w pracach [2,3,4,5,6].

Moment mechaniczny T_a turbiny wiatrowej, będący wynikiem oddziaływania wiatru o prędkości V_w na wirnik, napędza sprzęgnięty z nią poprzez przekładnię generator elektryczny (zob. rysunek 5). Zamiana energii mechanicznej w energię elektryczną powoduje wytworzenie momentu generatora T_g stanowiącego obciążenie turbiny. Moc elektryczna wytwarzana przez generator jest równa:

$$(4) \quad P_{gel} = T_g \cdot \omega_g \cdot \eta_g.$$

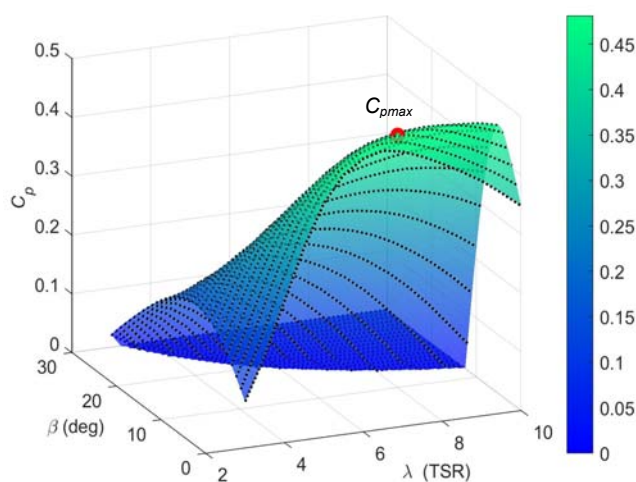
Celem sterowania turbiną wiatrową w warunkach poniżej znamionowej prędkości wiatru, jest produkcja maksymalnej mocy elektrycznej. Turbina powinna więc pracować z maksymalnym współczynnikiem przechwytywania C_{pmax} . Wytwarza wtedy maksymalny dla danej efektywnej prędkości wiatru V_w (uśrednionej po powierzchni zakreślonej przez koło wirnika) moment aerodynamiczny:

$$(5) \quad T_{aopt} = K_{opt} \omega_{LS}^2,$$

gdzie:

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

a ω_{LS} jest prędkością obrotową turbiny po wolnoobrotowej stronie przekładni (*low speed*). Dla każdej elektrowni wiatrowej z poziomą osią obrotu istnieje więc taka wartość wzmocnienia K_{opt} , dla której turbosespół pracuje na ekstremalnej krzywej mocy z optymalnymi wartościami wyróżnika szybkobieżności λ_{opt} i kąta ustawienia łopat wirnika β_{opt} . W praktyce 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 łopat wpływają na kształt krzywych mocy, przez co elektrownia wiatrowa dla zbyt dużego współczynnika wzmocnienia K mogłaby się znaleźć w niestabilnym punkcie pracy [7].



Rys. 3. Interpolowana charakterystyka współczynnika wykorzystania mocy $C_p(\lambda, \beta)$ turbiny wiatrowej WinPACT z generatorem o mocy 1,5 MW (punkty na wykresie oznaczają wartości stabelaryzowane)

Charakterystyka współczynnika wykorzystania mocy $C_p(\lambda, \beta)$ turbiny WinPACT z generatorem 1,5 MW jest pokazana na rysunku 3. Stabelaryzowane punkty charakterystyki (widoczne jako kropki) zostały

interpolowane i przedstawione w formie powierzchni. Z danych charakterystyki wynika, że optymalny kąt ustawienia łopatek dla prędkości wiatru poniżej znamionowej, umożliwiającą konwersję mocy z największą efektywnością $C_{pmax}=0,48$, przy wyróżniku szybkoobrotowości $\lambda_{opt}=7,1$, jest równy $\beta_{opt}=2^\circ$, a $K_{opt}=1,345 \cdot 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})^2$.

Na rysunku 4 pokazano charakterystyki punktów pracy w stanie ustalonym (punktów równowagi) układu generator-turbina WinPact (bez regulacji) w funkcji prędkości wiatru V_w . Punkty pracy zostały wyznaczone w Matlabie za pomocą funkcji `findop` (*find operating point*) z toolboku Control System Toolbox.

W Regionie 1 najszłabszego wiatru $V_w < 4 \text{ m/s}$ – nie pokazanym na wykresach – turbina rozpędza się bez obciążenia generatorem i energia elektryczna nie jest produkowana.

Region 2 jest strefą śledzenia punktu pracy zapewniającego maksymalną moc elektryczną (*maximum power point tracking – MPPT*) przy stałym $\beta = \beta_{opt}$. Optymalne sterowanie turbiną wiatrową jest osiągnięte poprzez „śledzenie” prędkości wiatru na podstawie znanej prędkości kątowej wału turbiny: $V_w = \omega_{LS} R / \lambda$. Moment zadany generatora przeniesiony na stronę wolnoobrotową wyliczany jest jako:

$$(7) \quad T_{gLS_ref} = K_{opt} \omega_{LS}^2.$$

Przy takim sterowaniu prędkość obrotowa turbiny zmienia się samoczynnie dążąc, ze względu na naturalną stabilność układu, do osiągnięcia optymalnego wyróżnika szybkoobrotowości λ_{opt} i maksymalnej mocy. Sterowanie (5) jest najprostszym i często stosowanym sposobem regulacji w Regionie 2, ponieważ wymaga jedynie pomiaru prędkości obrotowej wału i nie powoduje gwałtownych zmian momentu obciążenia turbiny, czyli dużych obciążeń mechanicznych.

Dla parametrów turbiny WinPACT, na charakterystykach statycznych na rysunku 4 występuje również wąski Region 3, ponieważ generator osiąga znamionową prędkość obrotową ω_{gn} poniżej znamionowej prędkości wiatru V_{wn} ($V_{w3}=10,5 \text{ m/s}$ oznacza prędkość wiatru przy wejściu do Regionu 3) i zanim osiągnie moment znamionowy T_{gn} (obie wielkości liczone po stronie szybkoobrotowej). W strefie tej układ regulacji ogranicza prędkość obrotową na poziomie ω_{gn} , a moment generatora rośnie liniowo ze wzrostem prędkości wiatru do osiągnięcia T_{gn} i znamionowej mocy elektrycznej P_{gnel} . W przypadku turbiny WinPACT generator osiąga znamionową moc przy nominalnej dla turbiny prędkości wiatru. W Regionie 3 układ pracuje poniżej punktu mocy maksymalnej.

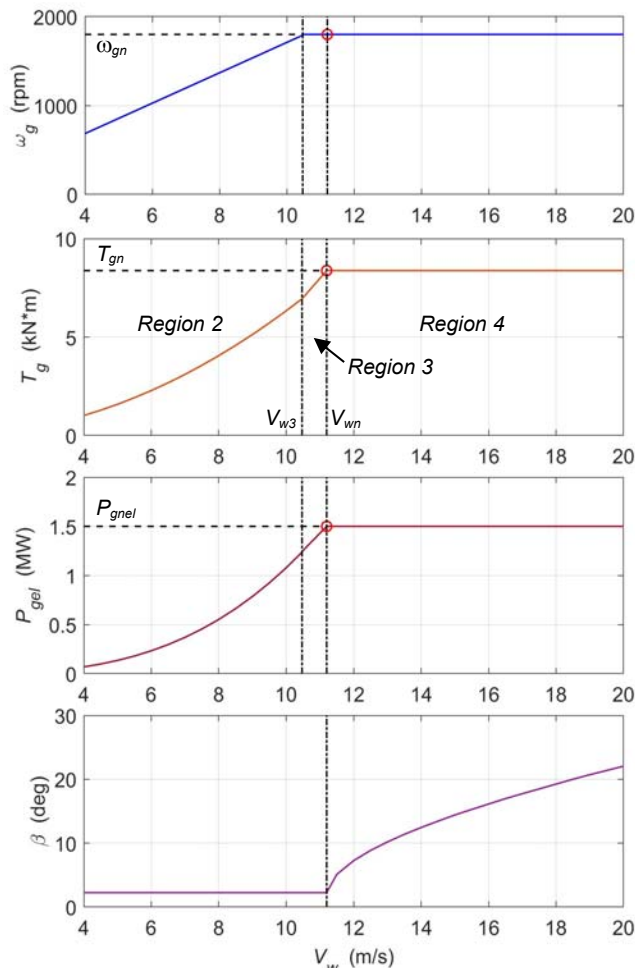
Region 4, powyżej nominalnej prędkości wiatru, jest strefą, w której wytwarzana moc i prędkość obrotowa są ograniczane do wartości znamionowych poprzez automatyczne zwiększanie przy wzroście prędkości wiatru kąta ustawienia łopatek wirnika do wartości $\beta > \beta_{opt}$, co powoduje zmniejszenie C_p i redukcję momentu aerodynamicznego T_a . Jeżeli prędkość wiatru przekracza pewną określoną dla turbiny prędkość „odcięcia” V_{w_cutoff} (dla turbiny WinPACT $V_{w_cutoff}=24 \text{ m/s}$), turbina jest wyhamowywana (elektrycznie lub mechanicznie) i wyłączana.

Uproszczony liniowy model dynamiczny obiektu

Do modelowania dynamiki układu generator-turbina zastosowano prosty model jednomasowy pomijający sprężystość wału i uwzględniający straty związane z tarciami lepkiem:

$$(8) \quad J_{eq} \frac{d\omega_{LS}}{dt} = T_a - T_{gLS} - D\omega_{LS},$$

gdzie: $J_{eq} = J_r + J_g G^2$ jest zastępczym momentem bezwładności na wale turbiny po stronie wolnoobrotowej LS, a D jest współczynnikiem tarcia lepkiego opisującym straty energii. Ten ostatni składnik, jako znacznie mniejszy od pozostałych, jest często zaniedbywany.



Rys. 4. Charakterystyki statyczne punktów pracy elektrowni wiatrowej WinPACT 1.5 MW w funkcji prędkości wiatru

Układ sterowania turbiny wiatrowej

Rysunek 5 przedstawia schemat turbiny wiatrowej z rozważanym układem regulacji i przepływem sygnałów. Schematy zastosowanych w pracy regulatorów momentu generatora i kąta natarcia łopatek wirnika turbiny zostały pokazane na rysunku 6 w formie schematów blokowych środowiska Simulink, które zostało wykorzystane do przeprowadzenia symulacji.

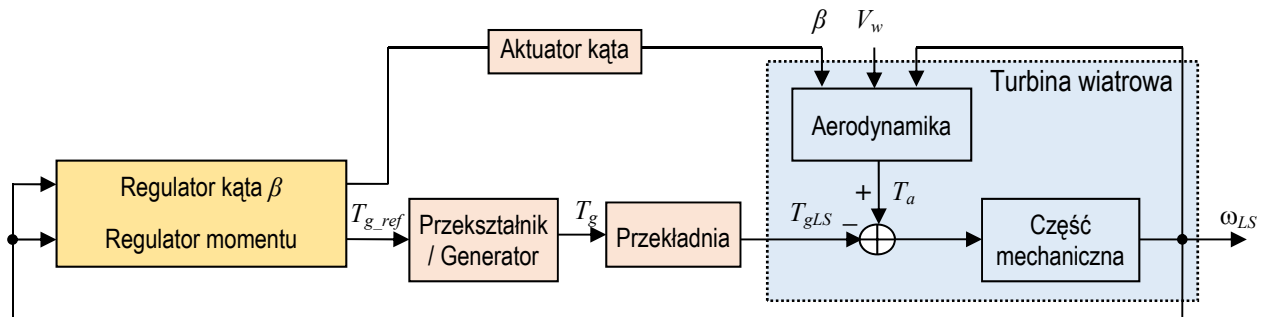
Na rysunku 6a pokazano regulator momentu turbiny. W Regionie 2, poniżej prędkości znamionowej generatora, regulator działa w trybie MPPT zgodnie ze wzorem (7). Po osiągnięciu prędkości znamionowej generatora (co jest równoważne prędkości wiatru V_{w3}) regulacja wchodzi w Region 3, gdzie moment generatora rośnie liniowo z prędkością wiatru. Ponieważ V_w nie jest wykorzystywane w regulacji zastosowano stromą liniową zależność $T_g(\omega_g)$ od $0,99\omega_{gn}$ do znamionowych wartości momentu i prędkości obrotowej. Dodatkowy składnik $-D\omega_{LS}$ kompensuje straty momentu turbiny związane z tarciami lepkiem (8). Na wyjściu zastosowano ograniczenie momentu do wartości

maksymalnej, w tym przypadku $T_{gmax}=T_{gn}$, oraz przeliczenie momentu na stronę szybkoobrotową HS (*high speed*).

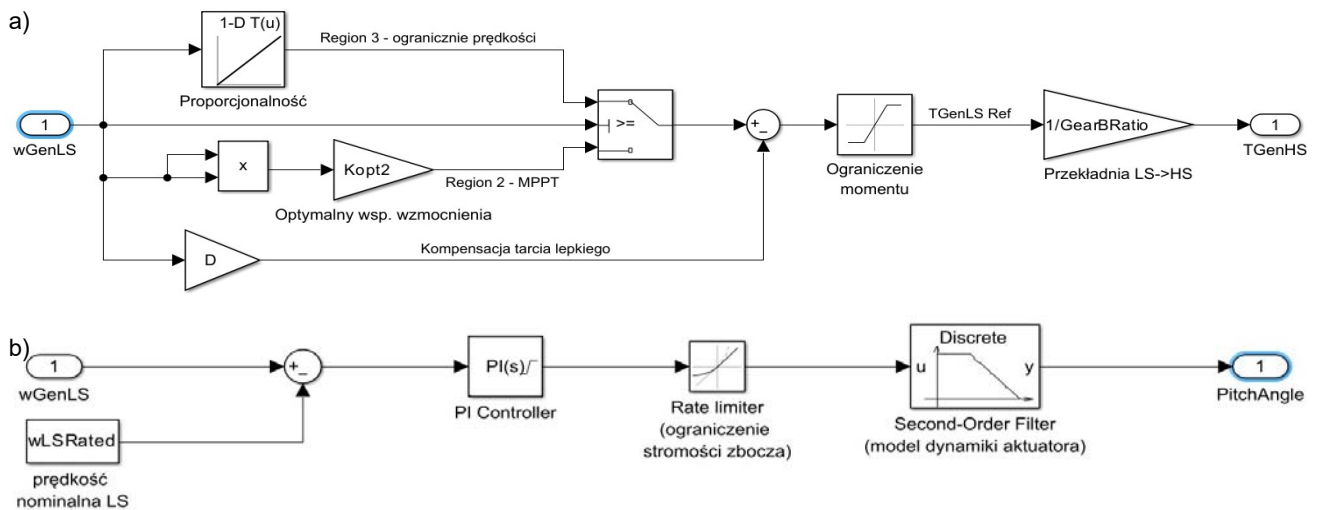
Na rysunku 6b pokazano regulator kąta ustawienia łopaty wirnika, który działa w Regionie 4, czyli jeśli $\omega_g > \omega_{gn}$. Zastosowano regulator PI o transmitancji:

$$(9) \quad G_{PI}(s) = k_p + k_i \frac{1}{s},$$

z ograniczeniem $\beta_{opt} \leq \beta \leq \beta_{max} = 30^\circ$. Nastawy regulatora $k_p=60$, $k_i=30$, zostały obliczone dla zlinearyzowanego modelu Simulinka (funkcja `linearize` toolboku Simulink Control Design) w otoczeniu β_{opt} przy założeniu pulsacji odciążenia układu otwartego $\omega_g=1$ rad/s i zapasu fazy $PM=70^\circ$. Element wykonawczy (aktuator) układu nastawiania kąta został zamodelowany jako transmitancja drugiego rzędu z ograniczeniem stromości zbocza narastania/opadania do 2° na sekundę.



Rys. 5. Schemat turbiny wiatrowej z układem regulacji (indeks LS oznacza wartości po wolnoobrotowej stronie przekładni)



Rys. 6. Schematy Simulinka: a) regulatora momentu turbiny w Regionach 2 i 3 (odpowiednio: regulacji MPPT i ograniczenia prędkości obrotowej), b) regulatora i aktuatora kąta natarcia β łopaty turbiny w Regionie 4 (powyżej znamionowej prędkości wiatru)

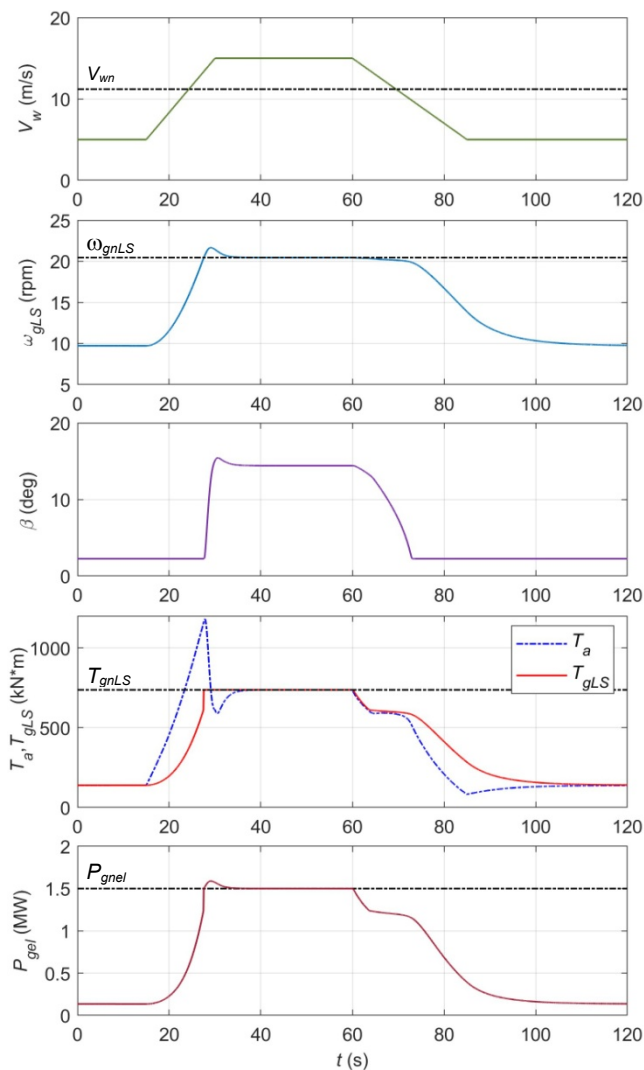
Wyniki badań symulacyjnych

Przebiegi pokazujące działanie elektrowni wiatrowej WinPACT dla teoretycznego trapezowego profilu prędkości wiatru o wartościach V_w od 5 m/s do 15 m/s zostały przedstawione na rysunku 7. Przy początkowej (i końcowej) prędkości wiatru układ pracuje w Regionie 2 w punkcie mocy maksymalnej. W czasie narastania prędkości wiatru układ działa w trybie MPPT do wyjścia z Regionu 2, a następnie w Regionie 3 z wyróżnikiem szybkoobieźności $\lambda < \lambda_{opt}$ (ponieważ prędkość obrotowa jest ograniczana, a prędkość wiatru rośnie). Po osiągnięciu znamionowej prędkości obrotowej ω_{gnLS} następuje skok momentu generatora (w 28. sekundzie symulacji) wskutek dużej stromości regulacji momentu w Regionie 3. Po przekroczeniu znamionowej prędkości $V_{wn}=11,2$ m/s, w Regionie 4, zaczyna działać regulator kąta natarcia łopaty wirnika, co powoduje szybki spadek dużej wartości momentu aerodynamicznego do momentu znamionowego generatora. Wytwarzana moc elektryczna jest ograniczana, po niewielkim przeregulowaniu, do wartości znamionowej $P_{gnet}=1,5$ MW.

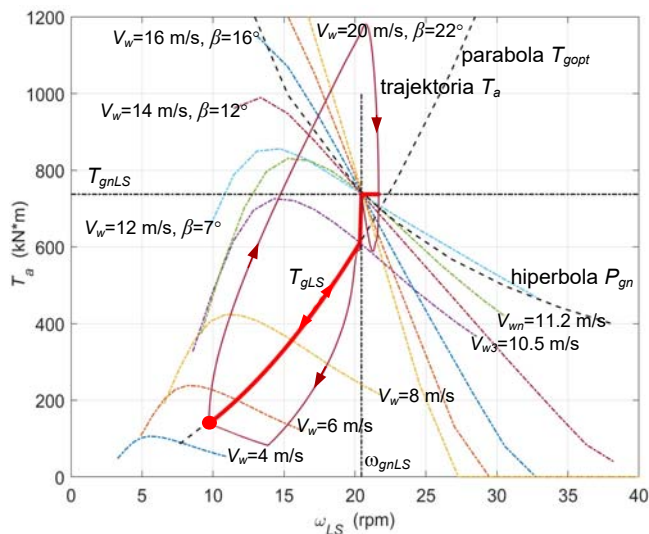
Kiedy prędkość wiatru zaczyna spadać, prędkość obrotowa również spada nieco poniżej ω_{gnLS} , co powoduje nie tylko zmniejszanie kąta β , ale również, z powodu podanego powyżej, szybki spadek momentu generatora (od 60. sekundy symulacji), a w konsekwencji niepotrzebny spadek wytwarzanej mocy.

Na rysunku 8 pokazano działanie układu za pomocą wykresów parametrycznych (parametrem jest czas) na płaszczyźnie $\omega_{LS}-T_a$. Rodzina krzywych pokazuje zależność momentu aerodynamicznego turbiny T_a w stanie ustalonym od prędkości obrotowej dla różnych prędkości wiatru ($\beta=\beta_{opt}$). Dla prędkości wiatru powyżej prędkości znamionowej podane są również kąty β odpowiednich punktów pracy. Pogrubiona linia pokazuje trajektorię momentu T_{gLS} wytwarzanego przez generator, a linia cienka ze strzałkami pokazuje trajektorię momentu aerodynamicznego turbiny T_a . Widoczne jest, że w Regionie 2 trajektoria momentu generatora porusza się po paraboli momentu optymalnego (linia przerywana), a w Regionie 3 moment wzrasta liniowo z prędkością wiatru, natomiast prędkość obrotowa jest ograniczana do wartości

znamionowej ω_{gnLS} . Krótki odcinek trajektorii momentu generatora na poziomie T_{gLS} oznacza przeregulowania prędkości obrotowej i mocy z rysunku 7.

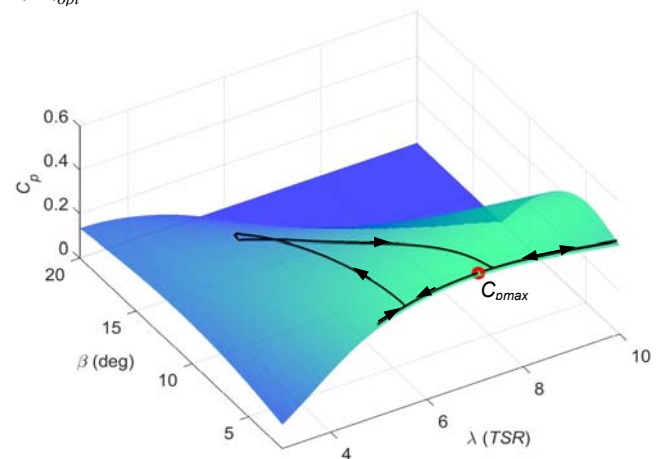


Rys. 7. Praca elektrowni wiatrowej WinPACT 1,5 MW dla teoretycznego trapezowego profilu prędkości wiatru przekraczającego prędkość nominalną V_{wn}



Rys. 8. Przebiegi zmiennych dla profilu wiatru pokazanego na rysunku 7

Na rysunku 9 pokazano trajektorię momentu aerodynamicznego turbiny na powierzchni $C_p(\lambda, \beta)$. W początkowej fazie wzrostu prędkości wiatru układ pracuje przy stałym kącie natarcia łopatek $\beta_{opt}=2^\circ$ (krawędź powierzchni) z wyróżnikiem szybkobieżności $\lambda < \lambda_{opt}=7,1$. Kiedy prędkość wiatru przekracza prędkość znamionową, kąt ustawienia łopatek wzrasta i trajektoria podąża po powierzchni w stronę mniejszych wartości C_p w kierunku punktu ustalonego dla najwyższej prędkości wiatru, który ma współrzędne $C_p=0,2$, $\lambda=5$, $\beta=14,5^\circ$. W fazie zmniejszania się prędkości wiatru trajektoria wraca do punktu C_{pmax} od strony wartości wyróżnika szybkobieżności $\lambda > \lambda_{opt}$.



Rys. 9. Trajektoria pracy turbiny wiatrowej

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi pokazujące działanie układu turbina-generator dla zmiennej prędkości wiatru ze składową losową. Profil efektywnej prędkości wiatru jest opisany wyrażeniem:

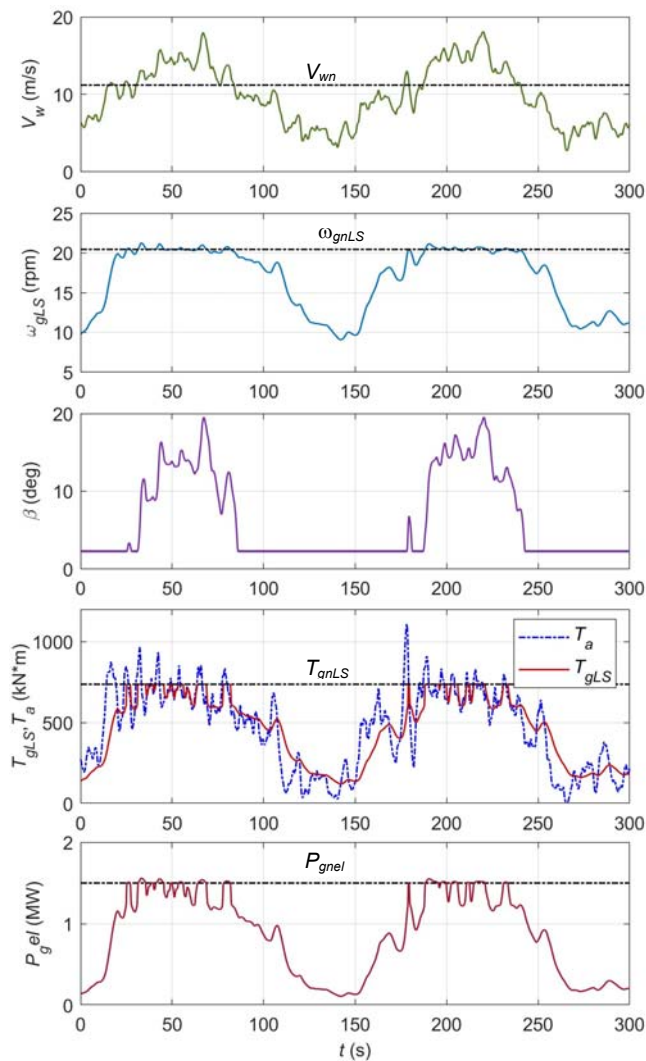
$$(10) \quad V_w(t) = 10 + 5 \sin\left(\frac{2\pi}{150}t + \frac{\pi}{4}\right) + s_{LP}(t),$$

gdzie składowa losowa $s_{LP}(t)$ jest szumem o rozkładzie normalnym, zerowej średniej i wariancji $\sigma_s^2=4$, przefiltrowanym filtrem dolnoprzepustowym o paśmie przenoszenia $f_{LP}=0,2$ Hz. Z zamieszczonych przebiegów widać, że zachowane są te same właściwości regulacji co w poprzednim przykładzie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki ciągłej regulacji prędkości obrotowej, momentu i mocy elektrycznej generatora oraz kąta ustawienia łopatek wirnika elektrowni wiatrowej z turbiną typu VSVP o dużej mocy w pełnym zakresie prędkości wiatru. Założono podstawowy model dynamiki części mechanicznej i przyjęto, że jedyną wielkością mierzoną jest prędkość obrotowa wału turbozespołu. Z tego powodu pojawia się trudność w wyznaczaniu w regulatorze zadanego momentu generatora w Regionie 3 (blisko poniżej znamionowej prędkości wiatru) występującym na charakterystykach statycznych analizowanej turbiny WinPACT. Zastosowana w tej strefie metoda liniowej stromej zależności momentu od prędkości obrotowej, czyli stałego, chociaż nie optymalnego wyróżnika λ , prowadzi do gwałtownych zmian momentu generatora, co oznacza duże obciążenia mechaniczne wału i przekładni oraz prowadzi do zakłóceń (wzrostów i spadków) generowanej mocy. Ten problem może być usunięty, jeżeli układ regulacji momentu będzie wykorzystywał dodatkowo mierzoną lub estymowaną

prędkość wiatru [9,10]. W praktyce kąt natarcia łopat jest zwykle nastawiany okresowo co kilka minut na podstawie uśrednionej prędkości wiatru, aby uniknąć problemów wynikających z regulacji ciągłej.



Rys. 10. Działanie elektrowni wiatrowej dla wiatru zmiennego ze składową losową

Autorzy:

dr inż. Janusz Baran, e-mail: janusz.baran@pcz.pl,
 dr inż. Andrzej Jąderko, e-mail: andrzej.jaderko@pcz.pl,
 Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny,
 Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

LITERATURA

- [1] Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym (2013), WNT, Warszawa
- [2] Bianchi F., De Battista H., Mantz R., Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design (2007), Springer-Verlag, London
- [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] Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S., Control Strategies for Variable-speed Fixed-pitch Wind Turbines, *Wind Power*, Ed. By S.M. Muyeen (2010), InTech, 209-232
- [5] Baran J., Jąderko A., Metoda śledzenia punktu mocy maksymalnej do sterowania turbiną wiatrową o regulowanej prędkości obrotowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019) nr 12, 89-92
- [6] Baran J., Jąderko A., Sterowanie elektrownią wiatrową z estymacją momentu aerodynamicznego przy dużych prędkościach wiatru, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020) nr 12, 146-149
- [7] Lubośny Z., Wind Turbine Operation In Electric Power Systems. Advanced Modeling (2003), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg
- [8] Rinker J., Dykes K., WindPACT Reference Wind Turbines, National Renewable Energy Laboratory (2018), NREL/TP-5000-67667
- [9] Jia Ch., Wang L., Meng E. *et al.*, Combining LIDAR and LADRC for intelligent pitch control of wind turbines (2021), *Renewable Energy*, doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.065
- [10] Sierra-Garcia J.E., Santos M., Improving Wind Turbine Pitch Control by Effective Wind Neuro-Estimators (2021), *IEEE Access*, doi 10.1109/access.2021.3051063