

Sterowanie kątem ustawienia łopat turbiny wiatrowej w zakresie dużych prędkości wiatru metodą LPV z programowanym wzmocnieniem

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu regulacji prędkości obrotowej, momentu obrotowego i mocy elektrycznej generatora oraz kąta natarcia łopat wirnika elektrowni wiatrowej z turbiną VSVP (zmienna prędkość, zmienny kąt natarcia łopat) w zakresie dużych prędkości wiatru. Dla układów opisywanych lokalnie za pomocą modelu liniowego o zmiennych parametrach (LPV) zaproponowano sterowanie odporne na zakłócenia. Nieliniowa postać modelu jest linearyzowana w dyskretnych punktach pracy systemu (prędkościach wiatru).

Abstract. The paper presents the results of simulation tests of the system for regulating the rotational speed, torque and electrical power of the generator as well as the attack angle of the rotor blades of a wind power plant with a VSVP (variable-speed variable-pitch) turbine in the range of high wind speeds. Disturbance-resistant control has been proposed for systems described locally with a linear model with variable parameters (LPV). The nonlinear form of the model is linearized at discrete system operating points (wind speeds). (**Control of the wind turbine blades angle in the range of high wind speeds by LPV method with programmable gain**)

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, zmienny kąt natarcia łopat, model ze zmiennymi parametrami
Keywords: wind turbine, variable attack angle of blades, model with variable parameters

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. Turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu budowane na lądzie przystosowane są do pracy przy prędkości wiatru do ok. 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. Rozróżnia się cztery obszary (strefy) pracy turbiny wiatrowej.

Pierwszą strefą pracy jest start turbiny przy minimalnej prędkości wiatru. W drugiej strefie pracy, w zakresie średnich prędkości wiatru pomiędzy prędkością startu a prędkością znamionową, układ regulacji ma za zadanie sterowanie prędkością wału w sposób zapewniający maksymalną wartość możliwą do uzyskania energii. 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 [1].

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 można zmniejszyć prędkość obrotową wirnika i ograniczyć wytwarzaną moc do bezpiecznej wartości.

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” (kąt natarcia jest równy 90°).



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.

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

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

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 łopatek turbiny (kąt natarcia, *blade pitch angle*), λ - tzw. wyróżnik szybkobieżności turbiny (*tip-speed ratio, TSR*):

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

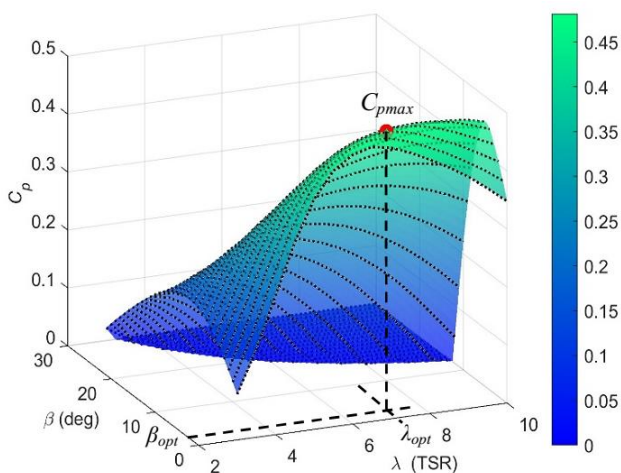
gdzie: ω - prędkość kątowna wirnika turbiny.

Moc aerodynamiczna wytwarzana przez turbinę rośnie z trzecią potęgą prędkości wiatru. Zależność współczynnika wykorzystania mocy C_p od wyróżnika szybkobieżności λ i kąta ustawienia łopatek 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 nieprzekraczającej wartości znamionowej dla danej turbiny, optymalny kąt ustawienia łopatek (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 łopatek, 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.

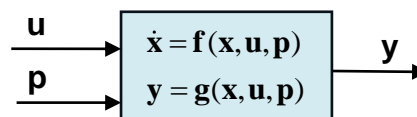


Rys. 3. Interpolowana charakterystyka współczynnika wykorzystania mocy $C_p(\lambda, \beta)$ turbiny wiatrowej WinPACT z generatorem o mocy 1,5 MW (punkty na wykresie oznaczają wartości stabelaryzowane)

Charakterystyka współczynnika wykorzystania mocy $C_p(\lambda, \beta)$ turbiny WinPACT [5] 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 szybkobieżności $\lambda_{opt}=7,1$, jest równy $\beta_{opt}=2^\circ$.

Metoda LPV do sterowania nieliniowym układem dynamicznym

Istotną klasą zadań projektowania układów regulacji jest projektowanie sterowania dla nieliniowych układów dynamicznych zależnych od pewnego parametru, jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Nieliniowy układ dynamiczny z wejściami sterującymi $u(t)$ i wejściami $p(t)$, traktowanymi jako pochodzące z zewnątrz parametry; $x(t)$ jest wektorem zmiennych stanu

Metoda LPV (*Linear Parameter - Varying*) [1, 2] polega na modelowaniu tego typu układu nieliniowego w sąsiedztwie punktu równowagi za pomocą *liniowego* układu dynamicznego, którego lokalna reprezentacja zmiennych stanu zależy od pochodzących z zewnątrz niestacjonarnych parametrów $p(t)$:

$$(4) \quad \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \underbrace{\mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)}_{\delta_0} + \mathbf{A}(\mathbf{p})(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{B}(\mathbf{p})(\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) \\ \mathbf{y} &= \underbrace{\mathbf{g}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)}_{\mathbf{y}_0} + \mathbf{C}(\mathbf{p})(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{D}(\mathbf{p})(\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) \end{aligned}$$

gdzie:

$$(5) \quad \mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}, \quad \mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)},$$

$$\mathbf{C} = \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}, \quad \mathbf{D} = \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}_0)}$$

Wartości δ_0 , \mathbf{x}_0 , \mathbf{u}_0 , i \mathbf{y}_0 są przesunięciami (*offsets*) punktu pracy, które należy uwzględnić przy zmiennym \mathbf{p} . Liniowa reprezentacja (4) umożliwia projektowanie z wykorzystaniem lokalnie liniowych regulatorów (np. PID), których parametry są zależne od parametrów *programujących* \mathbf{p} (stąd nazwa *gain-scheduling* – programowane wzmocnienie). Badania symulacyjne wykonano za pomocą oprogramowania Matlab Simulink dla układu generator-turbina WinPact 1,5 MW [5, 6, 7].

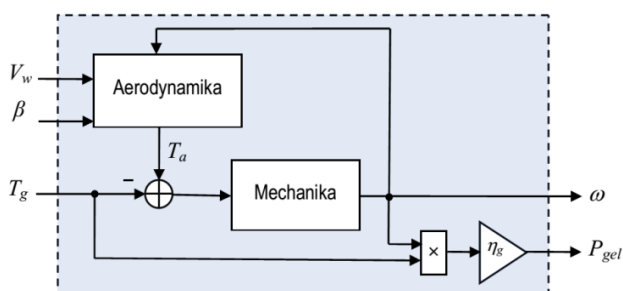
Model elektrowni wiatrowej

Do modelowania dynamiki układu generator-turbina zastosowano prosty model jednomasowy pomijający sprężystość wału:

$$(6) \quad J_{eq} \frac{d\omega_{LS}}{dt} = T_a - T_{gLS},$$

gdzie: $J_{eq}=J_r+J_gG^2$ jest zastępczym momentem bezwładności na wale turbiny po stronie wolnoobrotowej LS, G – przełożenie przekładni. Moment pochodzący od tarcia nie jest uwzględniony we wzorze (6), ponieważ jest on znacznie mniejszy od pozostałych składników.

Na rysunku 5 pokazano podstawowy nieliniowy model elektrowni wiatrowej. Kąt ustawienia łopát wirnika turbiny wiatrowej β i moment generatora T_g są wejściami sterującymi \mathbf{u} , efektywna prędkość wiatru V_w jest zewnętrznym (zmiennym w czasie) parametrem p . Prędkość obrotowa wirnika turbiny ω i moc elektryczna generatora są wyjściami modelu, η_g – sprawność generatora.



Rys. 5. Nieliniowy model elektrowni wiatrowej

Projektowanie układu regulacji LPV dla elektrowni wiatrowej w strefie ograniczania mocy i prędkości

W układzie regulacji z programowanym wzmacnieniem, parametry regulatora są automatycznie dostosowywane w zależności od czasu, warunków pracy lub parametrów obiektu. Programowanie wzmacnienia jest powszechną strategią sterowania systemami, których dynamika zmienia się w czasie lub warunkach pracy. Takie algorytmy regulacji stosowane są do obiektów liniowych o zmiennych parametrach (LPV – *Linear Parameter Varying*), jak również do obiektów nieliniowych.

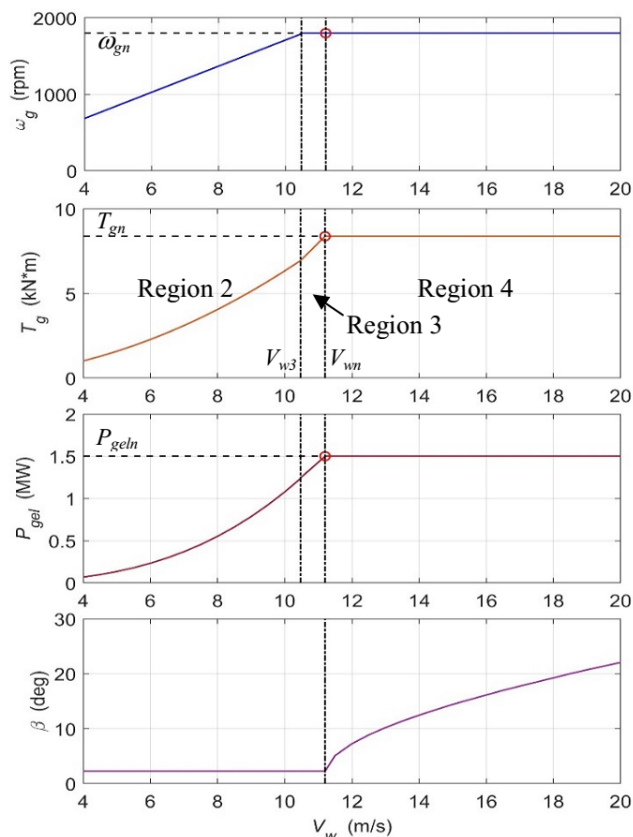
Do projektowania regulacji i przeprowadzenia badań symulacyjnych wykorzystano funkcje toolboksów Control System Toolbox i Simulink Control Design Matlaba [6, 7]. Poniżej opisano kolejne kroki projektowania układu regulacji.

Krok 1. Wyznaczenie charakterystyk punktów równowagi (punktów pracy w stanie ustalonym) układu generator-turbina WinPact 1,5 MW [5] w funkcji V_w , za pomocą funkcji `findop` (*find operating point*) toolboksów Control System Toolbox [6] dla parametru V_w od 4 do 20 m/s z krokiem 0,5 m/s, $V_{w3}=10,5$ m/s i V_{wn} (patrz rys. 6). W Regionie 4 (strefie), powyżej nominalnej prędkości wiatru V_{wn} , prędkość obrotowa turbiny, wytwarzana moc elektryczna i moment generatora są ograniczane do wartości maksymalnych (w tym przypadku znamionowych) poprzez automatyczne zwiększanie przy wzroście prędkości wiatru kąta ustawienia łopát wirnika do wartości $\beta > \beta_{opt}$, co powoduje zmniejszenie C_p i redukcję momentu aerodynamicznego T_a . Zadanie polega na zaprojektowaniu działającego w Regionie 4 regulatora LPV kąta ustawienia łopát wirnika.

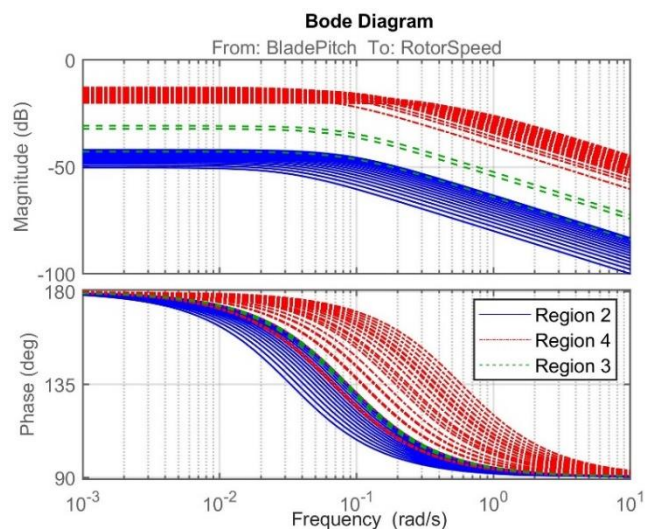
Krok 2. Lokalna linearyzacja modelu Simulinka układu z rysunku 2, opisanego równaniami (3, 6), za pomocą funkcji `linearize` toolboksów Simulink Control Design [7]. Rysunek 7 przedstawia rodzinę charakterystyk częstotliwościowych Bodego części SISO lokalnych liniowych aproksymacji LPV $G(1,2)$ od wejścia 2 (kąt natarcia łopát) do wyjścia 1 (prędkość obrotowa wału turbiny) otrzymaną przy zmianie wartości parametru V_w .

Krok 3. Projektowanie regulatora PI kąta β ustawienia łopát o parametrach programowanych prędkością wiatru (*gain-*

scheduling) w Regionie 4 (dla wartości prędkości wiatru większych od prędkości znamionowej $V_{wn}=11,2$ m/s i rosnących do prędkości 20 m/s) dla wyznaczonego modelu LPV. Regulator będzie projektowany dla części modelu LPV $G(1, 2)$ od wejścia 2 do wyjścia 1.



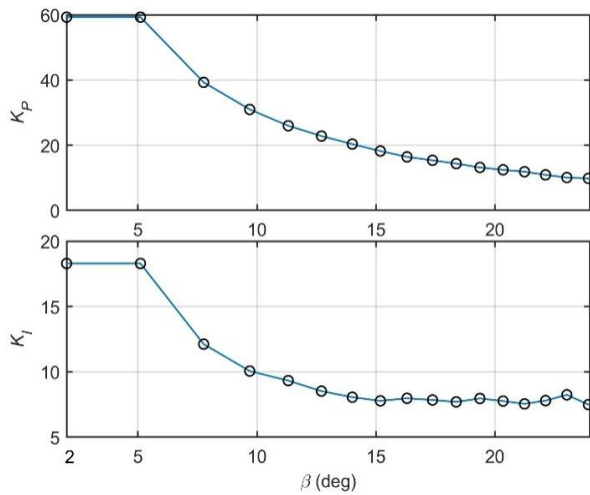
Rys. 6. Charakterystyki statyczne punktów pracy elektrowni wiatrowej WinPACT 1,5 MW w funkcji efektywnej prędkości wiatru V_w



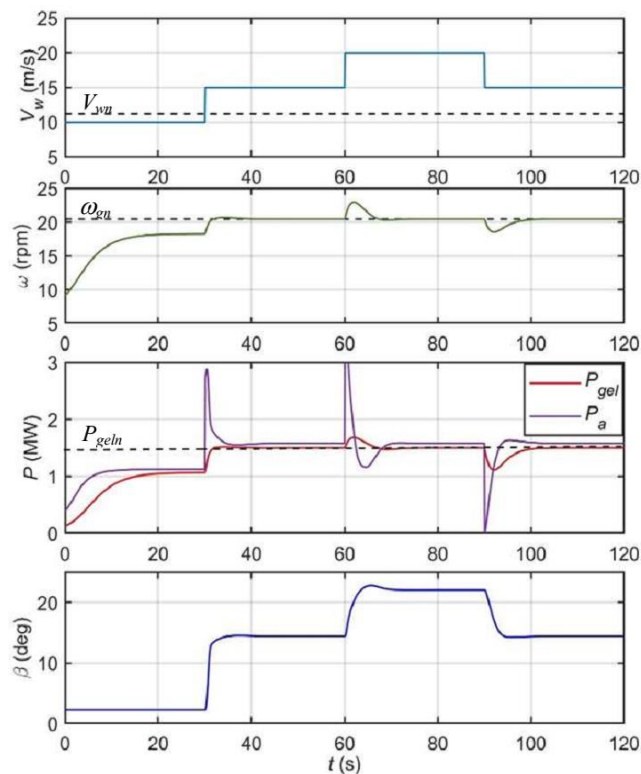
Rys. 7. Rodzina charakterystyk częstotliwościowych Bodego lokalnych liniowych aproksymacji $G(1,2)$ modelu nieliniowego od wejścia 2 (kąt natarcia łopát) do wyjścia 1 (prędkość obrotowa wału turbiny) dla parametru V_w w zakresie od 4 do 20 m/s

Zadanie projektowania można zrealizować z wykorzystaniem funkcji `pidtune` Matlaba, która dostraja parametry regulatora do podanego modelu liniowego w taki sposób, aby uzyskać zadaną pulsację odciążenia układu

otwartego (przyjęto $\omega_c = 0.628$ rad/s, czyli $f_c = 0.1$ Hz), która określa szybkość odpowiedzi i powinna być dostosowana do szybkości działania aktuatora kąta ustawienia łopát, oraz zadany zapas fazy (przyjęto $PM = 70^\circ$) określający zapas stabilności, w szczególności maksymalne przeregulowanie odpowiedzi. Zmienną wybranej części SISO $G(1, 2)$ modelu LPV podaje się ze znakiem minus ze względu na ujemne sprzężenie zwrotne. Zmiany wartości parametrów lokalnych regulatorów PI kąta ustawienia łopát w funkcji kąta β jako współrzędnej punktów pracy w Regionie 4 (dla $V_w > V_{wn} = 11,2$ m/s) pokazano na rysunku 8. Pierwsze zdublowane wartości odpowiadają nastawom dla $V_w = 11,5$ m/s i $\beta = 5,1^\circ$. Dla wartości β pomiędzy zaznaczonymi punktami stosowana jest interpolacja liniowa.

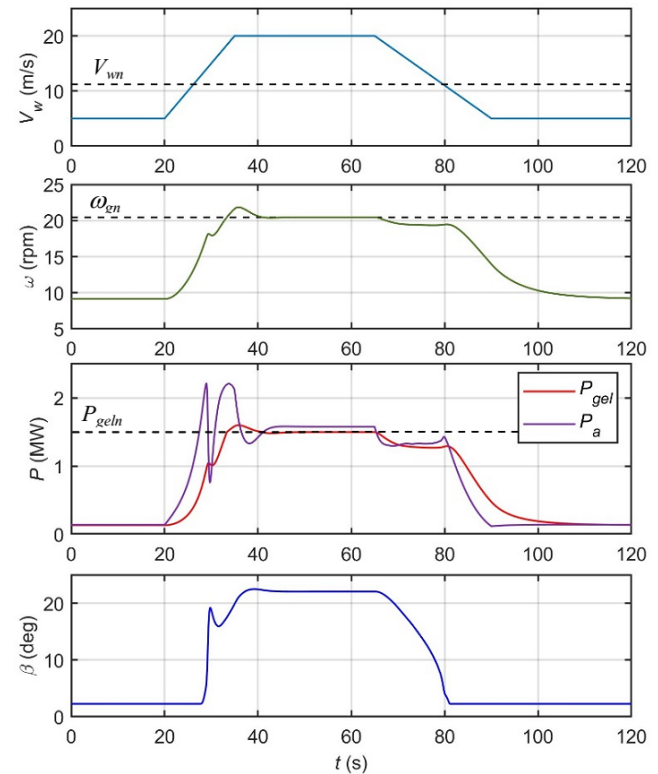


Rys. 8. Parametry lokalnych regulatorów PI kąta ustawienia łopát w Regionie 4 dla wartości β wyznaczonych jako współrzędne punktów pracy dla $V_w > V_{wn} = 11,2$ m/s



Rys. 9. Przebiegi symulacji sterowania elektrownią wiatrową z regulatorem LPV PI kąta ustawienia łopát w Regionie 4 dla teoretycznego skokowego przebiegu prędkości wiatru

Na rysunku 9 pokazano przebiegi symulacji sterowania elektrownią wiatrową z regulatorem LPV PI kąta ustawienia łopát z mechanizmem *anti-windup* w Regionie 4 dla teoretycznego skokowego przebiegu prędkości wiatru, natomiast na rysunku 10 pokazano przebiegi symulacji sterowania dla teoretycznego trapezowego przebiegu prędkości wiatru. Moc elektryczna P_{gel} generatora w stanach ustalonych jest mniejsza od mocy aerodynamicznej P_a przechwytywanej przez turbinę ze względu na uwzględnienie sprawności generatora $\eta_g = 0,95$. W Regionie 2 poniżej V_w i ω_{gn} zastosowano nieliniową regulację MPPT (*Maximum Power-Point Tracking*) momentu generatora $T_{gref} = K_{opt} \omega^2$.



Rys. 10. Przebiegi symulacji sterowania elektrownią wiatrową z regulatorem LPV PI kąta ustawienia łopát z mechanizmem *anti-windup* w Regionie 4 dla teoretycznego trapezowego przebiegu prędkości wiatru

Wyniki badań symulacyjnych

Dla teoretycznego skokowego profilu prędkości wiatru (patrz rys. 9) układ pracuje początkowo, przy prędkości wiatru poniżej V_{wn} , w Regionie 2 w punkcie mocy maksymalnej MPPT z wyróżnikiem szybkobieżności $\lambda = \lambda_{opt}$. W wyniku skokowego wzrostu prędkości wiatru od 10 do 15 m/s (czyli powyżej znamionowej prędkości $V_{wn} = 11,2$ m/s) i gwałtownego wzrostu mocy aerodynamicznej P_a układ wychodzi z Regionu 2, przechodzi przez Region 3, osiągając prędkość ω_{gn} po stronie wolnoobrotowej turbozespołu, i wchodzi do Regionu 4, gdzie wyróżnik szybkobieżności $\lambda < \lambda_{opt}$, ponieważ prędkość obrotowa jest ograniczana, a prędkość wiatru rośnie. Następuje skok mocy elektrycznej generatora z niewielkim przeregulowaniem do ograniczenia na poziomie $P_{geln} = 1,5$ MW poprzez zwiększenie kąta ustawienia łopát do $\beta = 14^\circ$. Działanie regulatora kąta natarcia łopát wirnika powoduje szybki spadek dużej wartości mocy aerodynamicznej do wartości znamionowej (większej od P_{geln} ze względu na sprawność generatora). W taki sam sposób układ pracuje w

Regionie 4 przy skokowej zmianie prędkości wiatru od 15 m/s do 20 m/s. Z powodu gwałtownego wzrostu mocy aerodynamicznej widoczna jest reakcja układu w postaci niewielkiego przeregulowania prędkości obrotowej i mocy elektrycznej. Te przeregulowania są kompensowane poprzez dalszy wzrost kąta ustawienia łopatek do $\beta=22^\circ$.

Kiedy prędkość wiatru skokowo spada, lecz utrzymuje się nadal w Regionie 4, widoczny jest szybki spadek mocy aerodynamicznej, a w konsekwencji chwilowy spadek prędkości obrotowej turbiny i wytwarzanej mocy generatora. Działanie regulatora kąta natarcia łopatek wirnika zmniejsza kąt β , co powoduje szybki powrót mocy aerodynamicznej i powrót mocy elektrycznej i prędkości turbiny do wartości znamionowych.

W bardzo podobny sposób układ pracuje dla teoretycznego trapezowego profilu wiatru (patrz rys. 10).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ciągłej regulacji prędkości obrotowej, momentu i mocy elektrycznej generatora oraz kąta ustawienia łopatek wirnika elektrowni wiatrowej z turbiną typu VSVP o dużej mocy, w zakresie dużych prędkości wiatru. Dla układów opisywanych lokalnie za pomocą modelu liniowego o zmiennych parametrach (LPV) zaproponowano sterowanie odporne na zakłócenia. Nieliniowa postać modelu jest linearyzowana w dyskretnych punktach pracy systemu (prędkościach wiatru). Założono podstawowy (jednomasowy) model dynamiki części mechanicznej.

W obliczeniach wykorzystano parametry turbiny wiatrowej WindPACT 1,5 MW [5]. Do przeprowadzenia badań symulacyjnych wykorzystano Control System Toolbox i Simulink Control Design Matlab, za pomocą których przeprowadzono omówione kroki projektowania regulacji: wyznaczono charakterystyki punktów równowagi

(punktów pracy w stanie ustalonym) układu generator-turbina WinPact 1,5 MW w funkcji prędkości wiatru, dokonano lokalnej linearyzacji modelu, zaprojektowano regulator PI kąta β ustawienia łopatek o parametrach programowanych prędkością wiatru (*gain-scheduling*) w Regionie 4 dla wartości prędkości wiatru większych od prędkości znamionowej.

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] Bianchi F., De Battista H., Mantz R., Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, Springer-Verlag, 2007
- [2] Adegas F., Sloth Ch., Stoustrup J., Structured Linear Parameter Varying Control of Wind Turbines, chapter 12, *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*, pod red. Mohammadpour J., Scherer C., Springer-Verlag, (2012), 303-338
- [3] 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
- [4] Baran J., Jąderko A., Sterowanie elektrownią wiatrową z estymacją momentu aerodynamicznego przy dużych prędkościach wiatru, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020) nr 12, 146-149
- [5] Rinker J., Dykes K., WindPACT Reference Wind Turbines, National Renewable Energy Laboratory (2018), NREL/TP-5000-67667
- [6] Control System Toolbox. User's Guide R2023b, The Mathworks Inc., Natick, (2023)
- [7] Simulink Control Design. User's Guide R2023b, The Mathworks Inc., Natick, (2023)