

Układ sterowania oraz model siłowni wiatrowej

mgr inż. Grzegorz Barzyk

Politechnika Szczecińska

Słowa kluczowe: Siłownie wiatrowe, układy sterowania, model matematyczny

Streszczenie: W referacie odniesiono się do zadań układów sterowania współczesnych siłowni wiatrowych. Zaprezentowano ogólny opis struktury modelu matematycznego stanowiącego część rozprawy doktorskiej Autora. Odniesiono się do zalet stosowania zasobów wiedzy eksperckiej

1. Rola układu sterowania współczesnej siłowni wiatrowej

Zastosowanie w systemach sterowania siłowni wiatrowych najnowszych trendów technologicznych powoduje ewidentny wzrost ich sprawności oraz wynikającej stąd produktywności. Stopniowa ewaluacja współcześnie stosowanych siłowni wiatrowych oraz ich układów sterowania od ręcznych poprzez pół- do w pełni zautomatyzowanych, charakteryzuje się także przejściem z metod pasywnych do tzw. aktywnych.

W związku z postępem cywilizacyjnym oraz przełamywaniem kolejnych barier technicznych, zakresowi działania układów sterowania poddawanych jest coraz więcej komponentów siłowni wiatrowych, począwszy od regulacji mocy wyjściowej a skończywszy na kontroli hamulców zarówno płatów wirnika jak i gondoli. Systemy sterowania zapewniające kontrolę zarówno czynników aerodynamicznych jak i typowo energetycznych, mogą zapewnić zwiększenie ilości produkowanej energii oraz zapobiec szeregowi przeregulowań lecz ich zastosowanie i wykorzystanie stanowi zwykle także swoisty kompromis. Nadmierne rozbudowywanie układów sterowania oraz wykorzystywanie podsystemów wchodzących w ich skład, to oprócz zwiększenia prawdopodobieństwa uszkodzenia poszczególnych składowych, także zwiększenie tzw. potrzeb własnych zarówno energetycznych jak i związanych z czasem reakcji na ewentualne zmiany. Ubogi system sterowania to z kolei zwiększone ryzyko braku optymalnych zachowań w stosunku do wymuszeń.

Proces konwersji energii wiatru na energię elektryczną za pośrednictwem siłowni wiatrowej jest niewątpliwie przykładem procesu nieliniowego. Jak zatem najlepiej sterować tym nieliniowym układem wielu zmiennych: aerodynamicznych, mechanicznych i elektrycznych? Jest to zagadnienie stanowiące wyzwanie dla każdego z projektantów systemów sterowania współczesnych siłowni wiatrowych, próbujących sięgać po najnowsze rozwiązania już stosowane w praktyce, jak i pojawiające się dopiero w fazie doniesień czysto naukowych.

Docelowo poszukiwania te skupiają się na osiągnięciu maksymalnej mocy produkowanej przez siłownię wiatrową przy jednoczesnej minimalizacji wpływu zarówno obciążeń tzw. sieciowych oraz zmian prędkości wiatru. Zagadnienie to, w przypadku „konwencjonalnych” układów sterowania jest tym trudniejsze do realizacji, że sygnał wejściowy w postaci wiatru oddziałuje na rotor siłowni nie tylko jako wymuszający ciągły, lecz często także jako gwałtownie turbulentny oraz powodujący nieoczekiwane wpływy wsteczne, hamujące.

Nieliniowość takich oddziaływań oraz ich złożoną nieprzewidywalność, można jednak próbować opisywać oraz z wysoką jakością kontrolować poprzez np. układ sterowania pracujący w oparciu o zasoby wiedzy eksperckiej, w tym w szczególności zasady logiki rozmytej, ang. fuzzy logic. Celowi temu służą poszczególne składniki modelu matematycznego rzeczywistego obiektu – siłowni wiatrowej, w tym: model prędkości wiatru, model aerodynamiki, model układów mechaniki oraz generatora elektrycznego.

2. Zadania układu sterowania siłowni wiatrowej

Współczesne siłownie wiatrowe pracują w pełni automatycznie. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu nowoczesnych układów sterowania, nierzadko wykorzystujących wiedzę ekspercką, spełniających następujące funkcje:

- Automatyczne naprowadzanie wirnika na wiatr w celu maksymalnego wykorzystania energii wiatru
- Załączanie i wyłączenie elektrowni (Tyrystorowe włączenie generatorów w celu ograniczenia prądu włączenia).
- Automatyczną płynną regulację napięcia i częstotliwości generatora prądu
- Włączanie i wyłączenie korekcji mocy biernej.
- Odkręcanie kabli wiązki energetyczno-sygnałowej
- Monitorowanie sieci energetycznej
- Monitorowanie pracy elektrowni wiatrowej
- Zatrzymywanie turbiny w przypadku awarii.

Układ sterowania kontroluje pracę elektrowni poprzez pomiar podstawowych parametrów siłowni, takich jak np. kierunek wiatru; prędkość wiatru, obroty wału, obroty generatora, napięcie generatora i prądy fazowe, kolejność faz, kąt natarcia łopat wirnika, drgania własne, napięcie zasilania układów wykonawczych.

Układy sterowania stosowane we współczesnych elektrowniach wiatrowych świadczą o jakości tych urządzeń. Układy te różnią się metodami regulacji mocy oddawanej oraz podstawowymi koncepcjami pracy. Wyróżnia się dwie koncepcje pracy siłowni wiatrowej:

- ze stałą prędkością obrotową,
- ze zmienną prędkością obrotową.

Ponadto można mówić o regulacji aktywnej lub o samoczynnym (pasywnym) dostosowaniu prędkości obrotowej turbiny i kierunku ustawienia do wiatru. Samoczynne określenie punktu pracy polega na zastosowaniu profilu płata, który powoduje utknięcie (zahamowanie) wirnika przy dużych prędkościach wiatru. Regulacja aktywna to zmiana kąta ustawienia płatów i kierunku ustawienia elektrowni za pomocą siłowników. Generalnie wszystkie sposoby regulacji mocy oddawanej przez elektrownię wiatrową mają na celu wytworzenie żądanego poziomu mocy przy satysfakcjonującej jakości energii elektrycznej i minimalizacji przejściowych przeciążeń mechanicznych wirnika oraz wału łączącego wirnik z generatorem (co ma wpływ na wydłużenie czasu pracy elektrowni).

Najbardziej powszechne układy regulacji to:

- Regulacja ustawieniem elektrowni w kierunku wiatru (Yaw Control)
- Regulacja kąta ustawienia łopat (Active Pitch Regulation)
- Regulacja przez zmianę prędkości obrotowej generatora
- Regulacja przez zmianę obciążenia (Load Control)
- Regulacja przez "przecignięcie" (Stall Regulation)
- Regulacja lotkami łopat wirnika (Aileron Control)

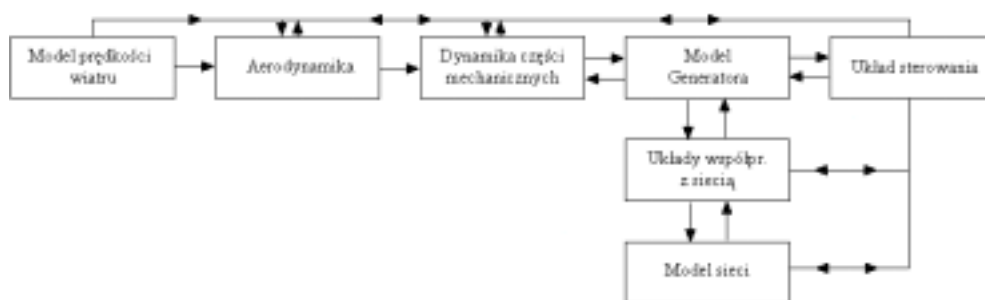
Jeden z popularnych i już znaczących w Polsce producentów i dostawców siłowni wiatrowych firma Vestas, dodatkowo zmodyfikowała swoje systemy sterowania, wykorzystujące zasady jw. budując i określając je jako: Optitip, Optislip, VCS.

3. Modelowanie matematyczne siłowni wiatrowej

Opracowanie matematycznego opisu układu konwersji wiatru oraz jego układu sterowania jest zagadnieniem determinującym poprawność formułowania wniosków w zakresie stanowiącym np. opis oddziaływania dynamicznego siłowni wiatrowej. Opis taki okazuje się w warunkach Polski o tyle istotny, że zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców (Dz.U. Nr 85 poz. 957 z dnia 13 października 2000r.) każdy podmiot ubiegający się o warunki przyłączenia, zmuszony jest do załączenia ekspertyzy wpływu przyłączanej instalacji na system elektroenergetyczny. Szereg Spółek dystrybucyjnych, Operatorów Systemu Rozdzielczego wymaga w treści w/w ekspertyzy opisu oddziaływania dynamicznego siłowni wiatrowej, którego to elementu bez modelu matematycznego zrealizować nie można...

Powyższy argument, przy jednoczesnym ściśle przestrzeganiem przez producentów siłowni wiatrowych zakazem transferu tzw. know-how (w tym w zakresie modelu, jego paramterów itp.), stał się jednym z motorów realizacji przez Autora przedmiotowego opisu funkcyjnego siłowni wiatrowej. Szczegółowy opis – model matematyczny stanowi część rozprawy doktorskiej Autora.

Biorąc pod uwagę wielorakość możliwych rozwiązań technicznych współczesnych siłowni wiatrowych, Autor skupił się na opracowaniu modelu stanowiącego opis układu, schematycznie określonego jak na rys.1



Rys.1 Schematyczny obraz układu konwersji wiatru przyjętego do analizy

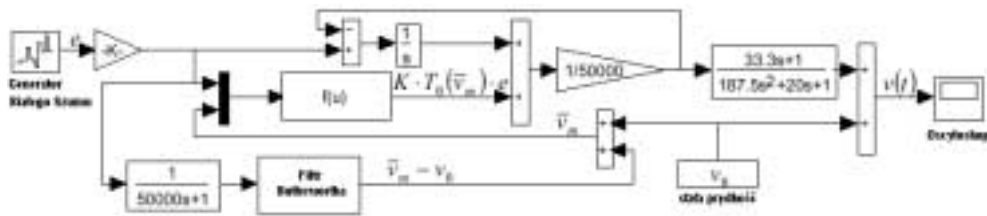
Zaprezentowany układ jest rozwinięciem spotykanych w literaturze [1,6] propozycji opisów pracy systemów siłowni wiatrowych.

Rola układu sterowania w przedstawionym schemacie oraz procesie jego regulacji sprowadza się do wytworzenia takiego sygnału sterującego, który zapewni pożądane zachowanie się obiektu regulacji. Obiektem regulacji jest tu ogólnikowo określony układ konwersji wiatru złożony z kilku subsystemów:

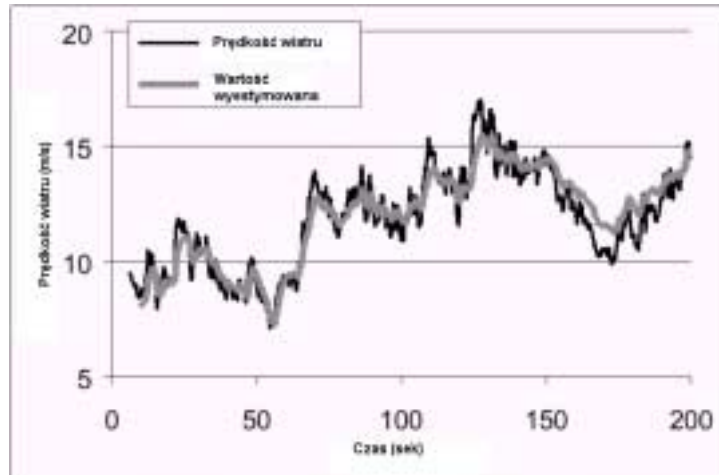
- części związanej z aerodynamiką płatów wirnika,
- układu mechanicznego, złożonego ze skrzyni przekładniowej oraz wałów wolno- i szybkoobrotowego wraz ze sprzęgłami,
- generatora energii elektrycznej
- układów współpracy z siecią, w tym w szczególności inwerterów IGBT

Współczesne algorytmy i metody zakładają przeważnie możliwość dotarcia do zmiennych stanu obiektu. Zazwyczaj, zmienne te są w układzie rzeczywistym niedostępne, lub trudno dostępne. Dotyczy to zarówno obiektu rzeczywistego (komponentów siłowni wiatrowej) jak i wiatru jako czynnika nieprzewidywalnego.

Tym samym dla celu sporządzenia opisu funkcyjnego koniecznym staje się stosowanie estymatorów wielkości niemierzalnych, w tym więc m. in. estymatora prędkości wiatru, estymatora wektora strumienia stojana.



Rys. 2 Filtr Butterwortha 4 rzędu stanowiący estymatę prędkości wiatru



Rys. 3 Przebiegi mierzone oraz estymowane prędkości wiatru

Końcowym efektem modelowania układu siłowni wiatrowej jest wykonanie modelu generatora energii elektrycznej. Dla tego celu Autor wykorzystał dostępny, szeroko opisany w literaturze model maszyny asynchronicznej (AC) w układzie dq. W tym celu, podstawowe niezbędne zależności zaprezentowano poniżej:

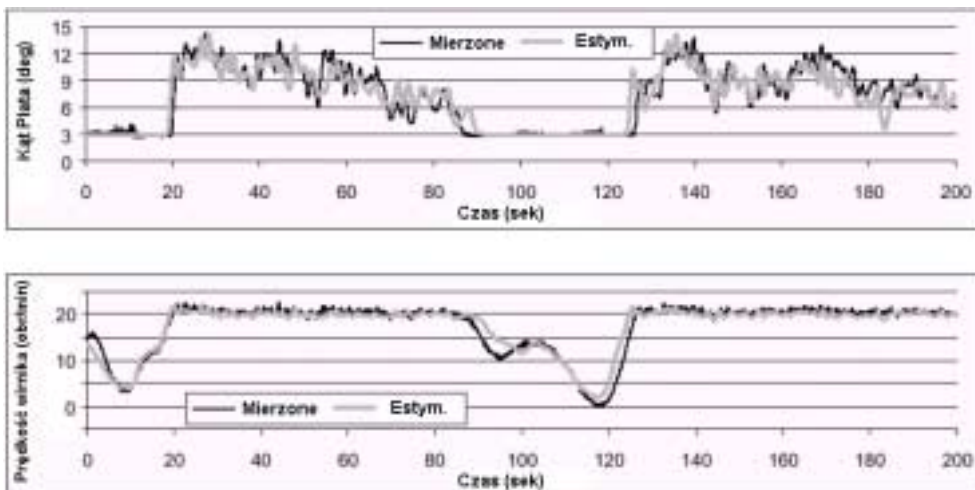
$$\bar{i}_s R_1 - \bar{u}_s = -\frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} - j\omega_b \bar{\Psi}_s$$

$$\bar{i}_r R'_2 - \bar{u}_r = -\frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - j(\omega_b - \omega_r) \bar{\Psi}_r \quad M_e = p_1 \operatorname{Re}\{j\bar{\Psi}_s \bar{i}_s^*\}$$

$$\bar{\Psi}_s = L_{1\sigma} \bar{i}_s + L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r)$$

$$\bar{\Psi}_r = L'_{2\sigma} \bar{i}_r + L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r)$$

Na rys. 4 zaprezentowano estymowane krzywe zależności kąta położenia płyta wirnika oraz prędkości wirnika, które potwierdzają wysoką zgodność przebiegów symulowanych z przebiegami mierzonymi.



Rys.4 Przebiegi mierzone oraz estymowane kąta położenia płata wirnika oraz prędkości obrotowej rotora

4. Podsumowanie

Aktualnie używana metoda sterowania na bazie np. regulatorów PID sprawdza się całkiem dobrze w procesie regulacji przy wiatrach o niskiej prędkości i niewielkiej zmienności. Dla prędkości wyższych zaczyna się jednak przy tej metodzie obserwować rosnące oscylacje. Stało się to podstawą do rozważań o możliwości uzyskania lepszych wyników przy zastosowaniu innej metody sterowania. W tym celu Autor wykorzystał zasady uogólnionej metody predykcji oraz metody ukośnej estymacji parametrów.

Celem regulacji jest utrzymywanie prędkości obrotowej wirnika na stałym poziomie przy niewielkim kącie nachylenia płatów wirnika. Dynamiczne zachowanie turbiny ma również pozostawać na stałym poziomie wraz ze zmieniającymi się warunkami wietrzności. Szczegółowa analiza zagadnienia, dostępna w przygotowywanej rozprawie doktorskiej Autora, wykazała dobre współdziałanie po części zaprezentowanego modelu z układem sterowania wykorzystującym zasady logiki rozmytej fuzzy logic.

Zdaniem Autora metoda fuzzy logic, sieci neuronowe oraz inne metody wykorzystujące wiedzę ekspercką stanowiąc mogą jeżeli nie wyznacznik trendów rozwoju technologicznego współczesnych układów sterowania siłowni wiatrowych to z pewnością jakościowe dobre jego uzupełnienie.

5. Literatura

1. Ekelund T.: Modeling and linear quadratic optimal control of wind turbines. Chalmers University of Technology, Technical Report No. 306, Goeteborg 1997
2. Muljadi E. at al: Control Strategy for Variable-Speed, Stall-Regulated Wind Turbines. Technical Report NREL/CP-500-24311, Washington 1998
3. Nim E.: Coupling and Reduction of the HAWC Equations. Technical Report Riso-R-1294; Danemark 2001
4. Novac J.H. at al.: EPA third-Generation air Quality Modeling system. Vol. I, Technical Report EPA600/R95/082, 1995

5. Petru T.: Modeling of Wind Turbines for Power System Studies. Chalmers University of Technology, Goeteborg 2001
6. Pierce K., Fingersh L.J.: Wind Turbine Control System Modeling Capabilities. Technical Report NREL/CP-500-24378, Colorado 1998