

Laboratorium Systemów Sterowania w Energetyce Odnawialnej

Badanie układu sterowania elektrownią wiatrową
małej mocy w sieci wydzielonej

Piotr Kołodziejek

Politechnika Gdańska 2016

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości statycznych i dynamicznych elektrowni wiatrowej małej mocy o poziomej osi wirnika z 3-fazową prądnicą synchroniczną magnesami trwałymi oraz układu sterowania w sieci wydzielonej. W badanym układzie prądnica jest napędzana przez silnik wiatrowy. Ćwiczenia dotyczą wyznaczania charakterystyk silnika wiatrowego, badania sprawności, określenia dopuszczalnego zakresu pracy, układu sterowania obciążeniem napisanego w języku C++.

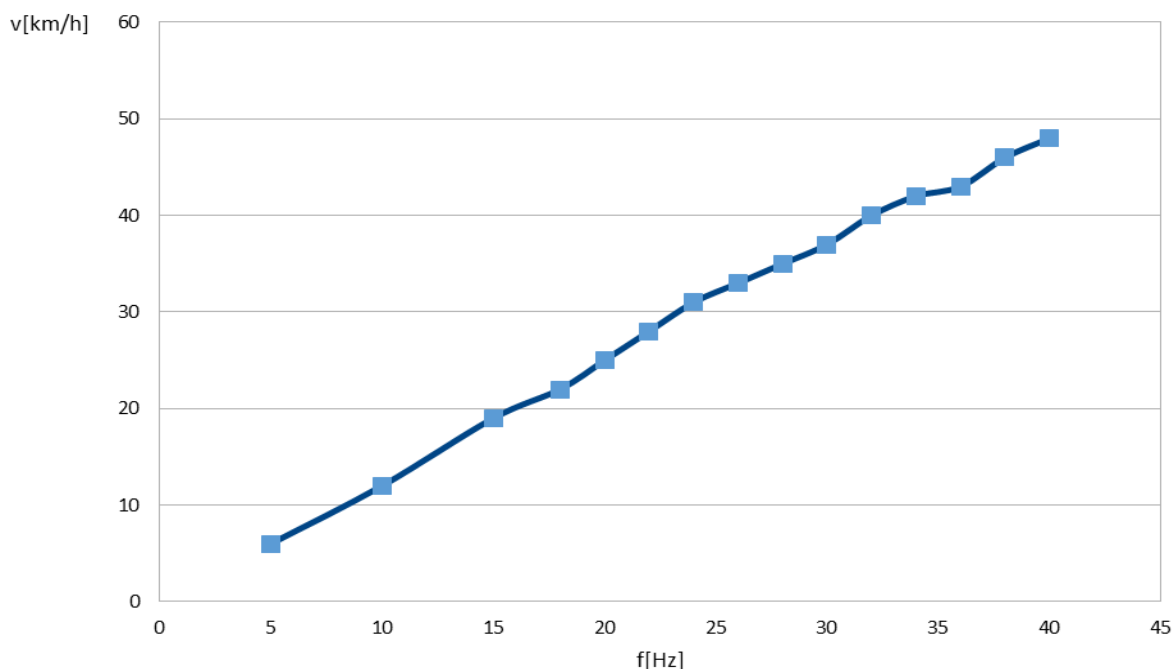
2. Wstęp

Przetwarzanie energii ze źródeł odnawialnych wymaga stosowania wysokosprawnych układów, dlatego zastosowanie znajdują tutaj układy napędowe o zmiennej prędkości kątowej wału. Tego rodzaju zagadnienie dotyczy problemu przetwarzania energii np.: w elektrowniach wiatrowych, w elektrowniach wałowych na statkach, w małych elektrowniach wodnych czy tzw. wirujących magazynach energii. Jako generatory mogą być stosowane maszyny synchroniczne, maszyny asynchroniczne klatkowe i maszyny dwustronnie zasilane. Każdy układ wymaga odrębnego układu przekształtnikowego do przetwarzania energii i odrębnego układu sterowania. Ze względu na swoje właściwości prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi z mostkiem prostowniczym na wyjściu jest chętnie stosowana. Jednak dopiero w ostatnich latach dynamiczny rozwój nowoczesnych urządzeń energoelektronicznych oraz ogromny postęp w dziedzinie mikroprocesorów umożliwił zrealizowanie układu z maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako generator przy zmiennej prędkości kątowej wału. W prądnicach synchronicznych z magnesami trwałymi energia w całości przetwarzana jest przez przekształtnik w odróżnieniu od maszyny dwustronnie zasilanej, gdzie moc przekształtnika projektuje się na ok. 30% mocy maszyny. Nie jest wymagane stosowanie przekładni mechanicznej w celu dopasowania obrotów silnika wiatrowego do obrotów prądnicy.

3. Konstrukcja stanowiska laboratoryjnego

Zarówno silnik wiatrowy jak i generator z układem regulacji są z punktu widzenia sterowania obiektami wielowymiarowymi, nieliniowymi i niestacjonarnymi, które w warunkach rzeczywistych podlegają wymuszeniom o charakterze losowym. Generator wiatrowy wraz z układem sterowania może być badany w stanie pracy ustalonej oraz przy standardowych sygnałach wymuszających w postaci skoku jednostkowego. Ponadto można oceniać wpływ składowych zmiennych w prędkości kątowej wirnika, specyficznych dla silnika wiatrowego, na jakość generowanej energii oraz na drgania konstrukcji mechanicznej wiatraka. Przyczyną zmiennych składowych momentu jest nie tylko wiatr, ale także sam wiatrak (zjawisko przesłonięcia) oraz oscylacje wieży w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru. Możliwość zbadania tych dodatkowych zjawisk oraz ewentualnego zbadania możliwości ich eliminacji w warunkach laboratoryjnych jest istotna. Stanowisko zostało zaprojektowane jako uniwersalne. Możliwe jest badanie struktur sterowania w wyizolowanych warunkach laboratoryjnych a także w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy elektrowni wiatrowej.

W warunkach laboratoryjnych źródłem sztucznego wiatru jest wentylator. Silnik napędowy wentylatora zasilany jest z falownika przy sterowaniu skalarnym, co umożliwia zmiany prędkości kątowej wentylatora i prędkości wiatru.



Rys.1. Charakterystyka wentylatora przy sterowaniu skalarnym.

UWAGA! Ze względów bezpieczeństwa wentylator 4kW może obsługiwać jedynie osoba zapoznana z obsługą układu! Przed uruchomieniem należy sprawdzić konfigurację falownika, zabezpieczyć otoczenie oraz sprawdzić czy wentylator zabezpieczony jest przed przemieszczaniem! Ze względów bezpieczeństwa prędkość obrotowa siłowni wiatrowej bez osłony nie może przekraczać 400 obr./min. i wymaga wydzielenia strefy bezpieczeństwa!

Układy sterowania wszystkich przekształtników oparte są na opracowanym w Katedrze systemie uruchomieniowym na bazie procesora sygnałowego wraz z układem interfejsów. Kontrola procesu, pomiary i ładowanie programu do procesora odbywa się z komputera nadrzędnego. Należy zaznaczyć, że system uruchomieniowy jest tak skonstruowany, że może samodzielnie pracować i sterować procesem.

Programy sterujące pisane są w języku C++ w wersji dla tego procesora. Pracę przetwornicy DC/DC sterującej obciążeniem prądnicy kontroluje układ mikroprocesorowy SH363 z układem logiki programowalnej Altera Cyclone.

Badana elektrownia wiatrowa produkcji Bobre-Komel typu JSW 750-12 zbudowana jest na bazie 3-fazowego generatora z magnesami trwałymi. Wytwarzane przez generator 3-fazowe napięcie jest przekształcane na napięcie stałe za pomocą zabudowanego w siłowni sześciopulsowego mostka prostowniczego. Elementem napędowym siłowni jest trójłopatowa turbina wiatrowa o średnicy koła wiatrowego $\phi=750$ mm osadzona bezpośrednio na czopie wału wirnika generatora. Konstrukcja piasty turbiny umożliwia zmianę kąta zaklinowania łopat wirnika. Sposób ustalania kąta zaklinowania i jego optymalizacje opisano w części dot. instalowania siłowni. Generator z zainstalowaną turbiną wiatrową jest osadzony w gondoli, która umożliwia swobodne obracanie się siłowni w osi pionowej. Maszt siłowni osadzony jest w serwonapędzie sterującym położeniem w kierunku wiatru. Ster kierunku, dzięki któremu następuje samoczynne ustawienie płaszczyzny koła wiatrowego turbiny wiatrowej prostopadle do kierunku prędkości wiatru nie jest wykorzystywany. Konstrukcja generatora jest bezobsługowa oraz odporna na

działanie wody morskiej. Została przetestowana przez producenta do prędkości wiatru 32 m/s. Producent określił minimalną prędkość wiatru przy której następuje start i produkowana jest energia elektryczna na 2,5 m/s.

Wybrane dane techniczne maszyn wykorzystanych na stanowisku laboratoryjnym zostały przedstawione w Tabeli 1a na rys. 2 pokazano schemat układu zasilania maszyny przewidziany przez poducenta.

Tabela 1. Wybrane dane techniczne elektrowni wiatrowej:

		Prądnicą synchroniczną z magnesami trwałymi
typ		JSW750-12
moc znamionowa P_n	W	150
moc maksymalna P_{max}	W	240
częstotliwość	Hz	50
napięcie znamionowe	V	3x380
Średnica koła wiatrowego	φ	750
masa netto	kg	8,5
min. prędkość wiatru	m/s	2,5
maks. prędkość wiatru	m/s	30
napięcie znamionowe	V	13,8
liczba łopat	-	3

Ustawianie łopat turbiny

Łopaty turbiny ustawia się dla przyjętego kąta zaklinowania. W tym celu należy na zdemontowanej z wału generatora turbinie poluzować śruby piasty łączące obie jej części, tak aby było możliwe wykonanie obrotu płata wokół osi jego stopy.

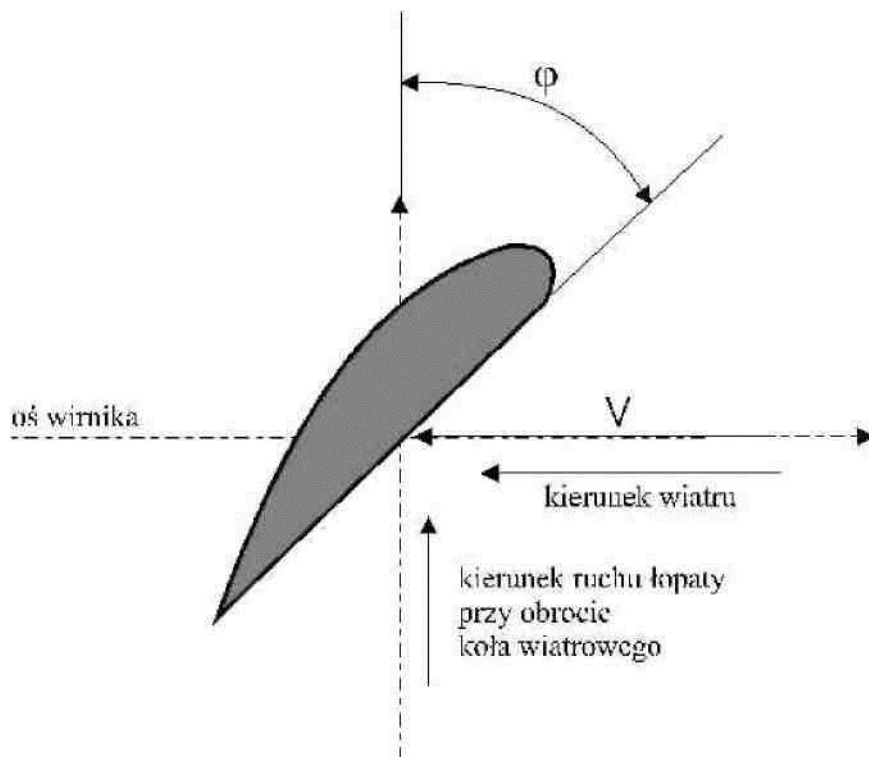
Następnie przy pomocy wcześniej wykonanego przymiaru ustawia się płaty w pożądanym położeniu. Po zakończeniu operacji ustawiania kąta zaklinowania dokręca się śruby łączące obie części piasty. Tak przygotowaną turbinę zakłada się na wał generatora i dokręca nakrętką zabezpieczającą turbinę przed zsunięciem się z wału.

Wybór kąta zaklinowania

Wartość kąta zaklinowania w dużym stopniu decyduje o sprawności aerodynamicznej turbiny wiatrowej. W dostarczanej odbiorcy zmontowanej turbinie wiatrowej producent ustawia łopaty turbiny z kątem zaklinowania o wartości $\varphi = 30^\circ$.

Użytkownik siłowni może samodzielnie zmieniać kąt zaklinowania łopat zgodnie z własnymi potrzebami. Wartość kąta zaklinowania ustala się dla prędkości wiatru najczęściej występującej na obszarze, gdzie siłownia będzie eksploatowana. Dla przykładu podano średnie prędkości wiatru na różnych akwenach:

- wody śródlądowe 5 m/s,
- wody morskie osłonięte (zatoki, wody przybrzeżne) 8 m/s,
- wody morza otwartego 10m/s.



Rys. 3. Identyfikacja kąta zaklinowania.

Zalecane nastawy kąta zaklinowania:

- wody śródlądowe: kąt zaklinowania $k_z=20-25^\circ$,
- wody morskie osłonięte i wody morza otwartego: kąt zaklinowania

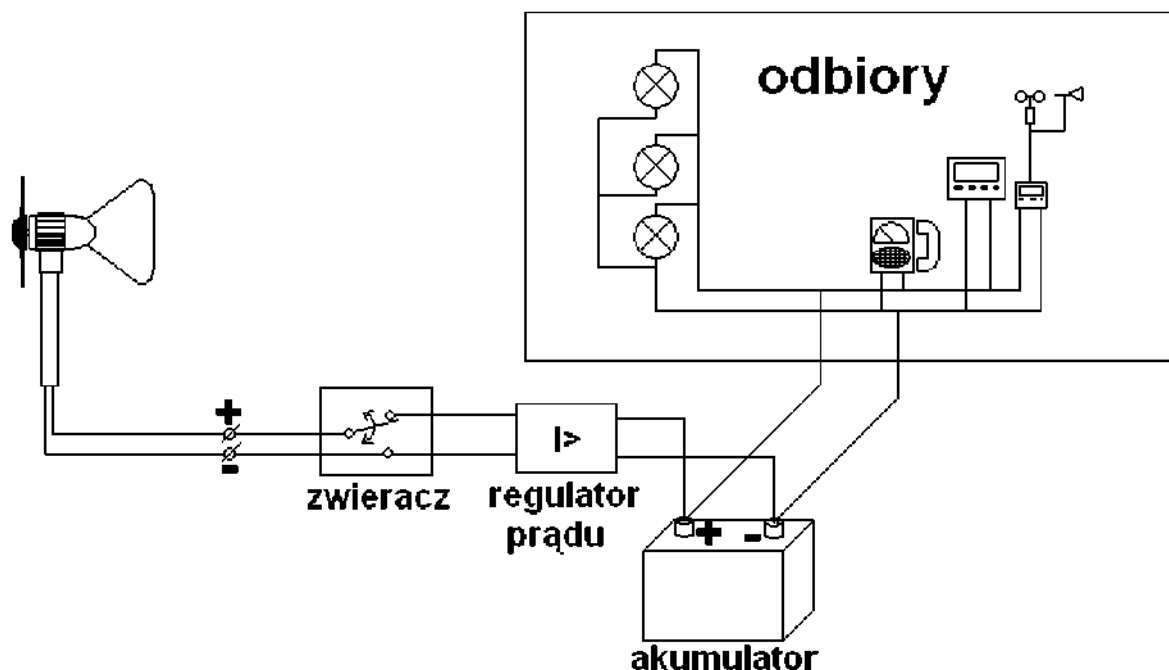
$k_z=30-45^\circ$. Należy zwrócić szczególną uwagę na osadzenie trzpienia mocującego łopatę w otworze i dokręcenie na całej długości śrub mocujących momentem wynoszącym ok. 1Nm. Decyduje to o spokojnej pracy, bez drgań turbiny wiatrowej oraz zabezpieczeniu przed wypadnięciem śmigieł.

Podłączenie siłowni do instalacji elektrycznej

Generator siłowni należy połączyć z instalacją przewodami o przekroju, co najmniej $1,5 \text{ mm}^2$. Przewody wyprowadzeniowe z generatora oznaczono zgodnie z biegunowością napięcia, które się na nich pojawia (+) oraz (-).

W przypadku stosowania akumulatorów o małej pojemności zaleca się podłączenie generatora do instalacji poprzez regulator ładowania. Ma to na celu zapewnienie ochrony akumulatorów przed przeładowaniem.

W przypadku eksploatacji siłowni bez regulatora ładowania, należy okresowo sprawdzać stan naładowania akumulatorów.



Rys. 4. Schemat poglądowy zalecanego podłączenia siłowni do instalacji elektrycznej (ładowanie akumulatorów pokładowych).

Eksploatacja i konserwacja.

Podstawowymi zagrożeniami występującymi podczas normalnej eksploatacji siłowni zainstalowanej na jachcie są: wysoki poziom drgań i silne chwilowe powiewy wiatru. Czynniki te mogą wpływać na skrócenie żywotności łożysk i węzła szczotkowego gondoli.

Podczas normalnej eksploatacji siłowni należy zwrócić szczególną uwagę, aby generator siłowni nie pracował w stanie biegu jałowego. Praca przy biegu jałowego grozi nadmiernym wzrostem prędkości obrotowej turbiny wiatrowej, co może spowodować jej uszkodzenie oraz wystąpieniem podwyższonego napięcia na zaciskach generatora.

Zaparkowanie siłowni

Stan zaparkowania siłowni polega na ustawieniu płaszczyzny koła wiatrowego turbiny równolegle do kierunku wiatru. W tym stanie turbina nie pracuje.

W celu parkowania siłowni należy podwiązać statecznik siłowni do elementów osprzętu stałego jachtu (np. kosz rufowy). W konstrukcji steru kierunku siłowni uwzględniono stan parkowania umieszczając otwór w tylnej części statecznika. Dodatkowo należy przymocować (przywiązać) płat turbiny do masztu, na którym jest osadzona siłownia.

Podczas silnego wiatru „wybicie” turbiny z linii wiatru może okazać się bardzo trudne i grozi uszkodzeniem płata steru kierunku. W tym celu należy zewrzeć zaciski wyjściowe generatora i niezwłocznie po tym zaparkować siłownię.

Uwaga:

Przy wiatrach umiarkowanych zwarcie obwodu wyjściowego generatora spowoduje zatrzymanie turbiny wiatrowej. W przypadku silnego wiatru turbina nadal będzie pracować, a w uzwojeniach generatora popłynie prąd zwarcia, który w przypadku pracy długotrwałej (dłuższej niż 15 sek.) może uszkodzić generator.

Konserwacja

Podczas normalnej eksploatacji siłowni należy okresowo kontrolować stan zamocowania turbiny wiatrowej na wale generatora. Po zakończeniu

sezonu użytkowania siłowni zaleca się przeprowadzenie przeglądu podzespołów:

- oględziny generatora,
- sprawdzenie stanu węzłów łożyskowych,
- sprawdzenie stanu węzła szczotkowego,
- sprawdzenie układu prostownika,
- sprawdzenie stanu generatora.

Awarie i usterki

OBJAWY	PRZYCZYNA	SPOSÓB USUNIĘCIA
Zbyt wysokie napięcie na zaciskach	Generator nie obciążony	Dołączyć dodatkowe
Bardzo wysokie obroty turbiny wiatrowej przy braku prądu na wyjściu generatora	1. Przerwa w przewodach łączących	Rewizja połączeń generatora z odbiorem.
	2. Awaria mostka prostowniczy	Wymienić mostek prostowniczy
	3. Awaria węzła szczotkowy	Wymienić węzeł szczotkowy
Niskie obroty turbiny wiatrowej w dobrych warunkach wiatrowych	1. Generator przeciążony	Zmniejszyć obciążenie
	2. Zwarcie na przewodach łączących	Rewizja połączeń generatora z odbiorem i
	3. Zwarcie w mostku prostowniczy	Wymienić mostek prostowniczy
	4. Awaria węzła łożyskowego generatora	Wymienić łożysko generatora
Gwałtowne obniżenie obrotów turbiny wiatrowej po włączeniu	1. Generator przeciążony 2. Niepoprawne ustawienie kąta	Zmniejszyć obciążenie Poprawnie ustawić kąt zaklinowania

Duże naprężenia konstrukcji masztu w kierunku równoległym	Niepoprawne ustawienie kąta zaklinowania	Zwiększyć kąt zaklinowania łopaty turbiny wiatrowej
---	--	---

4. Maszyna synchroniczna z magnesami trwałymi

Ogólny model matematyczny opisujący PMSM od strony elektrycznej przedstawiają równania różniczkowe, gdzie podkreślenie danej zmiennej oznacza wektor przestrzenny.

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\underline{\Psi}_s}{dt} + j\omega_s \underline{\Psi}_s$$

6. Literatura:

1. Tunia H., Kaźmierkowski M.: *Automatyka napędu przekształtnikowego*. PWN, Warszawa, 1987.
2. Krzemiński Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2001, dostępne na stronie KANE w materiałach dydaktycznych, Gdańsk.
3. Lubośny Z.: *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*. WNT 2013
4. Branżowy ośrodek badawczo-rozwojowy maszyn elektrycznych „Komel” - instrukcja obsługi siłowni wiatrowej jsw 750-12.

Program ćwiczenia:

1. Zapoznać się z układem laboratoryjnym, połączyć układ do pomiaru charakterystyk turbiny wiatrowej i narysować schemat ideowy elektrowni wiatrowej z układem pomiarowym.
2. Wykonać pomiar charakterystyki prędkości wiatru $v_w=f(\omega_u)$ dla $1/3$ i $1/2$ średnicy wirnika silnika wiatrowego.
3. Wykonać pomiar charakterystyk $P_w=f(\omega_w)$ dla 4-ch prędkości wiatru. Określić stabilny zakres pracy. Wyznaczyć graficznie i analitycznie krzywą optimum mocy.
 - 3.1. Wykonać zadanie dla 3 różnych pozycji odchylenia osi wirnika od kierunku wiatru.
 - 3.2. Wykonać zadanie dla 2 różnych kątów natarcia łopat wirnika.
4. Wyznaczyć, narysować i aproksymować nieliniową funkcją charakterystykę $c_p(\lambda)$.
5. Zarejestrować przebiegi napięcia, prądu i mocy w oscyloskopie cyfrowym dla 3-ch różnych wartości obciążenia prądnicy i obliczyć sprawność elektrowni wiatrowej.
6. Połączyć elektrownię wiatrową do pracy w sieci wydzielonej i narysować schemat ideowy.
7. Zarejestrować pracę układu sterowania – przebiegi napięcia, prądu i mocy przy zwiększeniu i zmniejszeniu prędkości wiatru. Ocenić jakość układu sterowania obciążeniem.
8. Zarejestrować przebiegi napięcia, prądu i mocy w stanie pracy ustalonej na oscyloskopie cyfrowym i obliczyć sprawność elektrowni wiatrowej.

9. zaproponować i zaimplementować wybrany algorytm sterowania obciążeniem elektrowni wiatrowej.
10. zaproponować, napisać i uruchomić algorytm sterowania obciążeniem z ograniczaniem mocy i prędkości kątowej wirnika. Zweryfikować eksperymentalnie działanie algorytmu.