

doi:10.15199/48.2017.12.62

Symulator turbiny wiatrowej małej mocy

Streszczenie. W pracy rozważono symulator turbiny wiatrowej małej mocy z asynchronicznym generatorem pierścieniowym sterowanym przez modulację rezystancji w obwodzie wirnika. Turbinę wiatrową zastępuje silnik obcowzbudny prądu stałego zasilany z trójfazowego prostownika sterowanego. Sterowanie prostownika, realizowane przez sterownik PLC zapewnia charakterystyki mechaniczne identyczne jak charakterystyki turbiny wiatrowej o założonych parametrach.

Abstract. This paper describes a small power wind turbine simulator. The simulator consists of an separately excited DC motor coupled to a slip ring induction generator. The DC motor is powered from a three phase controlled rectifier, while the generator is controlled by modulating the additional resistance in its rotor circuit. The DC motor and the induction generator are controlled with a PLC controller to match the desired characteristics of the turbine. (**Small Power Wind Turbine Simulator**)

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, indukcyjny generator pierścieniowy, modulacja rezystancji, sterownik PLC

Keywords: wind turbine simulator, slip ring induction generator, resistance modulation, PLC controller

Wstęp

Badania generatorów wiatrowych, współpracujących z nimi układów przekształtnikowych oraz układów sterowania są znacznie ułatwione jeżeli jest możliwe wykorzystanie symulatorów turbin wiatrowych. Różne sposoby symulowania turbiny są prezentowane w publikacjach. Turbina wiatrowa jest zastępowana przez maszyny indukcyjne [1] lub maszyny prądu stałego [2,3,4] zasilane z przekształtników, które odpowiednio sterowane symulują charakterystyki turbiny. W pracy rozważono symulator turbiny wiatrowej małej mocy z asynchronicznym generatorem pierścieniowym sterowanym przez modulację rezystancji w obwodzie wirnika.

Przy realizacji symulatora przyjęto następujące założenia:

- statyczne charakterystyki są wyznaczone na podstawie powszechnie przyjmowanych zależności,
- wartości liczbowe parametrów modelu są dobrane odpowiednio do parametrów maszyn w modelu, tak aby w pełni wykorzystywać zakresy mocy i prędkości,
- turbina jest symulowana przez silnik obcowzbudny prądu stałego,
- obciążeniem turbiny jest generator asynchroniczny pierścieniowy z modulacją rezystancji w obwodzie wirnika,
- symulator jest strukturą otwartą, nie zawiera układu regulacji pracy generatora.

Model turbiny

Przyjęty model właściwości statycznych turbiny wynika z rozważań przedstawionych w 1933 roku przez fizyka niemieckiego Alberta Betza i jest powszechnie stosowany przy określaniu mocy turbiny [5]. W modelu, moc turbiny wiatrowej przy założeniu stałego kąta natarcia łopaty turbiny (założenie to jest zwykle słuszne dla turbin małej mocy) określona jest wzorem:

$$(1) \quad P_t = c_p(\lambda) \frac{\rho A}{2} V_w^3$$

gdzie: P_t – moc mechaniczna turbiny, ρ – gęstość powietrza, A – pole powierzchni zakreślonej przez łopaty turbiny o promieniu R , V_w – prędkość wiatru, $c_p(\lambda)$ – współczynnik mocy, korygujący teoretyczną wartość mocy wynikającą z prawa Betza, będący funkcją współczynnika szybkości λ .

Współczynnik szybkości jest stosunkiem prędkości końca łopaty turbiny do prędkości wiatru i jest określony wzorem:

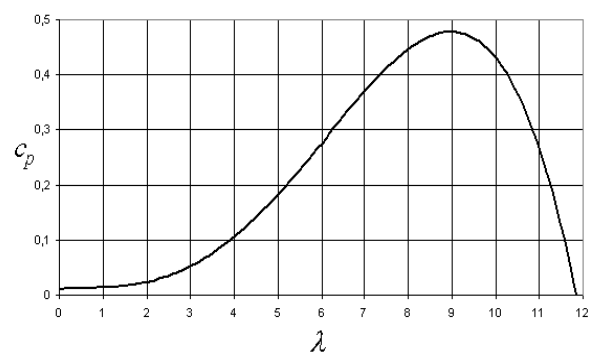
$$(2) \quad \lambda = \frac{\omega R}{V_w}$$

gdzie: ω – prędkość kątowna wirnika turbiny.

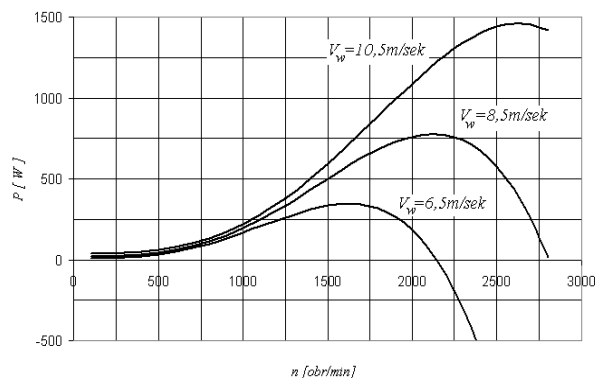
Przedmiotem symulacji jest turbina małej mocy, dla której przyjęto dane liczbowe, przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane dane liczbowe symulowanej turbiny

promień łopaty turbiny R	1,2m
pole powierzchni łopaty A	4,524m ²
gęstość powietrza ρ	1,168kg/m ³
przełożenie przekładni mechanicznej p	3,5



Rys. 1. Przyjęta zależność współczynnika mocy c_p od współczynnika szybkości λ



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne turbiny dla różnych prędkości wiatru

Przyjęto, że współczynnik mocy jest aproksymowany wielomianem czwartego stopnia:

$$(3) \quad c_p(\lambda) = -2,684662E-04\lambda^4 + 3,597493E-03\lambda^3 - 5,448498E-03\lambda^2 + 5,270628E-03\lambda + 1,072458E-02$$

Wykres zależności $c_p(\lambda)$ pokazano na rysunku 1.

Przedstawione powyżej założenia oraz wartości liczbowe parametrów pozwoliły na wyznaczenie przykładowych charakterystyk turbiny. Przyjęto przy tym, że moc turbiny jest przedstawiana nie w funkcji prędkości turbiny ω , a w funkcji prędkości generatora pierścieniowego n , którego prędkość obrotowa jest większa niż prędkość turbiny ze względu na przekładnię mechaniczną o przełożeniu p .

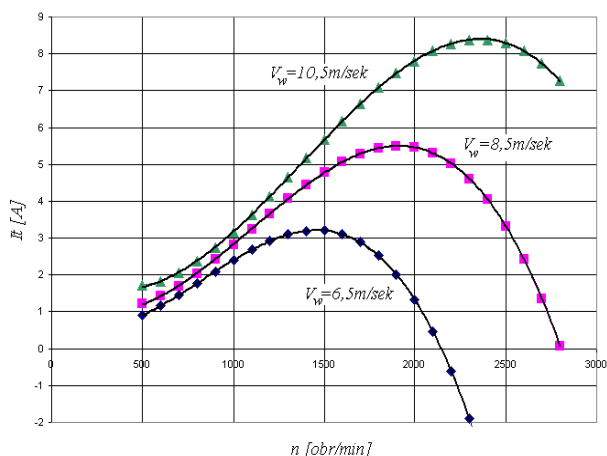
Opis układu elektrycznego

Do symulacji turbiny wykorzystano silnik obcowzbudny prądu stałego, ze stałym wzbudzeniem. Silnik został sprzężony mechanicznie z generatorem pierścieniowym oraz przetwornikiem obrotowo-impulsowym wykorzystanym do pomiaru prędkości obrotowej maszyn. Dane liczbowe zastosowanych maszyn przedstawiono w tabeli 2

Tabela 2. Parametry maszyn zastosowanych w układzie

maszyna M_{DC}	obcowzbudna typ PZBb 32b
moc P_n	1,5kW
napięcie wirnika U_n	220V
prąd wirnika I_n	8,37A
prędkość obrotowa n_n	2820 obr/min
prąd wzbudzenia I_{wn}	0,29A
współczynnik $c\Phi$	0,6646 Nm/A
maszyna M_{AC}	pierścieniowa typ SZUe 24b
moc P_n	1,1kW
napięcie stojana U_n	220/380V
prąd stojana I_n	4,6/2,7A
prędkość obrotowa n_n	1385 obr/min
dane wirnika U_n/I_n	37V/27A
przetwornik POI	obrotowo-impulsowy MOK40/360
liczba impulsów/obrot	360

Znajomość charakterystyk mechanicznych turbiny pozwoliła na wyznaczenie zależności prądu twornika maszyny DC od prędkości $I_t(n)$, dla której uzyskuje się identyczne charakterystyki mechaniczne silnika.



Rys. 3. Charakterystyki $I_t(n)$, dla których maszyna DC ma charakterystyki mechaniczne jak na rysunku 2

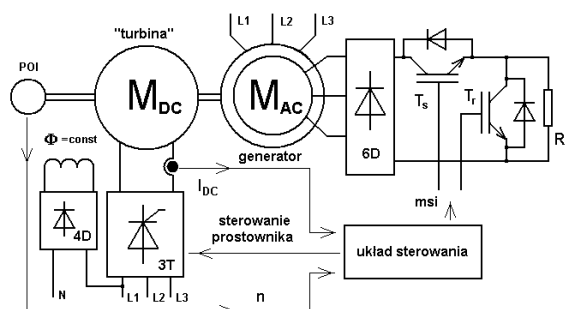
Charakterystyki te przedstawiono na rysunku 3, punkty wykresu oznaczają wyznaczone wartości prądów, a linie ciągłe – aproksymację obliczeń wielomianem trzeciego stopnia. Aproksymacje zostały wykorzystane w układzie sterowania maszyny DC.

Obwód twornika maszyny prądu stałego jest zasilany z prostownika sterowanego trójfazowego, gwiazdowego 3T.

W obwodzie twornika dołączono dławik dodatkowy oraz diodę zerową dla zapewnienia ciągłości prądu twornika I_t oraz ułatwienia filtracji tętnień prądu. Układ sterowania umożliwił wybranie jednego z trzech możliwych trybów pracy:

1. sterowanie przekształtnika 3T ze stałym kątem wyzwalania, co odpowiada w przybliżeniu sterowaniu ze stałą prędkością obrotową,
2. sterowanie przekształtnika 3T ze stałą wartością prądu zadanego, co odpowiada w przybliżeniu sterowaniu ze stałym momentem napędowym,
3. sterowanie z symulacją charakterystyki turbiny wiatrowej z założoną prędkością wiatru, przy czym możliwy jest wybór jednej z trzech wartości, dla których policzono charakterystyki.

Uproszczony schemat układu elektrycznego przedstawiono na rysunku 4.

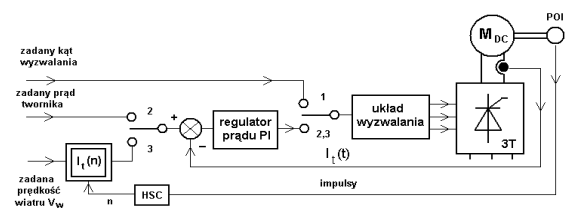


Rys. 4. Uproszczony schemat układu symulatora

W przypadku 2 i 3 wykorzystano analogowy regulator PI prądu twornika z własnym integralnym sprzężeniem zwrotnym prądowym, który w przypadku 1 pełni wyłącznie funkcję interwencyjną. W przypadku 3 prąd zadany jest określany na podstawie aproksymacji charakterystyk przedstawionych na rysunku 3. Np. charakterystyka mechaniczna $I_t(n)$ dla prędkości wiatru $V_w=10,5$ m/sek jest określana ze wzoru (4):

$$(4) \quad I_t(n) = -1,748574E-09n^3 + 7,181823E-06n^2 - 4,679664E-03n + 2,430430E+00$$

Blokowy schemat układu sterowania silnika DC przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat blokowy układu sterowania silnika DC, HSC – szybki licznik impulsów z przetwornika POI

Sterowanie układu prostownika 3T oraz modulacja rezystancji jest realizowana przez sterownik PLC. W sterowniku wykorzystano funkcję szybkiego licznika HSC oraz funkcję modulacji MSI.

Obwód stojana maszyny pierścieniowej pracującej jako generator nadsynchroniczny jest połączony bezpośrednio do sieci trójfazowej. Obwód wirnika jest przez prostownik trójfazowy mostkowy 6D i dwa tranzystory IGBT połączony do rezystancji R_d . Sterowanie generatora odbywa się przez modulację rezystancji dodatkowej w obwodzie wirnika. Przyjmując, że diody mostka i tranzystory są łącznikami

idealnymi modulując załączanie tranzystora szeregowego T_s , przy otwartym tranzystorze równoległym T_r uzyskuje się zmianę średniej rezystancji dodatkowej od ∞ do wartości R_d zgodnie ze wzorem:

$$(5) \quad R_{dav} = \frac{R_d}{\delta}$$

Modulując pracą tranzystora równoległego, przy zamkniętym tranzystorze szeregowym uzyskuje się zmianę rezystancji od wartości R_d do 0:

$$(6) \quad R_{dav} = (1 - \delta)R_d$$

gdzie:

R_d – wartość rezystancji dodatkowej,

R_{dav} – średnia wartość rezystancji,

δ - współczynnik wypełnienia.

Tranzystory IGBT zostały wyposażone w obwody tłumienia przepięć łączeniowych, a ich układy sterowania w obwody separacji galwanicznej sygnałów sterowania. Przyjęto częstotliwość modulatora 1kHz, wartość rezystancji dodatkowej $R_d = 3\Omega$.

Przez modulację rezystancji dodatkowej możliwe jest sterowanie charakterystyki mechanicznej maszyny, niestety wraz ze wszystkimi znanymi wadami takiego sposobu sterowania. Dopóki prędkość generatora nie przekracza prędkości synchronicznej maszyna DC i maszyna AC pobierają energię, która pokrywa straty mechaniczne i elektryczne w maszynach. Po przekroczeniu prędkości synchronicznej, przy odpowiedniej prędkości wiatru rośnie moc turbiny i nadwyżka energii jest przekazywana do sieci.

Wyniki badań i wnioski

Wykonano badania charakterystyk statycznych symulatora turbiny, dla ilustracji szczegółowe wyniki pomiarów dla wybranego stanu ustalonego układu przedstawiono w tabeli 3.

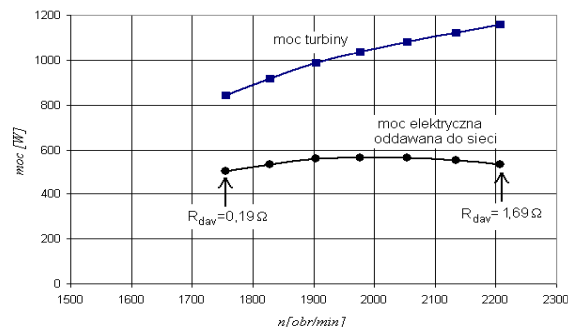
Tabela 3. Wyniki badań wybranego stanu ustalonego układu.

założona prędkość wiatru	10,5 m/sek
prędkość generatora pierścieniowego (pomiar)	2053 obr/min
moc elektryczna pobierana przez M_{DC} (pomiar U_i/I_i)	1133W (151V/7,5A)
moc mechaniczna na wale turbiny, wzór (1)	1080W
moc oddawana do sieci (pomiar)	566W
współczynnik mocy elektrycznej $\cos\phi$ (pomiar)	0,35
moc strat mechanicznych (wyznaczona z próby biegu jałowego)	133W
moc tracona w rezystancji R_d i tranzystorach IGBT (pomiar śr. prąd/śr. napięcie)	110W (10A/11V)
moc strat pozostałych: w maszynie M_{AC} , diodach mostka 6D	271W

W prezentowanym symulatorze obwód stojana generatora nadsynchronicznego jest bezpośrednio dołączony do sieci bez obwodów poprawiających współczynnik mocy. Ze względu na małą wartość współczynnika mocy sprawność przetwarzania energii mechanicznej turbiny na energię elektryczną jest niewielka, a straty w maszynie AC są duże. Dobór np. baterii kondensatorów mógłby poprawić sprawność energetyczną przetwarzania. Duże straty elektryczne są niestety cechą charakterystyczną układów z maszyną pierścieniową sterowaną przez zmianę rezystancji obwodu wirnika. Ten sposób sterowania generatora był stosowany np. w elektrowniach wiatrowych firmy Vestas, typu V66 o mocy 1,65MW i był określany terminem Optislip. Zasadniczym zadaniem sterowania nie była poprawa sprawności

przetwarzania energii ale możliwość szybkiej reakcji na gwałtowne zmiany prędkości wiatru. Gwałtowne wzrosty mocy turbiny nie mogły być eliminowane przez relatywnie wolno działające układy sterowania kąta natarcia łopat. Ale mogły być szybko niwelowane przez dodatkowe straty w obwodzie wirnika, co miało korzystny wpływ na jakość generowanej energii elektrycznej. Obecnie stosowane generatory pierścieniowe pracują jako maszyny dwustronnie zasilane (double fed induction generator DFIG), sterowanie to jest przedmiotem licznych publikacji. W pracy [2] przedstawiony został symulator turbiny wiatrowej z generatorem DFIG i kompletnym układem regulacji parametrów energii elektrycznej. W symulatorach turbin wiatrowych są także stosowane generatory synchroniczne z magnesami trwałymi (permanent magnet synchronous generator PMSG) [4].

W przypadku turbin wiatrowych małej mocy stosowanie DFIG może być nieuzasadnione ekonomicznie i alternatywą może być sterowanie rezystancji. Aby układ był kompletną elektrownią wiatrową konieczne jest wyposażenie go w algorytm regulacji. Na rysunku 6. przedstawiono wykres zależności mocy turbiny i mocy przekazywanej do sieci w funkcji prędkości obrotowej generatora, sterowanie prędkości realizowano przez modulację rezystancji dodatkowej.



Rys. 6. Wykresy mocy dla prędkości wiatru 10,5 m/sek

Wykres mocy przekazywanej do sieci posiada maksimum, co pozwala na aplikację sterowania ekstremalnego.

Autor:

dr inż. Wojciech Błasiński, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, Zakład Napędu Elektrycznego i Automatyki Przemysłowej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: wojciech.blasinski@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Matelski W., Łowiec E., Abramik S., Symulator małej turbiny wiatrowej, Prace Instytutu Elektrotechniki (2016) LXIII zeszyt 273
- [2] Jarek G., Jelen M., Gierlotka K., Symulator turbiny wiatrowej na bazie silnika prądu stałego, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R 90 (2014), nr.6, 51-55
- [3] Guangchen L., Shengtie W., Jike Z., Design and Realization of DC Motor and Drives Based Simulator for Small Wind Turbine, A/PPEEC Conference IEEE(2010), 1-4
- [4] Hussain J., Mahesh K., Design and Development of Real-Time Small-Scale Wind Turbine Simulator, IICPE Conference IEEE(2014), 1-5
- [5] Shepherd W., Zhang L., Electricity Generation Using Wind Power, World Scientific, New Jersey (2011)