

XIII *Seminarium*  
**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE 2003**  
Oddział Gdański PTETiS

**ELEKTROWNIA WIATROWA Z MASZYNĄ DWUSTRONNIE  
ZASILANĄ – BADANIA SYMULACYJNE**

**Krzysztof KULESZA, Stanisław WITKOWSKI, Jarosław GUZIŃSKI**

Politechnika Gdańska  
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych  
tel:058 347-29-93 fax: 058 341-08-80  
e-mail: [kkulesza@ely.pg.gda.pl](mailto:kkulesza@ely.pg.gda.pl), [switkow@ely.pg.gda.pl](mailto:switkow@ely.pg.gda.pl), [jarguz@ely.pg.gda.pl](mailto:jarguz@ely.pg.gda.pl)

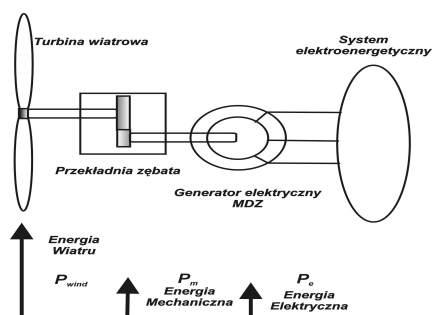
W referacie przedstawiono propozycję układu sterowania elektrowni wiatrowej pracującej w systemie elektroenergetycznym. Syntezę układu regulacji przeprowadzono bazując na multiskalarnym modelu maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej (MDZ). Optymalne przetwarzanie energii wiatru, odpowiadające ekstremalnej regulacji mocy czynnej turbiny, zrealizowano na podstawie charakterystyk statycznych. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych.

## 1. WSTĘP

Siłownia wiatrowa zbudowana jest z wieży, gondoli i turbiny wiatrowej. We wnętrzu gondoli znajduje się skrzynia przekładniowa łącząca wolnobieżny wał turbiny wiatrowej szybkoobrotowym wałem generatora elektrycznego.

Zadaniem elektrowni wiatrowej jest przetwarzanie energii wiatru na energię mechaniczną a następnie na energię elektryczną. Wspólną cechą elektrowni wiatrowych, niezależnie od przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych, jest występowanie maksimum mocy przy pewnej wartości prędkości kątovej. Ten punkt pracy odpowiada przetwarzaniu energii wiatru z maksymalną wartością współczynnika mocy silnika wiatrowego ( $C_p=0.41$ ). Dlatego, optymalne wykorzystanie energii wiatru jest możliwe tylko w elektrowniach pracujących przy zmiennej prędkości kątovej wału. Schemat konwersji energii wiatru na energię elektryczną przedstawiono na rysunku 1.

Zastosowanie maszyny dwustronnie zasilanej jako generatora umożliwia przetwarzanie energii mechanicznej, przy zmieniającej się prędkości kątovej wału, w energię elektryczną o określonych parametrach jakościowych. Zakres prędkości, dla których możliwa jest generacja mocy czynnej do systemu energetycznego jest uzależniony od mocy przekształtnika w obwodzie wirnika. Ze względów ekonomicznych oraz technicznych przyjmuje się użyteczny zakres pracy od 70% do 130% prędkości znamionowej generatora.



Rys. 1. Przetwarzanie energii w elektrowni wiatrowej

## 2. PRZETWARZANIE ENERGII W TURBINE WIATROWEJ

Moc aerodynamiczna [1] silnika wiatrowego opisana jest zależnością (1).

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi R_b^2 V_{wind}^3 \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$ - masa właściwa powietrza,  $R_b$ - promień łopat wirnika,  $V_{wind}$ -prędkość wiatru

Wartość współczynnika mocy turbiny wiatrowej  $C_p$  określa sprawność konwersji mocy wiatru na moc mechaniczną, zgodnie z zależnością (2).

$$P_m = C_p P_{wind} \quad (2)$$

gdzie:  $C_p$ - współczynnik mocy  $P_m$  – moc mechaniczna

Moment napędowy na wale MZD wynikający z pracy silnika wiatrowego obliczono na podstawie zależności (3).

$$T_{wind} = \frac{P_m R_b}{V_{wind} \eta} \quad (3)$$

gdzie:  $T_{wind}$  - moment napędowy,  $\eta$  – przełożenie przekładni zębatej

Współczynnik mocy silnika wiatrowego jest parametrem zależnym od aktualnego kąta nachylenia łopat turbiny ( $\beta$ ) i współczynnika szybkobieżności ( $\lambda$ ), (4). Referat dotyczy turbin wiatrowych pracujących ze stałym kątem nachylenia łopat, przy założeniu  $\beta = \text{const}$ .

$$\lambda = \frac{\omega_t R_b}{V_{wind}} \quad (4)$$

gdzie:  $\omega_t$  – prędkość kątowa turbiny

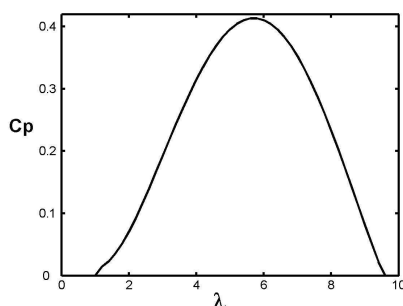


W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych przyjęto charakterystykę statyczną elektrowni wiatrowej przedstawioną na rysunku 2 i opisaną wielomianem czwartego rzędu według zależności:

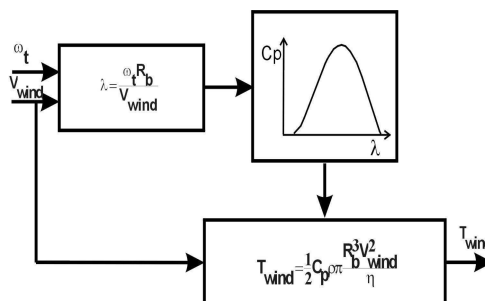
$$C_p(\lambda) = A + B\lambda + C\lambda^2 + D\lambda^3 + E\lambda^4 \quad (5)$$

gdzie:  $A = 0.093368$ ,  $B = -0.183800$ ,  $C = 0.118605$ ,  $D = -0.017730$ ,  $E = 0.000756$

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy turbiny wiatrowej zastosowany w badaniach symulacyjnych.



Rys. 2. Charakterystyka statyczna elektrowni wiatrowej



Rys. 3. Schemat blokowy modelu symulacyjnego turbiny wiatrowej

### 3. STRUKTURA UKŁADU REGULACJI ELEKTROWNIĄ WIATROWĄ

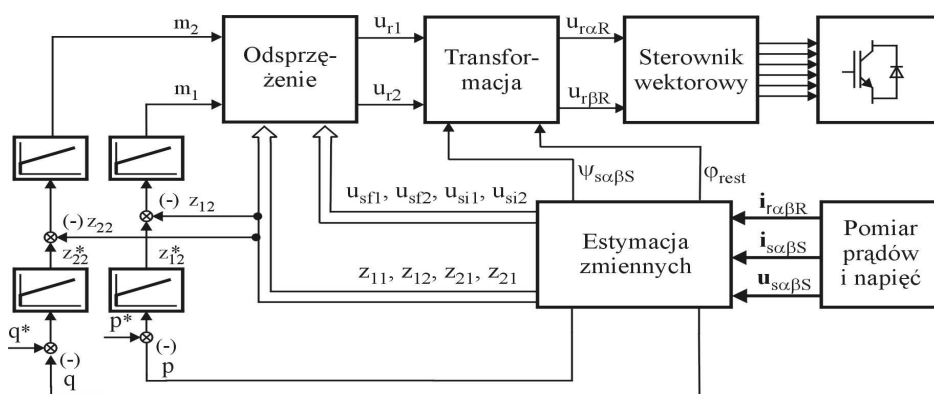
Proces regulacji elektrowni wiatrowej obejmuje sterowanie przemianą energii mechanicznej dostępnej na wale MDZ, na energię elektryczną. Energia elektryczna poprzez zaciski uzwojenia stojana oraz wirnika przekazywana jest do systemu elektroenergetycznego. Uzwojenie wirnika zasilane jest poprzez kaskadę przekształtników energoelektronicznych, natomiast uzwojenie stojana jest połączone bezpośrednio z systemem elektroenergetycznym. Zależnie od znaku poślizgu zmienia się kierunek przepływu mocy czynnej w obwodzie wirnika. Pożądane działanie generatora, czyli dostarczanie energii o określonych parametrach jakościowych do systemu, zrealizuje się na drodze wymuszania trójfazowej fali prądu [2] lub napięcia [3] wirnika.

W proponowanym układzie regulacji przyjęto warstwową strukturę sterowania procesem generacji mocy. W układzie regulacji bezpośredniej (podpunkt 3.1) sterowane są moce czynna i bierna stojana, natomiast w nadrzędnej warstwie regulacyjnej (podpunkt 3.2), zależnie od aktualnej prędkości kątowej wirnika, wyznaczana jest zadana wartość mocy czynnej. W referacie przedstawiono pierwszą próbę syntezy układu regulacji elektrowni wiatrowej z wykorzystaniem multiskalarnego modelu MDZ.



### 3.1 UKŁAD REGULACJI MOCĄ MDZ

Właściwości dynamiczne układu z MDZ zależne są od modelu matematycznego na podstawie którego zrealizowano syntezę układu regulacji. Najczęściej spotykane są układy regulacji bazujące na modelu wektorowym [2], jednak korzystniejsze właściwości dynamiczne wykazują układy bazujące na modelu multiskalarnym [3]. Zastosowany w proponowanym systemie układ regulacji mocy maszyny dwustronnie zasilanej, pracującej jako generator w systemie elektroenergetycznym przedstawiono na rysunku 4. Obszerny opis układu regulacji, łącznie z estymacją zmiennych, można znaleźć w [4]-[6].



Rys. 4. Struktura sterowania mocą maszyny dwustronnie zasilanej

Prawo sterowania mocą czynną i bierną MDZ w stanie ustalonym wyrażone w funkcji zmiennych modelu multiskalarnego określone jest zależnościami:

$$P = -\frac{L_m}{L_s} z_{12} \quad (6)$$

$$Q = \frac{1}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} z_{22} \quad (7)$$

gdzie:  $P$  jest mocą czynną uzwojenia stojana,  $Q$  jest mocą bierną uzwojenia stojana,  $L_m$  jest indukcyjnością wzajemną,  $L_s$  jest indukcyjnością uzwojenia stojana.

Zmienne multiskalarne zdefiniowano następująco:

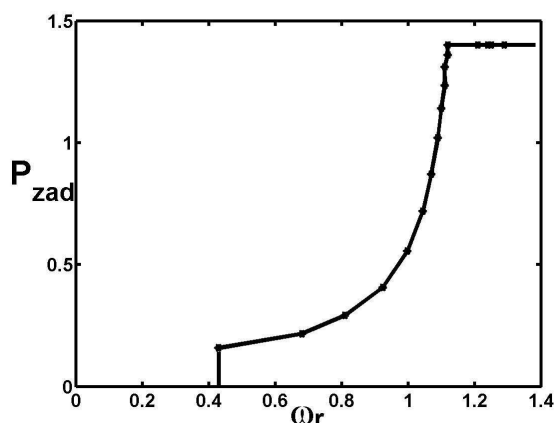
$$z_{12} = \psi_{sx} i_{ry} - \psi_{sy} i_{rx} \quad (8)$$

$$z_{22} = \psi_{sx} i_{rx} + \psi_{sy} i_{ry} \quad (9)$$

gdzie:  $\psi_{sx}$ ,  $\psi_{sy}$  są składowymi wektora strumienia stojana,  $i_{rx}$ ,  $i_{ry}$  są składowymi wektora prądu stojana i wirnika.

### 3.2 UKŁADU REGULACJI NADRZĘDNEJ

Optymalne przetwarzanie energii wiatru w elektrowni wiatrowej realizuje się w układzie regulacji nadrzędnej. Zależnie od prędkości wiatru, zmienia się prędkość kątowna wirnika. Na tej podstawie w układzie regulacji nadrzędnej wyznaczana jest wartość zadana mocy czynnej zgodnie z charakterystyką przedstawioną na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyka statyczna elektrowni wiatrowej

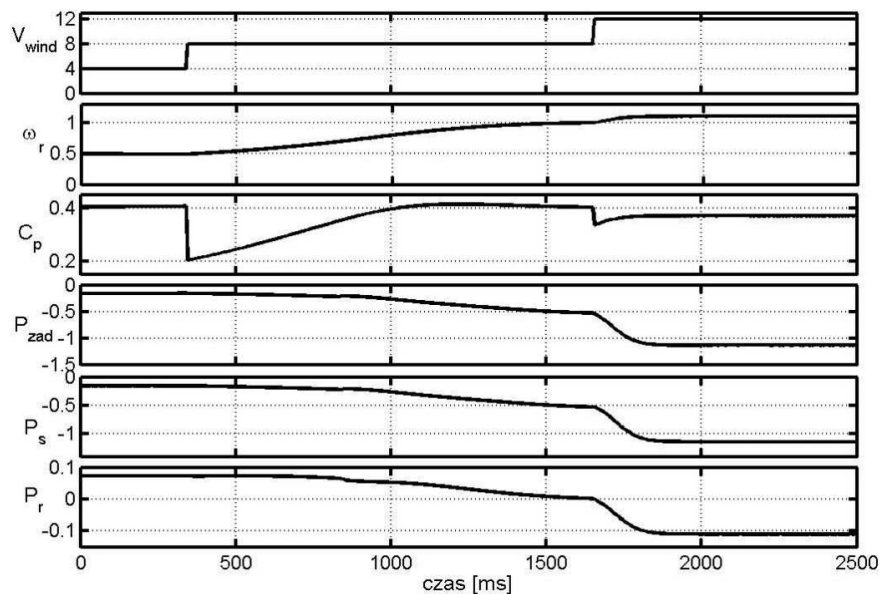
Prezentowaną powyżej charakterystykę aproksymowano wielomianem piątego rzędu zgodnie z zależnością:

$$P_{zad}(\omega_r) = A + B\omega_r + C\omega_r^2 + D\omega_r^3 + E\omega_r^4 + F\omega_r^5 \quad (10)$$

gdzie:  $A = -40,463$ ,  $B = 296,35$ ,  $C = -835,19$ ,  $D = -1145,3$ ,  $E = -768,16$ ,  $F = 202,69$

### 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH I WNIOSKI

Prezentowane badania symulacyjne przeprowadzono na stanowisku badawczym w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Gdańskiej. Weryfikację proponowanego układu regulacji przeprowadzono zadając skokowe zmiany wartości prędkości wiatru a uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 6. Prezentowane wyniki wyrażono w jednostkach względnych. Analiza uzyskanych przebiegów potwierdza optymalną pracę elektrowni, ze względu na stopień wykorzystania energii wiatru (41%), w szerokim zakresie zmian prędkości obrotowej. Stwierdzono, że dynamika procesu regulacji mocy czynnej jest zależna od dynamiki wielkości wejściowej nadrzędnego układu regulacji. Wielkością sterującą w proponowanej strukturze układu regulacji (podpunkt 3.2) jest prędkość obrotowa wirnika, obciążona stosunkowo dużą stałą czasową, zależną od sumarycznego momentu bezwładności turbiny wiatrowej i generatora. Przedmiotem dalszych badań jest wykazanie własności układu regulacji w którym wartość zadanej mocy czynnej wyznaczano zależnie od aktualnej prędkości wiatru.



Rys. 6. Przebieg procesu regulacji mocy w elektrowni wiatrowej z MDZ: gdzie  $P_s$  jest mocą czynną uzwojenia stojana a  $P_r$  jest mocą czynną uzwojenia wirnika

Praca powstała w ramach projektu badawczego KBN nr 8 T10A 05521.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Zekai S.: A short physical note on a new wind power formulation, *Renewable Energy* 28 (2003), s. 2379-2382.
2. Bogalecka E, Krzemiński Z., Wierzejski M.: Control system of Double Fed Machine Working as a Generator, *Int. Conf. "Power Conversion and Intelligent Motion"*, June 1991.
3. Bogalecka E, Krzemiński Z.: Sensorless Control of Double Fed Machine for Wind Power Generators, *EPE-PEMC Dubrovnik&Cavat*, 2002.
4. Krzemiński Z.: Control system of Double Fed Machine Based on Multiscalar Model, *IFAC 11<sup>th</sup> World Congress on Automatic Control*, Vol.8, Talin, 1990.
5. Krzemiński Z.: Sensorless Control of Double Fed Machine for Wind Power Generators, *Power Conversion Conference Osaka*, 2002.
6. Krzemiński Z., Kulesza K.: Właściwości dynamiczne maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej, *PES*, Kościelisko, 2003.

## WIND POWER STATION WITH DOUBLE FED INDUCTION GENERATOR

This paper propose a control strategy of double fed induction machine working as generator in wind power generating system, connected to the network. The synthesis of the control system is based on a multiscalar model of DFM. A controller, which maximizes the power output of turbine is also described.