

Adam GULCZYŃSKI\*

## STEROWANIE MAŁEJ ELEKTROWNI WIATROWEJ NA MAKSYMUM MOCY CZYNNEJ

Przedstawiono sposób sterowania pozwalający na optymalizowanie generowanej mocy w małej elektrowni wiatrowej. Zaprezentowany sposób sterowania opiera się na pomiarze wielkości prądów i napięć w układzie przekształtnikowym, obliczaniu mocy czynnej oraz cyklicznej zmianie obciążenia, przez co nie istnieje konieczność stosowania układów pomiaru prędkości wiatru oraz prędkości obrotowej generatora. Pokazano wybrane wyniki badań symulacyjnych dla układu elektrowni pracującej ze zmienną prędkością obrotową, z generatorem z magnesami trwałymi oraz z pełnowymiarowym układem przekształtnikowym. Porównano pracę elektrowni w zamkniętym i otwartym układzie sterowania.

### 1. WSTĘP

Pomimo niedoskonałości elektrowni wiatrowych, a właściwie stochastycznej natury wiatru, liczba elektrowni wiatrowych podłączonych do sieci lub pracujących indywidualnie rośnie. Ponadto prowadzone są badania nad sposobami gromadzenia energii takimi jak: akumulatory litowo-jonowe, koła zamachowe i systemy magazynowania za pomocą sprężonego powietrza [1]. Z wyżej wymienionych powodów modelowanie, projektowanie nowych rozwiązań układów oraz algorytmów sterowania dla elektrowni wiatrowych jest istotnym zagadnieniem.

Przedmiotem badań jest mała elektrownia wiatrowa składająca się z turbiny wiatrowej, generatora z magnesami trwałymi oraz pełnowymiarowego układu przekształtnikowego. Układ przekształtnikowy stanowią: prostownik niesterowany, przetwornica podwyższająca napięcie oraz falownik napięcia.

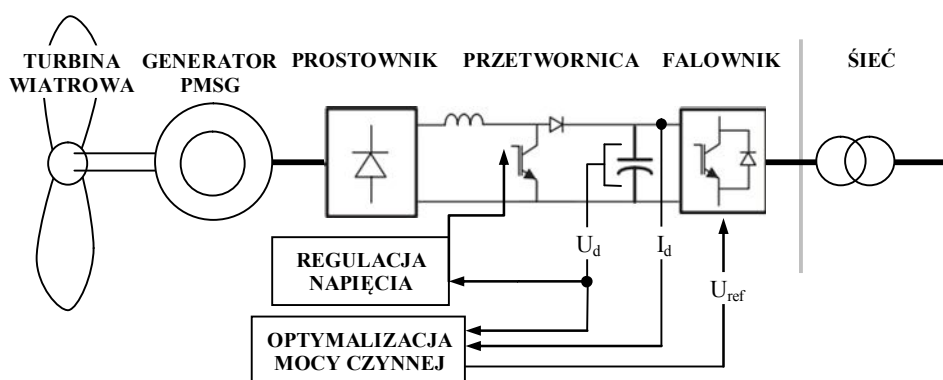
Celem jest opracowanie prostego sposobu sterowania elektrowni wiatrowej na maksimum mocy czynnej. Zaproponowany sposób opiera się na cyklicznej zmianie obciążenia elektrowni poprzez zmianę napięcia referencyjnego falownika, na pomiarze wielkości napięć i prądów na wyjściu przetwornicy, obliczaniu mocy czynnej oraz analizie mocy w zależności od obciążenia. Wówczas możliwe jest określenie punktu pracy w jakim znajduje się elektrownia oraz określenie dalszej zmiany obciążenia, tak aby pozyskiwać maksymalną moc z wiatru. Zaproponowany sposób nie wymaga stosowania stosunkowo drogich i skomplikowanych układów pomiaru prędkości wiatru oraz prędkości obrotowej turbiny.

---

\* Politechnika Poznańska.

## 2. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU

Rysunek 1 przedstawia schemat badanego układu elektrowni wiatrowej. Rozważono turbinę wiatrową bez regulacji kąta natarcia łopat, sprzężoną bezpośrednio z generatorem, bez przekładni. Układ taki charakteryzuje się prostą budową części mechanicznej. Nieobecność przekładni zmniejsza awaryjność elektrowni oraz zwiększa sprawność, jednak pociąga za sobą konieczność zastosowania generatora wolnoobrotowego.



Rys. 1. Schemat blokowy badanego układu małej elektrowni wiatrowej

Dla małych elektrowni wiatrowych dobrym rozwiązaniem generatora wolnoobrotowego jest generator synchroniczny z magnesami trwałymi (PMSG). Konstrukcja generatora PMSG zapewnia długotrwałą pracę bez wymiany i konserwacji podzespołów. Nowe wysokoenergetyczne magnesy umożliwiają budowę generatorów synchronicznych o wysokiej sprawności. Ponadto generator PMSG nie wymaga dodatkowego obwodu wzbudzenia.

Warunkiem koniecznym na pozyskiwanie maksymalnej mocy z wiatru jest praca elektrowni ze zmienną prędkością obrotową wirnika. Jednak generatory z magnesami trwałymi nie dają stałego napięcia w przypadku gdy zmienia się prędkość obrotowa lub prąd obciążenia. Dlatego w układzie z generatorem PMSG pracującym przy zmiennej prędkości obrotowej konieczne jest zastosowanie układu energoelektronicznego. Układ energoelektroniczny przekształca całą energię elektryczną o zmiennej częstotliwości i amplitudzie na energię o parametrach dopasowanych do sieci lub odbiornika.

Układ przekształtnikowy składa się z niesterowanego układu prostownikowego, przetwornicy podnoszącej napięcie oraz falownika napięcia. Powyższe rozwiązanie umożliwia oddawanie energii do sieci również w przypadku występowania niskich prędkości wiatru. Gdy prędkość wiatru jest niska, turbina obraca się wolno, na zaciskach generatora uzyskujemy niską wartość napięcia. Wówczas przetwornica

podwyższa napięcie do takiej wartości, przy której możliwe jest oddawanie energii do sieci lub odbiornika. Odpowiednie sterowanie falownikiem umożliwia oddawanie do sieci zadanej lub optymalnej wartości mocy czynnej.

W układzie występują dwie pętle sprzężenia zwrotnego. Pierwsza pętla reguluje wartość napięcia na kondensatorze wyjściowym szyny napięcia stałego, poprzez zmianę współczynnika wypełnienia modulatora przetwornicy. Napięcie stałe utrzymywane jest na takim poziomie, przy którym istnieje możliwość oddawania energii do obciążenia. Zastosowanie regulatora PI zapewnia odpowiednią jakość regulacji napięcia.

W drugiej pętli zaimplementowano proponowany algorytm optymalizowania mocy. Polega on na cyklicznej zmianie obciążenia elektrowni. Dla stałej prędkości wiatru obciążenie oscyluje wokół pewnej wartości, przy której elektrownia oddaje moc maksymalną. Dzięki temu elektrownia znajduje się поблизу optymalnego punktu pracy. Zmianę obciążenia dokonuje się poprzez zmianę przebiegu napięcia referencyjnego falownika.

## 2.1. Model turbiny

Moc mechaniczna  $P_m$  turbiny jest mniejsza od mocy wiatru  $P_w$  ponieważ prędkość wiatru za turbiną nie jest zerowa. Stosunek mocy uzyskiwanej przez turbinę do mocy wiatru określa współczynnik wykorzystywania energii wiatru  $c_p$ . Współczynnik  $c_p$  zależy od względnej prędkości końca łopat oraz, w przypadku gdy istnieje możliwość regulacji łopat, od kąta natarcia łopat.

Znając charakterystykę współczynnika mocy  $c_p$ , moc mechaniczną uzyskiwaną z wiatru przez turbinę wyrazić można wzorem [2]:

$$P_m = P_w c_p(\lambda) = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 c_p(\lambda), \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza,  $v$  – prędkość powietrza,  $R$  – promień wirnika,  $\lambda$  – względna prędkość końca łopat. Przy czym względną prędkość końca łopat określamy w zależności od prędkości obrotowej wału turbiny –  $\omega_m$ , promienia wirnika oraz prędkości wiatru, w następujący sposób:

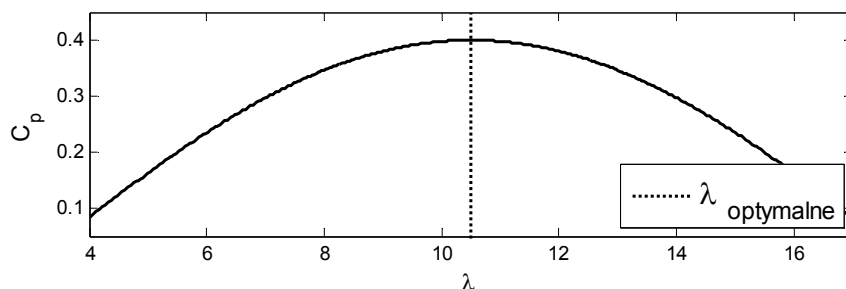
$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v}. \quad (2)$$

Współczynnik wykorzystania energii wiatru dla przykładowej turbiny wiatrowej zgodnie z [3] możemy aproksymować wzorem:

$$c_p(\lambda) = 0,4 \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15}\right). \quad (3)$$

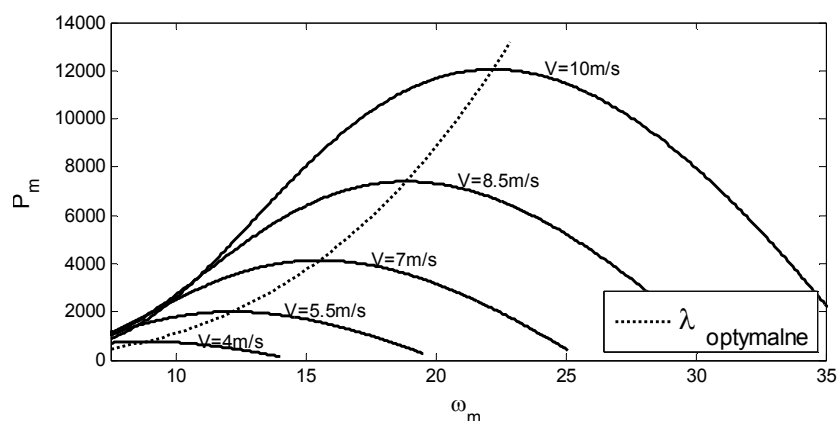
Maksymalna teoretyczna wartość  $c_p$  wynosi 0,593, jednak w praktyce zmienia się w zakresie od 0,1 do 0,4 [3]. Charakterystykę współczynnika mocy w funkcji względnej prędkości końca łopat, określonego zgodnie z wzorem (3) przedstawia

rysunek 2. Gdy względna prędkość końca łopat równa się wartości optymalnej turbina znajduje się w optymalnym punkcie pracy, współczynnik mocy  $c_p$  jest największy.



Rys. 2. Charakterystyki współczynnika mocy określonego zgodnie z wzorem (x)

Charakterystyki mocy turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla współczynnika mocy określonego zgodnie z wzorem (3) przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Charakterystyki mocy turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla różnych prędkości wiatru

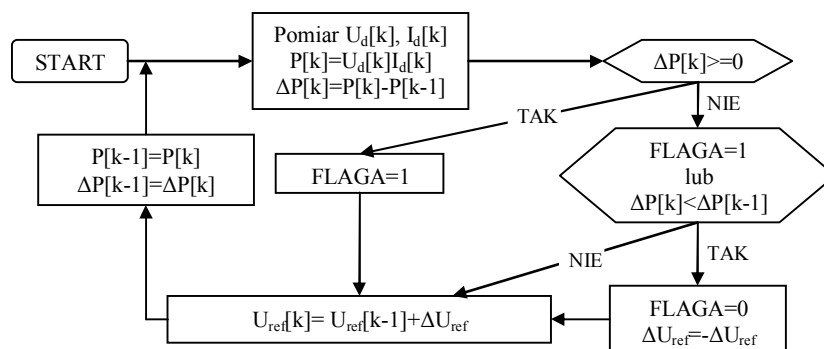
Dla danej prędkości wiatru istnieje dokładnie jedna wartość prędkości obrotowej turbiny, przy której z wiatru pozyskiwana zostaje moc maksymalna. Zadaniem algorytmu sterującego jest utrzymywanie elektrowni w pobliżu optymalnego punktu pracy.

## 2.2. Algorytm sterowania

Klasyczny algorytm optymalizujący generowaną moc reguluje względną prędkość końca łopat na wartość optymalną. Układ taki wymaga znajomości modelu turbiny, aktualnej prędkości wiatru oraz prędkości obrotowej. Jednak nie

zawsze posiadamy dokładne parametry modelu. Co więcej układy pomiaru prędkości wiatru oraz prędkości obrotowej komplikują budowę oraz podrażają koszt elektrowni [4]. Alternatywą jest poniżej przedstawiony algorytm sterowania.

Prezentowany algorytm (rysunek 4) opiera się na ciągłej zmianie obciążenia. Przy czym wielkości wejściowe wpływają na ścisłą monotoniczność obciążenia. Wielkościami wejściowymi są napięcie ( $U_d$ ) oraz natężenie prądu ( $I_d$ ) na wyjściu przetwornicy podwyższającej napięcie. Zmiana obciążenia dokonywana jest poprzez zmianę napięcia referencyjnego falownika. W wyniku działania algorytmu obciążenie oscyluje wokół pewnej wartości, przy której elektrownia oddaje moc maksymalną.



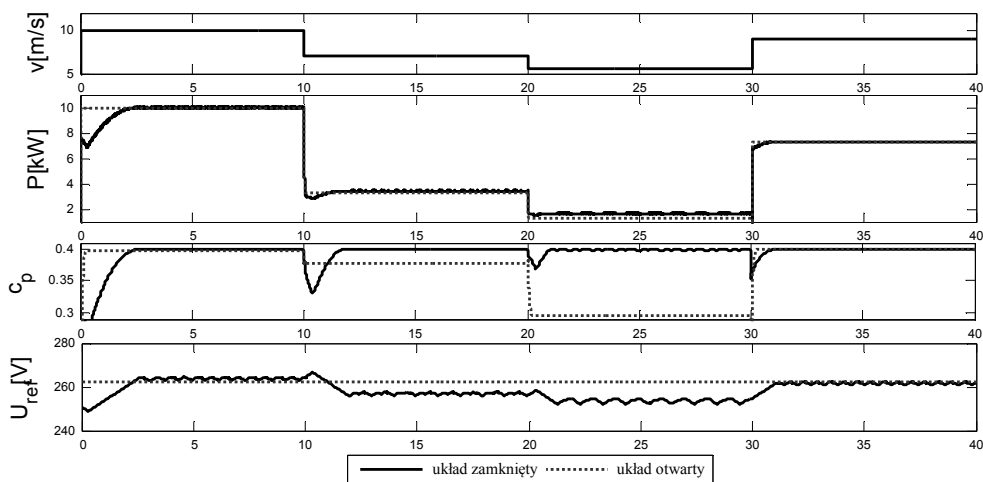
Rys. 4. Algorytm sterowania na maksimum mocy czynnej

W przypadku gdy moc rośnie lub nie zmienia się oznacza to odpowiedni kierunek zmiany obciążenia, elektrownia zbliża się do optymalnego punktu pracy. Jednak po pewnym czasie stała zmiana obciążenia powoduje oddalenie się od optimum. Zatem gdy wcześniej moc rosła a po chwili zaczęła maleć oznacza to, że należy zmienić kierunek zmian obciążenia. Wówczas moc zacznie ponownie rosnąć, osiągnie wartość maksymalną i po pewnej chwili zacznie maleć, cykl się powtórzy. Układ będzie pracował w otoczeniu punktu optymalnego.

Dla pewnych warunków układ jest niestabilny. Mianowicie gdy prędkość wiatru maleje a obciążenie rośnie, moc zaczyna gwałtownie maleć. Przypadek ten można wykryć poprzez porównywanie aktualnego oraz poprzedniego przyrostu mocy. Występuje on gdy moc maleje oraz aktualny przyrost jest mniejszy od poprzedniego. Wówczas wystarczy zmienić kierunek zmiany obciążenia.

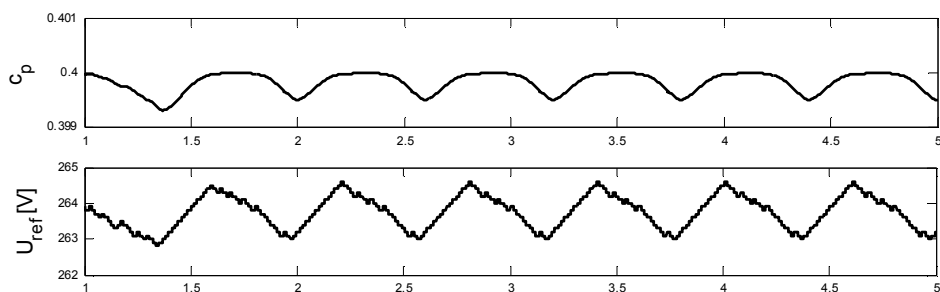
### 3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania przeprowadzono w środowisku Matlab/Simulink. Badania wykonano dla zamkniętego układu regulacji z zaimplementowanym algorytmem optymalizującym oddawaną moc oraz dla układu otwartego z stałą wartością napięcia referencyjnego falownika czyli stałą wartością obciążenia (rysunek 5).



Rys. 5. Wyniki badań symulacyjnych dla zamkniętego oraz otwartego układu regulacji

Elektrownia pracująca w zamkniętym układzie regulacji wykazuje większą efektywność w zmiennych warunkach wiatrowych, co szczególnie wynika z przebiegu współczynnika mocy  $c_p$  na rysunku 5.



Rys. 6. Wyniki badań symulacyjnych dla stałej prędkości wiatru dla układu zamkniętego

Rysunek 6 przedstawia wyniki symulacji dla stałej prędkości wiatru. Współczynnik mocy  $c_p$  oraz wartość referencyjna napięcia falownika, a przez co obciążenie elektrowni, oscylują wokół optymalnych wartości.

#### 4. PODSUMOWANIE

Prezentowany algorytm może być atrakcyjnym rozwiązaniem dla małych elektrowni wiatrowych ze względu na to, że nie wymaga pomiaru prędkości wiatru, pomiaru prędkości obrotowej oraz znajomości modelu turbiny. Można go

zaimplementować w istniejącym układzie mikroprocesorowym który steruje elektrownią wiatrową. Ponadto wielkościami wejściowymi są sygnały łatwo dostępne i mierzalne w układzie przekształtnikowym. Proponowany algorytm umożliwia wzrost generowanej energii elektrycznej.

W trakcie badań symulacyjnych dokonano porównania pracy elektrowni w układzie otwartym i zamkniętym. Praca w układzie zamkniętym z zaproponowanym sposobem sterowania wykazała większą efektywność. Z badań symulacyjnych wynika również, że algorytm sprawdza się dla różnych prędkości wiatru. Wadą prezentowanego rozwiązania jest stosunkowo długi czas regulacji.

### LITERATURA

- [1] Electricity Storage Technologies: Market Penetration and Roadmapping, <http://www.frost.com>
- [2] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Wind Energy Handbook. England 2001.
- [3] Mosaud Barakati S., Handbook of Renewable Energy Technology. Wind Turbine Systems: History, Structure and Dynamic Model. Chapter 2. World Scientific Publishing 2011.
- [4] Tan K., Islam S., Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 19, Number 2, June 2004.

### OUTPUT POWER MAXIMIZATION CONTROL TECHNIQUE OF SMALL WIND TURBINE

This text focuses on technique to get maximum power of wind energy conversion system. It uses the measurements of power converter current and voltage, power calculation and permanent load change without using sensors for wind and rotor speed. Simulation results of the wind turbine with permanent magnet synchronous generator and fully rated power electronics converter controlled by proposed algorithm was presented. Obtained results was compared with simulation results of system with constant load. The presented control allows the wind turbine system operate with optimal power.