

Piotr BICZEL¹

Antoni DMOWSKI²

Arkadiusz KASZEWSKI²

Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki (1)
Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej (2)

Wybrane zagadnienia modelowania elektrowni wiatrowej

Streszczenie. Artykuł prezentuje wybrane wyniki symulacji elektrowni wiatrowej na potrzeby projektowania urządzeń. Szczególny nacisk autorzy położyli na pracę falownika energoelektronicznego. Przedstawione zostały modele silnika wiatrowego, generatora synchronicznego i falownika energoelektronicznego. Rozpatrzono różne przypadki pracy elektrowni wiatrowej w sieci zasilającej.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowe, falownik napięcia, regulacja mocy, modelowanie

Wprowadzenie

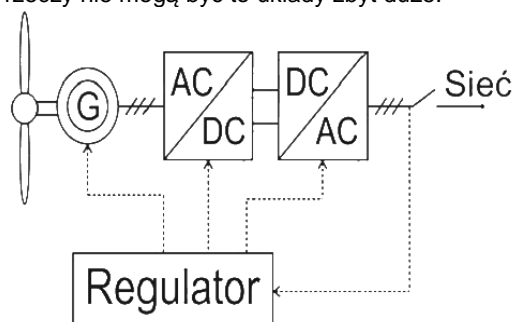
Elektrownie wiatrowe są wciąż dynamicznie rozwijającą się gałęzią wytwarzania energii elektrycznej. W obecnej sytuacji rynkowej inwestorzy są zmuszeni czekać od kilkanaście miesięcy do 2-3 lat na dostawę siłowni wiatrowych. Stąd co jakiś czas pojawiają się przedsiębiorcy, którzy są zainteresowani produkcją elektrowni wiatrowych. Proces projektowania, konstruowania i wprowadzenia takiego produktu na rynek jest jednak długi i skomplikowany. Można go wybitnie skrócić stosując metody symulacyjne w projektowaniu turboszespołu wiatrowego. Celem opisywanej tu pracy jest przygotowanie narzędzi symulacyjnych do projektowania siłowni wiatrowych, szczególnie układów przekazywania energii do krajowego systemu elektroenergetycznego. Głównym problemem jest takie skonstruowanie urządzenia przekształtnikowego, żeby w węźle przyłączeniowym zachowane zostały właściwe parametry jakości napięcia, a z drugiej, żeby konstrukcja ta i jej elementy składowe były zoptymalizowane pod kątem kosztów produkcji i materiałów.

Na własności ruchowe elektrowni ma wpływ cały układ przeniesienia mocy. Stosunek mocy znamionowych poszczególnych elementów jest ważny dla dopasowania konstrukcji do danych warunków wiatrowych. Na przykład w Polsce, ze względu na małe prędkości wiatru, należy przewymiarowywać silniki wiatrowe w stosunku do mocy generatora.

Modelowana elektrownia wiatrowa

Spośród wielu konstrukcji elektrowni wiatrowych autorzy wybrali do badania układ przedstawiony na rysunku 1. Jest to najbardziej obiecująca konstrukcja, która zapewnia dużą efektywność pozyskania energii wiatru, szczególnie w warunkach krajowych, przy dużym udziale słabych wiatrów. Najważniejszą cechą tej konstrukcji jest znacznie niższa prędkość rozruchu w stosunku do układów z generatorami asynchronicznymi różnych typów.

Prace nad własną konstrukcją siłowni wiatrowej należy zaczynać od niezbyt dużych jednostek. Wraz z nabieraniem doświadczenia można wprowadzać do produkowanego typoszeregu urządzenia o coraz większych mocach. Z drugiej strony małe elektrownie wiatrowe (rzędu kilkunastu-, kilkudziesięciu kilowatów) są zbyt małe, żeby mogły odnieść sukces ekonomiczny, szczególnie przy polskim systemie wpracy OZE. Z tych powodów dalsze rozważania dotyczą modelowania elektrowni o mocy zainstalowanej rzędu 100 kW. Innym powodem wyboru siłowni tej wielkości jest chęć zaspokojenia zapotrzebowania na siłownie wiatrowe, w które mogłyby zainwestować średnio zamożny przedsiębiorca. Siłą rzeczy nie mogą być to układy zbyt duże.



Rys. 1. Schemat blokowy modelowanej elektrowni wiatrowej

Głównym celem jest tu przygotowanie narzędzia do badania zachowania głównego toru mocy elektrowni. Autrzy koncentrują się więc na modelowaniu poszczególnych jego elementów: silnika wiatrowego, wolnoobrotowego generatora synchronicznego i falownika napięcia. Przy czym zaproponowane modele mają pozwalać na badanie zdolności urządzenia do przekazywania energii do KSE i wzajemne wymiarowanie urządzeń.

Modelowanie silnika wiatrowego i generatora

Sygnałami wejściowymi modelu silnika wiatrowego są: prędkość wiatru, prędkość obrotowa wału i kąt natarcia łopatek. Zaś sygnałem wyjściowym moment na wale silnika, wyrażony wzorem:

$$(1) \quad M_{wt} = \frac{P_{wt}}{\omega_{wt}}$$

gdzie: M_{wt} – moment na wale silnika, P_{wt} – moc silnika, ω_{wt} – prędkość obrotowa wału silnika.

Podstawiając do równania (1) wyrażenie wiążące moc generowaną przez silnik wiatrowy i prędkość wiatru [3] oraz wprowadzając wyróżnik szybkobieżności λ :

$$(2) \quad \lambda = \frac{\omega_{wt} R}{v_1}$$

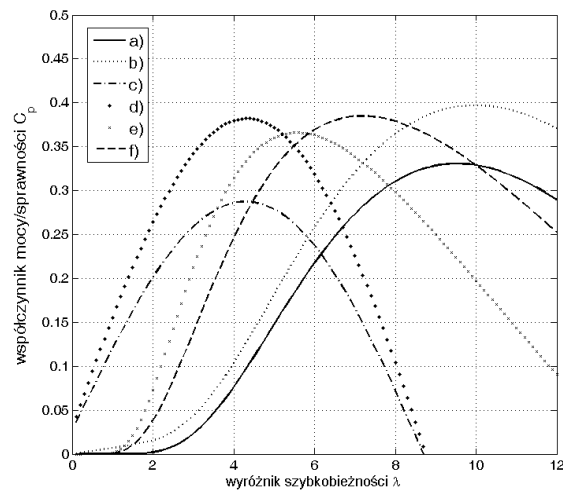
gdzie: R – promień wirnika, v_1 – prędkość wiatru przed silnikiem, otrzymuje się wyrażenie opisujące moment rozwijany na wale silnika w funkcji określonych wyżej wielkości, w którym dane techniczne silnika wiatrowego są parametrami:

$$(3) \quad M_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_1^2 \frac{C_p}{\lambda}$$

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

gdzie: ρ – gęstość powietrza, C_p – krzywa mocy (sprawności Betza) silnika.

Jak widać ze wzoru (3) kluczowa dla modelowania silnika wiatrowego jest znajomość krzywej sprawności silnika. Krzywa C_p jest funkcją wyróżnika szybkobieżności i kąta natarcia łopat. Powstaje najczęściej na drodze pomiarów i jest charakterystyczna dla danego typu silnika. Silniki podobne wielkości i liczbie łopat mogą się znacząco różnić przebiegiem tych krzywych. Autorzy zebrali kilka przykładowych krzywych dla różnych silników wiatrowych (rys 2) [2, 3, 4].



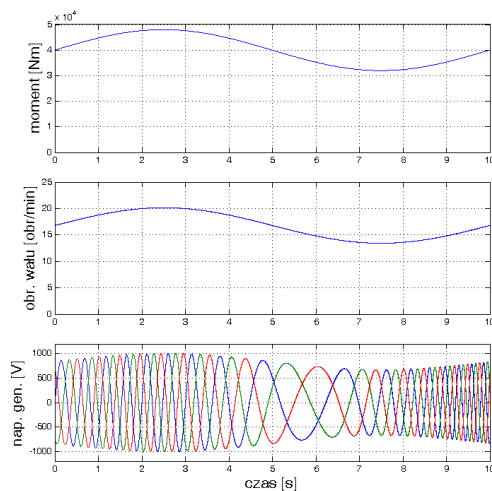
Rys. 2. Współczynniki mocy wybranych silników wiatrowych

Wał silnika wiatrowego rozpratrywanej elektrowni jest bezpośrednio połączony z wałem generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Model generatora przyjęty przez autorów opisany jest równaniem [6]:

$$(4) \quad \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_{ds}} (-R_s i_d + \omega_e L_{qs} i_q + u_d) \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_{qs}} (-R_s i_q + \omega_e (L_{ds} i_d + \Psi_f)) + u_q \\ \omega_e &= p \omega_{wt} \\ M_{gen} &= \frac{3}{2} p (L_{ds} i_d i_q + i_q \Psi_f) \end{aligned}$$

gdzie: u_d, u_q, i_d, i_q – składowe napięcia i prądu stojana we współrzędnych $0dq$, gęstość powietrza, L_d, L_q – składowe indukcyjności stojana, R_s – rezystancja stojana, R_s – rezystancja stojana, p – liczba par biegunów, Ψ_f –

Równanie mechaniczne zostało sformułowane dla całego zespołu wirującego. Przykładowy przebieg napięcia na zaciskach generatora synchronicznego przedstawiony jest na rys. 3.



Rys. 3. Przebieg napięcia na zaciskach generatora modelowanego zespołu

Modelowanie falownika napięcia

Falownik napięcia ma decydujące znaczenie dla zachowania się elektrowni wiatrowej w KSE. To z kolei przekłada się wprost na sukces komercyjny budowy parku wiatrowego. Falownik napięcia pozwala na regulację mocy czynnej i biernej w punkcie przyłączenia elektrowni. Dzięki temu można wyprowadzić więcej energii. Szczególnie ważna jest tu regulacja mocy biernej. Dotychczas stosowano głównie falowniki utrzymujące zerową moc bierną. Jest to rozwiązanie niekorzystne w warunkach miękkich sieci.

Autorzy przygotowali modele falowników napięcia sterowanych prądowo i z nadrzędnym regulatorem mocy czynnej i biernej. Dla właściwej pracy elektrowni wiatrowej korzystniejsze jest stosowanie falowników z regulacją mocy czynnej i biernej, tzw. falowników z regulacją PQ. Na rys. 4. przedstawiony został wynik symulacji falownika umożliwiającego regulację mocy biernej w szerokim zakresie.

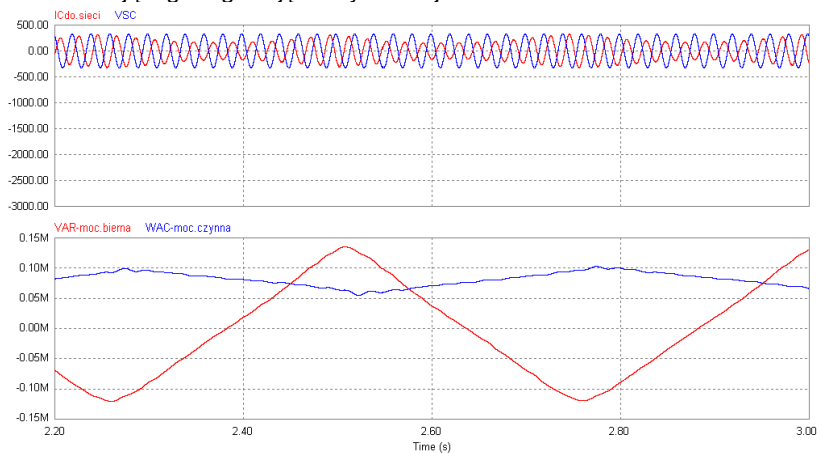


Fig. 4. Symulacja pracy falownika napięcia z możliwością regulacji mocy biernej

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Badanie właściwości falownika z regulatorem PQ pozwala zauważyć, że do poprawnej regulacji mocy biernej i czynnej niezbędny jest pomiar napięcia w dwóch punktach: bezpośrednio na zaciskach wyjściowych falownika i w punkcie przyłączenia do KSE. Regulacja mocy następuje w punkcie przyłączenia. W większości farm wiatrowych punkty te są oddalone od siebie i występuje pomiędzy nimi pewna impedancja, która jest niezbędna w procesie regulacji. Jednak w wypadku urządzeń instalowanych w pobliżu punktu przyłączenia może być konieczne wprowadzenie dodatkowej indukcyjności szeregowej.

Przykładowe badanie wpływu zespołu elektrowni wiatrowych na sieć elektroenergetyczną

Oprócz badania właściwości samego falownika w elektrowni wiatrowej przygotowane modele pozwalają na badanie współpracy danej jednostki z liniami różnych rodzajów. Rodzaj linii ma bowiem decydujące znaczenie dla rozptyłu mocy biernej [5]. W tym celu przygotowano model układu przedstawiony na rys. 5. Wybrane wyniki badań przedstawione są na rys. 6. Widać zmiany mocy biernej przekazywanej do sieci w funkcji mocy czynnej.

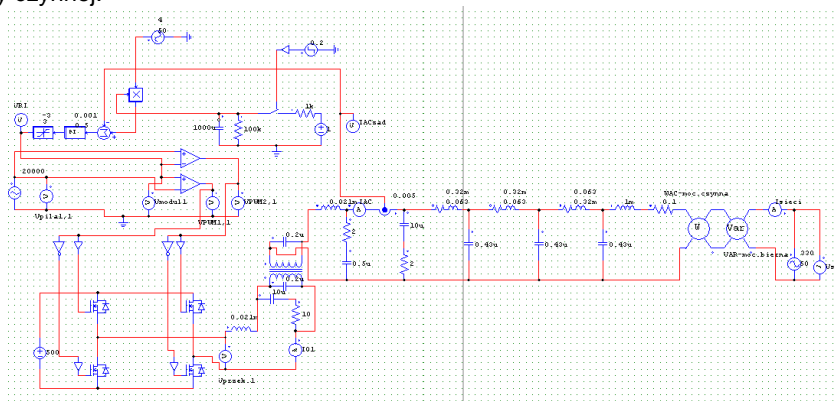


Fig. 5. Schemat symulacyjny pracy elektrowni wiatrowej z linią przyłąceniową

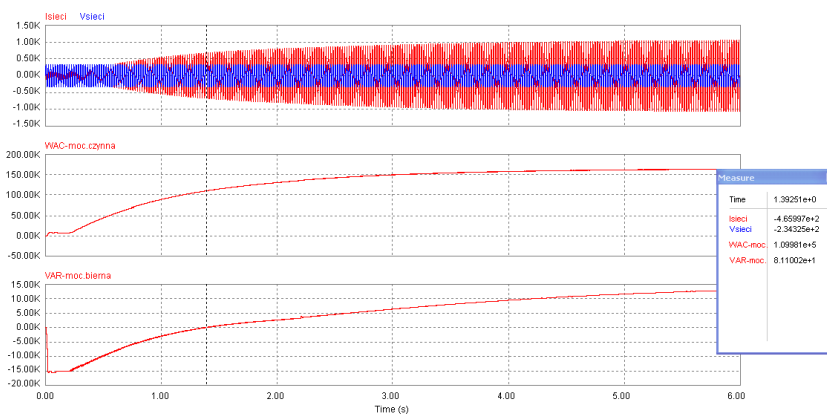


Fig. 6. Wyniki symulacji pracy elektrowni wiatrowej z linią przyłąceniową

Podsumowanie

Mimo pozornie nasyconego rynku wciąż istnieje miejsce dla kolejnych wytwórców siłowni wiatrowych. Sukces komercyjny zależy od umiejętności obniżenia kosztów produkcji, w tym procesu projektowania urządzenia. Modele przedstawione w niniejszym artykule mają ułatwić i skrócić ten proces.

Z drugiej strony w warunkach KSE należy szczególnie skupić się na oddziaływaniu siłowni wiatrowej na sieć zasilającą i wpływie na jakość napięcia w punkcie przyłączenia. Dzięki temu już na etapie projektowania urządzenia można starać się ograniczyć część niekorzystnych zjawisk przez właściwe wzajemne wymiarowanie urządzeń składowych jednostki oraz zastosowanie odpowiednich topologii i algorytmów sterowania układów przekształtnikowych przekazujących energię do KSE. Przedstawione modele symulacyjne zmierzają do realizacji tego celu.

Omówione modele zostały przygotowane w programie Matlab/Simulink i PSIM. Są to podstawowe narzędzia modelowania matematycznego do celów inżynierskich, które pozwalają na odpowiednio wierne oddanie badanych zjawisk i uzyskanie wyników satysfakcjonujących inżyniersko.

Referat powstał w ramach grantu JM Rektora Politechniki Warszawskiej nr 503R/0022011 „Symulacje komputerowe elektrowni wiatrowych i farm wiatrowych przyłączanych do KSE” oraz grantu nr N510 325537 „Projekt i wykonanie układu zapewniającego współpracę ogniw fotowoltaicznych i zasobnika energii z siecią elektroenergetyczną”.

Literatura

1. Biczel P., Integracja rozproszonych źródeł energii w mikrosieci prądu stałego. Rozprawa habilitacyjna. Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny. W druku.
2. Duquette M. M., The Effect of Solidity and Blade Number on the Aerodynamic Performance of Small Horizontal Axis Wind Turbines. Praca magisterska, Clarkson University, Potsdam, NY, USA, 2002
3. Lubosny Z., Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT, Warszawa, 2007.
4. Mullane A., Lightbody G., Yacamini R., Adaptive control of variable speed wind turbines. Power Engineering, strony 101–110, 2001
5. Schulz D., Grid integration of Wind Energy System in "Power Electronics in Smart Electrical Networks". Redaktorzy: Strzelecki R., Benysek. G. Springer Verlag, London, 2008.
6. Rolan A. i in., Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2009, ISIE 2009, pp.734-739, 5-8 July 2009

Autorzy: prof. dr hab. inż. Antoni Dmowski, mgr inż. Arkadiusz Kaszewski; Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, dr inż. Piotr Biczel Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: biczel@ee.pw.edu.pl