

*elektrownia wiatrowa, konfiguracja,
generator asynchroniczny
modelowanie, symulacja*

Piotr URACZ*, Bogusław KAROLEWSKI*

UKŁADY PRACY GENERATORÓW STOSOWANYCH W ELEKTROWNIACH WIATROWYCH

Przedstawiono opis konfiguracji generatorów i układów energoelektroniki najczęściej stosowanych w konstrukcjach elektrowni wiatrowych. Opis zawiera cechy charakterystyczne oraz najważniejsze wady i zalety poszczególnych konfiguracji. Ze względu na popularność generatora asynchronicznego w elektrowniach wiatrowych, zwłaszcza o niewielkich mocach, zaprezentowano możliwość jego modelowania za pomocą modelu matematycznego analogicznego do modelu obwodowego silnika indukcyjnego, opisanego w [6]. Zamieszczono wyniki przykładowej symulacji przejścia od pracy silnikowej do generatorowej.

1. WPROWADZENIE

Turbiny wiatrowe znane są już od bardzo dawna, ale profesjonalna energetyka wiatrowa rozwija się dynamicznie od początku lat 80-tych dwudziestego wieku. Na przestrzeni 25 lat moc znamionowa instalowanych elektrowni zwiększyła się praktycznie o trzy rzędy: zaczynając od montowanych w połowie lat 80-tych konstrukcji o mocy kilku kW, a kończąc na współczesnych rozwiązaniach o mocach sięgających 4,5 MW (np. Enercon 112 w Magdeburgu). W okresie tym zmieniały się także konfiguracje turbin i generatorów elektrowni, oraz sposób ich podłączania do sieci. Stosowane początkowo proste układy wykorzystujące generatory indukcyjne klatkowe zastępowano stopniowo coraz bardziej skomplikowanymi konstrukcjami z innymi typami generatorów. Dużą rolę w tych przemianach odegrał rozwój energoelektroniki, umożliwiając budowanie bardziej elastycznych, a co za tym idzie, efektywniejszych elektrowni wiatrowych. Znaczący wpływ miał także rozwój technologii wytwarzania magnesów trwałych. Nowe wysokoenergetyczne magnesy umożliwiły budowę

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-372 Wroclaw, ul Smoluchowskiego 19, piotr.uracz@pwr.wroc.pl, boguslaw.karolewski@pwr.wroc.pl

generatorów synchronicznych o sprawności i niezawodności na poziomie zbliżonym do maszyn klatkowych.

Na świecie systematycznie rośnie liczba i moc siłowni wiatrowych podłączanych do systemu elektroenergetycznego. Prym w tej dziedzinie wiodą państwa Unii Europejskiej. W samym tylko 2004 roku, moc nowo zainstalowanych urządzeń wyniosła tutaj ponad 5,7 GW, a tym samym całkowita moc zainstalowana wzrosła o 20% – do poziomu ponad 34 GW [4]. W Polsce również można spodziewać się wzrostu mocy zainstalowanej, pomimo że oficjalnie w 2004 roku nie zarejestrowano nowych jednostek. Bодźcem do dalszego rozwoju powinno być Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii oraz energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła – Dz. U. Nr 104, poz. 971, z dnia 30 maja 2003 r. Oprócz nowych jednostek, w Polsce instaluje się również elektrownie używane, sprowadzane najczęściej przez prywatnych importerów, nie ujmowane w oficjalnych sprawozdaniach [2].

Istotnym zagadnieniem jest określenie oddziaływania tego typu jednostek wytwórczych na istniejącą sieć. Aby to było możliwe, konieczne jest sformułowanie modelu matematycznego elektrowni wiatrowej. Model taki składa się z kilku głównych elementów: układu odwzorowującego prędkość wiatru, modelu części mechanicznych (turbina, przekładnia, sprzęgło), modelu generatora oraz modelu elementów elektronicznych i energoelektronicznych (regulatorów, układu sterowania, przekształtników).

Do modelowania popularnego w siłowniach wiatrowych generatora indukcyjnego można wykorzystać odpowiednio przystosowany model obwodowy silnika indukcyjnego. W niniejszej publikacji przedstawiono przykładowe wyniki symulacji uzyskane za pomocą takiego modelu.

2. UKŁADY PRACY ELEKTROWNI WIATROWYCH – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

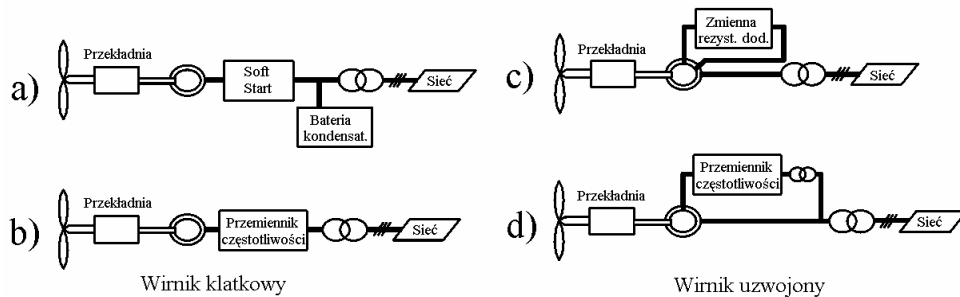
Na rys. 1 przedstawiono konfiguracje generatora i energoelektroniki najczęściej stosowane w elektrowniach wiatrowych.

Konfiguracja z rys. 1a stosowana była przez wielu duńskich producentów w latach 80-tych i 90-tych. Turbina jest połączona z generatorem przez przekładnię. W latach 80-tych układ został rozbudowany o baterię kondensatorów do kompensacji mocy biernej i układ tyrystorowy, tzw. soft-starter, ograniczający prąd rozruchu [5].

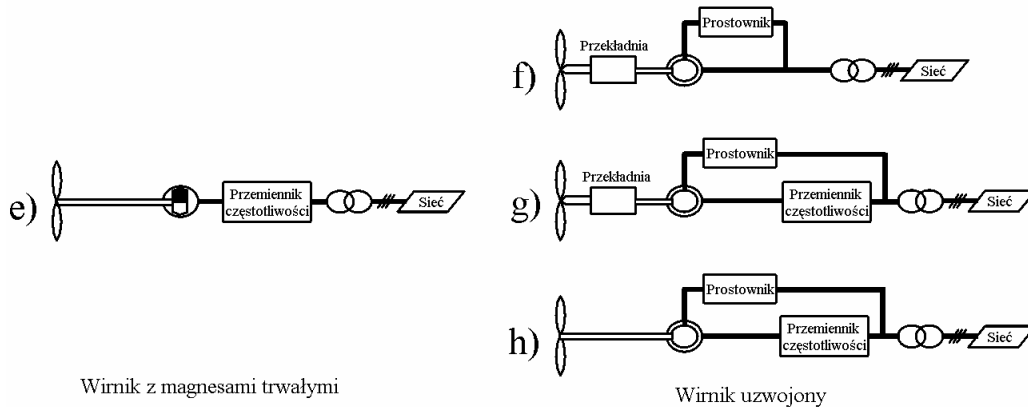
W stanie normalnej pracy generator pracuje przy prędkości nadsynchronicznej oddając moc czynną do sieci, ale równocześnie pobierając moc bierną. Prędkość maszyny jest utrzymywana przez sieć i zmienia się tylko w zakresie ograniczonym wartością poślizgu znamionowego. Dużą zaletą tego rozwiązania jest niski koszt układu oraz tanie i nieskomplikowane sterowanie. Układ taki nie wymaga układów synchronizacji ani kontroli prędkości. Niewątpliwą wadą tego rozwiązania jest brak możliwości ste-

rowania mocą oraz konieczność kompensacji mocy biernej. Ze względu na zastosowanie kondensatorów do kompensacji mocy, w stanach awaryjnych może dojść do wzrostu napięcia i w konsekwencji do uszkodzenia generatora lub transformatora. Kolejną wadą jest też prawie stała prędkość maszyny co nie sprzyja optymalnemu wykorzystaniu wiatru. W praktyce układ ten jest stosowany dla mocy do 1,5MW [1].

Konfiguracje z generatorem asynchronicznym



Konfiguracje z generatorem synchronicznym



Rys. 1. Standardowe konfiguracje turbiny wiatrowej: a), b), c), d) z generatorem indukcyjnym, e), f), g), h) z generatorem synchronicznym [5]

Fig. 1 Standard wind turbine configurations: a), b), c), d) with induction generator, e), f), g), h) with synchronous generator

W kolejnej konfiguracji (rys. 1b) soft-starter i bateria kondensatorów są zastępowane przez pełno-wymiarowy przemiennik częstotliwości (około 120% mocy znamionowej generatora). Eliminuje to wady poprzedniego układu, a ponadto umożliwia pracę przy zmiennej prędkości obrotowej. Szeroki zakres zmian prędkości turbiny pozwala efektywniej wykorzystać energię wiatru. W chwilach silniejszych podmuchów jest ona gromadzona w postaci energii kinetycznej wirnika i odzyskiwana później. Oczywistą wadą jest koszt układu energoelektronicznego. Innym wariantem tej konfiguracji jest użycie przemiennika częstotliwości o mocy rzędu 20-30% mocy generatora, włączanego w celu kompensacji mocy biernej tylko wtedy, gdy prędkość wiatru przekracza wartości projektowane [5].

Konfiguracja 1c wykorzystuje generator pierścieniowy i jest używana m.in. przez firmę Vestas od połowy lat 90-tych (OptiSlip). Zasadnicza idea tego rozwiązania polega na kontrolowaniu całkowitej rezystancji wirnika przy pomocy zmiennej rezystancji zewnętrznej sterowanej za pomocą przekształtnika energoelektronicznego. W ten sposób możliwe jest sterowanie poślizgiem w zakresie do 10%. Kontrola poślizgu pociąga za sobą kontrolę mocy wytwarzanej [5].

Dla potrzeb tej konfiguracji buduje się także generatory pozbawione pierścieni. Polega to na zabudowaniu wewnątrz wirnika układu energoelektronicznego oraz rezystorów. Komunikacja systemu sterowania z układami w wirniku odbywa się poprzez interfejs z wirującym optycznym sprzęgłem. Zwiększa to niezawodność układu i wydłuża czas między przeglądami technicznymi, co obniża koszty eksploatacyjne.

W konfiguracji przedstawionej na rys. 1d, generator jest skonstruowany jako podwójnie zasilana maszyna asynchroniczna z uzwojonym wirnikiem, połączona z obwodami zewnętrznymi przy pomocy pierścieni ślizgowych. W obwodzie wirnika znajduje się przemiennik częstotliwości, który podaje do obwodu wirnika napięcie o regulowanej częstotliwości, dzięki czemu możliwa jest regulacja prędkości w zakresie około $\pm 30\%$ synchronicznej prędkości obrotowej. W podsynchronicznym trybie pracy moc przepływa z sieci przez przemiennik częstotliwości, obwód wirnika i stojan z powrotem do sieci. Energia mechaniczna turbiny napędzającej wał prądnicy przetwarzana jest na elektryczną i dodaje się do energii odprowadzonej do sieci przez stojan, dzięki czemu bilans energii jest dodatni. W trybie nadsynchronicznym do ok. 80% energii jest dostarczane do sieci przez stojan, a reszta przepływa przez obwód wirnika i przetwornicę częstotliwości. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu pomiędzy przetwornicą częstotliwości a generatorem, następuje dostrojenie częstotliwości prądnicy do częstotliwości sieci zarówno w trybie podsynchronicznym jak i nadsynchronicznym [3].

Układ ten stwarza możliwość zastosowania przekształtnika o mocy mniejszej od mocy generatora (20-30% mocy znamionowej), ponieważ moc przetwarzana jest proporcjonalna do poślizgu. Dużą zaletą tego rozwiązania jest generowanie mocy o stałym poziomie (w zakresie prędkości wiatru pomiędzy wartością znamionową a maksymalną). Mimo, że prędkość na wale generatora zmienia się, to dzięki zastosowaniu przemiennika, moc oddawana do sieci może pozostawać stała. Parametry mocy odda-

wanej do sieci są bardzo dobre, migotanie napięcia jest mniejsze od 1%, nie ma tzw. zjawiska przesłaniania, a pulsacje mocy oddawanej do sieci są bardzo małe. Zaletą tej konfiguracji jest również możliwość sterowania mocą bierną. Wadą tego układu jest wysoki koszt układów energoelektronicznych - chociaż i tak niższy niż w przypadku konfiguracji 1b, trudny układ sterowania oraz konieczność stosowania przekładni [1].

Układ ten cieszy się obecnie największą popularnością wśród producentów. Elektrycznie o tej konfiguracji stanowią ponad 90% mocy zainstalowanej obecnie w polskiej energetyce wiatrowej (24 turbiny Vestas V80 2MW: 9 w Cisowie k. Darłowa, 15 w Zagórzcu; 6 turbin Vestas V52 850kW - Barzowice). Do końca 2005 udział ten może się jeszcze zwiększyć w związku z planowaną budową nowego parku wiatrowego o mocy 50MW (25 kolejnych turbin V80).

Turbiny współpracujące z generatorem o magnesach trwałych (rys. 1e) są typowo stosowane jako źródła energii na łodziach żaglowych. Dwu- lub trójłopatowe turbiny wykorzystujące taki generator (zwykle o mocy poniżej 1kW) używane są do ładowania akumulatorów – w tym przypadku miejsce przemiennika zajmuje prostownik. Konfiguracja ta jest stosowana także w systemach przydomowych (1-20kW), często w układzie hybrydowym z generatorem spalinowym lub baterią słoneczną [5].

Główną zaletą tej konfiguracji jest samowzbudzenie generatora. Stąd wynikają też kolejne zalety: praca przy wysokim współczynniku mocy i wysoka sprawność. Wirnik tego typu generatora ma także dużą odporność na działanie zabrudzeń, dlatego konserwacja generatora ogranicza się praktycznie do smarowania łożysk.

Kolejna konfiguracja (rys. 1f) nie jest szeroko używana w turbinach wiatrowych. Maszyna jest wzbudzana zewnątrz z użyciem prostownika. Mniejsza atrakcyjność w porównaniu z poprzednią konfiguracją wynika z trzech powodów: występowania strat w obwodzie wzbudzenia, potrzeby stosowania pierścieni ślizgowych i bardziej złożonej strategii zabezpieczania turbiny [5].

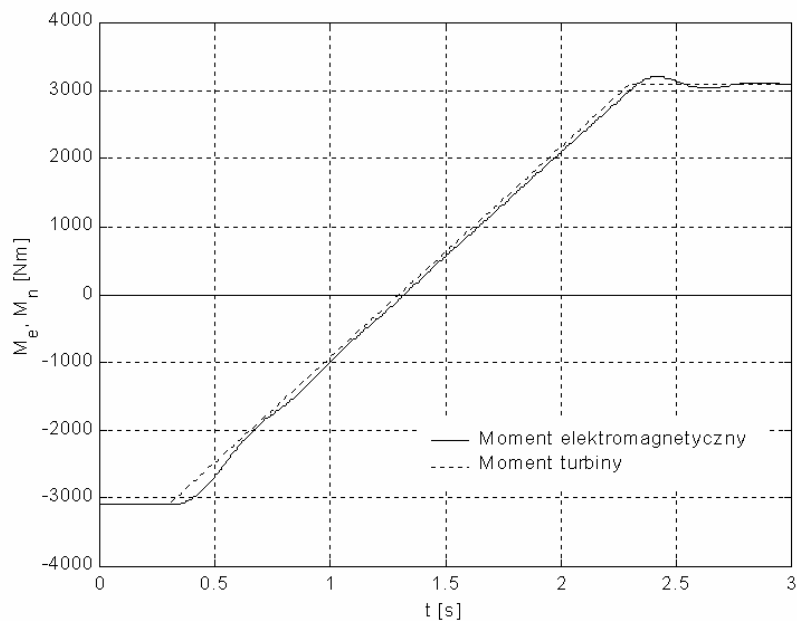
Konfiguracja z rys. 1g również nie jest szeroko stosowana. W odróżnieniu od poprzedniej, konfiguracja ta pozwala na pracę ze zmienną prędkością obrotową, pod warunkiem, że prądnicą jest połączona z siecią za pomocą cztero-kwadrantowego przemiennika częstotliwości [5].

Ostatnia prezentowana konfiguracja turbiny (rys. 1h) wykorzystuje wielobiegunowy generator synchroniczny. W zasadzie nie różni się od poprzedniej konfiguracji, ale dzięki wykorzystaniu wolnoobrotowego generatora, nie ma potrzeby stosowania przekładni. Jej zaletą jest też praca ze zmienną prędkością obrotową. Podstawową wadą jest wysoki koszt układu przekształtnikowego. Konfiguracja ta jest dość szeroko stosowana. W swoich konstrukcjach wykorzystują ją firmy Lagerway i Enercon, m.in. w największej obecnie turbinie E112.

2. MODELOWANIE GENERATORA ASYNCHRONICZNEGO

Wstępne badania symulacyjne wykonano z wykorzystaniem modelu obwodowego silnika indukcyjnego, opisanego w [6]. Model ten można użyć do badania pracy generatora współpracującego z siecią sztywną, podłączonego za pośrednictwem linii zasilającej o znanej rezystancji i reaktancji. Należy w tym celu wprowadzić ujemną wartość momentu obciążenia, który staje się wtedy momentem napędzającym.

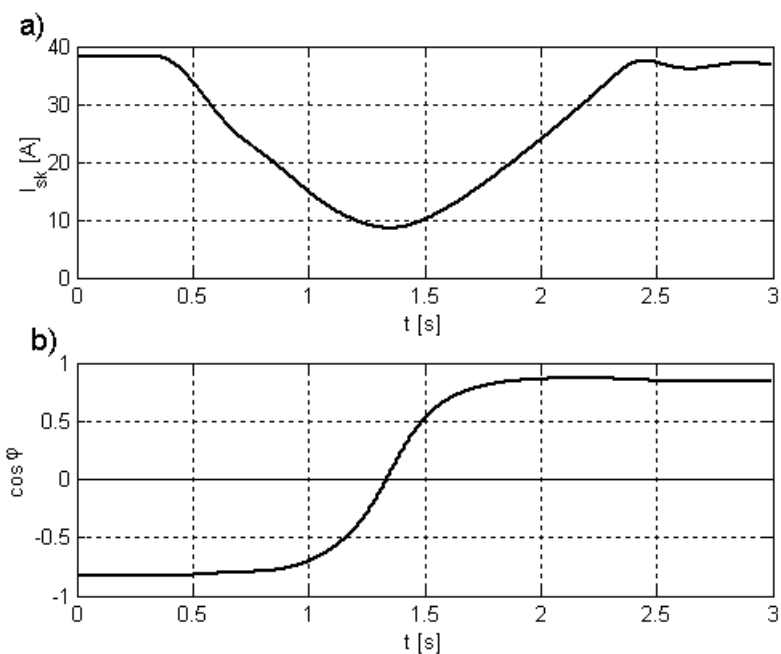
Przeprowadzono symulację przejścia maszyny z trybu pracy silnikowej do pracy prądnicowej. Na początku symulacji maszyna pracuje jako silnik w stanie ustalonym, ze znamionowym obciążeniem. Następnie poczynając od chwili $t = 0,3$ s następuje liniowa zmiana momentu na wale do wartości znamionowej ze znakiem ujemnym. Ten moment – początkowo hamujący (turbina pracuje jako wentylator), a następnie napędzający maszynę z prędkością nadsynchroniczną, nazwano momentem turbiny. Przyjęto krok symulacji $T_p = 4 \cdot 10^{-4}$ s. Wykorzystano dane maszyny o mocy 320 kW i napięciu 6 kV, podane w [6].



Rys. 2 Przebieg momentu turbiny i momentu elektromagnetycznego generatora
Fig 2 Turbine torque and electromagnetic torque of the generator

Do symulacji wykorzystano program napisany w środowisku MATLAB, przedstawiony w [7]. Poza wyznaczaniem przebiegów momentu i wartości chwilowych prądów i napięć maszyny, program rozwiązuje dodatkowe algorytmy do wyznaczania mocy oraz wartości skutecznych prądu. Do wyznaczania wartości skutecznych wykorzystano próbki prądu zawarte w oknie pomiarowym równym pełnemu okresowi napięcia zasilającego. Algorytm nie uwzględnia chwilowych zmian częstotliwości, związanych ze zmianą kąta fazowego. Moc czynna wyznaczana jest w oparciu o chwilowe wartości prądu i napięcia z jednego pełnego okresu napięcia. Ze względu na wstępny charakter badań, moc bierną obliczano w oparciu o teorię trójkąta mocy, czyli z pominięciem zniekształceń w przebiegach prądu i napięcia. Moc pozorną wyznaczano jako iloczyn aktualnych wartości skutecznych prądu i napięcia. Współczynnik mocy określano jako stosunek mocy czynnej do pozornej.

Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4. Przebiegi zaprezentowano w konwencji generatorowej, czyli dodatnie wartości momentu, mocy oraz współczynnika mocy występują w trybie pracy prądnicowej.



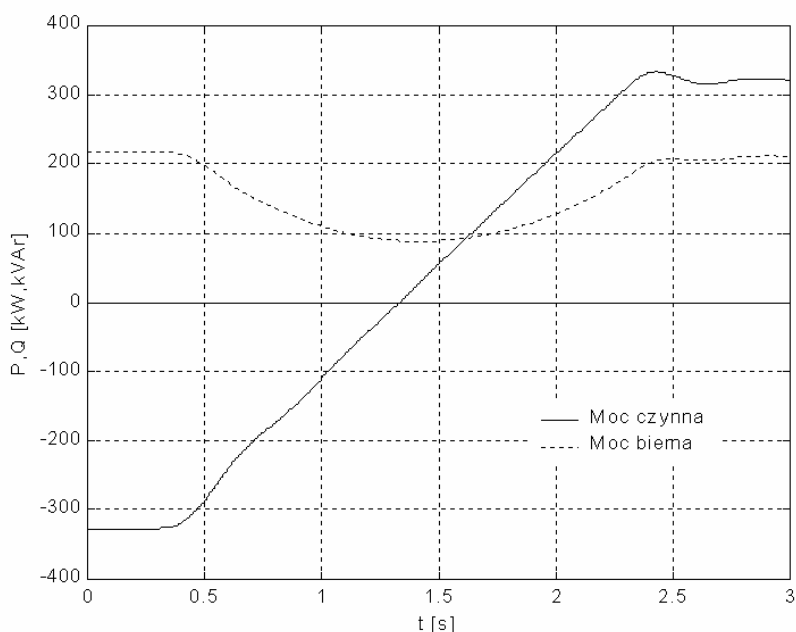
Rys. 3 Przebiegi: a) wartości skutecznej prądu jednej z faz stojana, b) zmian współczynnika mocy
 Fig. 3 Curves: a) Current RMS value one of stator's phase, b) power coefficient changes

Przebieg momentu elektromagnetycznego maszyny (rys. 2) prawie dokładnie odpowiada przebiegowi momentu turbiny. Zmiany prędkości obrotowej, towarzyszące

zmianie momentu elektromagnetycznego są niewielkie, dlatego wpływ momentu bezwładności na przebiegi jest nieznaczny. Stąd tak wiernie odwzorowywanie zmian momentu turbiny.

Wartość skuteczna prądu zmienia się zgodnie z oczekiwaniami. Początkowo maleje wraz ze zmniejszaniem się momentu hamującego, by następnie wzrosnąć po przekroczeniu przez silnik prędkości synchronicznej (rys. 3a). Maszyna zaczyna pracować jako generator, czyli zmienia się kierunek przepływu prądu. Kąt fazowy przechodzi od wartości φ do $180^\circ - \varphi$, co widać na przebiegu zmian wartości współczynnika mocy (rys. 3b), i na przebiegach mocy (rys. 4). Wartość skuteczna prądu jest niższa w stanie pracy generatorowej. Jest to spowodowane podwyższeniem się napięcia na zaciskach stojana. W stanie pracy silnikowej, napięcie na zaciskach maszyny jest pomniejszone o spadek napięcia na linii zasilającej, dlatego aby maszyna mogła wytworzyć tę samą wartość momentu, musi pobrać z sieci większy prąd.

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych są zgodne z logiką i potwierdzają przydatność modelu do badania pracy generatorów asynchronicznych.



Rys. 4 Przebieg mocy czynnej i biernej
Fig. 4 Active and reactive power course

3. PODSUMOWANIE

Modelowanie elektrowni wiatrowych jest istotnym zagadnieniem, między innymi ze względu na rosnącą liczbę i moc tych urządzeń, podłączanych do systemu elektroenergetycznego. Powszechne zastosowanie maszyny asynchronicznej jako generatora w różnych konfiguracjach elektrowni nadaje duże znaczenie opracowaniu odpowiedniego modelu matematycznego tej maszyny. Wykazano, że do wstępnych badań można przystosować znany model matematyczny silnika indukcyjnego, zmieniając znak momentu obciążenia. Kontynuacja badań wymaga jednak przekształcenia tego modelu, w celu uwzględnienia takich elementów jak baterie kondensatorów czy układy przekształtnikowe, bądź też w celu modelowania innych stanów pracy, np. biegu jałowego. Zagadnienia te będą przedmiotem dalszych prac.

LITERATURA

- [1] ANUSZCZYK J., DĘBOWSKI A., PERADZYŃSKI K., *Współpraca elektrowni wiatrowej z siecią energetyczną*, Materiały konferencyjne SME, Gdańsk, 2003.
- [2] BARZYK G., *Repowering a sprawa polska*, Czysta Energia, Luty 2004.
- [3] EMMERICH M., *Elektrownia wiatrowa GE Wind Energy 1,5sl. Opis ogólny*, GE Wind Energy, 2002.
- [4] European Wind Energy Association, *Wind power continues to grow in 2004 in the EU, but faces constraints of grid and administrative barriers*, EWEA News Release, 28.01.2005, www.ewea.org.
- [5] HANSEN L. H. i inni, *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*, Roskilde - Dania, Risoe National Laboratory, 2001.
- [6] KAROLEWSKI B., ŚWIDERSKI P., *Modelowanie silników indukcyjnych w naturalnym układzie współrzędnych*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne 2003, nr 66, Wyd. BOBRME KOMEL, Katowice 2003, s. 129-135.
- [7] URACZ P., *Przystosowanie modelu obwodowego silnika do wyznaczania wartości skutecznych prądów i mocy*, Magisterska Praca Dyplomowa, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2004.

GENERATOR CONFIGURATIONS USED IN WIND TURBINES

A description of generator and power electronic configuration most commonly applied in wind turbines has been presented. The description contains distinctive features, essential advantages and drawbacks of particular configurations.

Due to popularity of asynchronous generator in wind turbine applications, a possibility of modeling using mathematical model of an induction motor has been presented. Results of an exemplary simulation has been published.