

Andrzej LATKO, Tadeusz RODACKI  
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

## WSPÓLPRACA ELEKTROWNI WIATROWYCH Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

**Streszczenie.** W artykule opisano konstrukcje elektrowni wiatrowych i sposoby współpracy z siecią elektroenergetyczną. Specyfika źródła energii, jakim jest wiatr, powoduje niestacjonarną pracę elektrowni. W celu uwidocznienia wagi pewnych problemów przedstawiono rozkład prędkości wiatru bazujący na rozkładzie Rayleigha, który jest reprezentatywny dla naszego kraju. Przedstawiono pomiary prądu w czasie załączania generatora do sieci i podczas pracy. Pomiary były wykonywane w elektrowni stałobrotowej, pracującej bezpośrednio na sieć. Omówiono możliwości łagodzenia prezentowanych skutków występujących przy synchronizacji i normalnej pracy w zależności od układu współpracy z siecią.

## WIND TURBINES CONNECTED TO THE GRID

**Summary.** Modern wind turbine systems being connected to the grid are described in the paper. Wind character causes nonstationary work of wind turbine what has bad influence on the grid. Wind speed distribution based on Rayleigh's distribution, representative for our region, is used in order to show importance of specific problems. Current waveforms during synchronisation process and normal work, taken from constant speed wind turbine directly connecting to the grid, are presented. Ways of reducing undesirable effects during synchronisation process and normal work in different wind turbine system configuration are shown.

### 1. WSTĘP

Elektrownia wiatrowa to zespół urządzeń przetwarzających energię kinetyczną wiatru na energię elektryczną. Zespół ten tworzy silnik wiatrowy połączony wałem i przekładnią mechaniczną z generatorem elektrycznym oddającym wyprodukowaną energię elektryczną do sieci elektroenergetycznej.

Moc wiatru na powierzchnię przekroju określana jest zależnością:

$$P = \frac{1}{2} \rho(\vartheta) v^3, \quad (1)$$

gdzie:  $\rho(\vartheta)$  - gęstość powietrza w zależności od temperatury,  
 $v$  - prędkość wiatru.

Energii tej nie można pozyskać w całości. Zgodnie z prawem Betza maksymalnie tylko 59% energii wiatru można przetworzyć w energię mechaniczną za pośrednictwem turbiny wiatrowej.

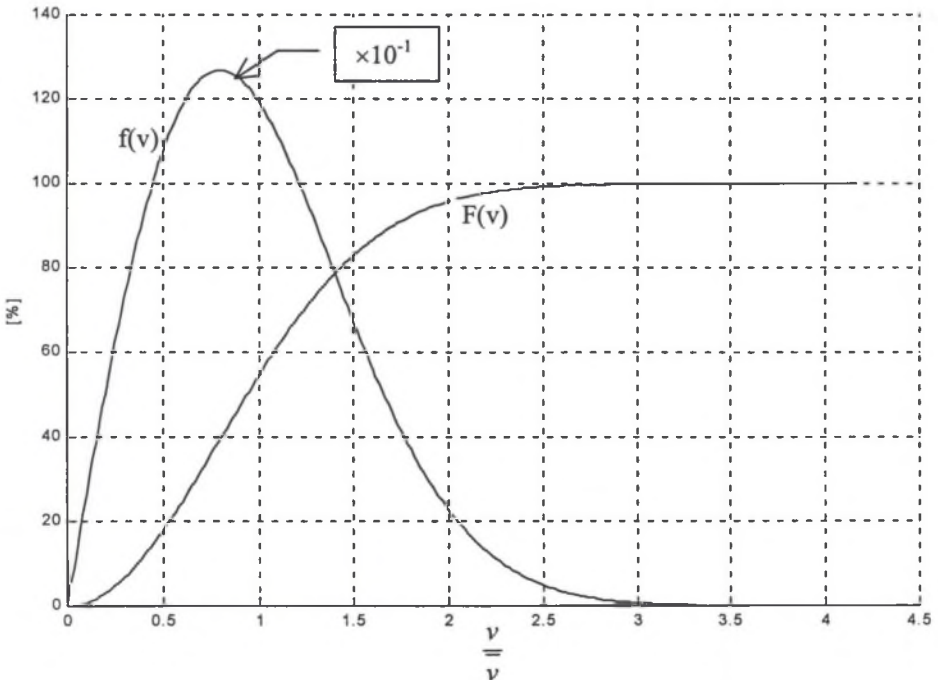
Wiadomo, że prędkość wiatru nie jest stała i zależy od wielu czynników meteorologicznych. Według meteorologów rozkład Rayleigha w przybliżeniu oddaje warunki wiatrowe w naszej części Europy [1]. Rozkład Rayleigha (rys. 1) jest określany:

$$f(v) = \frac{2}{A^2} v \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^2\right) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right), \quad (2)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^2\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right), \quad (3)$$

$$\bar{v} = A\Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = A \frac{\sqrt{\pi}}{2}, \quad (4)$$

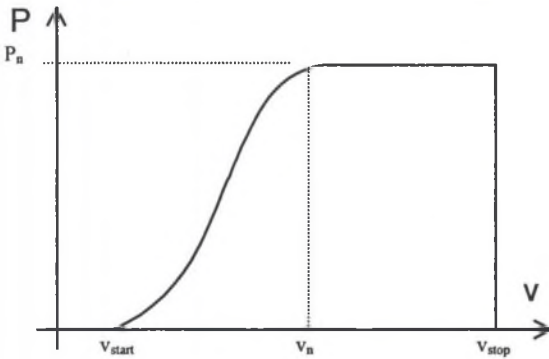
gdzie:  $f(v)$  - rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia danej prędkości wiatru  $v$ ,  
 $F(v)$  - skumulowany rozkład prawdopodobieństwa prędkości wiatru  $v$ ,  
 $\Gamma$  - funkcja gamma.



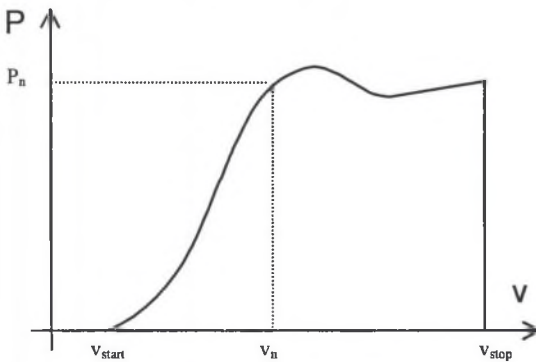
Rys. 1. Rozkład prędkości wiatru według rozkładu Rayleigha  
 Fig. 1. Wind speed distribution according to Rayleigh's distribution

## 2. CHARAKTERYSTYKA MOCY ELEKTROWNI WIATROWEJ

W śmigłowych silnikach wiatrowych ilość energii odzyskiwanej z wiatru zależy od kąta ustawienia śmigła względem wiatru. Kąt ten zmienia się zarówno z prędkością wiatru, jak i z prędkością wirnika silnika wiatrowego. Problem z utrzymaniem optymalnego kąta rozwiązuje się przez zastosowanie silnika śmigłowego ze sterowanym kątem ustawienia łopaty, a złożony algorytm sterowania ustala kąt położenia łopat wraz ze zmianami prędkości wiatru. Mechanizmy przestawiające łopaty z reguły są realizowane w oparciu o układy hydrauliczne, choć można też spotkać rozwiązania elektryczne i elektromechaniczne. Łopaty z możliwością zmiany kąta położenia służą też do ograniczenia mocy elektrowni wiatrowej w sytuacji, kiedy wieje zbyt silny wiatr. Przy starcie elektrowni wiatrowej cenna jest również możliwość takiego ustawienia łopat, aby uzyskać duży moment rozruchowy zapewniający szybkie osiągnięcie obrotów, przy których elektrownia zostaje przyłączona do sieci. Aby uniknąć złożonego układu sterowania, często wykorzystuje się zjawisko odrywania strugi powietrza (stall effect) powyżej pewnej prędkości przepływu od profilu łopaty silnika wiatrowego, co powoduje utratę



a) regulacja mocy przez zmianę kąta ustawienia łopat



b) regulacja mocy za pomocą efektu odrywania

siły nośnej przez łopatę. W tym przypadku łopaty ustawione są na stałe pod ustalonym kątem. Efekt odrywania pozwala na ograniczenie mocy elektrowni w przypadku zbyt silnego wiatru. Charakterystyka mocy w funkcji prędkości wiatru dla obu typów silników wiatrowych przedstawiona jest na rys. 2. Dodatkowo przy silniku wiatrowym pracującym ze stałym kątem ustawienia łopat można dla bezpieczeństwa przy bardzo silnym wietrze zastosować hamowanie aerodynamiczne przez skręcanie o dziewięćdziesiąt stopni końcówek łopat.

Dodatkową możliwość sterowania mocą elektrowni wiatrowej daje zastosowanie generatora z przekształtnikiem energoelektronicznym. Zastosowanie układu energoelektronicznego pozwala na kształtowanie obciążenia generatora elektrowni wiatrowej w zależności od aktualnych zmian prędkości wiatru. Przekształtnik energoelektroniczny jest w stanie dużo szybciej zareagować na zmiany siły wiatru niż układy ustawiania położenia łopat. Pozwala to na wyeliminowanie gwałtownych przyrostów produkowanej mocy niekorzystnie oddziałujących na sieć elektroenergetyczną.

Rys. 2. Charakterystyki mocy  $P$  elektrowni wiatrowych w funkcji prędkości wiatru  $v$ Fig. 2. Wind power station power  $P$  characteristics as a function of wind speed  $v$

### 3. UKŁADY WSPÓLPRACY ELEKTROWNI WIATROWYCH Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

W elektrowniach wiatrowych współpracujących z siecią elektroenergetyczną do przetwarzania energii mechanicznej w elektryczną stosuje się dwa podstawowe typy generatorów prądu przemiennego:

- asynchroniczne,
- synchroniczne.

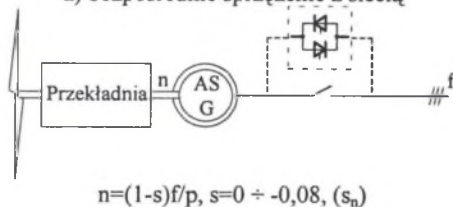
Podstawowe układy współpracy z siecią elektroenergetyczną przedstawiono na rys. 3.

Do niedawna w elektrowniach wiatrowych najczęściej stosowano generatory asynchroniczne klatkowe pracujące powyżej prędkości synchronicznej. Charakteryzują się one wysoką niezawodnością oraz niskim kosztem produkcji i eksploatacji. Przykładowy układ z wykorzystaniem tego typu generatora pokazano na rys. 3a. W tym przypadku wirmik elektrowni wiatrowej obraca się praktycznie ze stałą prędkością wynikającą z poślizgu  $s$  generatora indukcyjnego. Stąd tego typu elektrownie wiatrowe przyjęło się klasyfikować jako stałobrotowe. Prędkość obrotowa generatora indukcyjnego wynika z aktualnego

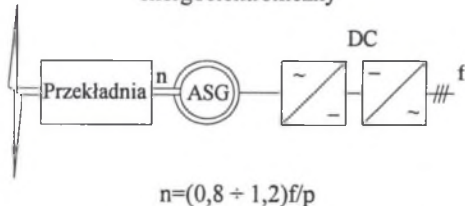
obciążenia, częstotliwości sieci zasilającej  $f$  i liczby par biegunów generatora  $p$  i wynosi  $n=(1-s)f/p$ , gdzie  $s \sim 0 \div -0,08$ , ( $s_n$ ). Bardzo często wykorzystywane są w elektrowniach wiatrowych generatory z przełączalną liczbą par biegunów. Elektrownia wiatrowa pracuje wówczas przy dwóch prędkościach wirowania: dla słabszego wiatru - niższa (większa liczba par biegunów generatora), a dla silniejszego - wyższa (mniejsza liczba par biegunów generatora). Przerwaną linią narysowano często stosowany w tym przypadku układ miękkiego rozruchu (soft-startu). Układ ten pracuje jedynie podczas włączania elektrowni do sieci, eliminując duże udary prądowe oraz duże wartości momentu dynamicznego generatora. Z jednej strony unika się niekorzystnego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną w postaci efektu migotania napięcia, z drugiej mniejszym obciążeniem dynamicznym podlega konstrukcja mechaniczna. Ten typ rozwiązania przeważał w zdecydowanej większości elektrowni wiatrowych do niedawna budowanych [4].

Układy przetwarzania z generatorami asynchronicznymi

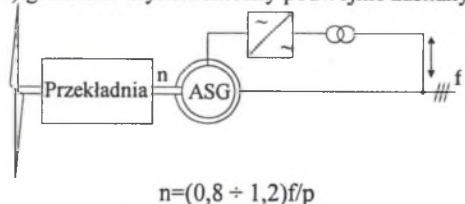
a) bezpośrednie sprzężenie z siecią



b) sprzężenie z siecią przez przekształtnik energoelektroniczny



c) generator asynchroniczny podwójnie zasilany

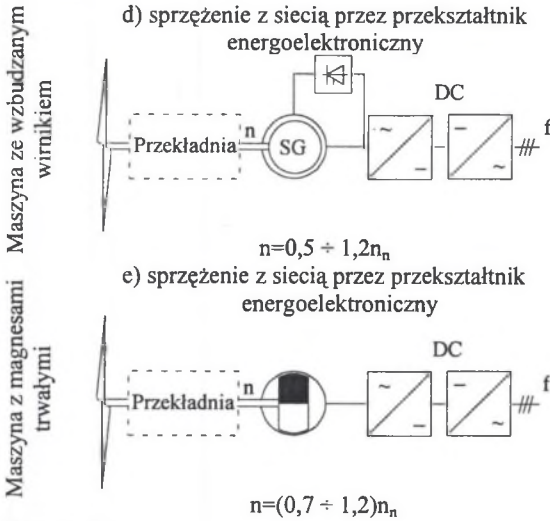


Maszyna klatkowa

Maszyna pierścieniowa



Układy przetwarzania z generatorami synchronicznymi



Oznaczenia:

- n - mechaniczna prędkość obrotowa
- $n_n$  - znamionowa prędkość obrotowa
- f - częstotliwość sieci zasilającej
- s - poślizg generatora
- p - liczba par biegunów

Przekładnie obwiedzione przerywaną linią oznaczają możliwość realizacji układów bezprzekładniowych.

Rys. 3. Układy przetwarzania energii w elektrowniach wiatrowych [3]

Fig. 3. Power energy converters in wind power stations

W elektrowniach wiatrowych coraz szerzej stosowane są generatory asynchroniczne pierścieniowe z podwójnym zasilaniem. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie przekształtnika w wirniku, który tylko oddaje energię do sieci (rys. 3c). W zależności od zastosowanego przekształtnika będzie istniała (4-kwadrantowy) bądź nie (2-kwadrantowy) możliwość sterowania współczynnikiem mocy elektrowni  $\cos\varphi$ . Również w zależności od przekształtnika różny będzie zakres prędkości wirowania:  $n=(1 \div 1,3)f/p$  (2-kwadrantowy),  $n=(0,8 \div 1,2)f/p$  (4-kwadrantowy). Dodatkową korzyścią tego typu układu jest znaczne ograniczenie mocy przetwarzanej przez przekształtnik energoelektroniczny w stosunku do mocy generowanej do sieci. Pozwala to na ograniczenie kosztów budowy tego typu elektrowni.

Innym rozwiązaniem współpracy elektrowni wiatrowej z siecią elektroenergetyczną jest układ przedstawiony na rys. 3d. W tym przypadku wykorzystuje się do produkcji energii elektrycznej generator synchroniczny sprzęgnięty z siecią za pomocą przekształtnika AC/AC z pośredniczącym obwodem prądu stałego. Obecnie przekształtniki sprzęgające mają postać prostownika diodowego i falownika tranzystorowego MSI. Układy takie mają mniejszą zawartość harmonicznych, a ponadto mają możliwość pracy bez poboru mocy biernej z sieci. Prędkość generatora jest zmienna i sterowana w zakresie  $n=(0,5 \div 1,2)f/p$ . W elektrowniach tych dzięki zastosowaniu na tyle wolnoobrotowych generatorów synchronicznych, że można było

Pozostałe układy współpracy elektrowni wiatrowej z siecią elektroenergetyczną, pokazane na rys. 3, pozwalają na pracę elektrowni ze zmienną prędkością obrotową, określaną przez układ sterowania w zależności od panujących warunków wiatrowych. Przynależą one do grupy elektrowni zmiennoodrotowych.

Koncepcja przedstawiona schematycznie na rys. 3b z generatorem indukcyjnym sprzęgniętym z siecią elektroenergetyczną przez energoelektroniczną przetwornicę częstotliwości nie znalazła jak na razie szerszych zastosowań. Przyczyną tego jest konkurencyjność podobnych rozwiązań z wykorzystaniem generatorów synchronicznych. W tego typu rozwiązaniu przekształtnik musi być czterokwadrantowy ze względu na potrzebę dostarczenia mocy biernej do generatora indukcyjnego. Przetwarza on całą moc produkowaną przez generator i może pracować bez pobierania mocy biernej z sieci elektroenergetycznej. Zakres roboczych prędkości obrotowych generatora elektrowni wynosi  $n=(0,8 \div 1,2)f/p$ .

bezpośrednio połączyć wał turbiny wiatrowej z wałem generatora, ograniczono do minimum liczbę elementów wirujących. Podobną konstrukcję bezprzekładniową można zrealizować z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi (rys. 3e).

#### 4. ODDZIAŁYWANIE ELEKTROWNI WIATROWYCH NA SIEĆ ELEKTROENERGETYCZNĄ

Elektrownie wiatrowe w różny sposób oddziałują na sieć elektroenergetyczną. Ogólnie te oddziaływania można podzielić ze względu na okresowe i nieokresowe zmiany generowanej mocy.

Okresowe zmiany generowanej mocy są wywoływane przez:

- Efekt cienia wieży (wirnik po zawietrznej) lub efekt spiętrzenia (wirnik po dowietrznej).

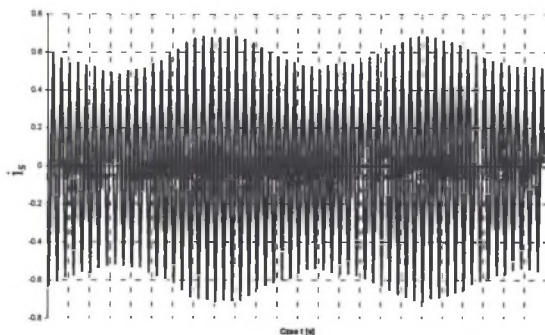
Cykliczne przechodzenie łopaty silnika wiatrowego przez cień wieży powoduje oscylacje momentu napędowego w zakresie pojedynczych herców, mogące dochodzić nawet do 15% wartości znamionowej.

- Pionowy profil wiatru.

Prędkość wiatru wzrasta w wysokość, co w efekcie powoduje sinusoidalną modulację mocy wyjściowej.

- Błąd kąta ustawienia wirnika.

Płaszczyzna wirnika nie może nadążnie cały czas śledzić kierunku wiatru tak, by zawsze utrzymywać kąt  $90^\circ$  z uwagi na szybkość zmian kierunku wiatru.



Rys. 4. Zmierzony przebieg prądu generatora asynchronicznego (wartość względna) podczas pracy elektrowni wiatrowej (głównie efekt wieży)

Fig. 4. Measured waveform of asynchronous generator current (relative value) during wind power station operation (mainly tower effect)

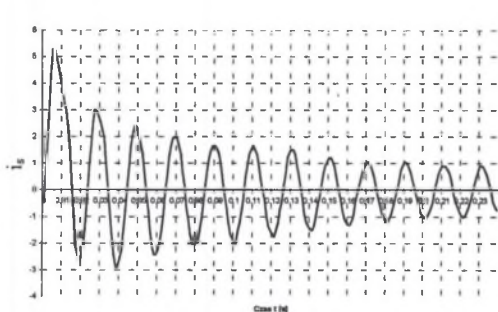
Z reguły dopuszczalny jest pewien mały błąd ustawienia wirnika względem kierunku wiatru, co powoduje również małe sinusoidalne modulowanie mocy wyjściowej.

Okresowe wahania mocy są najbardziej widoczne w elektrowniach wiatrowych stałobrotowych (rys. 4), ze względu na sztywną charakterystykę mechaniczną generatora asynchronicznego. Zmniejszenie sztywności tej charakterystyki nieco polepsza niekorzystne oddziaływanie na sieć, ale pogarsza sprawność generatora. Dużo lepiej przedstawia się ten problem w elektrowniach zmiennoobrotowych. Zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego pozwala w znacznym stopniu wyeliminować niekorzystne

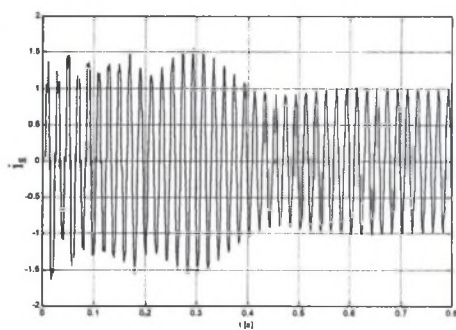
oddziaływania tutaj przedstawione. Z uwagi na to, że we współczesnych elektrowniach wiatrowych są najczęściej stosowane tranzystorowe przetwornice MSI, pracujące z wysoką częstotliwością modulacji, eliminacja wyższych harmonicznych nie jest kłopotliwa i kosztowna.

Nieokresowe stochastyczne wahania generowanej mocy są wynikiem:

- Zmiany prędkości wiatru.  
Stochastyczne zmiany prędkości wiatru przenoszą się na fluktuację generowanej mocy. Mogą one mieć charakter zarówno powolnych, jak i szybkich (przy podmuchach i porywistym wietrze) zmian.
- Synchronizacji generatora z siecią - załączenie elektrowni wiatrowej.  
Przetężenia prądowe powstające przy załączaniu generatora do sieci elektroenergetycznej mogą wywoływać krótkotrwałe wahania napięcia (rys. 5a). Elektrownia jest załączana przy warunkach wiatrowych pozwalających na pracę generatorową.
- Nagłego wyłączenia dużej mocy.  
Szczególnie istotne przy zbyt silnym wietrze (powyżej  $(20 \div 25)$  m/s), kiedy ze względu na bezpieczeństwo obiektu istnieje konieczność wyłączenia elektrowni, co w efekcie może powodować nagłe wahania napięcia w sieci elektroenergetycznej.



a) bezpośrednie załączenie generatora (pomiar)



b) załączenie generatora za pomocą układu miękkiego startu (symulacja)

Rys. 5. Przebieg prądu (wartość względna) generatora asynchronicznego podczas synchronizacji z siecią [2]

Fig. 5. Waveform of asynchronous generator current (relative value) during the grid synchronisation [2]

Zmian mocy wywołanych zmianami prędkości wiatru nie można skompensować bez dodatkowego źródła. W przypadku elektrowni zmiennobrotowych można w pewnym zakresie złagodzić szybkość tych zmian.

Przy synchronizacji elektrowni wiatrowej z siecią, stosując układy przekształtnikowe, można zupełnie wyeliminować niekorzystne przetężenia prądu. W przypadku elektrowni stałobrotowych stosuje się różne warianty układów miękkiego startu, pracujące tylko przejściowo na czas synchronizacji, po którym układy te są bocznikowane stycznikiem obejściowym (rys. 5b), [2, 4]. W elektrowniach zmiennobrotowych przekształtnik tam zastosowany pozwala zupełnie zlikwidować przetężenia prądu związane z synchronizacją elektrowni z siecią elektroenergetyczną.

Nagłe wyłączenia szczególnie dużej mocy powodują również niekorzystne oddziaływanie na sieć elektroenergetyczną. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wiatr o takiej sile występuje bardzo rzadko w ciągu roku. Z przedstawionego rozkładu Rayleigha wynika, że przy średniej rocznej prędkości wiatru równej 8 m/s, co jest dużą wartością, wiatr o prędkości powyżej 20 m/s wieje przez 65 h/rok, natomiast wiatr o prędkości powyżej 25 m/s wieje zaledwie przez 4 h/rok. Zdecydowana większość wyłączeń elektrowni, pomijając sporadyczne

stany awaryjne, będzie miała miejsce z powodu zbyt słabego wiatru przy stosunkowo niewielkiej produkowanej mocy. Dodatkowo rozpatrywany problem można nieco złagodzić narzucając producentom elektrowni konieczność zmodyfikowania charakterystyki mocy elektrowni tak, by przy silnym wietrze powyżej pewnej prędkości wiatru moc elektrowni zaczynała stopniowo maleć. Wówczas przy prędkości wiatru  $v_{\text{stop}}$  osiągnięta moc byłaby znacznie mniejsza od znamionowej. W ten sposób wyłączenie elektrowni przy silnym wietrze będzie miało łagodniejszy skutek dla sieci.

## 5. PODSUMOWANIE

W przedstawionym artykule poruszono problemy współpracy elektrowni wiatrowych z siecią elektroenergetyczną. Elektrownie tego typu są atrakcyjne przede wszystkim dlatego, że wykorzystują darmowe źródło energii, jakim jest wiatr. Niestety, w związku z tym, że wiatr nie jest medium stabilnym i sterowalnym, elektrownie wiatrowe mają pewne niedogodne własności. W artykule starano się wykazać, że niektórych niekorzystnych cech nie należy wyolbrzymiać. Rozwój technologii wykorzystywanych w elektrowniach wiatrowych w dużym stopniu pozwolił na ograniczenie ich niekorzystnego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną. Współczesne techniki teleinformatyczne pozwalają na pełny zdalny nadzór i sterowanie parkami wiatrowymi.

## LITERATURA

1. Lorenc H.: *Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce*. Materiały Badawcze, seria: Meteorologia – 25. IMGW, Warszawa, 1996.
2. Rodacki T., Latko A., Wylęzek W.: *Analiza symulacyjna rozruchu elektrowni wiatrowej*, Konferencja MiS'2000, Zakopane (19÷23).06.2000.
3. Heier S.: *Winkraftanlagen im Netzbetrieb*, B. G. Teubner, Stuttgart 1994.
4. T. Schuckart, T. Schutt, J. Petzoldt, A. Rafoth: *Start-up current limitation for constant speed wind power stations*. Materiały konferencyjne PEMC'98, Praga 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Antoni Dmowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 20.10.2003 r.