

## WARUNKI PRACY AUTONOMICZNYCH ELEKTROWNI WIATROWYCH

Hubert BIAŁAS<sup>1</sup>, Ryszard PAWEŁEK<sup>2</sup>, Irena WASIAK<sup>3</sup>

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

1. tel.: 42 631 2594 e-mail: hubert.bialas@p.lodz.pl
2. tel.: 42 631 2596 e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl
3. tel.: 42 631 2590 e-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl

**Streszczenie:** W artykule dokonano analizy możliwości pracy wyspowej turbozespołów wiatrowych w różnych układach sieciowych. Do realizacji badań wykorzystano model sieci składający się z turbozespołu wiatrowego, obciążenia oraz elektrochemicznego zasobnika energii. Rozważono dwa przypadki pracy sieci wyspowej: bez zasobnika i zasobnikiem energii. W pierwszym przypadku turbozespół wiatrowy jest źródłem napięciowym zasilającym lokalne odbiory. W drugim przypadku funkcję źródła napięciowego pełni zasobnik energii natomiast turbozespół wiatrowy jest źródłem prądowym wytwarzającym moc czynną zależną od warunków atmosferycznych (prędkości wiatru). Zaimplementowane algorytmy sterowania pracą turbozespołu i zasobnika pozwalają na stabilizację napięcia zasilającego odbiory. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono w postaci wykresów ilustrujących bilanse mocy czynnej i biernej w układzie, zmiany napięcia zasilającego oraz zmiany wielkości elektromechanicznych charakteryzujących pracę turbozespołu.

**Słowa kluczowe:** turbozespół wiatrowy, zasobnik energii, praca wyspowa.

## 1. WSTĘP

Wzrost mocy odnawialnych źródeł energii (OZE) zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym (SEE) stwarza możliwości lokalnego bilansowania mocy i energii elektrycznej oraz poprawia efektywność energetyczną, a tym samym zwiększa całkowite bezpieczeństwo dostaw energii do odbiorców końcowych [1].

Jednocześnie obecność OZE w bilansie energii daje nowe możliwości organizacji pracy systemu, prowadzące do dalszej poprawy niezawodności i pewności dostaw. Wymaga to przystosowania lokalnych obszarów bilansowania (źródła i odbiory) do pracy bez połączenia z SEE w dłuższym horyzoncie czasowym, czyli stworzenia warunków do pracy wyspowej [2]. Wprowadzane obecnie przez polskich operatorów sieciowych rozporządzenie Komisji Europejskiej nr 2016/631 [3] definiuje dla przyłączanych źródeł również wymagania w zakresie pracy wyspowej.

Przejście do pracy wyspowej może nastąpić w sposób kontrolowany bądź też w wyniku zakłócenia w systemie. Elementarnym warunkiem jaki musi zostać spełniony, aby możliwa była praca wyspowa jest ciągłe bilansowanie poboru i produkcji mocy w nowopowstałej sieci.

Implementacja odpowiednich algorytmów regulacji oraz elementów realizujących sterowanie pozwala na dostosowanie źródeł OZE do pełnienia roli urządzeń bilansujących [5, 6, 7]. Przykładami urządzeń, które mogą

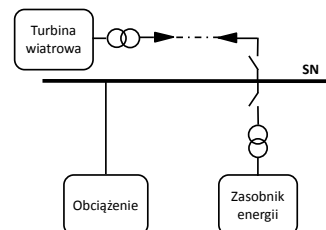
pełnić taką rolę w lokalnych obszarach bilansowania, przy pracy wyspowej są turbozespoły wiatrowe oraz zasobniki energii.

Celem artykułu jest przeprowadzenie oceny zdolności wydzielonej sieci do stabilnej i długotrwałej pracy, w lokalnym obszarze bilansowania, przy wykorzystaniu elektrowni wiatrowej oraz zasobnika energii, a także określenie potencjalnych zagrożeń dla takiej pracy.

Ocena została dokonana na podstawie analizy bilansów mocy czynnej i biernej w układzie, zmian napięcia w zależności od obciążenia oraz przebiegów wielkości elektromechanicznych charakteryzujących pracę turbozespołu wiatrowego.

## 2. BADANY UKŁAD

Schemat analizowanej sieci został przedstawiony na rysunku 1.

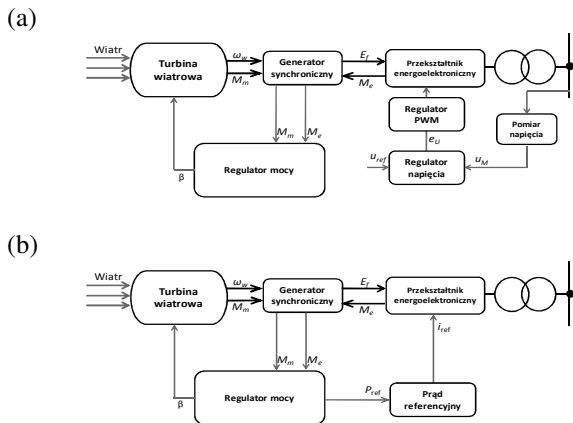


Rys. 1. Schemat badanego układu

Badany układ składa się z trzech podstawowych elementów: turbozespołu wiatrowego o mocy znamionowej wynoszącej 2 MW, zastępczego, zmiennego obciążenia sieci oraz opcjonalnie elektrochemicznego zasobnika energii o mocy 1 MW. Poszczególne elementy połączone są linią kablową o napięciu 15 kV. Model badanej sieci został zbudowany w środowisku programu PSCAD [8].

## 2.1. Model turbozespołu wiatrowego

Model turbozespołu składa się z modelu turbiny wiatrowej, modelu generatora synchronicznego, energoelektronicznego układu przetwarzania energii ze stopniem pośrednim (AC/DC/AC) oraz transformatora łączącego turbozespół z siecią zewnętrzną [9]. Turbozespół posiada dwa układy regulacji przeznaczone do pracy w sieci bez zasobnika (źródło napięciowe) i sieci z zasobnikiem energii (źródło prądowe) pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Układy sterowania pracą turbozespołu wiatrowego: (a) praca jako źródło napięciowe, (b) praca jako źródło prądowe

Model turbiny wiatrowej został zbudowany w oparciu o moduł „Wind Source”, pochodzący z biblioteki programu PSCAD. Charakterystyka mocy  $P = f(v)$  modelowanej turbiny została skorygowana tak, aby odpowiadała charakterystyce podawanej przez producenta dla turbiny E70 [10]. **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..** Działanie turbiny wiatrowej dla stanów ustalonych i przejściowych wynika z równania równowagi momentów mechanicznego i elektromagnetycznego [11], które opisuje wzór:

$$J \frac{d\omega}{dt} = (M_m - M_0) - M_e \quad (1)$$

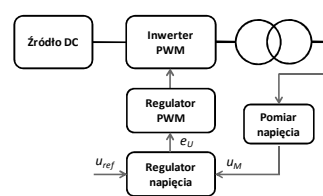
gdzie:  $J$  – moment bezwładności wirnika generatora i turbiny,  $\omega$  – elektryczna prędkość kątowa wirnika,  $M_m$  – moment napędowy mechaniczny,  $M_e$  – moment elektromagnetyczny,  $M_0$  – moment strat.

Sygnałem wyjściowym układu regulacji mocy turbozespołu, wynikającym z równania (1), jest dla źródła napięciowego (rysunek 2a) wartość kąta natarcia łopatek turbin wiatrowych  $\beta$  (pitch control) powodująca dostosowanie momentu mechanicznego turbiny do aktualnego obciążenia turbozespołu. Drugim układem regulacji w tym przypadku jest układ regulacji napięcia w sieci odbiorczej.

Dla turbozespołu pracującego jako źródło prądowe (rysunek 2b) sygnałem wyjściowym układu regulacji jest wartość mocy czynnej, wynikająca z warunków atmosferycznych, możliwa do wprowadzenia do sieci. Wprowadzenie mocy czynnej do sieci realizowane jest przez odpowiednie sterowanie pracą przetwornika AC/DC/AC. W tym przypadku układ regulacji kąta natarcia łopatek  $\beta$  jest aktywowany po przekroczeniu znamionowej prędkości obrotowej turbozespołu uzyskiwanej przy prędkości wiatru wynoszącej 14 m/s i ma na celu zabezpieczenie turbiny przed przeciążeniami mechanicznymi, jakie mogą wystąpić przy przekroczeniu dopuszczalnej prędkości wiatru.

## 2.2. Model zasobnika energii

Model zasobnika energii przedstawiony na rysunku 3 składa się ze źródła DC reprezentującego baterię akumulatorów, przetwornika ze sterowaniem PWM pozwalającego na dwukierunkowy przepływ energii oraz układu regulacji napięcia mającego na celu utrzymanie zadanej wartości napięcia w wybranym punkcie sieci [12, 13].



Rys. 3. Układ sterowania pracą zasobnika energii

## 2.3. Model obciążenia

Model zastępczego obciążenia sieci stanowią zestawy elementów RL pozwalające na zdefiniowanie całkowitego (3-fazowego) obciążenia węzła mocą czynną i bierną, przy określonym współczynniku mocy.

## 3. BADANIA SYMULACYJNE

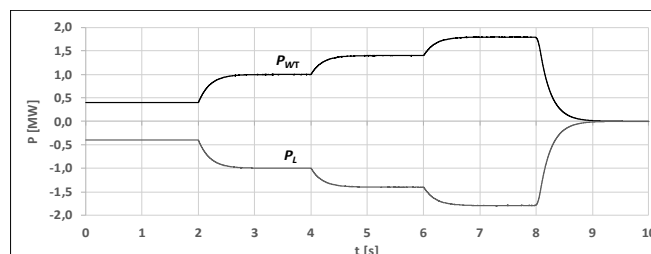
W artykule rozważono następujące scenariusze pracy sieci zasilanej z pracującej autonomicznie elektrowni wiatrowej:

- pracę elektrowni wiatrowej jako źródła zasilającego zmieniające się obciążenie,
- pracę turbozespołu wiatrowego w sieci z zasobnikiem energii bilansującym zmienne moce generacji i obciążenia.

Pierwszy scenariusz ilustruje możliwości pracy turbozespołu wiatrowego jako źródła zasilającego odbiorców w warunkach zmieniającego się obciążenia oraz zagrożenia dla stabilnej pracy wynikające z braku możliwości zbilansowania mocy w układzie. Drugi z rozpatrywanych scenariuszy prezentuje możliwości zasobnika energii w zakresie bilansowania mocy w warunkach niezależnych zmian generacji i obciążenia w sieci wydzielonej

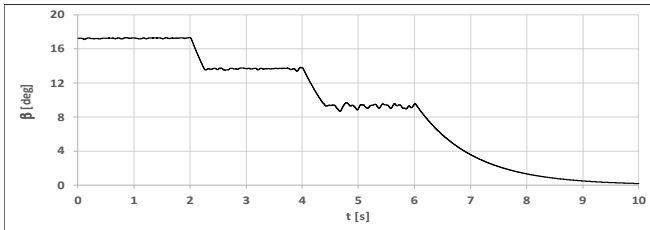
### 3.1. Praca turbozespołu wiatrowego w sieci bez zasobnika energii

W rozpatrywanym przypadku elektrownia wiatrowa pracowała jako źródło napięciowe. Założono, że prędkość wiatru w ciągu całej symulacji (10 sekund) miała wartość stałą równą 15 m/s. Obciążenie w sieci wzrastało stopniowo od wartości początkowej wynoszącej 0,4 MW do 1,8 MW. Na te zmiany elektrownia reagowała wzrostem generacji odpowiednim do zmian obciążenia (rys. 4). Wraz ze zmianą obciążenia mocą czynną wzrastał proporcjonalnie pobór mocy biernej ( $\text{tg}\varphi = \text{const}$ ). Zapotrzebowanie odbiorów na moc bierną było pokryte generacją odpowiedniej mocy biernej przez turbinę wiatrową.



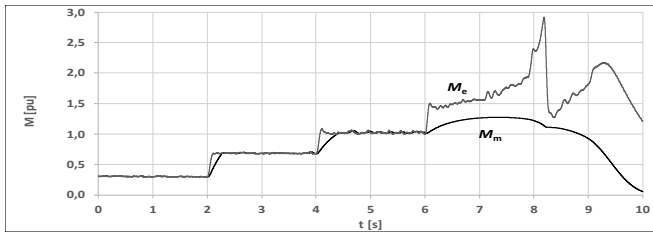
Rys. 4. Bilans mocy czynnej w sieci wyspowej bez zasobnika energii ( $P_{WT}$  - moc turbozespołu,  $P_L$  - moc obciążenia)

Regulacja mocy generowanej przez elektrownię była realizowana za pomocą zmian kąta natarcia łopatek turbiny  $\beta$ . Przebieg zmian kąta  $\beta$  w czasie symulacji pokazano na rysunku 5.



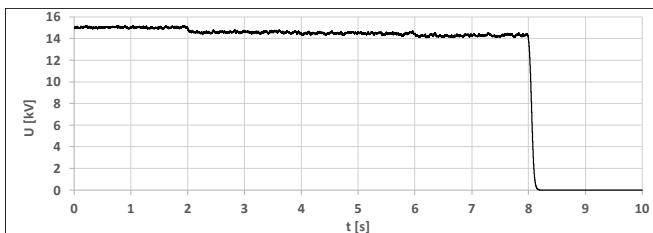
Rys. 5. Zmiany kąta natarcia łopát turboszespołu wiatrowego

Prędkość wiatru w ciągu całej symulacji nie ulegała zmianie, dlatego obrót łopát turbiny musiał zapewnić takie ograniczenie momentu mechanicznego turbiny, aby zrównoważyć moment elektromagnetyczny wynikający ze zmieniającego się obciążenia turboszespołu. Przy wzroście obciążenia, aby zaspokoić zapotrzebowanie odbiorów, kąt natarcia maleje by większa część energii zawartej w wietrze była dostępna w postaci momentu mechanicznego, pozwalając na odpowiednie zwiększenie generacji. Na rysunku 6 pokazano zmiany momentów mechanicznego i elektromagnetycznego turboszespołu wiatrowego.



Rys. 6. Zmiany momentów mechanicznego ( $M_m$ ) i elektromagnetycznego ( $M_e$ ) turboszespołu wiatrowego

Skokowe zmiany obciążenia powodujące nierównowagę momentów aktywują układ regulacji kąta natarcia łopát i w efekcie odpowiedni wzrost momentu napędowego turboszespołu. Wzrost obciążenia do wartości 1,8 MW w 6 sekundzie symulacji spowodował, że wartość momentu elektromagnetycznego trwale przewyższyła moment mechaniczny co oznacza, że dostępna z wiatru energia nie wystarczyła na pokrycie obciążenia. Ostatecznie niezrównoważenie momentów doprowadziło do zapadu napięcia i blackout'u całego układu (rysunek 7).



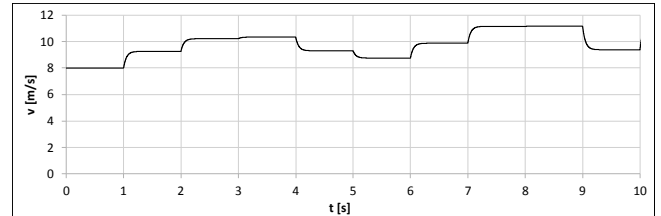
Rys. 7. Przebieg zmian napięcia w węzle odbiorczym

### 3.2. Praca turboszespołu wiatrowego w sieci z zasobnikiem energii

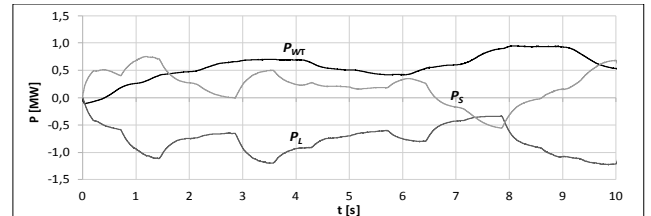
W tym przypadku elektrownia wiatrowa pracuje jako źródło prądowe generując moc czynną, odpowiednio do istniejących warunków wiatrowych, przy wartości współczynnika mocy bliskiej 1. Zasobnik energii jest źródłem napięcia referencyjnego o zadanej wartości skutecznej i częstotliwości pełniąc jednocześnie funkcję elementu bilansującego moc i energię w badanej sieci. W badaniach symulacyjnych przyjęto losowe zmiany prędkości wiatru w zakresie od 8 do 12 m/s (rysunek 8) oraz

losowe zmiany obciążenia od 0,5 do 1,5 MW. Ponieważ maksymalna wartość prędkości wiatru nie przekracza prędkości znamionowej dla modelowanego turboszespołu, więc nie został aktywowany układ regulacji kąta natarcia łopát i przez cały okres symulacji kąt  $\beta$  był równy zero.

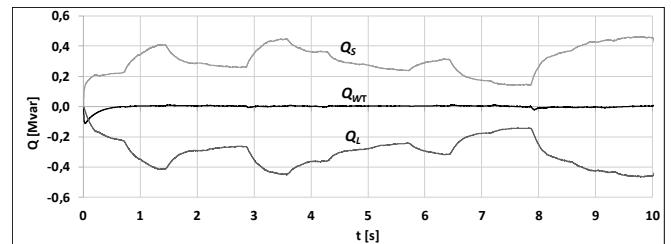
Zmiany mocy czynnej urządzeń pracujących w sieci dla analizowanego przypadku (sieć z zasobnikiem energii) pokazano na rysunku 9 a zmiany mocy biernej na rysunku 10. Z przedstawionych bilansów mocy, że zasobnik bilansując moc czynną w układzie jest jednocześnie źródłem mocy biernej dla przyłączonych odbiorów.



Rys. 8. Losowe zmiany prędkości wiatru w czasie symulacji

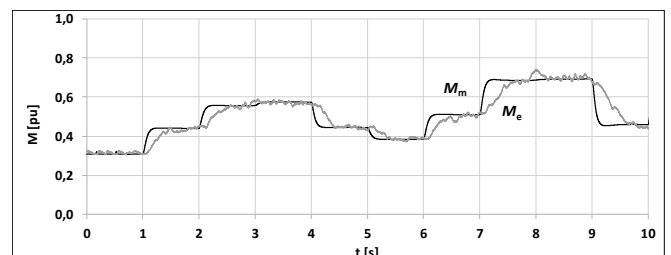


Rys. 9. Bilans mocy czynnej w sieci z zasobnikiem energii ( $P_{wr}$  - moc turboszespołu,  $P_L$  - moc obciążenia,  $P_S$  - moc zasobnika)



Rys. 10. Bilans mocy biernej w sieci z zasobnikiem energii ( $Q_{wr}$  - moc turboszespołu,  $Q_L$  - moc obciążenia,  $Q_S$  - moc zasobnika)

Procesy regulacyjne zachodzące w turboszespołe wiatrowym przy zmieniającej się prędkości wiatru są wynikiem braku równowagi momentów w stanach przejściowych. Przebiegi zmian momentów mechanicznego i elektromagnetycznego dla tego przypadku pokazano na rysunku 11. Należy zauważyć, że zmiany momentu mechanicznego odpowiadają zmianom prędkości wiatru a elektromagnetycznym zmianom mocy wytwarzanej przez turboszespoły.



Rys. 11. Zmiany momentów mechanicznego ( $M_m$ ) i elektromagnetycznego ( $M_e$ ) turboszespołu wiatrowego

#### 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących możliwości pracy elektrowni wiatrowej zasilającej wydzieloną sieć rozdzielczą średniego napięcia. Wykorzystując zbudowany w środowisku programu PSCAD model przyjętego do badań układu rozważono dwa scenariusze pracy sieci wyspowej: bez zasobnika i z zasobnikiem energii elektrycznej.

W scenariuszu bez zasobnika elektrownia pracuje jako źródło napięcia wytwarzając moc czynną i bierną na potrzeby przyłączonych odbiorców. Dostosowanie wartości mocy generowanej do zapotrzebowania odbiorów realizowane jest poprzez regulację kąta natarcia łopatek turbin, ograniczając w ten sposób możliwość wykorzystania w pełni energii kinetycznej wiatru.

W przypadkach, gdy obciążenie układu będzie większe od zdolności wytwórczych elektrowni (przy aktualnej prędkości wiatru) w sieci może dojść do blackout'u.

W scenariuszu dotyczącym pracy układu z zasobnikiem energii elektrownia wiatrowa pracuje jako źródło prądowe dostarczając do sieci moc czynną o wartości wynikającej z prędkości wiatru, natomiast zasobnik pełni funkcję źródła napięcia referencyjnego oraz elementu bilansującego moc czynną w układzie dostarczając jednocześnie odbiorcom potrzebną moc bierną.

W obu scenariuszach poprawna praca turbozespołu wiatrowego realizowana jest poprzez procesy regulacyjne mające na celu zachowanie równowagi momentów mechanicznego i elektromagnetycznego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Głowacki F., Koseda H.: Praca wyspowa odnawialnych źródeł energii, *Acta Energetica* nr 4/37, 2018, s. 53-60.
2. Olivares D.E. et al: Trends in Microgrid Control, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, p. 1905-1919, July 2014.

3. Rozporządzenie KE 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.
4. Bonk L., Korpikiewicz J., Pakulski T.: *Możliwości świadczenia usług regulacyjnych przez generację rozproszoną*, Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, Gdańsk 2016.
5. Zhang J., Cheng M., Chen Z., Fu X.: Pitch angle control for variable speed wind turbines, *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, 2008, s. 2691-2696.
6. Ben Smida M., Sakly A.: Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines. *Renewable Energy and Sustainable Development*, June 2015, p. 81 – 88.
7. Bianchi F.D., de Battista H., Mantz R.J.: *Wind Turbine Control Systems*, Springer Germany, 2014.
8. PSCAD – Power Systems Computer Aided Design. *User's Guide on the Use of PSCAD*, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2003.
9. Pawełek R., Terlecki B., Anuszczyk J.: Model symulacyjny parku wiatrowego, *Przegląd elektrotechniczny*, nr 3/2017, s. 223-227.
10. ENERCON wind energy converters. *Product overview*, ENERCON GmbH, Aurich, Germany, July 2010.
11. Machowski J., Białek J.W., Bumby J.: *Power System Dynamics: Stability and Control*, John Wiley & Sons, 2008.
12. Kłosowski Z.: Analiza możliwości wykorzystania turbozespołu wiatrowego do stabilizacji napięcia w węzle elektroenergetycznej linii SN z wykorzystaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym, *Przegląd elektrotechniczny* nr 1/2015, s. 20-27.
13. Thet A.K., Saitoh H.: Pitch control for improving the low-voltage ride-through of wind farm, *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Seoul, 2009, p. 1-4.

### AUTONOMOUS WORKING CONDITIONS FOR WIND POWER PLANTS

The European Commission Regulation No. 2016/631, that is currently introduced by Polish network operators, divides all connected sources into four types, depending on rated power. For sources of type C and D with rated power greater than 50 and 75 MW respectively in the regulation defines island work requirements. However, it should be expected that these requirements will be extended to B sources with rated power from 1 MW in the future.

Wind farms with high rated power (classified as types C or D), most often connected to a 110 kV network, contain many generating units (wind generators) with rated power of about several megawatts, which are treated separately as type B sources. Smaller Wind Farms, consisting several wind generators are connected to the medium voltage network (MV).

The paper considered the possibility of autonomous operation of a single MV wind turbine supplying local customers. Two variants of separate power network operation were taken into account. In the first variant, power balancing is carried out in the system: wind turbine – variable load. In the second variant, power balancing element is the energy storage.

The article presents the tested power network model developed in the PSCAD program environment and the results of simulation tests performed at random changes in wind speed and load for both analyzed networks.

**Keywords:** wind turbine, energy storage, island operation.