Możliwości pracy wyspowej elektrowni wiatrowej

Streszczenie. W artykule rozważono 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 z zasobnikiem energii. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono w postaci wykresów ilustrujących bilanse mocy czynnej i biernej w układzie oraz zmiany wielkości elektromechanicznych charakteryzujących pracę turbozespołu.

Abstract. The article considers the possibilities of islanding operation of wind turbines in different network systems. A network model consisting of a wind turbine, load and electrochemical energy storage was used to carry out the research. Two cases of island network operation were considered: without storage and energy storage. The results of simulation tests were presented in the form of graphs illustrating active and reactive power balances in the system and changes in electromechanical quantities characterizing the operation of the wind turbine (**Possibilities of islanding operation of wind power plants**).

Słowa kluczowe: turbozespół wiatrowy, zasobnik energii, praca wyspowa, regulacja mocy. **Keywords**: wind turbine, energy storage, island operation, power control.

Wstęp

Wzrost mocy odnawialnych źródeł energii (OZE) zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym (SEE) stwarza możliwości lokalnego bilansowania mocy i energii elektrycznej, a tym samym zwiększa całkowite bezpieczeństwo dostaw energii do odbiorców końcowych 0.

Źródła OZE instalowanie są zwykle na poziomie sieci dystrybucyjnych. Obecność źródeł energii w pobliżu miejsc zapotrzebowania wpływa na odciążenie sieci zasilającej, czego efektem jest zwiększenie efektywności przesyłu energii oraz niezawodności zasilania odbiorców w normalnych warunkach pracy. Pojawia się także możliwość utrzymania zasilania wszystkich lub części odbiorców w warunkach awaryjnych, o ile stworzone zostaną warunki do pracy wyspowej wydzielonego obszaru sieci.

Zmniejszenie czasu przerw w dostawie energii przez umożliwienie pracy wyspowej sieci dystrybucyjnej jest uzasadnione wzrastającymi wymaganiami odbiorców, ale także jest obowiązkiem prawnym operatora sieci [2, 3]. Możliwość pracy wyspowej jest więc pożądaną cechą sieci dystrybucyjnej, której w ostatnim czasie poświęca się wiele uwagi [4]. Wprowadzane obecnie przez polskich operatorów sieciowych rozporządzenie Komisji Europejskiej nr 2016/631 [5] definiuje dla przyłączanych źródeł również wymagania w zakresie pracy wyspowej. Wymagania sformułowane w rozporządzeniu dotyczą modułów wytwarzania energii typu C i D, tzn. jednostek wytwórczych o mocach powyżej 50 MW, ale w przyszłości mogą być rozszerzone na moduły typu B czyli źródła o mocach od 1 MW przyłączanych do sieci dystrybucyjnych.

W chwili obecnej potencjał sieci z generacją rozproszoną nie może być w pełni wykorzystany, ze względu na brak odpowiednich systemów pomiarowokontrolnych i sterujących. Zgodnie z obowiązującymi przepisami, w sytuacji zaniku napięcia zasilającego źródła powinny zostać wyłączone [3], w celu uniknięcia niekontrolowanej pracy wyspowej i związanego z nią ryzyka uszkodzenia urządzeń i narażenia personelu.

W przypadku pracy w połączeniu z systemem elektroenergetycznym lokalne niezbilansowanie generacji i zapotrzebowania w sieci z lokalnymi źródłami energii pokrywane jest przez system. Wydzielona sieć pracująca autonomicznie musi mieć zdolność do bilansowania mocy i energii oraz zdolności regulacyjne w zakresie utrzymania parametrów napięcia zasilającego. właściwych W istniejących warunkach uzyskanie takiej funkcjonalności jest trudne lub wręcz niemożliwe. Zwykle lokalne źródła energii przyłączane są do sieci przez przekształtniki

energoelektroniczne i sterowane jako źródła prądowe, co zapewnia generację określonej mocy przy napięciu sieciowym. Ten sposób sterowania jest powszechnie stosowany i wygodny, gdyż nie koliduje z działaniem układów regulacji napięcia w sieci. Przy pracy autonomicznej przynajmniej jedno ze źródeł musi być źródłem napięciowym, zdolnym do utrzymania wartości skutecznej napięcia i częstotliwości w zadanych granicach [6, 7]. Ponadto, losowo zmienna i nie podlegająca dysponowaniu moc źródeł OZE stwarza problemy z uzyskaniem bilansu mocy i energii.

W literaturze można znaleźć wiele publikacii poświęconych algorytmom i strategiom sterowania, które umożliwiają pracę autonomiczną mikrosystemów, m.in. [8, 9, 10, 11], jednak w większości dotyczą one układów projektowanych lub pracujących jako wydzielone lub Implementacja odpowiednich algorytmów pilotażowe. regulacji układów sterowania pozwala oraz na dostosowanie istniejących źródeł OZE do pełnienia roli urządzeń bilansujących [12, 13, 14].

Celem artykułu jest analiza warunków, jakie muszą być spełnione, aby możliwa była praca wyspowa wydzielonej sieci przy wykorzystaniu elektrowni wiatrowej. Analizę przeprowadzono posługując się modelem symulacyjnym zastępczego układu sieciowego opracowanym w środowisku programu PSCAD/EMTDC [15].

Ocena została dokonana na podstawie analizy bilansów mocy czynnej i biernej w układzie oraz przebiegów wielkości elektromechanicznych charakteryzujących pracę turbozespołu wiatrowego.

Badany układ

Schemat zastępczy analizowanej sieci został przedstawiony na rysunku 1. Badany układ składa się z trzech podstawowych elementów: turbozespołu wiatrowego o mocy znamionowej 2 MW, zastępczego, zmiennego obciążenia sieci oraz opcjonalnie elektrochemicznego zasobnika energii. Poszczególne elementy połączone są liniami kablowymi o napięciu 15 kV. W modelu turbozespołu odwzorowano turbinę wiatrową, generator synchroniczny, energoelektroniczny układ przetwarzania energii ze stopniem pośrednim (AC/DC/AC) oraz transformator łączący turbozespół z siecią zewnętrzną [16].

Założono, że turbozespół wiatrowy posiada dwa układy regulacji, pokazane na rysunku 2. Pierwszy z nich zapewnia pracę elektrowni jako źródła napięciowego, drugi jako źródła prądowego.



Rys. 1. Schemat badanego układu



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 [17]**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** Działanie turbiny wiatrowej dla stanów ustalonych i przejściowych wynika z równania równowagi momentów mechanicznego i elektromagnetycznego [18], które opisuje wzór:

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

gdzie: J – moment bezwładności wirnika generatora i turbiny, ω – prędkość kątowa turbozespołu, M_m – moment napędowy mechaniczny, M_e – moment elektromagnetyczny, M_{θ} – moment strat.

Sygnałem wyjściowym układu regulacji mocy turbozespołu, wynikającym z równania (1), jest dla źródła napięciowego (rys 2a) wartość kąta natarcia łopat turbin wiatrowych β (pitch control) powodująca dostosowanie momentu mechanicznego turbiny do aktualnego obciążenia turbozespołu. Drugim układem regulacji w tym przypadku jest układ regulacji napięcia w sieci odbiorczej. Zadaniem tego układu jest uzyskanie odpowiednich przebiegów napięcia zasilającego na wyjściu elektrowni wiatrowej.

Dla turbozespołu pracującego jako źródło prądowe (rys. 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 przekształtnika AC/DC/AC. Zadanie to realizowane jest przez regulator histerezowy współpracujący ze sterownikiem PWM. W tym przypadku układ regulacji kąta natarcia łopat β jest aktywowany dopiero 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. Uproszczony schemat regulatora mocy turbozespołu pokazano na rysunku 3.

Rys. 3. Regulator mocy turbozespołu wiatrowego

Model zasobnika energii przedstawiony na rysunku 4 składa się ze źródła DC repezentującego baterię akumulatorów, przekształtnika ze sterowaniem PWM pozwalającego na dwukierunkowy przepływ energii oraz układu regulacji napięcia mającego na celu utrzymanie zadanej wartości napięcia w wybranym punkcie sieci [19, 20].



Rys. 4. Układ sterowania pracą zasobnika energii

W układzie regulacji napięcia zasobnika (rys. 4) oraz turbozespołu pracującego jako źródło napięciowe (rys. 2a) zastosowano regulator histerezowy odtwarzający z zadaną dokładnością sinusoidalne przebiegi referencyjne napięcia.

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

Praca turbozespołu wiatrowego w sieci bez zasobnika energii

Praca wyspowa wydzielonej sieci zasilanej z elektrowni wiatrowej, bez zasobnika energii, wymaga zastosowania sterowania napięciowego źródła, które zapewni odpowiednie parametry napięcia zasilającego. Układ przedstawiony na rysunku 2a) utrzymuje zadane napięcie na zaciskach obciążenia i umożliwia także dostosowanie mocy generowanej do mocy zapotrzebowanej przez zmianę kąta natarcia łopat. Jednakże, jego praktyczne wykorzystanie jest ograniczone dostępnością energii pierwotnej.

Dla ilustracji działania układu sterowania, poniżej przedstawiono wyniki symulacji pracy elektrowni wiatrowej jako źródła zasilającego zmieniające się obciążenie.

Początkowo założono, że prędkość wiatru w ciągu całej symulacji ma 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. 5). Wraz ze zmianą obciążenia mocą czynną wzrastał proporcjonalnie pobór mocy biernej ($tg\varphi = const$). Zapotrzebowanie odbiorów na moc bierną było pokryte generacją odpowiedniej mocy biernej przez turbinę wiatrową. Regulacja mocy generowanej przez elektrownię była realizowana za pomocą zmian kąta natarcia łopat turbiny β . Przebieg zmian kąta β w czasie symulacji pokazano na rysunku 6.

Przy stałej prędkości wiatru zmiany kąta natarcia łopat turbiny zapewniają dostosowanie momentu mechanicznego turbiny, do momentu elektromagnetycznego wynikającego ze zmieniającego się obciążenia turbozespołu (rys. 7). Przy wzroście obciążenia kąt natarcia maleje, a większa część energii zawartej w wietrze jest dostępna w postaci momentu mechanicznego, czego efektem jest zwiększenie generacji. Utrzymanie równowagi mocy w sieci wydzielonej jest możliwe do chwili osiągnięcia granicy mocy generowanej. Na rysunku 7 odpowiada to 6 sekundzie symulacji, w której obciążenie wzrosło do 1,8 MW. Brak zrównoważenia momentów prowadzi do głębokiego zapadu napięcia (rys. 8) i wyłączenia całego układu.



Rys. 5. Bilans mocy czynnej w sieci wyspowej bez zasobnika energii przy zmiennym obciążeniu (P_{BT} - moc turbozespołu, P_L - moc obciążenia)



Rys. 6. Zmiany kąta natarcia łopat turbozespołu wiatrowego przy zmiennym obciążeniu



Rys. 7. Zmiany momentów mechanicznego (M_m) i elektromagnetycznego (M_e) turbozespołu wiatrowego przy zmiennym obciążeniu



Rys. 8. Przebieg zmian napięcia w węźle odbiorczym



Rys. 9. Losowe zmiany prędkości wiatru w czasie symulacji



Rys. 10. Bilans mocy czynnej w sieci wyspowej bez zasobnika energii przy zmiennej prędkości wiatru i zmiennym obciążeniu (P_{WT} - moc turbozespołu, P_L - moc obciążenia)

Działanie układu regulacji jest podobne zarówno przy zmianach obciążenia, jak i prędkości wiatru. Na rysunkach 10, 11, 12 pokazano bilans mocy, zmiany momentów oraz zmiany prędkości turbiny wiatrowej w układzie przy losowych zmianach prędkości wiatru w zakresie od 12 do 15 m/s (rys. 9) oraz obciążenia sieci w zakresie od 0,6 do 1,4 MW (rys. 10). Regulacja mocy generowanej przez elektrownię wiatro-wą, podobnie jak uprzednio, była realizowana za pomocą zmian kąta natarcia łopat turbiny β . Przebieg zmian kąta β wynika w tym przypadku ze zmian prędkości wiatru i obciążenia.

Na rysunku 11 pokazano zmiany momentów mechanicznego i elektromagnetycznego turbozespołu wiatrowego dla analizowanego przypadku. Skokowy spadek prędkości wiatru, a tym samym momentu napędowego, w końcowym etapie symulacji spowodował, że dla utrzymania stabilnej pracy układu konieczne było wykorzystanie energii kinetycznej mas wirujących drogą zmniejszenia prędkości obrotowej wirnika turbozespołu (rys. 12).



Rys. 11. Zmiany momentów mechanicznego (M_m) i elektromagnetycznego (M_e) turbozespołu wiatrowego przy zmiennej prędkości wiatru i zmiennym obciążeniu



Rys. 12. Zmiany prędkości wirowania turbozespołu wiatrowego przy zmiennej prędkości wiatru i zmiennym obciążeniu

Praca turbozespołu wiatrowego w sieci z zasobnikiem energii

Pomimo możliwości regulacyjnych elektrownia wiatrowa nie gwarantuje pracy wyspowej wydzielonej sieci, ze względu na ograniczenia mocy generowanej wynikające z zależności od energii pierwotnej wiatru. Z tego powodu uzasadnione jest zainstalowanie w układzie zasobnika energii, który może pełnić funkcję elementu bilansującego, będąc jednocześnie źródłem napięcia referencyjnego. Obecność zasobnika sterowanego jako źródło napięciowe powoduje, że nie jest wymagana zmiana sterowania elektrowni wiatrowej przy przejściu z pracy w trybie połączenia z siecią do trybu wyspowego.

Wyniki kolejnej symulacji przedstawione na kolejnych rysunkach ilustrują scenariusz pracy wyspowej sieci z zasobnikiem energii. W badaniach symulacyjnych przyjęto losowe zmiany prędkości wiatru w zakresie od 8 do 12 m/s (rys. 13) oraz losowe zmiany obciążenia od 0 do 1,3 MW. Ponieważ maksymalna wartość prędkości wiatru nie przekracza prędkości znamionowej dla modelowanego turbozespołu, więc nie został aktywowany układ regulacji kąta natarcia łopat i przez cały okres symulacji kąt β był równy zero.

Zmiany mocy czynnej urządzeń pracujących w sieci dla analizowanego przypadku pokazano na rysunku 14, a zmiany mocy biernej na rysunku 15. Z przedstawionych bilansów mocy wynika, że zasobnik bilansując moc czynną w układzie jest jednocześnie źródłem mocy biernej dla przyłączonych odbiorów.



Rys. 13. Losowe zmiany prędkości wiatru w czasie symulacji



Rys. 14. Bilans mocy czynnej w sieci z zasobnikiem energii (P_{WT} - moc turbozespołu, P_L - moc obciążenia, P_S - moc zasobnika)



Rys. 15. Bilans mocy biernej w sieci z zasobnikiem energii (Q_{BT} - moc turbozespołu, Q_L - moc obciążenia, Q_S - moc zasobnika)



Rys.16. Zmiany momentów mechanicznego (M_m) i elektromagnetycznego (M_e) turbozespołu wiatrowego pracującego w sieci z zasobnikiem energii

Przebiegi zmian momentów mechanicznego i elektromagnetycznego dla tego przypadku pokazano na rysunku 16. Należy zauważyć, że zmiany momentu mechanicznego odpowiadają zmianom prędkości wiatru, a elektromagnetycznego zmianom mocy wytwarzanej przez turbozespół.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy możliwości pracy wyspowej wydzielonej sieci rozdzielczej średniego napięcia przy wykorzystaniu elektrowni wiatrowej jako źródła energii. Do analizy wykorzystano model symulacyjny zbudowany w środowisku programu PSCAD. Rozważono dwa scenariusze pracy sieci wyspowej: bez zasobnika i z zasobnikiem energii elektrycznej.

Dostosowanie wartości mocy generowanej elektrowni do mocy zapotrzebowanej odbiorów realizowane jest poprzez regulację kąta natarcia łopat turbiny, co ogranicza pełne wykorzystanie energii kinetycznej wiatru. W warunkach słabej wietrzności zbilansowanie mocy w układzie może nie być możliwe, nawet przy zastosowaniu regulacji mocy (odciążania) po stronie odbiorów.

Z powyższego względu wykorzystanie elektrowni wiatrowej do utrzymania pracy wyspowej wydzielonego układu sieci wymaga zastosowania zasobnika energii. W takim przypadku elektrownia wiatrowa może być sterowana jako źródło prądowe, które wprowadza do sieci moc czynną o wartości wynikającej z prędkości wiatru, natomiast zasobnik pełni funkcję źródła napięcia referencyjnego oraz elementu bilansującego moc czynną w układzie i jednocześnie dostarcza moc bierną potrzebną odbiorom. Poprawna praca turbozespołu wiatrowego realizowana jest poprzez procesy regulacyjne mające na celu zachowania równowagi momentów mechanicznego i elektromagnetycznego. Można stwierdzić, że zastosowanie zasobnika energii może być rozwiązaniem umożliwiającym przystosowanie elektrowni wiatrowej do pracy wyspowej.

Autorzy: mgr inż. Hubert Białas, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: hubert.bialas@edu.p.lodz.pl; dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl; dr hab. inż. Irena Wasiak, prof. PŁ, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, Email: irena.wasiak@p.lodz.pl;

LITERATURA

- Głowacki F., Koseda H., Praca wyspowa odnawialnych źródeł energii, Acta Energetica, 37 (2018), nr 4, 53-60
- [2] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne, Dz.U. 1997 Nr 54, poz. 348
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz.U Nr 93, poz. 623
- [4] Olivares D.E. et al, Trends in Microgrid Control, IEEE Transactions on Smart Grid, 5 (2014), n. 4, 1905-1919
- [5] Rozporządzenie KE 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, (2016), L112/1
- [6] Ariyasinghe M.N.S., Hemapala K.T.M.U., Microgrid Test-Beds and Its Control Strategies, Smart Grid Renew. Energy, 04 (2013), no. 01, 11-17
- [7] Rocabert J., Luna A., Blaabjerg F., Rodríguez P., Control of power converters in AC microgrids, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2012), no. 11, 4734-4749
- [8] Sahoo S.K., Sinha A.K., Kishore N.K., Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC-DC Microgrid. A Review, *IEEE Journal* of *Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6 (2018), no. 2, 738-759
- [9] Malik S.M., Sun X.Ai,Y., Zhengqi C., Shupeng Z., Voltage and frequency control strategies of hybrid AC/DC microgrid: a review, *IET Generation Transmission & Distribution*, 11 (2017), no. 2, 303-313
- [10] Venkataramanan G., Marnay C., A larger role for microgrids, IEEE Power and Energy Magazine, 6 (2008) no. 3, 78–82
- [11]Bonk L., Korpikiewicz J., Pakulski T.,: Możliwości świadczenia usług regulacyjnych przez generację rozproszoną, Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, Gdańsk 2016
- [12]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), 2691-2696
- [13]Ben Smida M., Sakly A., Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines, *Renewable Energy and Sustainable Development*, June 2015, 81-88
- [14]Bianchi F.D., de Battista H., Mantz R.J., Wind Turbine Control Systems, Springer, Germany, 2014
- [15] PSCAD Power Systems Computer Aided Design. User's Guide on the Use of PSCAD, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2003
- [16] Pawełek R., Terlecki B., Anuszczyk J., Model symulacyjny parku wiatrowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr.3, 223-227
- [17] ENERCON wind energy converters. Product overview, ENERCON GmbH, Aurich, Germany, July 2010
- [18] Machowski J., Białek J.W., Bumby J., Power System Dynamics: Stability and Control, John Wiley& Sons, 2008
- [19]Kłosowski Z., Analiza możliwości wykorzystania turbozespołu wiatrowego do stabilizacji napięcia w węźle elektroenergetycznej linii SN z wykorzystaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr 1, 20-27
- [20] 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, 1-4