

WYBRANE ZAGADNIENIA ANALIZ PRZYŁĄCZEŃ MORSKICH FARM WIATROWYCH NA PRZYKŁADZIE POLSKI

Paweł KUBEK¹, Maksymilian PRZYGRÓDZKI²

1. PSE Innowacje Sp. z o.o., Politechnika Śląska
tel.: 32 257 8637 e-mail: pawel.kubek@pse.pl
2. PSE Innowacje Sp. z o.o., Politechnika Śląska
tel.: 32 237 8571 e-mail: Maksymilian.przygrodzki@pse.pl

Streszczenie: Rozwój morskiej energetyki wiatrowej w perspektywie najbliższych kilkunastu lat może odgrywać decydującą rolę w wypełnianiu zobowiązań dotyczących udziału energii odnawialnej w ogólnym bilansie energetycznym. Sytuacja ta nasuwa potrzebę analiz zagrożeń wynikających z przyłączenia do krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE) morskich farm wiatrowych o mocy tysięcy MW. Eliminacja tych zagrożeń będzie wymagać nie tylko wystarczająco szerokiej regulacji przepustowości czynnego wytwarzania energii w KSE, ale także dostępu do rezerw mocy, które zapobiegają skutkom nagłych strat mocy dochodzących do tysięcy MW. Niniejsza publikacja przedstawia wybrane zagadnienia analiz możliwości przyłączenia morskich farm wiatrowych do KSE w perspektywie 2030 r. Zakres przeprowadzonych prac obejmuje analizy sieciowe, co pozwoliło określić wymagania w zakresie rozwoju KSE i oszacować niezbędne nakłady inwestycyjne.

Słowa kluczowe: morskie farmy wiatrowe, rozwój sieci, analizy sieciowe.

1. WPROWADZENIE

Od początku XXI wieku można zaobserwować gwałtowny rozwój morskich farm wiatrowych, szczególnie w krajach europejskich z dostępem do Morza Północnego [1,2,3]. Rozważa się także wykorzystanie basenu Morza Bałtyckiego, głównie przez Danię i Niemcy. Polska, ze względu na swoje korzystne położenie geograficzne, uważana jest za kluczowego gracza w otwarciu rynku offshore na Morzu Bałtyckim [4,5,6]. Oczekiwania te wzmacnia fakt, że w najbliższych dziesięcioleciach Polska będzie musiała podjąć znaczny wysiłek, aby zaspokoić swoje potrzeby energetyczne i utrzymać odpowiedni poziom bezpieczeństwa energetycznego. Istniejące elektrownie węglowe, które są kluczowym elementem aktualnego systemu elektroenergetycznego są przestarzałe. Szacuje się, że w latach 2020-2035 instalacje stanowiące około 50% produkcji energii mają zostać zamknięte, a większość pozostałych jednostek należy zmodernizować. Przewiduje się, że do roku 2050 tylko 5 GW z istniejących instalacji będzie nadal wykorzystywanych w KSE, a maksymalne zapotrzebowanie szacuje się na około 40 GW [7,8]. W celu zapewnienia długoterminowego krajowego zapotrzebowania na energię, a także sprostaniu celom polityki klimatycznej UE, konieczne są znaczne inwestycje w nowe źródła energii, w tym energię odnawialną. W tym kontekście morskie farmy

wiatrowe mogą stanowić ważny element polskiej elektroenergetyki w perspektywie kilkunastu najbliższych lat.

Szacuje się, że potencjał morskiej energetyki wiatrowej w warunkach polskich do 2030 roku wyniesie ok. 10 000 MW, co zostało uwzględnione w artykule jako jedno z głównych założeń. Taki poziom mocy zainstalowanej w siłowniach wiatrowych pozwoli na wyprodukowanie dodatkowo rocznie nieco ponad 30 TWh energii elektrycznej [7]. Rozwój energetyki wiatrowej, a w szczególności morskiej energetyki wiatrowej, niesie za sobą jednak również szereg niekorzystnych zjawisk. Do najistotniejszych zagrożeń można zaliczyć m.in. wzrost strat sieciowych oraz negatywny wpływ na bezpieczeństwo pracy KSE (fluktuacje mocy generowanej i możliwe nagłe ubytki mocy generowanej). Morskie farmy wiatrowe (MFW), ze względu na ich lokalizację geograficzną, przyłączane będą do KSE w jego północnej części. Z uwagi na konieczność utrzymania salda wymiany międzynarodowej oraz bilansu mocy w KSE praca MFW wiązać będzie się z koniecznością ograniczenia mocy generowanej w konwencjonalnych elektrowniach systemowych. Ze względu na fakt lokalizacji tych źródeł systemowych w dużej mierze w południowej części kraju, praca źródeł wiatrowych wymusi w takim przypadku silne przesyły mocy w kierunku południowym. Bezpośrednim skutkiem takich przesyłów mocy będzie wzrost strat sieciowych. W ramach przeprowadzonych analiz wzrost strat sieciowych, związany bezpośrednio z pracą MFW oszacowano na:

- 800 MW do 900 MW dla warunków szczytu letniego,
- 600 MW do 700 MW dla warunków szczytu zimowego,

w zależności od przyjętego wariantu przyłączenia MFW do KSE. Zgodnie z przyjętym oszacowaniem praca MFW w skrajnym przypadku zwiększy szczytowe straty mocy w KSE o równowartość jednego nowego bloku wytwórczego, co wpłynie bezpośrednio na koszt energii kupowanej przez polskiego operatora systemu przesyłowego na pokrycie strat sieciowych.

Jak już wspomniano, praca farm wiatrowych wiązać będzie się z dużymi fluktuacjami mocy wytwarzanej, co wynika z charakteru pracy takich źródeł (zmienność prędkości wiatru). Bezpieczna praca KSE wymagać będzie w takim przypadku zapewnienia odpowiednio szerokiego

pasma regulacji wytwarzania mocy czynnej w KSE, zapewne wielokrotnie szerszego od wymaganego obecnie. W chwili obecnej, zgodnie z [9] wymagany zakres regulacji w KSE wynosi:

- około +/- 170 MW w przypadku regulacji pierwotnej,
- około +/- 500 MW w przypadku regulacji wtórnej.

Powyższe wartości określone zostały zgodnie z wytycznymi UCTE [10] na podstawie rozważań analitycznych oraz oświadczeń ruchowych. Rozwój energetyki wiatrowej wiązać będzie się z koniecznością zweryfikowania tych wartości, tym bardziej, że przy określaniu podanych wyżej wielkości nie został uwzględniony istotny udział OZE w ogólnej strukturze wytwarzania mocy w KSE.

2. ZAŁOŻENIA ANALIZ

Analizy sieciowe związane z oceną skutków dla KSE przeprowadzono w latach 2020 i 2030. W analizach sieciowych uwzględniono układ sieci zamkniętej 400/220/110 kV, którego podstawą były modele obliczeniowe przygotowane dla stanów obciążeń: szczyt zimowy, szczyt letni oraz dolina letnia. Układy te uzupełniono o przewidywane w Planie Rozwoju (PRSP) inwestycje sieciowe oraz zmiany w obszarze generacji. Jednocześnie w modelach uwzględniono globalną prognozę zapotrzebowania na moc czynną. W obliczeniach rozptyłów mocy dla okresu zimowego przyjęto obciążalności prądowe linii napowietrznych dla temperatury otoczenia 0°C, a dla okresu letniego dla temperatury otoczenia 25°C. Dla warunków szczytu letniego oraz szczytu zimowego saldo wymiany międzysystemowej (międzynarodowej) zostało utrzymane zgodnie z wyjściowymi (referencyjnymi) modelami obliczeniowymi.

Na przekroju Polska – Niemcy w 2020 r. utrzymano wymianę mocy, tj. przesył z Niemiec do Polski mocy rzędu 400 MW (po 100 MW każdym torem linii 400 kV Krajnik – Vierraden i Mikułowa – Hagenwerder). W 2030 r. rozważono możliwość uruchomienia trzeciego połączenia na napięciu linii 400 kV, przez co łączny przesył mocy z Niemiec do Polski zwiększono do 600 MW. W analizach przyjęto, że na połączeniach transgranicznych Polska – Niemcy wykorzystuje się możliwości sterowania przepływem poprzez zmianę kąta fazowego przesuwników fazowych poza zakres ± 22 stopni.

We wszystkich badanych układach jednym z kryterium poprawności pracy układu był dopuszczalny poziom napięcia. Poziom napięć został przyjęty zgodnie z obowiązującymi zapisami Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP), w tym punkt II.A.2.2.3 oraz II.A.2.2.4 [9].

W ramach analiz technicznych uwzględniono obliczenia rozptyłów mocy w stanach normalnych i awaryjnych (zgodnie z kryterium N-1). W analizie uwzględnione zostały dwa scenariusze potencjalnych lokalizacji Morskich Farm Wiatrowych (MFW), uzależnione od roku przyłączenia. Dla roku 2020 rozkład generacji MFW przedstawia się następująco:

- scenariusz I – moc 500 MW wprowadzona na ląd w rejonie miejscowości Grzybowo (woj. zachodniopomorskie),
- scenariusz II – moc 500 MW wprowadzone na ląd w rejonie miejscowości Ustka (woj. pomorskie).

Dla roku 2030 rozkład generacji MFW przedstawia się następująco:

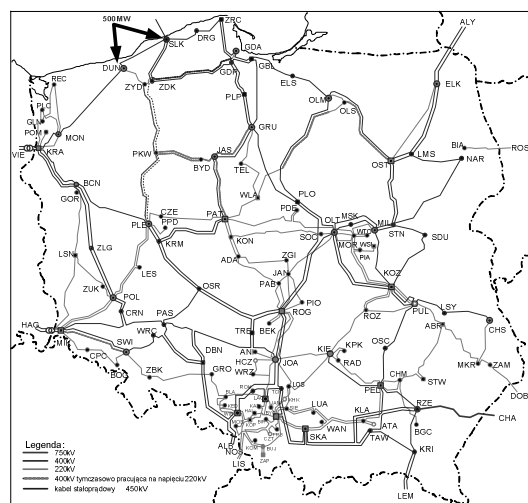
- scenariusz I – przyłączenie MFW w dwóch lokalizacjach: moc 5 000 MW wprowadzona na ląd w rejonie miejscowości Grzybowo (woj. zachodniopomorskie) oraz moc 5 000 MW wprowadzona na ląd w rejonie miejscowości Ustka (woj. pomorskie),
- scenariusz II – przyłączenie MFW w trzech lokalizacjach: moc 3 500 MW wprowadzona na ląd w rejonie miejscowości Grzybowo (woj. zachodniopomorskie), moc 3 500 MW wprowadzona na ląd w rejonie miejscowości Ustka (woj. pomorskie) oraz moc 3 000 MW wprowadzona na ląd w rejonie miejscowości Lubiatowo (woj. pomorskie).

W związku z stosunkową niską wartością mocy MFW w 2020 r., w analizie przyjęto, że przyłączone one zostaną linią promieniową do istniejących stacji NN tj. MFW w rejonie miejscowości Grzybowo do rozdzielni 400 kV stacji Dunowo, a MFW w rejonie miejscowości Ustka do rozdzielni 400 kV stacji Słupsk. W 2030 r. ze względu na dużą moc MFW rozważono różne sposoby powiązania nowych stacji NN z siecią przesyłową.

Dodatkowo przebadano także scenariusz zakładający przyłączenie do KSE MFW o łącznej mocy 10 000 MW w 2030 roku, przy czym moc 5 000 MW wprowadzana jest bezpośrednio wydzielonym ciągiem liniowym do rozdzielni 400 kV stacji Plewiska. Moc maksymalna czynna generowana przez farmy wiatrowe na lądzie została przyjęta w analizie alternatywnie w wysokości 6 150 MW w 2020 r. i 7 687 MW w 2030 r.

3. WYNIKI ANALIZ

W 2020 r. zapewnienie bezpiecznej pracy KSE w przypadku przyłączenia MFW o mocy 500 MW do KSE w rejonie miejscowości Grzybowo wymagać będzie modernizacji ok. 8 km linii 220 kV. Łączny szacowany nakład inwestycyjny wyniesie ok. 8 mln zł. W przypadku przyłączenia MFW do KSE w rejonie miejscowości Ustka konieczne będzie zmodernizowanie ok. 44 km linii 400 kV. Łączny szacowany nakład inwestycyjny wyniesie wtedy ok. 28 mln zł. Docelową strukturę układu sieciowego dla 2020 r. pokazano na rysunku 1.



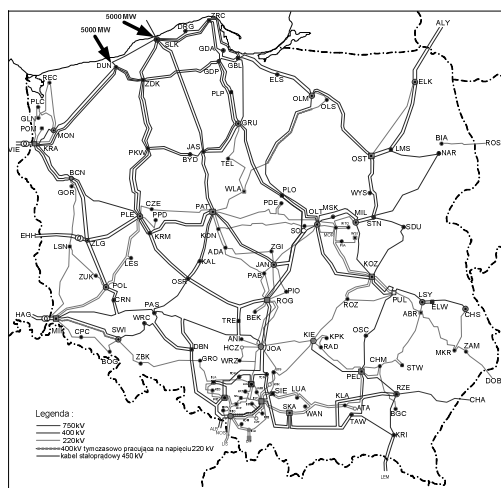
Rys. 1. Docelowa struktura układu sieciowego w 2020 r.

W 2030 r. przyłączenia MFW o sumarycznej mocy 10 000 MW w rejonie miejscowości Grzybowo i Ustka wymagać będzie nakładów inwestycyjnych w wysokości ok.

5 476 mln zł. Składać się na to będą nakłady inwestycyjne wymagane do:

- budowy 1 250 km nowych linii dwutorowych 400 kV,
- przebudowy 353 km istniejących linii NN na dwutorowe linie 400 kV,
- modernizacji 336 km istniejących linii 220 kV i 400 kV,
- instalacji 7 dławików o mocach 100 Mvar i 150 Mvar,
- instalacji 10 baterii kondensatorów stacyjnych (BKS) o mocach od 100 Mvar do 250 Mvar.

Docelową strukturę układu sieciowego dla 2030 r. pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Docelowa struktura układu sieciowego w 2030 r. MFW przyłączone do KSE w rejonie miejscowości Grzybowo i Ustka

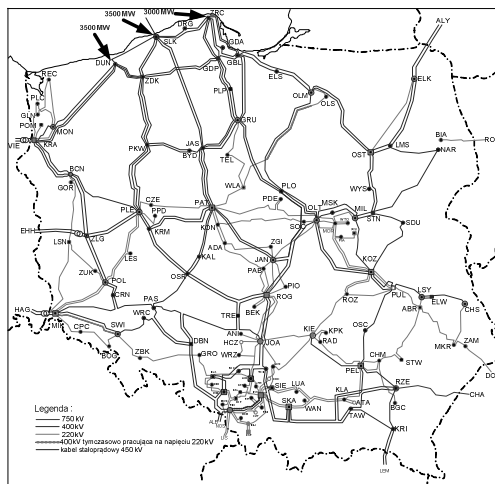
Zmiana miejsca przyłączenia MFW (3 miejsca przyłączenia w rejonie miejscowości Grzybowo, Ustka i Lubiato) wpłynie na wzrost sumarycznych nakładów inwestycyjnych do poziomu ok. 6 124 mln zł, na co składa się nakład inwestycyjny konieczny do:

- budowy 1 316 km nowych linii dwutorowych 400 kV,
- przebudowy 568 km istniejących linii na dwutorowe linie 400 kV,
- modernizacji 271 km istniejących linii 220 kV i 400 kV,
- instalacji 6 dławików o mocach 100 Mvar i 150 Mvar,
- instalacji 9 BKS o mocach od 100 Mvar do 250 Mvar.

W takim przypadku docelową strukturę układu sieciowego pokazano na rysunku 3.

Rozbudowa KSE, związana z przyłączeniem MFW o mocy 5 000 MW w rejonie miejscowości Grzybowo i Ustka w 2030 r. oraz 5 000 MW przesyłanych bezpośrednio do stacji Plewiska (wewnątrz kraju) wymagać będzie:

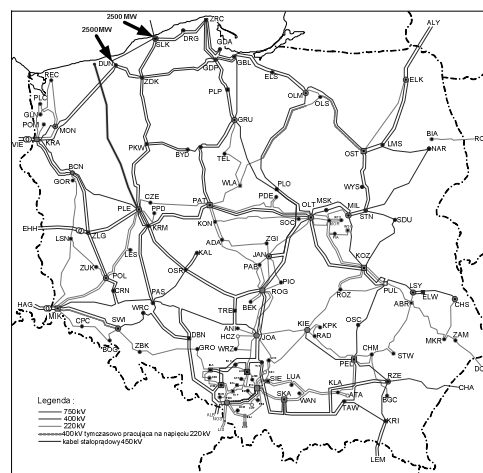
- budowy 672 km nowych linii dwutorowych 400 kV,
- przebudowy 300 km istniejących linii na dwutorowe linie 400 kV,
- modernizacji 250 km istniejących linii 220 kV i 400 kV,
- instalacji 1 nowego ATR 400/220 kV 500 MVA,
- instalacji 2 dławików o mocy 150 Mvar.



Rys. 3. Docelowa struktura układu sieciowego w 2030 r. MFW przyłączone do KSE w rejonie miejscowości Grzybowo, Ustka i Lubiato

Dodatkowo uwzględnić należy konieczność budowy wspomnianego wydzielonego ciągu liniowego o długości ok. 250 km. Zatem łączny nakład inwestycyjny wyniesie od ok. 5 028 mln zł (w przypadku budowy wydzielonego ciągu liniowego jako dwóch linii dwutorowych 400 kV) do ok. 5 278 mln zł (w przypadku wykorzystania technologii HVDC i budowy dwóch torów DC 500 kV).

Przy przyłączeniu łącznych 10 000 MW w 2030 roku docelową strukturę układu sieciowego przedstawia rysunek 4. Na rysunku zaznaczono również bezpośredni ciąg poprowadzony do stacji Plewiska (oznaczenie PLE).



Rys. 4. Docelowa struktura układu sieciowego w 2030 r. MFW przyłączone do KSE w rejonie miejscowości Grzybowo, Ustka

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Sumaryczny nakład inwestycyjny wymagany do przyłączenia MFW o mocy 10 000 MW w 2030 roku w rejonie miejscowości Grzybowo i Ustka wyniesie około 5 476 mln zł. Zmiana miejsca przyłączenia MFW (3 miejsca przyłączenia w rejonie miejscowości Grzybowo, Ustka i Lubiato) wpłynie na wzrost sumarycznych kosztów inwestycyjnych do poziomu ok. 6 124 mln zł.

Poza aspektami inwestycyjnymi należy zauważyć, że rozwój energetyki wiatrowej, a w szczególności uruchomienie MFW o łącznej mocy 10 000 MW wpłynie na diametralną zmianę rozkładu generacji w skali całego KSE.

Dodatkowo może uniemożliwić zachowanie wymaganych przepływów mocy na przekroju synchronicznym Polska – Niemcy. W takim przypadku zakres regulacji przesuwników fazowych, wynoszący $\pm 22^\circ$ także może okazać się niewystarczający. W celu zachowania salda wymiany konieczne będzie bardzo silne ograniczenie wytwarzania w elektrowniach systemowych zlokalizowanych w dużej mierze w południowej części kraju. Skutkiem tego będą bardzo duże przepływy mocy w kierunku południowym. Innym aspektem będzie wpływ na stabilność pracy systemu elektroenergetycznego [11]. Należy bowiem uwzględnić zagrożenia wynikające z dużych i nagłych ubytków mocy generowanej, wywołane wyłączeniem turbin wiatrowych spowodowanych przekroczeniem dopuszczalnej prędkości wiatru.

Wyznaczone możliwości wprowadzenia pochodzącej z MFW zostały określone w podstawowych (istniejących oraz przewidywanych przez PRSP) strukturach KSE. Poziom tej mocy jest jedynie funkcją poniesionych nakładów inwestycyjnych. Wartości te można uzyskać poprzez działania doraźnie i nie wymagają długoterminowych planów rozwojowych w tym budowy nowych ciągów bądź połączeń. Dalsze zwiększanie zapotrzebowania na usługi przesyłowe w związku z przyłączaniem nowych (większych) zespołów MFW będzie musiało skutkować poważnymi inwestycjami w KSE, wymagającymi nowych pozwoleń i uzgodnień, a więc działań o charakterze wieloletnim [12]. W tym przypadku należy spodziewać się nowych wytycznych rozwojowych KSE, w tym analiz włączonych do PRSP. Do tej grupy należy zaliczyć analizy o charakterze dynamicznym, realizowane w stanach przejściowych i oddziałujące na stabilne warunki pracy KSE jak i funkcjonowanie układów automatyki zabezpieczeniowej.

Podsumowując przedstawione rozważania należy wskazać, że potencjał energetyczny MFW będzie możliwy do wykorzystania w warunkach polskich, niemniej jednak jego skala będzie musiała zostać bezpośrednio związana z realiami prawnymi oraz możliwościami inwestycyjnymi leżącymi po stronie interesantów tego procesu.

5. BIBLIOGRAFIA

1. The European offshore wind industry - key trends and statistics 2015. A report by the European Wind Energy Association, February 2016, www.ewea.org.
2. Wind in power 2017. Annual combined onshore and offshore wind energy statistics. WindEurope, February 2018, www.windeurope.org.
3. The Ten-Year Network Development Plan 2018 – Analysis of the needs of the European system. Report, www.entsoe.eu.
4. Polskie Towarzystwo Morskiej Energetyki Wiatrowej, www.ptmew.pl.
5. Model of the electricity mix until 2035 together with the analysis of potential balancing problems of the PPS with wind generation. The Polish Wind Energy Association, Szczecin, January 2019, www.psew.pl.
6. Polityka Energetyczna Polski do roku 2040 (projekt), Ministerstwo Energii, Warszawa 2018.
7. Planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2018-2027 (projekt). PSE S.A., styczeń 2018, www.pse.pl.
8. Prognoza pokrycia zapotrzebowania szczytowego na moc w latach 2016–2035. PSE SA, Maj 2016, www.pse.pl.
9. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. PSE S.A., Grudzień 2017, www.pse.pl.
10. Policy 1 – Load-Frequency Control and Performance. Appendix 1. UCTE, March 2009, www.entsoe.eu.
11. M. Szabliski, P. Rzepka, Analysis of Technical Possibilities of Photovoltaic and Wind Sources Playing in an Ancillary Service of Frequency and Power Regulation, *Acta Energetica*, vol. 4, no. 29, pp. 112-125, October 2016.
12. M. Przygodzki, W. Lubicki, Wykorzystanie podejścia probabilistycznego w planowaniu rozwoju na podstawie doświadczeń operatorów sieciowych. *Rynek Energii*, no 2, pp. 36-43, 2017.

CHOSEN ASPECTS OF OFFSHORE WIND FARMS CONNECTION ANALYSES IN POLISH CASE

The development of offshore wind energy in the perspective of the next dozen or so years may play a decisive role in fulfilling the obligations regarding the share of renewable energy in the overall energy balance. At the same time, one should take into account the threats resulting from the connection to Polish National Power System (NPS) onshore and offshore wind farms with a capacity of thousands MW. Elimination of these threats will require not only a sufficiently wide bandwidth regulation of active power generation in the National Power System (many times wider than currently required), but also access to power reserves that prevent the effects of sudden power losses up to thousands of MW. This publication presents the possibilities of connected the offshore wind farms to the NPS in the perspective of 2030, analyzed in the framework of development works carried out by the transmission system operator. The scope of work included network analysis, which allowed to determine the requirements as to the scope of NPS development and to estimate the necessary investment costs.

Keywords: Offshore wind farms (OWF), network development, network analysis.