

Wieże hybrydowe turbin wiatrowych – alternatywną koncepcją magazynowania energii

Streszczenie. W pracy przedstawiono innowacyjny system energetyczny wiatrowo-wodny. Należą do niego 4 turbiny wiatrowe, aktualnie najwyższe na świecie oraz zintegrowany układ magazynowania energii – zrealizowany na dwóch poziomach. Magazyny górne zrealizowano w zbiornikach wodnych umieszczonych w fundamentach wież hybrydowych turbin wiatrowych, jako magazyn dolny wykorzystano zbiornik wodny w dolinie, oddległy o 3,2 km, zlokalizowany o 200 m niżej. Komponenty układu działają w sposób zintegrowany i niezawodnie.

Abstract. The paper presents an innovative wind-water energy system. It includes 4 wind turbines, currently the highest in the world and an integrated energy storage system – implemented on two levels. The upper warehouses were built in water reservoirs placed in the foundations of the hybrid turbine towers, while the bottom storehouse was a water reservoir in the Valley, 3.2 km away, located 200 m below. The system components operate in an integrated and reliable way. Hybrid towers of wind turbines - alternative energy storage concept.

Słowa kluczowe: System hybrydowy OZE, magazynowanie energii, najwyższe turbiny wiatrowe, integracja elementów systemu.

Keywords: RES hybrid system, energy storage, the highest wind turbines, hybrid turbine towers, integration of system elements.

Wstęp

W związku z częstymi fluktuacjami dostaw energii z Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) korzystne jest wprowadzenie zintegrowanych układów magazynowania, często na dwóch poziomach. Pełnią one rolę systemów buforujących, dzięki czemu zapewniają niezawodność zasilania. Aktualnie producenci instalacji bazujących na odnawialnych źródłach energii próbują je integrować z magazynami energii tak, aby jej nadmiar mógł być na bieżąco zabezpieczony [1-3]. Najważniejszym problemem w realizacji tego procesu jest kontrola przepływu energii i sterowanie nim w celu zapewnienia większej niezawodności i elastyczności systemu [4-6].

Konieczna jest również integracja OZE i wybranej technologii magazynowania z konkretną siecią. O właściwym doborze decydują przede wszystkim: pojemność magazynująca (kWh), moc wyjściowa (kW), liczba cykli (ładowanie/rozładowanie) czas życia (lata/cykle), głębokość rozładowania (%), czas reakcji (ms-min), sprawność (%), koszty inwestycyjne i eksploatacyjne [2,7,8].

Takie podejście, uwzględniające predykcję generacji OZE i zapotrzebowania na energię pozwala na prawidłowe bilansowanie pracy systemu.

Decyzję w tym zakresie powinno poprzedzić przeprowadzenie wielokryterialnych badań mających na celu potwierdzenie dostępności OZE na wybranym terenie np. długookresowych pomiarów iradiacji i prędkości wiatru na różnych wysokościach, ocena ukształtowania terenu, kompatybilności z wybraną technologią magazynowania [8-11] oraz – istotne jest również uwzględnienie przy tym problemów dotyczących ekologii i gatunków zagrożonych [12-14]. Dotyczy to zwłaszcza ekosystemów wodnych z powodu ich ekologicznej degradacji i ewapotranspiracji wody (transpiracji i sublimacji roślin) [15,16].

Zaprezentowany w pracy system energetyczny stanowi całkowicie nowatorskie rozwiązanie, integrację energetyki wiatrowej (farma) z magazynowaniem energii (elektrownia szczytowo-pompowa ze standardowym zbiornikiem dolnym i aktywnymi zbiornikami górnymi w wieżach hybrydowych turbin wiatrowych) [17,18].

Ocena ogólna potencjału energii wiatru

W planowaniu lokalizacji farm wiatrowych ocena zasobów wiatru stanowi najtrudniejsze przedsięwzięcie [19-22].

Istotne w tym zakresie jest oszacowanie rocznej produkcji energii, tj. wskaźnika AEO (Annual Energy Output). Stanowi on funkcję parametrów środowiskowych. Możliwe jest uśrednianie danych pomiarowych wiatru, w tym prędkości, przy czym zaleca się przyjęcie okresu 10 minut. W przypadku innych przedziałów czasowych, konieczne jest zastosowanie modelowania. Do modelowania mocy i energii elektrowni wiatrowych przydatny jest zwłaszcza rozkład Weibulla.

Nie bez znaczenia pozostaje także wpływ parametrów konstrukcyjnych elektrowni wiatrowej na efektywność konwersji (1).

Przy przyjęciu założonej, stałej sprawności i średniogodzinowej prędkości wiatru, wielkość AEO opisana jest zależnością [23-26]:

$$(1) \quad AEO = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta t$$

gdzie: A – powierzchnia łopaty wirnika, m², v – prędkość wiatru (wartość średniogodzinowa), m/s, ρ – gęstość powietrza kg/m³, η – sprawność (aerodynamiczna, mechaniczna, elektryczna), t = 8,760 h/rok.

Jak wynika z zależności (1), czynnikiem decydującym o wskaźniku AEO jest prędkość wiatru. Jej pomiary powinny być prowadzone na wysokości co najmniej 30 – 40 m. Dopuszczalna jest ekstrapolacja wyników na wysokości większe. Ekstrapolację przeprowadza się za pomocą prawa mocy, względnie – logarytmicznego, co przedstawiają zależności (2) i (3) [19,20,22]:

$$(2) \quad \frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

$$(3) \quad \frac{P}{P_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{3\alpha}$$

gdzie: H – wysokość wieży turbiny, α – współczynnik szorstkości terenu, pozostałe oznaczenia jak poprzednio, przy czym wielkości indeksowane 0, to wielkości pomiarowe na potrzeby ekstrapolacji. W omawianej lokalizacji najczęściej występują wiatry o prędkościach w zakresie od 5 do 20 m/s, chociaż spotyka się także większe, głównie w okresie od października do marca, przy czym największym

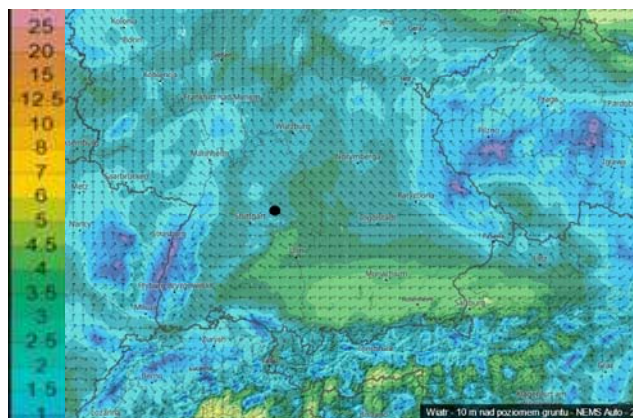
potencjałem charakteryzują się wiatry z kierunków zachodniego i południowo – zachodniego. Jak widać z równań (2) i (3) prędkość wiatru, ze względu na możliwy do pozyskania potencjał energetyczny, przyjmuje korzystniejsze wartości na większych wysokościach.

Do pionowej ekstrapolacji prędkości wiatru można również zastosować modele bazujące na systemie hybrydowym sztucznej sieci neuronowej Artificial Neural Networks (ANN), wykorzystujące algorytm genetyczny i optymalizację roju cząstek, tj. GA – NN i PSO – NN [27].

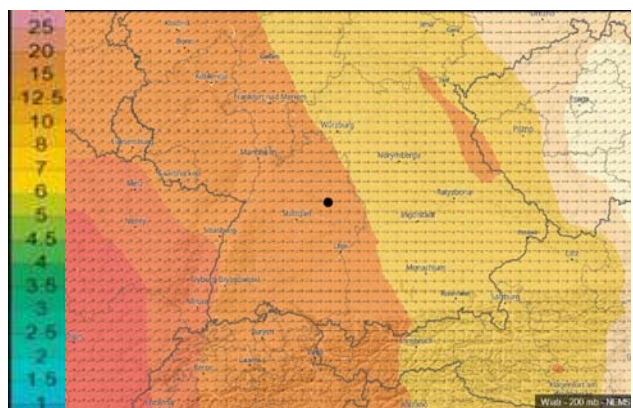
Kryteria decyzyjne wyboru lokalizacji pod inwestycję

Po odpowiednich ustaleniach, obejmujących: charakterystykę warunków klimatycznych, szorstkości terenu oraz wyniki pomiarów prędkości wiatru zgodnie z wytycznymi europejskimi (na różnych wysokościach i w co najmniej rocznym czasookresie) [19,20,23,], jak również topografię terenu, podjęto decyzję o realizacji inwestycji w Bawarii, w miejscowości Gaildorf. Zgodnie z wynikami badań stwierdzono, że rejon charakteryzuje się średnią dostępnością wiatru. Lokalizacja na wzgórzach Limpurgu (200 m n.p.m.) pozwalała na wybór elektrowni szczytowo-pompowej jako magazynu energii. Projekt zyskał poparcie lokalnej społeczności i dofinansowanie rządowe [17,18].

Na Rysunku 1 przedstawiono rozkład prędkości wiatru dla omawianej lokalizacji, w dniu 10 lipca 2021 roku, w południe, na wysokości odpowiednio 10 m (a), i – 210 m (b) nad poziomem gruntu.



a.)



b.)

Rys.1. Rozkład prędkości wiatru nad powierzchnią gruntu, w Gaildorf, w dniu 10 lipca 2021 godz.12, a.) na wysokości 10 m (v_1), b.) 210 m (v_2). Skala od 1-25 m/s. Lokalizacja Gaildorf oznaczona na mapkach punktem. Praca własna na podstawie [28]

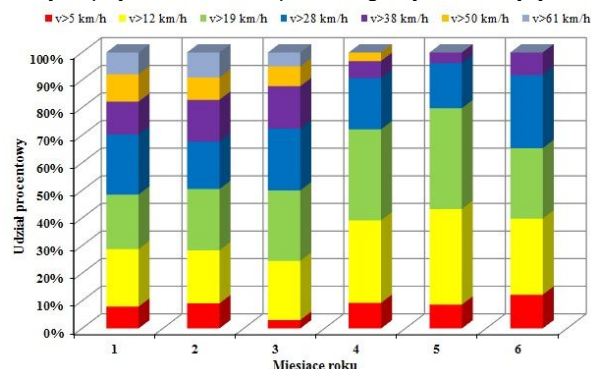
Przykładowe informacje, dotyczące zróżnicowania w zakresie dostępności zasobów wiatrowych zestawiono w Tabeli 1 dla dnia 10 lipca 2021 w południe, odpowiednio dla 10 m. n.p.m. (v_1) i 210 m. n.p.m. (v_2) [28].

Tabela1. Prędkość wiatru dla dnia 10 lipca 2021 na wysokości nad gruntem 10 m. n.p.m. (v_1) i 210 m. n.p.m. (v_2), opracowanie własne na podstawie map animacji wiatru [28].

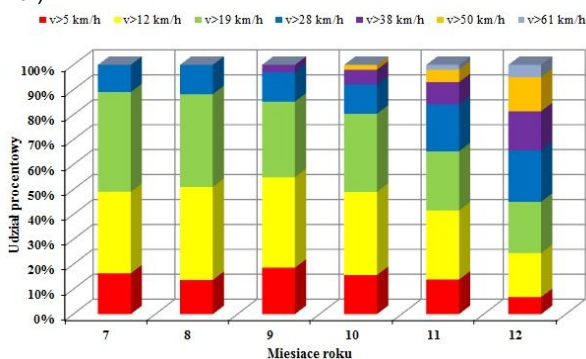
Godz.	3	6	9	12	15	18	21	24
v_1 [m/s]	2-3	2-3	1-1,7	3-3,3	3-3,3	2-3	2-3	2-3
v_2 [m/s]	19-22	19-22	17-19	17-19	19-22	19-22	17-19	14-17
kier. wiatru	S	SSE	SE	SE	SE	SSE	SSE	ESE

Można stwierdzić, że w tym regionie, występuje również znaczne zróżnicowanie w zakresie dostępności zasobów wiatrowych w skali miesiąca czy roku, stąd konieczność zapewnienia magazynowania energii dla utrzymania stabilności zasilania [3].

Na rysunku 2 zilustrowano rozkład procentowy wiatrów o różnych prędkościach dla poszczególnych miesięcy.



a.)



b.)

Rys.2. Procentowy rozkład wiatrów o różnych prędkościach dla poszczególnych miesięcy w skali roku, w Gaildorf, a.) styczeń-czerwiec, b.) lipiec-grudzień. Praca własna na podstawie [28]

Farma wiatrowa

Współpracę pomiędzy firmami Max Bögl Wind AG a General Electric (GE) Renewable Energy Onshore Wind Deutschland w zakresie Projektu Gaildorf, zapoczątkowano w 2016 roku. Ostatecznie, do realizacji przedsięwzięcia, wybrano z platformy III GE turbiny o mocy jednostkowej 3,4 MW i o średnicy wirnika 137 m. W skład farmy wchodziły cztery turbiny [17,18].

Parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne omawianych turbin zawarto w Tabeli 2 [20,29].

Tabela 2. Parametry konstrukcyjno - eksploatacyjne turbin wiatrowych GE z platformy 3 MW

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc turbiny wiatrowej	3,2 - 3,8	MW
Średnica wirnika	103,130,137	m
Energia elektryczna dostępna z konwersji energii wiatru	42	GWh
Wysokość piasty turbiny	150,175,178,5, 199, 223	m. n.p.m.
Poziom mocy akustycznej (redukcja szumów)	106-107	dB(A)

Są to turbiny trójłopatowe, zamontowane na wieży o konstrukcji rurowej, pracujące w osi poziomej. Kierunek obrotów wirnika odpowiada kierunkowi wskazówek zegara. Rozwiązania charakteryzują się możliwością pracy ze zmienną prędkością (przystosowanie do szerokiego spektrum prędkości wiatru), wyposażeniem w aktywną kontrolę optymalnego odchylenia względem wiatru i zaawansowaną kontrolę obciążeń, w wyniku pomiaru naprężeń i indywidualnej kontroli nachylenia łopatek [20].

Zastosowano elektryczną regulację napędu i hamulec aerodynamiczny. Zapewniono ochronę antykorozyjną.

Wraz z turbinami wiatrowymi, GE dostarcza również dedykowane im oprogramowanie [20]. Uwzględniono zaawansowany system monitorowania Global Research, obejmujący: CMS (Condition Monitoring System) jak również SCADA Supervisory Control and Data Acquisition Anomaly Detection Services [20,29].

Liczne modyfikacje i modernizacje wprowadzane przez GE na bieżąco do własnych istniejących już rozwiązań, pozwalają na ich optymalizację, skutkującą – z punktu widzenia ekonomii – wzrostem potencjału energetycznego, oraz – ekologii – zmniejszeniem emisji CO₂ do środowiska i obniżeniem nakładów inwestycyjnych [20]. Ta elastyczność w zakresie rozwiązań umożliwiła integrację turbin wiatrowych z innowacyjnym projektem magazynowania energii Max Bögl Wind AG.

Zastosowano niestandardowe wysokości piast, od 155 do 178 metrów [20,29]. Jedna z turbin, od momentu zainstalowania, jest najwyższą na świecie. Łączna wysokość jej wieży i skrzydła wirnika osiąga 246,5 metra [17,18]. Pozostałe są niewiele niższe. Znacząca wysokość turbin jest dodatkowym gwarantem ich pracy przy dużych prędkościach wiatru – a tym samym pozyskiwania opłacalnego wskaźnika AEO [23-26]. Dodatkowo, zwiększono o 40 m wysokość wież, jest to wynikiem ich unikalnej hybrydowej konstrukcji. Korzystnym jest również fakt, że wieże turbin zlokalizowano na wzgórzach, co zapewniło im łącznie odpowiednio 501,5 m. n.p.m., 489,5 m. n.p.m., 489,5 m. n.p.m., 485,5 m. n.p.m [17,18]. W efekcie, taka wysokość pozwala nie tylko na zwiększenie uzysku energii, ale i na ograniczenie turbulencji [22].

Wysokość wież stanowiła jednak wyzwanie przy montażu turbin. Wyniesienie łopatek turbin na odpowiednią wysokość zrealizowano za pomocą dźwigu Liebherr, Rys. 3, a do ich montażu zastosowano EF 300 Plus electric torque multiplier Alkitronic, łącznie 1248 śrub [30].



Rys.3. Montaż łopatek turbiny wiatrowej na wieży w Gaildorf, Foto: [A] (Holger Hesselthaler)

Farma wiatrowa rozpoczęła pracę w 2017 roku.

Magazynowanie energii - system pilotażowy

Pilotażowy system magazynowania energii, zastosowany w Gaildorf wykorzystuje fundamenty wież

turbin wiatrowych jako zbiorniki tzw. górne w rozwiązaniu szczytowo-pompowym magazynowania energii.

Modułowo zbudowana wieża jest od podłoża do wysokości 40 m wyposażona w baseny: pionowy, aktywny o średnicy 16,8 m i wysokości słupa wody do 31 m oraz – pasywny o średnicy 63 m i głębokości od 8-13 m. Łącznie w czterech wieżach zmagazynować można 160 000 m³ wody. Fundamenty wież o konstrukcji hybrydowej, zapewniają pojemność energetyczną 70 MWh [17,18].

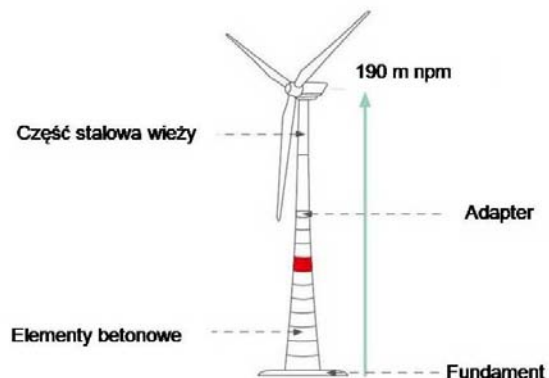
Aktywne baseny składają się z 27 sprężonych pierścieni z betonu. Przy montażu zastosowano dziewięćosiowy samojezdny żuraw Liebherr LTM 11200-9.1 Hercules, wyposażony w balast o masie 202 tony. Pierścienie zabezpieczono stalowymi linami.

Dolny fragment wieży hybrydowej z magazynem górnym hydroelektrowni przedstawiono na Rysunku 4.



Rys. 4. Fragment wieży o konstrukcji hybrydowej z magazynem górnym, Foto: [C]

Sekcje wież hybrydowych turbin wiatrowych przedstawiono na Rysunku 5.



Rys. 5. Wieża hybrydowa turbiny wiatrowej w Gaildorf. Zaznaczono sekcję wieży, praca własna na podstawie [A]

Betonowa (hybrydowa) konstrukcja wieży bazuje na fundamencie pierścieniowym, wykonanym bezpośrednio na placu budowy. Zabezpiecza to przeniesienie znacznych obciążeń, pochodzących zarówno od masy własnej jak i od siły wiatru – na podłoże.

Sprężanie betonowej wieży uzyskano dzięki zewnętrznemu systemowi stali o wysokiej wytrzymałości, który przejmuje siły rozciągające wieżę, co eliminuje zjawisko pękania elementów betonowych.

Sekcja stalowa wieży stanowi elastyczną konstrukcję. Produkcja realizowana jest w zakładzie Max Bögl Wind AG w Sengenthal. W skład sekcji wchodzi kilka segmentów.

Adapter – łączy dwa komponenty wieży: betonowy i stalowy. Jednocześnie zapewnia siły sprężające. Dzięki połączeniu segmentów hybrydowa wieża o wysokości do 190 metrów może być zrealizowana ekonomicznie.

Precyzyjne szlifowanie wykonywane z zastosowaniem sterowania komputerowego Computerized Numerical Control (CNC) stanowi gwarancję dokładności wykonania elementów. Komponenty wież są ostatecznie zestawiane w całość w lokalizacji inwestycji Rys. 6, [31].

Na tym etapie do prac montażowych na wysokości 190 m konieczne było zastosowanie samopodnoszącego się żurawia obrotowego Liebherr 630 EC-H70 [32].



Rys. 6. Montaż wieży stalowej za pomocą dźwigu, Foto: [A]

Wśród nie kwestionowanych zalet górnych zasobników w fundamentach wież wymienić należy:

- Standaryzację koncepcji elektrowni, co skutkuje obniżeniem kosztów inwestycji,
- Minimalną ingerencję w krajobraz,
- Możliwości aplikacji dla rozwiązań ze słodką lub słoną wodą jak również innych rozwiązań OZE,
- Długi czas życia (50 lat), przy głębokim rozładowaniu,
- Sprawność akumulacji 80% i czas przełączania z generacji energii na jej magazynowanie 30 sekund [33].

Magazynowanie energii – dolny zbiornik elektrowni

Inwestycja w Gaildorf dysponuje zbiornikiem wodnym dolnym w dolinie Kochertal, odległym o 3,2 km (200 m w linii pionowej) od fundamentów wież turbin wiatrowych. Zastosowano magazynowanie energii, bazujące na standardach elektrowni szczytowo – pompowej. W przypadku magazynów wielkoskalowych, elektrownie tego typu wydają się być najlepszym rozwiązaniem. Stanowią 95% wszystkich tego typu rozwiązań obiektów magazynujących (według raportu Electric Power Research Institute). Charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami [7,10].

W omawianej elektrowni szczytowo – pompowej do napędu generatorów prądu zastosowano 3 reakcyjne turbiny Francisa, o łącznej mocy 16 MW (3 x 5,3 MW). Z uwagi na dużą moc jednostek, zostały one zaprojektowane indywidualnie dla wybranej lokalizacji, z uwzględnieniem warunków hydrologicznych. Pozwoliło to uzyskać, przy danym przepływie wody i wysokości podnoszenia, ich najwyższą wydajność (ponad 90%). W elektrowniach tego typu turbiny Francisa sprawdzają się niezawodnie.

Za turbiny wodne w tym projekcie odpowiedzialna jest firma niemiecka Voith Hydro [34,35], producent turbin Francisa od 1870 roku.

W dolnym zbiorniku zachodziła potrzeba instalacji rurociągu dystrybucyjnego trifurcator. Stanowi on rozgałęzienie z przejściem do trzech turbozespołów w elektrowni. Podział rurociągu po stronie wysokiego ciśnienia (przed turbinami wodnymi), zoptymalizowany za pomocą wspomaganą komputerowo symulacji płynu, umożliwia zmniejszenie utraty ciśnienia podczas pracy turbiny i pompy [36,37]. Ten zakres prac należał do austriackiej firmy Bilfinger VAM Anlagentechnik GmbH, rysunek 7 [33].



Rys.7. Rurociąg dystrybucyjny trifurcator z przejściem do trzech turbozespołów, Foto: [D]

Elementem łączącym zbiorniki górne z dolnym jest rurociąg firmy Egelplast. Jego instalację przeprowadzono za pomocą maszyny PIPECrawler do montażu rurociągów termoplastycznych na skalę przemysłową. Umożliwiło to znaczące skrócenie procesu jak również zwiększenie skuteczności w przypadku nierówności w terenie i ograniczenie ingerencji w środowisko. Spawarka osadzona jest na platformach samobieźnych, odcinki rur wyrównywane przed spawaniem, spawane i następnie - opuszczane za spawarką. Konstrukcja zapewnia stabilność sieci przesyłowej. Rozwiązanie uzyskało pierwszą nagrodę w kategorii „Rozwój dla przemysłu” w 2019 roku [38].

Montaż rurociągu pokazano na rysunku 8.



Rys.8. Montaż rurociągu Egelplast za pomocą maszyny PIPECrawler, Foto: [A]

W okresie szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną, otwarcie penstocku umożliwia, przepływ wody z magazynów górnych do dolnego w lokalizacji Kochertal. Jej przepływ napędza turbiny wodne. Prędkość przepływu w omawianym hydrosystemie szacuje się na 9,5 m³/s. Nadwyżka energii implikuje proces pompowania wody z dolnego zbiornika do górnych, w fundamentach wież.

Hydroelektrownia jest w pełni zautomatyzowana. Podczas analizy jej pracy rozpatrzono nawet proces ewapotranspiracji wody [15,16]. Energia powstaje w wyniku współdziałania pracy turbin wiatrowych i wodnych [17].

Z uwagi na to, że dolny zbiornik pełni również rolę zbiornika retencyjnego, zagadnienie zarządzania zasobami wodnymi należy rozpatrywać kompleksowo. Dla zapewnienia rezerwy przestrzennej rzędu 30 000 m³, o taką wielkość pomniejszono jego pojemność na potrzeby OZE. Zapewnia to bezpieczeństwo na wypadek powodzi. Budowę hydroelektrowni sfinalizowano w 2019 roku.

Podstacja zlokalizowana na południe od elektrowni ma służyć do połączenia z istniejącą linią 110 kV.

Integracja komponentów systemu

Magazyny wody górne połączone są z magazynem dolnym za pomocą przepustnicy. Przedstawiony projekt pilotażowy dopuszcza różnice wysokości od 150 do 350 metrów między dolnym zbiornikiem a podstawami zbiorników turbin wiatrowych [17,18].

Szkic systemu obejmujący wszystkie komponenty zamieszczono na Rys. 9.



Rys.9. Szkic systemu wiatrowo-wodnego w Gaildorf. Opracowanie własne na podstawie [18]

Ostatecznie integracja turbin wiatrowych z siecią w Gaildorf nastąpiła wiosną 2018 roku. Farma wiatrowa rozpoczęła pracę, Rys.10. [31].



Rys.10. Rozmieszczenie komponentów Projektu Pilotażowego wind-hydro w Gaildorf, [A]

Nowe realizacje koncepcji Hybrid Tower

W 2020 w Houston niemiecka firma i American Wind Energy Association (AWEA) uzgodniły plan współpracy w zakresie realizacji koncepcji Hybrid Tower na rynku północnoamerykańskim. Stalowe wieże turbin w USA mają wysokość piasty 80 m, a turbiny moc wyjściową 1,63 MW. Wieże hybrydowe są predestynowane do nowych, mocniejszych turbin i większych łopat wirnika. Szacuje się, że zwiększy to moc turbin o dziesięć-dwanaście GW [39].

Max Bögl Wind AG zbudował w Tajlandii pierwszą na świecie mobilną fabrykę dla wież hybrydowych. Planuje się produkcję 90 wież dla farmy wiatrowej Korat [40].

Japonia chce zwiększyć udział OZE do 24 % w ogólnym bilansie energetycznym do 2030 roku. Nawiązała współpracę z autorami rozwiązania w zakresie systemów wież hybrydowych z wysokimi piastami [41].

W wyniku podjęcia współpracy firmy z Vestas, wieże o wysokości 166 i 169 m są certyfikowane dla V162-5.6 i V150-5,6 MW platformy EnVentus dla Austrii i Niemiec [42].

Równolegle firma prowadzi działalność na terenie Niemiec. Inwestycje z ostatnich lat obejmują farmy wiatrowe w Drohndorf i Elfertshausen. Zainstalowano tam wieże hybrydowe nowej generacji. W pierwszym przypadku rozwiązanie dotyczy turbin VENSYS (4 x 3,5 MW), przy czym są plany rozbudowy farmy o osiem kolejnych. Wysokość piasty osiąga 132 m, a średnica wirnika – 136 m. Inwestycja w Elfertshausen obejmuje trzy turbiny wiatrowe GE o wysokości piasty do 161 metrów, zainstalowane na wieżach hybrydowych. Turbiny charakteryzują się mocą jednostkową 5,3 MW przy średnicy wirnika 158 m [43].

Hybrydowe wieże II generacji zaprojektowano tak, aby można realizować turbiny o większych średnicach wirników. Modyfikacje pozwoliły zwiększyć efektywność rozwiązania. Ograniczenie wymiarów umożliwia zastosowanie transportu kolejowego wież w miejsce samochodowego, a tym samym ograniczenie emisji CO₂ [43,44].

Od kwietnia 2021 roku prowadzone są modyfikacyjne prace przy budowie Windparkprojekt Wargolshausen-Wülfershausen, gdzie wstępnie zaplanowane w projekcie turbiny Nordex mają być zastąpione przez Enercon [45].

Kolejna farma wiatrowa Coesfeld Letter Bruch GmbH realizowana jest przez Max Bögl Wind AG przy udziale Siemens Gamesa. Są plany dalszej współpracy [46].

Podsumowanie

Szybki rozwój technologii pozyskiwania energii elektrycznej z OZE i zapewnienie niezależności energetycznej wymagają rozwiązań systemowych. Technologie magazynowania energii powinny być zintegrowane zarówno ze źródłem jak i z konkretną siecią.

W instalacji hybrydowej szczególnie istotne są synergie zachodzące między technologiami. Koszty planowania i wykonania całego zespołu obiektów są niższe niż przy odrębnym rozważaniu poszczególnych komponentów.

Zaprezentowany projekt pilotażowy wiatrowo – wodny ma charakter innowacyjny. Gwarantuje najwyższą sprawność konwersji energii wiatru w elektryczną. Stanowi również element konsolidujący turbiny wiatrowe z elektrownią szczytowo – pompową.

Wprowadzenie rozwiązania ustandaryzowanego, jakim są magazyny w fundamentach wież turbin charakteryzuje mniejsza zależność od lokalizacji i większa niezawodność. Nie wymaga dużego zbiornika, a – zatem – dopasowywania inwestycji do lokalizacji, co prowadzi do ograniczania potencjału magazynującego [12]. Nie wymaga również standardowego magazynu bateryjnego dla uzupełnienia możliwości akumulacji jak w rozwiązaniu [47].

Przedstawione rozwiązanie energetyczne wymagało włączenia do prac zespołów ekspertów z zagranicy. Rozwijane koncepcje rozpatrywać należy w aspekcie transformacji energetycznej jak i globalnej zmiany klimatu.

Koncepcja Hybrid Tower przyczyni się do osiągnięcia przez Niemcy zakładanego celu, tzn. 45% energii z OZE już w 2027.

Technologia Mobile Fabrication Max Bögl Wind AG zdobyła Bauma Innovation Award (2019). Koncepcja produkcji wież hybrydowych zawiera innowacje, wkład w ochronę klimatu i efektywne gospodarowanie zasobami.

Specjalne podziękowania dla Nancy Fürst z Max Bögl Wind AG [A], Agathe Lefevre Dela Houpliere z GE Renewable Energy [B], Meryem Yaman z Liebherr Deutschland GmbH International [C] i Philippe Grontzki z Bilfinger [D] za dodatkowe informacje i udostępnienie fotografii.

Autorzy: dr hab. inż. Grażyna Frydrychowicz-Jastrzębska, dr inż. Dorota Bugała Politechnika Poznańska Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, grazyna.jastrzebska@put.poznan.pl dorota.bugala@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Global Energy Storage for Renewables Integration Market Size And Forecast Sept. 2020, www.marketresearchintellect.com (I.2021)
- [2] Infield D., Freris L., Renewable Energy In Power Systems, A John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 2nd Ed., 2008, UK
- [3] Raczkowski R.M., Robak S., System magazynowania energii elektrycznej jako środek poprawy elastyczności systemu elektroenergetycznego z dużym udziałem generacji OZE, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr. 3, 1-8
- [4] Kopyt M., Power Flow Forecasts: A Status Quo Review. Part 1: RES Generation Prediction, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr. 11, 1-4
- [5] Kopyt M., Power Flow Forecasts: A Status Quo Review. Part 2: Power Flow Forecasts: A Status Quo Review. Part 2: Electricity Demand and Power Flow Prediction, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr. 11, 5-10
- [6] Amar-Bensaber A., Benghanem M., Guerouad A., Amar-Bensaber M., Power flow control and management of a Hybrid Power System, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr. 1, 186-190
- [7] Energy Storage for Renewable Energy Grid Integration (ESRI) Market Analysis, Revenue, Price, Market Share, Growth Rate, Forecast to 2025, *ET Press Release*, www.marketwatch.com share-growth-rate-forecast-to-2025-2021-02-01, (III.2021)
- [8] Li L., Liu P., Li Z., Wang X., A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems, *Computers&Chemical Engineering*, 115 (2018), 213-225
- [9] Foley A.M., Leahy P.G., Li K., McKeogh E.J., Morrison A.P., A long-term analysis of pumped hydro storage to firm wind power, *Applied Energy*, 137 (2015), 638-648
- [10] International Renewable Energy Agency, Innovative Operations of Pumped Hydropower Storage Abu Dhabi 2020
- [11] Locatelli G., Palerma E., Mancini M., Assessing the economics of large Energy Storage Plants with an optimisation methodology, *Energy*, 83 (2015), 15-28
- [12] Frydrychowicz - Jastrzębska G., El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough Compromise, *Energies*, 11 (2018), nr. 10, 1-20
- [13] van Hout P., Assessing the impacts of land use change and climate change on potential hydropower production in the Amazon, *Master Thesis Earth System Science Climate Studies*, Wageningen UR, 2013
- [14] Ravazzani G., Dalla Valle F., Gaudard L., Mendlik T., Gobiet A., Mancini M., Assessing Climate Impacts on Hydropower Production: The Case of the Toce River Basin, *Climate*, 4 (2016), nr. 2, 1-15
- [15] Pfister S., Scherer L., Buxmann K., Waterscarcity footprint of hydropower based on a seasonal approach-Global assessment with sensitivities of model Assumption tested on specific cases, *Sc. of The Total Environment*, 724 (2020), 2-28
- [16] Scherer L., Pfister S., Global water footprint assessment of hydropower, *Renewable Energy*, 99 (2016), 711-720
- [17] Frydrychowicz-Jastrzębska G., The Innovative Gaildorf Wind-Water Project Guarantees Reliability of Power Supply, *IntechOpen Innovation In Energy Systems New Technologies for Changing Paradigms*, London, UK, 2019, 207-224
- [18] Info Gaildorf News 2019, [https://www.max-boegl.de/en/\(V2020\)](https://www.max-boegl.de/en/(V2020))
- [19] Frydrychowicz-Jastrzębska G., Bugała A., Janczak D., Dach J., Zaborowicz M., The efficiency of the modern wind turbine as a function of the wind energy potential resulting from the construction, *3rd International Conference on Energy and Environment: Bringing together Engineering and Economics*, Porto, Portugal, 2017, 335-342
- [20] GE Renewable Energy, GE's 3 MW Platform Powerful and Efficient GE Renewable Energy Trademark of General Electric Company 2017, https://www.ge.com/content/dam/gepowerrenewables/global/en_US/downloads/brochures/wind-onshore-3mw-wind-turbine-platform-gea32208b-r1.pdf (III 2021)
- [21] Gipe P., Fundamentals of Wind Energy wind-works.org (I 2021)
- [22] St. Martin C.M., Lundquist J.K., Clifton A., Poulos G.S., and Schreck S.J., Wind turbine power production and annual energy production depend on atmospheric stability and turbulence, *Wind Energy Sciences*, 1 (2016), 221-236
- [23] Wizelius T., Wind Power Projects: Theory and Practice, *Routledge 1st Ed.*, London, NY 2015
- [24] Borja, M. A., Lagunas, J., Miscalculations on the estimation of annual energy output (AEO) of wind farm Project, *Energy Procedia*, 57 (2014), 698-705
- [25] Savenkov M., On the Truncated Weibull Distribution and its Usefulness in Evaluating the Theoretical Capacity Factor of Potential Wind (or Wave) Energy Sites, *University Journal of Engineering and Technology*, 1 (2009), 21-25
- [26] Sumair M., Aized T., Raza Gardezi S.A.R., Rehman S.M.S., ur Rehman S.U., A newly proposed method for Weibull parameters estimation and assessment of wind potential in Southern Punjab, *Energy Reports*, 6 (2020), 1250-1261
- [27] Islam M.S., Mohandes M., Rehman S., Vertical extrapolation of wind speed using artificial neural network hybrid system, *Neural Computing and Applications*, 28 (2017), n. 8, 2351-2361
- [28] Weather, www.meteoblue.com, (X 2006-IV 2021)
- [29] 3MW Windturbine Platform 2019, <https://www.ge.com/renewable-energy/wind-energy/onshore-wind/turbines/3mw-platform> (XII. 2021)
- [30] World Champion of Height In Wind Assembly Case Study Max Bögl, https://www.alkitronic.com/file_admin/user_upload/referenzen/Projekte/Downloads (VII 2021)
- [31] <https://www.max-boegl.de/en/news/pilot-project-with-high-capacity-for-innovation> (III 2021)
- [32] Höchste Windkraftanlagen der Welt: Max Bögl baut mit Liebherr-Mobilkran modernen Energiespeicher, 2017, *Cranemarket* 24 (XII 2018)
- [33] Bilfinger liefert Verteilrohrleitung für Wasserbatterie-Projekt-Bilfinger SE 04.09.2018, <https://www.bilfinger.com> (12.2020)
- [34] Reidy R., Voith to Deliver PumpTurbines for Wind/Pumped Storage Power Plant. *World Pumps* (2016). <https://www.worldpumps.com/Power-generation/news/voith-to-deliver-pump-turbines-for-windpumped> (12 2020)
- [35] Innovative Combination of Wind and Water-Voith to deliver Pump Turbines for First Combination of Wind and Pumped Storage Power Plant 2016, http://voith.com/corp-en-news-room/pressreleases_72434.html (VIII 2020)
- [36] Kavurmaci, B. C., Kutay, Aradag, S., Tascioglu, Y., Model Testing of Francis-Type Hydraulic Turbines, *Journal - Measurement and Control*, 2017/04/01, 50 (3), (2017), 70-73
- [37] Neidhardt T., Magnoli M., Gummer J., High Part-load Fluctuations In Francis Turbines and the Applicability of Model Test data, 2017, *Conf.Hydro*, Seville, Spain, Oct. 2017, 1-10.
- [38] Method Used to Lay Pipe for Naturstromspeicher Gaildorf Energy Storage Pilot Project Wins Award. Hydro Industry FAQs and Resources, 2019. <https://www.hydroworld.com/articles/2019/02/method-used-to-lay-pipe-for-naturstromspeicher-gaildorf-energy-storage-pilot-project-wins-award.html>, (X 2020)
- [39] New towers and hub heights for North America, *AltEnergyMag*, [https://www.altenergymag.com/s/2019/05/\(I2021\)](https://www.altenergymag.com/s/2019/05/(I2021))
- [40] 90 Hybrid Towers erected in Thailand using Mobile Fabrication Max Bögl builds some of Asia's tallest wind turbines, *Media Release Neumarkt*, January 22, 2019 (I 2021)
- [41] German solutions for renewable energies in Japan, March 12, 2018, <https://www.mbrenewables.com/> (VIII 2020)
- [42] Vestas and Max Bögl Wind AG are joining forces to lead the energy transition in Germany and Austria to success, *Press release Neumarkt*, June 16, 2020, <https://www.mbrenewables.com/en/> (III 2021)
- [43] Hybrid Towers of the second generation used for the first time, November 12, 2019, <https://www.mbrenewables.com> (I 2021)
- [44] Sustainable train transport for concrete tower segments, June 24, 2020, Sustainability at the top of the list: Train transport for concrete to tower segments of wind turbines <https://www.mbrenewables.com/en/transport> (IX 2020)
- [45] Max Bögl-Wust-Kooperation bringt Windparkprojekt Wargols-hausen-Wülfershausen wieder auf Kurs 7.APRIL 2021, <https://www.max-boegl.de/V> (2021)
- [46] Siemens Gamesa and Max Bögl Wind AG sign partnership agreement News Siemens Gamesa and Max Bögl Wind AG sign partnership agreement (I2021).
- [47] Tselepis S., Storage for non-mainland grids and Rother special situations. The future role of energy storage In South-Eastern Europe. *Proc. of the Enlargement and Integration Action Workshop*, Tirana Albania, 21-22 Oct. 2014.