

Piotr Szymczak, Paweł Prajzenc, Adam Łosiewicz
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

ZARYS ROZWOJU ELEKTROWNI WIATROWYCH

OUTLINE OF THE DEVELOPMENT OF WIND POWER PLANT

Streszczenie: W pracy omówiono zarys historyczny rozwoju elektrowni wiatrowych na lądzie i morzu oraz zamieszczono krótkie dane biograficzne wybranych pionierów i twórców w tej dziedzinie. Zaproponowano periodyzację rozwoju generatorów elektrycznych i elektrowni wiatrowych. Poszczególne etapy pokrótce scharakteryzowano. W dalszej części pracy omówiono obecny stan energetyki wiatrowej zarówno na świecie jak i w Polsce oraz przedstawiono prognozowane scenariusze jej rozwoju w Unii Europejskiej i Polsce.

Abstract: The paper discusses the outline of the historical development of wind power on land and sea and provides brief biographical data of selected artists and pioneers in the field. Periodization proposed development of electric generators and wind turbines. Specific steps briefly characterized. In the following paper discusses the current state of wind energy, both worldwide and in Poland and presents the projected scenarios of its development in the European Union and Poland. A summary of the work finalized.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, etapy rozwoju, generator, pionierzy, turbina
Keywords: wind energy, stages of development, generator, pioneers, turbine

1. Wstęp

Współczesny rozwój cywilizacji jest zależny w dużym stopniu od zużywanej energii elektrycznej. Według wytycznych UE każde państwo z uwagi na ochronę naturalnego środowiska jest zobowiązane produkować energię elektryczną ze źródeł odnawialnych. Przy rozwoju energetyki występuje w związku z tym problem doboru proporcji właściwego „energymix” dla każdego kraju. Stowarzyszenie Elektryków Polskich opublikowało w 2016 roku raport pt. „Energia elektryczna dla pokoleń”, w którym przedstawiono te zagadnienia. Według raportów opracowanych przez światowych specjalistów energetyka wiatrowa powinna wносить swój istotny wkład do bilansu energii elektrycznej bez zanieczyszczania środowiska. Elektrownia wiatrowa o małej mocy jest w stanie zaspokoić potrzeby gospodarstwa domowego, a nadwyżkę przekazywać do systemu elektroenergetycznego. Podstawowymi elementami elektrowni wiatrowej są: turbina wiatrowa o poziomej lub pionowej osi obrotu, przekładnia mechaniczna, generator elektryczny prądu stałego lub przemiennego oraz urządzenia sterujące i sprzęgające z siecią. Wykorzystanie energii wiatru do produkcji energii elektrycznej nastąpiło dopiero po ok. 100 latach od badań nad elektrycznością Aleksandra Volty. Sukcesy w energetyce wiatrowej uzależnione były od osiągnięć w dziedzinie konstruowania generatorów i elektrycznych

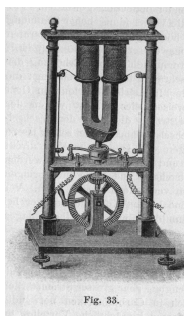
turbin wiatrowych [1-5]. Wdrożenie nowych technologii powoduje wzrost średnicy turbin i mocy elektrowni wiatrowej.

2. Etapy rozwoju

Na początku w energetyce wiatrowej wykorzystywano generatory prądu stałego ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym, następnie zastosowano wzbudzenie elektromagnetyczne (1854), potem odkryto zjawisko samowzbudzenia (1866), a w kolejności wdrożono system prądów trójfazowych (od 1891 roku) [6-9]. Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na energię elektryczną, wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych zarówno generatorów, jak i turbin wiatrowych oraz dostępne technologie i materiały można umownie wyróżnić kolejne etapy rozwoju elektrowni wiatrowych.

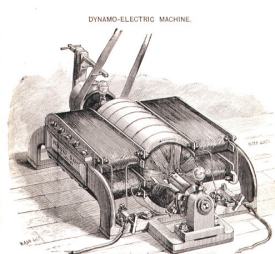
2.1. Etapy rozwoju generatorów

Pierwszy etap (1831-1851) – budowano generatory ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Do nich zaliczyć można unipolarny generator tzw. dysk Faradaya, generator prądu przemiennego, synchroniczny wielobiegunowy, nieznanego autorstwa P.M. oraz generator M.H. Jacobiego, a także rozwiązanie H. Pixiego (rys. 1).



Rys. 1. Hippolyte Pixii i jego generator [www.wikiwand.com/pt/Hippolyte_Pixii]

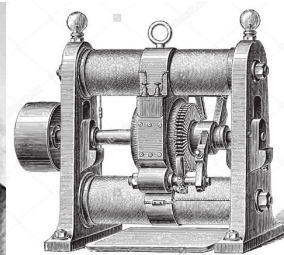
Etap drugi (1851-1867) – wykorzystano zjawisko wzbudzenia elektromagnetycznego. Przykładami generatorów mogą być rozwiązania: Wilhelma Sinstedena, Sereno Hjorta, Henryka Wilde i Wernera Simensa (rys. 2).



Rys. 2. Werner von Siemens i jego dynamo [pl.wikipedia.org/wiki/Werner_von_Siemens, www.siemens.co.uk/en/about_us/index/uk_history.htm]

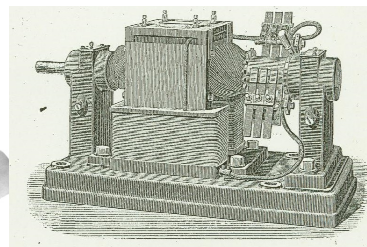
Etap trzeci (1867-1870) – odkryto zasadę samowzbudzenia maszyny, i zbudowano nowe rozwiązania, m.in.: Anosz Jedlik, Charles Whitstone i W. Simens, (nazwał ją zasadą dynamoelektryczną, stąd generatory nazywały się wówczas dynamomaszynami).

Etap czwarty (1870-1888) – charakteryzuje się innowacyjnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi (zastosowano wirnik pierścieniowy i walcowy) z wykorzystaniem zasady samowzbudzenia się maszyny. Twórcą tego rozwiązania był Z. Gramme, który w 1871 r. zbudował dojrzałą konstrukcję generatora (rys. 3). W 1873 r. udoskonalił ją Fryderyk Hefner-Alteneck. Thomas Edison w 1881 r. zbudował pierwszą na świecie elektrownię miejską. Oddzielne dotąd drogi rozwoju generatorów i silników połączyły się. W 1886 r. bracia Hopkinson: Jan i Edward sformułowali prawa Ohma dla obwodu magnetycznego, a Gisbert Kapp w latach 1886-1887 r. opracował i ogłosił teorię, będącą podstawą projektowania maszyn elektrycznych [12].



Rys. 3. Zénobe Gramme i generator prądu stałego [www.thinglink.com/scene/519714298_704_953346]

Etap piąty (1888-1920) – odkryto pole wirujące (G. Ferraris, N. Tesla) i rozpoczęto budowę generatorów prądu przemiennego (do ich twórców należą m.in. N. Tesla, M. Doliwo-Dobrowolski i C. E. L. Brown) oraz nadal doskonalono konstrukcję generatorów prądu stałego. Do polskich konstruktorów tych generatorów należą Waław Kamil Rechniewski (rys. 4), Aleksander Rothert i Michał Doliwo-Dobrowolski. Na wystawie powszechnej w Paryżu w 1889 r. nasz rodak W.K. Rechniewski za swoje konstrukcje maszyn prądu stałego otrzymał złoty medal [10]. E. Arnold w 1891 r. publikuje teorię obliczania uzwojeń wirnika. W końcu wieku XIX zakończył się zatem proces formowania dojrzałych konstrukcji generatorów, których sprawność dochodziła do 95%.



Rys. 4. Zapomniany twórca słynnego dynamo Rechniewskiego [10]

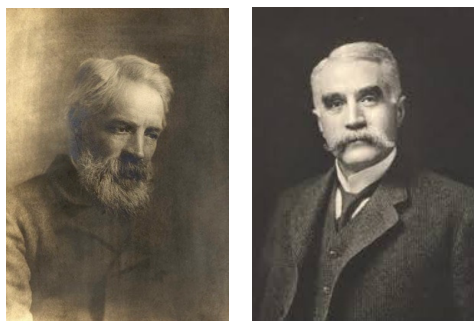
Etap szósty (1920-2016) – charakteryzuje się zastosowaniem nowych materiałów elektrotechnicznych i rozwojem teorii maszyn elektrycznych z uwzględnieniem ujęć analitycznych, które pozwoliły na wybór optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych, na początku bez stosowania technik informacyjnych, a po roku 1950 z wykorzystaniem techniki komputerowej i metod numerycznych [11].

2.2. Etapy rozwoju elektrowni wiatrowych

Należy podkreślić, że rozwój elektrowni wiatrowych uzależniony był od konstrukcji turbin wiatrowych, zapewniających uzyskanie możli-

wie wysokiej sprawności przetwarzania energii wiatru. Zależała ona od głębokiego zrozumienia zjawisk fizycznych i aerodynamicznych oraz opracowania adekwatnej teorii turbin wiatrowych [1-13]. Z tych względów można wyróżnić pięć etapów rozwoju elektrowni wiatrowych.

Etap wynalazczy (1887-1919) – pierwszą samoczynnie działającą elektrownię wiatrową [14] zbudował w lipcu 1887 r. szkocki elektryk – profesor James Blyth (rys. 5).



Rys. 5. Pionierzy elektrowni wiatrowej J. Blyth (z lewej) i Ch. F. Brush [http://scienceonstreets.phys.strath.ac.uk/new/James_Blyth.html, 1]

W tym samym roku (w zimie) w Stanach Zjednoczonych wybitny inżynier elektryk – Charles Brush [5, 13] skonstruował elektrownię wiatrową o mocy 12 kW (rys. 5), która posiadała 144 łopaty oraz 17-metrowy wirnik. Obie te konstrukcje były wykorzystywane do ładowania akumulatorów i oświetlania posiadłości.

Europejskim prekursorem badań teoretycznych i eksperymentalnych w zakresie elektrowni wiatrowych był duński inżynier Paul la Cour [1-5, 13], który zaproponował wydajniejsze turbiny wyposażone w zespoły kilku łopat, prowadził jako pierwszy na świecie badania w tunelu aerodynamicznym i wybudował w 1891 roku w duńskiej miejscowości Askov instalację testową [15], a następnie w 1897 roku elektrownię wiatrową. Zasługą P. la Cour'a było udoskonalenie technologii i konstrukcji wiatraków na podstawie przeprowadzonych przez Niego badań teoretycznych i eksperymentalnych.

Wykorzystał energię prądu stałego z generatora do elektrolizy i składowania wyprodukowanego wodoru. Metoda ta od 1895 r. była używana do produkcji wodoru spalanego w lampach gazowych służących do oświetlania szkoły w Askov. W 1897 roku zbudował drugą, większą elektrownię wiatrową. Należy podkreślić, że w 1903 r. P. la Cour założył Stowarzyszenie

Duńskich Inżynierów Energetyki Wiatrowej (z ang.)



Rys. 6. Duński prekursor badań P. la Cour (z lewej) i Jego uczeń J. Juul - twórca współczesnej elektrowni wiatrowej [1, https://en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Juul]

Danish Wind Electricity Society - DVES), które pośród wielu działań oferowało kurs na elektryka wiatrowego „Wind Electricians” [15].



Rys. 7. Fot. członków duńskiego DVES [21]

Etap fundamentalnych badań teoretycznych (1920-1931)

W latach 30-tych XX wieku w Niemczech zaczęto rozwijać teorię turbin wiatrowych w Instytucie Badań Aerodynamicznych [1] pod kierownictwem profesora Alberta Betza (rys. 5). W 1920 r. opublikował on artykuł pt. „Teoretyczna granica maksymalnego wykorzystania wiatru przez turbinę wiatrową”, w którym udowodnił, że maksymalne wykorzystanie energii wiatru jest możliwe tylko na poziomie 59.3 %.

Pierwszą turbinę wiatrową o pionowej osi obrotu [16] zaprojektował fiński inżynier Sigurd Johannes Savonius w 1922 r. Kolejną turbiną pionową o innej konfiguracji była turbina opa-

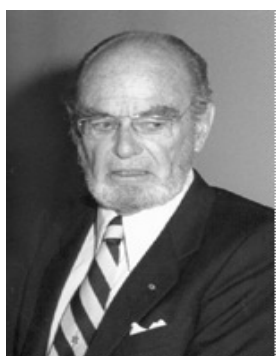
tentowana w 1931 r. przez Francuza Georgesa Darrieusa [17]. Po dzień dzisiejszy wykorzystywane są różne modyfikacje tych dwóch fundamentalnych rozwiązań o pionowej osi obrotu, głównie w elektrowniach małej mocy (szacuje się, że obecnie na świecie istnieje 300 patentów).



Rys. 8. Pionierzy turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu S. J. Savonius i G. Darrieus (z prawej) [16, 17]

Etap wdrożeń przemysłowych (1932-1972)

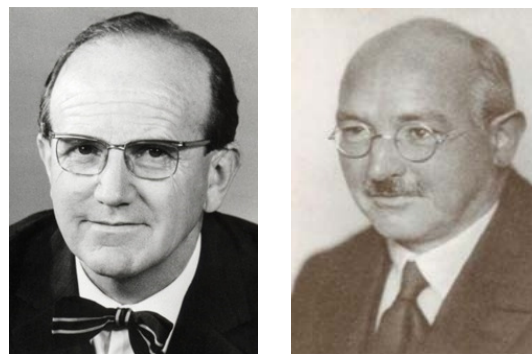
Szybko rozwijała się szkoła amerykańska, która odnotowała wiele osiągnięć. Wprowadzono energetykę wiatrową do programu badań i rozwoju w USA. Po 1932 roku zainicjowano program elektryfikacji obszarów wiejskich. Pierwsza elektrownia wiatrowa o mocy powyżej 1 MW, zaprojektowana została przez Palmera Cosslett Putmana (rys. 8), a wybudowana przez firmę S. Morgana Smitha. Wyposażona była ona w wirnik dwupłatowy i generator synchroniczny.



Rys. 9. Konstruktor turbiny 1 MW-P. C. Putman [1]

Została włączona do sieci elektroenergetycznej w 1941 r. i pracowała tylko przez 1100 godzin. Bardzo zasłużoną postacią dla niemieckiej i europejskiej energetyki wiatrowej jest profesor Ulrich Hütter – fizyk i pionier teorii turbin wiatrowych. Założył on w 1942 r. Stowarzy-

szenie Badań Energii Wiatru i zbudował 90 jednostek małych turbin wiatrowych z wirnikiem o średnicy 10 m, które równocześnie służyły jako poligon do badań eksperymentalnych. Prace te pozwoliły zaprojektować i zbudować w 1958 r. turbinę typu W-34 o mocy znamionowej 100 kW i średnicy 34 m, która stała się wzorem dla innych projektantów i konstruktorów.



Rys. 10. Twórca niemieckiej szkoły A. Betz (z prawej) oraz profesor Ulrich Hütter [1]

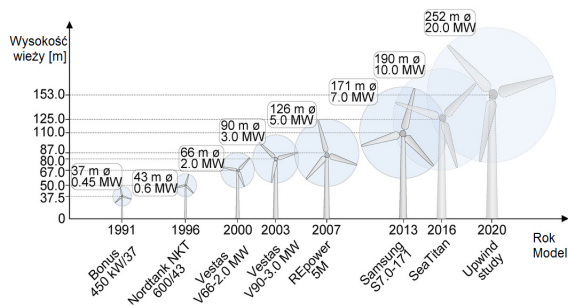
Uczeń La Coura - Johannes Juul (rys. 6), kontynuował prace swojego nauczyciela i rozwijał energetykę wiatrową w swoim kraju. W 1950 r. zastosował generator asynchroniczny prądu przemiennego, a w 1957 r. zbudował współczesny model elektrowni wiatrowej o mocy 200 kW z wirnikiem trójpłatowym oraz regulacją kąta natarcia łopat.

Renesans energetyki wiatrowej (1973-1990)

Od 1973 roku nastąpiło ponowne wielkie zainteresowanie wykorzystaniem energii wiatru w wyniku dużych podwyżek cen ropy i innych paliw na rynkach światowych z powodu kryzysu energetycznego. W USA tematykę energetyki wiatrowej wprowadzono do krajowego programu badań i rozwoju oraz wykorzystano technologie wojskowe i najnowsze osiągnięcia techniki. W jej rozwój włączyła się również Agencja NASA. Dzięki tym rozwiązaniom Stany Zjednoczone w niedługim czasie stały się wiodącym centrum światowym energetyki wiatrowej – posiadały najwięcej zainstalowanej mocy z turbin wiatrowych. Na świecie rozpoczął się nowy etap budowy elektrowni wiatrowych z optymalnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi w doborze materiałów i zastosowanych technologii, zarówno w turbinach, jak i generatorach [1].

Etap dynamicznego rozwoju (1991-2016)

Następuje szybki rozwój techniki i technologii. Budowane są elektrownie wiatrowe na lądzie i morzu o mocy do 8 MW i średnicy 164 m, a w planach są średnice 190 m i moc do 10MW[1-3, 18-20].



Rys. 11. Rozwój morskich turbin wiatrowych w okresie 1991-2016.[21]

Powstaje nowa gałąź przemysłu – morska energetyka wiatrowa (offshore). Pierwsza morska farma wiatrowa (MFW) o mocy 4.95 MW powstała w 1991 roku na wodach terytorialnych Danii koło Vindeby. Składała się ona z 11 elektrowni wiatrowych posadowionych na 4 metrach głębokości w odległości 2 km od wybrzeża. MFW Horns Rev w Danii w 2002 roku osiągnęła sumaryczną moc 160 MW. W następnych latach, wybierając optymalne lokalizacje, aż do 2005 roku zainstalowano w całej Europie 700 MW. MFW Alpha Ventus eksploatowana od 2009 roku, na Morzu Północnym jest oddalona od brzegu o 45 km („far-offshore”), na głębokości do 33 m. Zastosowano w niej turbiny typu „Multibrid M5000 Repower 5M”, o mocy 5 MW i średnicy łopaty (116-126m). Obecnie największą morską farmą wiatrową o mocy 630 MW jest London Array, eksploatowana od 2013 r. Składa się ona z 175 turbin typu Siemens, o mocy 3.6 MW i średnicy łopaty 120m, posadowionych na wodach o głębokości do 25m, w odległości 22 km od brzegu.

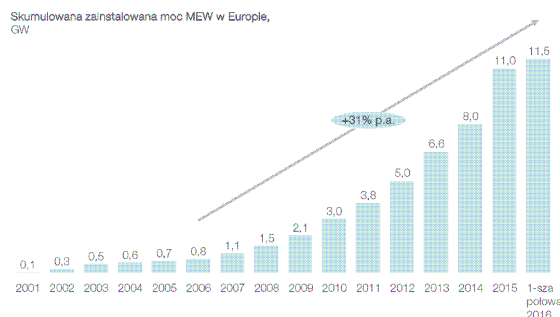
3. Energetyka wiatrowa na świecie

Wiodącą pozycję w dziedzinie lądowej energetyki wiatrowej obecnie zajmują na naszym kontynencie Dania i Niemcy. Liderem, jeżeli chodzi o energetykę wiatrową, jest Dania, która będąc krajem równinnym, pozbawionym surowców energetycznych i zasobów energii wodnej, zmuszona była intensyfikować prace badawcze od ponad 100 lat dotyczące wykorzystania odnawialnych źródeł energii. O imponujących rezultatach w tym zakresie najlepiej

świadczą dane rosnącego trendu mocy zainstalowanej z energetyki wiatrowej w okresie od ponad 30 lat: 1983 – 40 MW i w 2006 – 3136 MW. W 2015 r., po 125 latach, osiągnięto w Danii rekordowy wynik – 42% energii uzyskano z energii wiatru, co jest najlepszym wynikiem na świecie [5]. Dania w 2020 r. planuje osiągnąć wynik na poziomie 50%.

Obecnie najwięcej mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych posiadają Chiny, Unia Europejska i Stany Zjednoczone. Analizując wskaźnik porównawczy „W/osobę” – na pierwszym miejscu jest Dania – 892.9 W/os, dalej Szwecja 575.3,1 W/os, a trzecie są Niemcy – 486,1 W/os. W USA wskaźnik ten wynosi 219,5 W/os, a w Chinach kształtuje się na poziomie 107,4 W/os.

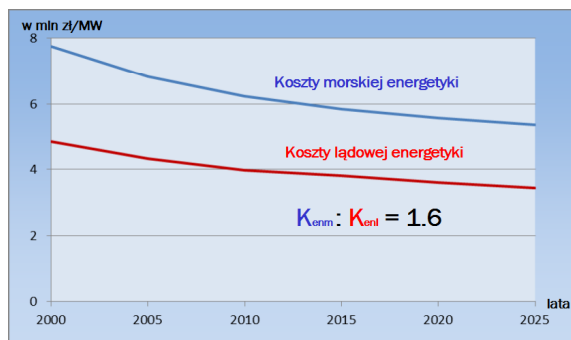
Zdaniem znanego eksperta ds. bezpieczeństwa energetycznego profesora Jeremiego Rifkina w Unii Europejskiej i na świecie rozpoczęła się trzecia rewolucja energetyczna polegająca, m.in. na zmniejszeniu emisji dwutlenku węgla. Profesor Michio Kaku w swojej pracy podkreśla istotną rolę jaką ma do spełnienia energetyka wiatrowa na świecie. Pochodzący z Niemiec Erich Hau oraz z Kanady Bin Wu w swoich pracach podkreślili rolę morskiej energetyki wiatrowej, która zaczęła się rozwijać obecnie bardzo dynamicznie.



Rys. 12. Skumulowana zainstalowana moc MEW w Europie w GW[19]

W przeciągu ostatnich 15 lat wzrost zainstalowanych mocy rośnie blisko o 30% każdego roku (rys. 12). W 2003 roku zainstalowanych było 0.5 MW, w 2012 roku już 5 GW, natomiast w 2016 już ponad 12 GW mocy morskich farm wiatrowych. Prognozuje się, że do końca 2020 roku moc MFW może osiągnąć wartość 50 GW. Rozwój MFW wiąże się z budową turbin i generatorów o zwiększonych mocach. W 2002 r. posiadały one średnią moc 2 MW, obecnie wielkość ta zawiera się w granicach 4-8 MW, a w 2020 roku przewi-

duże się stawianie elektrowni wiatrowych o mocy znamionowej powyżej 8 MW. Prekursorem w tej dziedzinie jest Europa, na czele z Wielką Brytanią, Niemcami i Danią. Należy odnotować fakt, iż coraz więcej krajów zaczyna interesować się tym sektorem energetyki, szukając rozwiązań dla swoich potrzeb energetycznych kraju. Francja, Holandia i Hiszpania dopiero planują duże inwestycje w tym zakresie. Szczególnie widać to w krajach, które już eksploatują morskie elektrownie wiatrowe, gdzie przewiduje się w sumie ponad siedmiokrotny wzrost zainstalowanej mocy między 2012 rokiem, a 2020 rokiem. Największy, bo ponad 96-krotny wzrost planowany jest w Irlandii, w Niemczech ponad 35-krotny, a w Holandii prawie 21-krotny. Koszty elektrowni wiatrowych na morzu są większe od takich instalacji na lądzie. Porównanie szacunkowe kosztów na lądzie i morzu przedstawiono na rysunku 13.

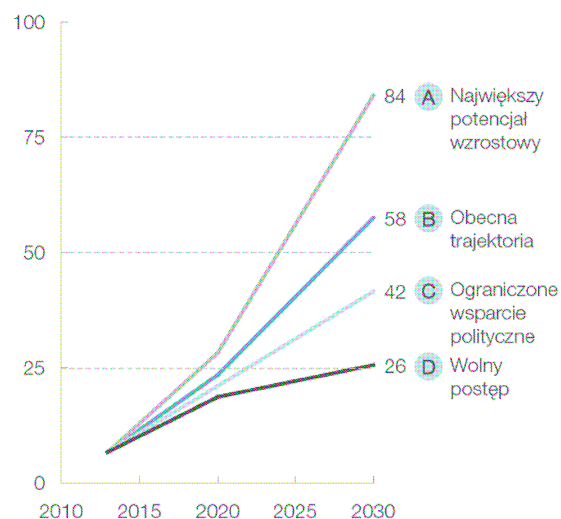


Rys. 13. Porównanie kosztów elektrowni wiatrowej: morskiej i lądowej, w mln. zł/MW w okresie 2000-2025.

Europejskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej (EWEA) przewiduje kilka strategii rozwoju dla morskiej energetyki wiatrowej w zależności od uwarunkowań, które będą głównie zależne od dwóch czynników: konkurencyjności kosztu wytwarzania energii przez ten sektor oraz polityki wsparcia dla rozwoju energetyki odnawialnej w Europie. W raportach opublikowanych przez koncern Ernst&Young oraz McKinsey&Company przewiduje się następujące strategie rozwoju: w 2020 r. 20-30 GW (szybki rozwój 28 GW, zrównoważony 23 GW, powolny 20 GW). W 2030 r. 26-84 GW (szybki rozwój 84 GW, zrównoważony 58 GW, powolny 26 GW) (rys. 14).

4. Energetyka wiatrowa w Polsce

Rozwój polskiej energetyki wiatrowej rozpoczął się dopiero w latach 90-tych XX wieku poprzez wybudowanie w 1991 r. pierwszej elektrowni wiatrowej w Lisewie. Drugą była inwestycja w Swarzewie wybudowana przez Folkcenter, a trzecią we Wrockach w 1995 r. Pierwsza natomiast w Polsce farma wiatrowa powstała w 1999 r. w miejscowości Cisowo koło Darłowa. Obecnie w kraju pracuje ponad 980 instalacji wiatrowych włączonych w Krajowy System Energetyczny, a łączna ich moc zainstalowana wynosi ponad 4,5 GW. Już obecnie zapewnia ona ok. 11% zaopatrzenia w energię, a w przyszłości przewiduje się wzrost do ok. 20%.



Rys. 14. Scenariusze rozwoju morskiej energetyki wiatrowej w UE w GW [19]

Godnym podkreślenia jest fakt, iż województwo zachodniopomorskie jest przodującym w kraju pod względem zainstalowanej mocy elektrowni wiatrowych – wynosi ona ponad 1000 MW. W Polsce podpisane zostały umowy na przyłączenie do sieci elektroenergetycznej farm o mocy 2.2 GW przez dwóch inwestorów PGE EO (1050MW) i Polenergia (1200 MW). Krajowy Plan Działań opracowany przez Ministerstwo Gospodarki zakłada uruchomienie pierwszych MFV o mocy 500 MW już w 2021 roku. Rozwój morskiej energetyki wiatrowej w Polsce do 2050 roku prognozowany jest w przedziale 7.5-14 GW i zależy od polityki rządu, a zwłaszcza od zagwarantowanego wsparcia dla tego kierunku rozwoju energetyki.

5. Podsumowanie

Rozwój elektrowni wiatrowych na świecie trwa przez 130 lat i był ściśle związany z postępem w konstruowaniu generatorów oraz silników wiatrowych. Należy stwierdzić, iż generatory elektryczne osiągnęły doskonałość swojej konstrukcji już w końcu XIX wieku, natomiast postęp w dziedzinie konstruowania silników wiatrowych nastąpił 30 lat później po opracowaniu teorii turbiny wiatrowej. Odrodzenie energetyki wiatrowej rozpoczęło się w latach ostrego kryzysu paliwowego w latach 70-tych XX wieku, a jej renesans nastąpił po uświadomieniu sobie przez ludzkość głębokich zmian klimatu w Kioto w 1997 r., i wydzielania do atmosfery bardzo szkodliwych gazów, a zwłaszcza CO₂ i NO_x.

Obecnie energetyka wiatrowa zapewnia znaczący procent energii elektrycznej zapotrzebowania danego kraju w granicach 10-50%. Inwestycje w elektrownie wiatrowe stały się światowym trendem i należy przewidywać w przyszłości obniżenie jednostkowych kosztów wytwarzania energii.

Analizując obecnie rozwój morskiej energetyki wiatrowej na świecie można stwierdzić, iż jest ona jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi gospodarki. W krajach, które już eksploatują morskie elektrownie wiatrowe przewiduje się ponad 7-krotny wzrost dotychczas zainstalowanej jej mocy. Przyrost w Irlandii będzie 96-krotny, natomiast w Polsce planuje się dopiero zainstalować 500 MW do roku 2020.

6. Literatura

- [1]. Hau E.: *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Wyd.: Springer-Verlag, Berlin, 2013.
- [2]. Heier S.: *Grid integration of wind energy*, Wyd. Wiley& Sons, 2014.
- [3]. Wu B. at all.: *Power Conversion and Control of wind energy systems*; Wyd.: John Wiley & Sons Inc., 2011.
- [4]. Lubośny Z.: *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2013.
- [5]. Szymczak P., Prajzendanc P.: *Kompleksowa analiza elektrowni wiatrowych*. Mat. Konf. IX i-MITEL 2016, s. 107-108.
- [6]. Królikowski L.: *Rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*, Wyd. Zakład Narodowy im. Ossolińskich PAN, Wrocław, 1986
- [7]. Wróblewski A.K.: *Historia fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2006
- [8]. Historia elektrotechniki pod red. I.A. Glebova, wyd. MEI, Moskwa, 1999
- [9]. Dąbrowski M.: *Początki rozwoju transformatorów*, Wyd. 2 zm. i roz., Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań, 2008
- [10]. Szymczak P.: Biogram Rechiniewskiego W.K. „Polski wkład w przyrodznawstwo i technikę”, t. III, s.401-403, Wyd. Instytut Historii Nauki PAN, Oficyna Wydawnicza ASPRA-IR, Warszawa, 2015.
- [11]. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych – zarys rozwoju*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 176, s.11-30, Wyd. PŚ, Gliwice, 2001.
- [12]. Glinka T.: *Historia Rozwoju Maszyn Elektrycznych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 4/2016 (112), s105-116.
- [13]. Boczar T.: *Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania.*, Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2008.
- [14]. [https://en.wikipedia.org/wiki/James_Blyth_\(engineer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Blyth_(engineer)).
- [15]. <http://www.alchetron.com/Poul-la-Cour-1180081-W>.
- [16]. https://en.wikipedia.org/wiki/Sigurd_Johannes_Savonius.
- [17]. https://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Jean_Marie_Darrieus.
- [18]. Raport Ernst&Young „*Morska energetyka wiatrowa analiza- korzyści dla polskiej gospodarki oraz uwarunkowań rozwoju*”, 2013.
- [19]. Raport McKinsey&Company „*Rozwój morskiej energetyki wiatrowej w Polsce*”, 2016.
- [20]. Raport Stowarzyszenie Elektryków Polskich „*Energia Elektryczna dla pokoleń*”, 2016.
- [21]. Rodrigues S., at all.: *A Multi-Objective Optimization Framework for Offshore Wind Farm Layouts and Electric Infrastructures*, 2016.

Autorzy

Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, ZUT w Szczecinie
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin
piotr.szymczak@zut.edu.pl
pawel.prajzendanc@zut.edu.pl
losiewiczadam@gmail.com