

Aspekty techniczne budowy i przyłączenia elektrowni wiatrowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe aspekty techniczne związane z budową oraz bezpieczeństwem użytkowania elektrowni wiatrowych. Przedstawiono problemy ochrony odgromowej i stosowane w elektrowniach wiatrowych rozwiązania zabezpieczeń. Przedstawiono także aspekty związane z infrastrukturą uzimienia elektrowni wiatrowych. W artykule omówiono również problem przyłączenia farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego, a także nowoczesne rozwiązania związane z budową oraz wyprowadzeniem mocy z farm wiatrowych.

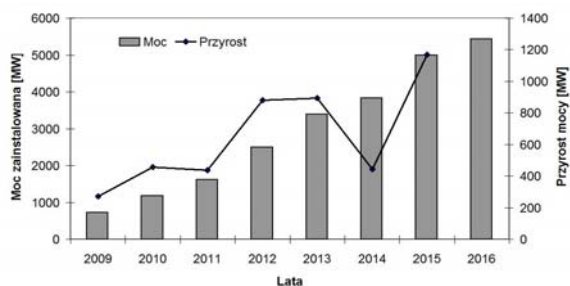
Abstract. In the paper there are presented technical aspects connected with construction and security of using of wind power station. There are presented issues of lightning protection and used in wind power plants protection solutions. There are also presented aspects connected with infrastructure of grounding of wind power plants. In the paper there are also discussed problems of connecting wind farms with power system, and also modern solutions of their constructing (**Technical Aspects of the Construction and Connection of Wind Power Plants**).

Słowa kluczowe: elektrownia wiatrowa, ochrona odgromowa, uzimienie, system elektroenergetyczny.

Keywords: wind power plant, lightning protection, grounding, electric power system.

Wstęp

W ostatnich latach energetyka wiatrowa jest jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin energetyki. Liczba przyłączanych co rok elektrowni wiatrowych do systemu elektroenergetycznego rośnie w znacznym tempie. Rozwój ten obserwowany jest na całym świecie. Również w Polsce liczba przyłączonych w ostatnich latach elektrowni wiatrowych, a co za tym idzie sumaryczna moc osiągalna przez elektrownie wiatrowe zdecydowanie wzrosła. W 2015 roku pobity został krajowy rekord przyrostu mocy elektrowni wiatrowych, a na koniec marca 2016 roku moc zainstalowana w elektrowniach wiatrowych wyniosła ponad 5400 MW (rys. 1) [1]. Wraz ze wzrostem liczby uruchomionych elektrowni wiatrowych rośnie również liczba awarii związanych z ich pracą, a także pojawia się coraz większy problem dostępności możliwych miejsc do przyłączenia farm.



Rys. 1. Moc zainstalowana oraz przyrost wzrostu mocy zainstalowanej w latach 2009-15 (opracowanie własne na podstawie [1])

Ochrona odgromowa elektrowni wiatrowych

Do jednych z najczęściej pojawiających się czynników zakłócających poprawne działanie elektrowni wiatrowych należą wyładowania atmosferyczne. Dzieje się tak z uwagi na znaczną wysokość budowanych obecnie turbin wiatrowych oraz, bardzo często, na uwarunkowania terenowe, które sprzyjają produkcji energii z wiatru, którymi są otwarte przestrzenie. Powoduje to, że elektrownie wiatrowe są szczególnie narażone na częste wyładowania atmosferyczne, które mogą być przyczyną poważnych uszkodzeń. Obecnie budowane turbiny wiatrowe o mocy rzędu kilku megawatów instalowane mogą być na wieżach sięgających ponad 100 m wysokości. Jeśli dodatkowo

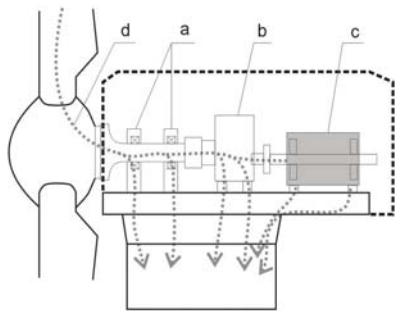
uwzględnimy długość łopat wirnika, całkowita wysokość obiektu dochodzi do prawie 200 metrów. Prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w obiekt wzrasta w drugiej potęgze wraz ze wzrostem jego wysokości. Dlatego też elektrownie wiatrowe są szczególnie narażone na niebezpieczeństwo wyładowań atmosferycznych, a co za tym idzie również na uszkodzenia wywołane bezpośrednim uderzeniem pioruna. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki obserwacji liczby wyładowań atmosferycznych w turbiny wiatrowe na przykładzie Niemiec, Danii oraz Szwecji. Badania te prowadzone były w okresie lat 1990-98 [2, 3, 4].

Tabela 1. Wyładowania atmosferyczne w turbiny wiatrowe [3]

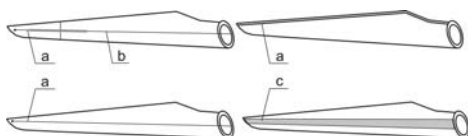
Państwo	Okres	Turbiny w bazie danych	Liczba wyładowań atmosferycznych
Niemcy	1991-98	1498	738
Dania	1990-98	2839	851
Szwecja	1992-98	428	86

Obecnie stosowane łopaty turbin wiatrowych budowane są z włókien szklanych wzmacnianych żywicami epoksydowymi lub poliestrem. Aby wzmocnić strukturę powierzchni płatów stosuje się również kevlar. Sprawia to, że płaty elektrowni wiatrowych są zdecydowanie lżejsze od stalowych i aluminiowych, a co za tym idzie są bardziej wytrzymałe. W czasie silnych wyładowań atmosferycznych najbardziej narażonymi na uderzenie pioruna są łopaty wirnika, gondola oraz wszystkie urządzenia na niej zainstalowane, np. czujnik pomiaru wiatru czy instalacja oświetleniowa. Przepływ wyładowania atmosferycznego może nastąpić przez wszystkie urządzenia zamontowane w gondoli (rys. 2).

W celu ochrony przed wyładowaniem konieczne jest zatem stosowanie w konstrukcji elektrowni wiatrowej materiałów przewodzących, które zapewnią skuteczne odprowadzenie prądu wyładowania atmosferycznego z miejsca trafienia do ziemi. Często takie elementy jak gondola czy wieża nie wymagają dodatkowych systemów odgromowych, jednak jeśli zbudowane są z materiałów nieprzewodzących konieczne jest zainstalowanie instalacji odgromowych. Najbardziej narażone na bezpośrednie uderzenie pioruna są łopaty wirnika. Ponieważ obecnie budowane są one z materiałów nieprzewodzących stąd konieczne jest zapewnienie przewodzenia łopat. W tym celu stosuje się kilka rozwiązań technicznych (rys. 3), które sprowadzają wyładowanie atmosferyczne z łopaty do piasty wirnika [5].



Rys. 2. Przykładowa droga przepływu wyładowania atmosferycznego przez urządzenia elektrowni wiatrowej; a - łożyska główne, b - przekładnia, c - generator, d - droga przepływu wyładowania (opracowanie własne na podstawie [4])

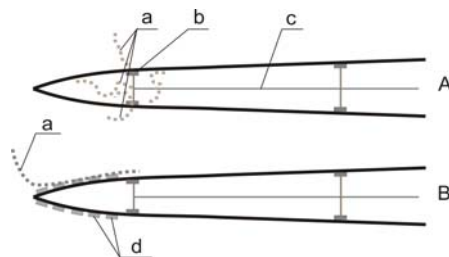


Rys. 3. Stosowane rozwiązania dla przewodzenia prądu przez łopaty; a - przewód odprowadzający, b - przewód miedziany lub stalowy, c - siatka metalowa (opracowanie własne na podstawie [3, 4, 5])

Standardowy system ochrony odgromowej turbiny wiatrowej opiera się na dwóch czynnikach: wytrzymałości elektrycznej struktury płata i połączonych szeregowo receptorów wyładowania piorunowego montowanych na zewnątrz płata. Jednak wytrzymałość elektryczna łopatek turbiny w sposób naturalny zmniejsza się z wiekiem. Uszkodzenia spowodowane przez wyładowania w pobliżu mogą zmniejszyć wytrzymałość elektryczną prawie do zera. W rezultacie, system ochrony przed wyładowaniami zmniejsza swoją skuteczność, podczas gdy prawdopodobieństwo uszkodzenia wzrasta prawie wykładniczo. Aby przedłużyć żywotność łopatek turbin wiatrowych po wyładowaniu (uszkodzeniu), receptory muszą być naprawione, a wytrzymałość elektryczna łopatek przywrócona. Należy odłączyć końcówkę ostrza łopaty oraz zainstalować nową strukturę kompozytową, co jest drogie i czasochłonne. Zastosowanie segmentowych odgromników to rozwiązanie prostsze oraz bardziej efektywne kosztowo. Segment składa się z szeregu małych receptorów metalowych (o grubości ok. 0,3 mm). Segmentowe odgromniki zwiększają skuteczność istniejących receptorów i chronią już zdegradowane ostrza łopaty. W obecności najbliższego wyładowania lub bezpośredniego uderzenia pioruna, metalowe styki kierują energię wyładowania do istniejącego systemu receptora - z dala od struktury płata wirnika (rys. 4.) [6].

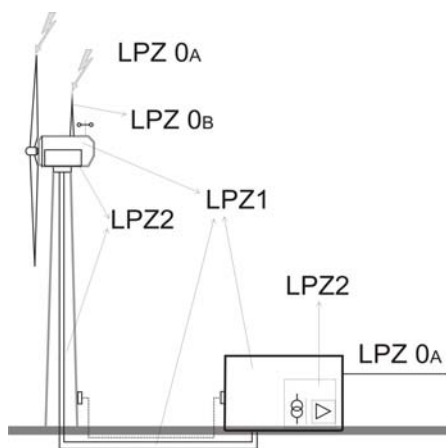
Strefowa koncepcja ochrony odgromowej i przepięciowej (LPZ - ang. *Lightning Protection Zone*) to optymalne rozwiązanie dotyczące tworzenia ochrony przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym. Ogólne wytyczne zawarte są w normie PN-EN 62305. Na urządzenia elektryczne i elektroniczne zainstalowane w każdym obiekcie, w tym również elektrowni wiatrowej, który znajduje się w strefie działania udaru piorunowego, oddziaływać mogą udary zakłócające o różnym kształcie i amplitudzie. Podobne zagrożenie mogą wprowadzać udary dochodzące do urządzenia liniami zasilania lub przesyłu sygnałów. Mogą być także spowodowane poprzez innego

rodzaju zakłócenia, np. stany nieustalone w sieciach energetycznych. Dlatego też przestrzeń chroniona elektrowni wiatrowej powinna być podzielona na strefy ochrony odgromowej (LPZ) w celu wyznaczenia przestrzeni o różnej intensywności działania impulsu elektromagnetycznego i ustalenia punktów połączeń na granicy stref. Strefy charakteryzują się zasadniczą zmianą warunków elektromagnetycznych na ich granicach. Przechodząc z jednej strefy do drugiej przepięcia oraz impulsowe pole elektromagnetyczne są ograniczane do wartości dopuszczalnych w danej strefie. W normie zostały określone dopuszczalne wartości parametrów charakteryzujących impulsowe pole elektromagnetyczne oraz wartość przepięcia i przetężenia jakie mogą dochodzić do urządzeń pracujących wewnątrz danej strefy. Przestrzeń chronioną dzieli się na kilka stref. Strefa 0A (LPZ 0A) to strefa, w której urządzenia elektryczne i elektroniczne są narażone na bezpośrednie uderzenie pioruna. Strefa 0B (LPZ 0B) to strefa, w której urządzenia elektryczne i elektroniczne nie są już narażone na bezpośrednie wyładowanie atmosferyczne. Występuje w niej jednak nietłumione pole elektromagnetyczne oraz udary napięciowe i prądowe indukowane przez prądy piorunowe. Strefa 1 (LPZ 1) to obszar w którym urządzenia nie są narażone na bezpośrednie wyładowanie piorunowe i prądy we wszystkich znajdujących się w niej częściach przewodzących są zredukowane w stosunku do prądu w strefie 0B. Jeżeli jest wymagane dodatkowe zmniejszenie prądów przewodzonych oraz pola elektromagnetycznego to powinny być wprowadzone następne strefy (LPZ 2, itd.). Wymagania tych stref powinny być dopasowane do wymagań zainstalowanych w nich urządzeń.



Rys. 4. Standardowy system ochrony odgromowej (A) oraz ochrona odgromowa z segmentowym odgromnikiem (B); a - wyładowanie atmosferyczne, b - receptor wyładowania, c - przewód odprowadzający, d - odgromnik segmentowy (opracowanie własne na podstawie [6])

Wszystkie części przewodzące oraz linie elektroenergetyczne i telekomunikacyjne wchodzące do kolejnych stref LPZ powinny być na ich granicy połączone. Połączenie powinno być wykonane za pomocą lokalnej szyny wyrównawczej, do której należy także przyłączyć elementy ekranujące lub inne lokalne przedmioty metalowe (np. obudowy wyposażenia). W związku z tym ochrona przeciwprzepięciowa elektrowni wiatrowej na wypadek wyładowania bezpośredniego lub w jej pobliżu jest standardem. W celu wyznaczenia miejsc, w których konieczne jest zamontowanie ograniczników przepięć, elektrownia wiatrowa musi być podzielona na strefy. Klasyfikacja ta jest opisana w normie PN-EN 62305. Podział turbiny wiatrowej na strefy zgodnie z tą klasyfikacją przedstawiono na rysunku 5. W elektrowni wiatrowej ochrony wymagają następujące obszary: zasilanie piasty i linie sygnałowe łączące gondolę i piastę, oświetlenie ostrzegawcze dla samolotów, stacja pogodowa, układ sterowania i zasilanie gondoli, stojan i wirnik, zasilanie szafy sterowniczej w podstawie wieży, główne zasilanie, inwerter i linie sygnałowe szafy sterowniczej.



Rys. 5. Rozmieszczenie stref ochronnych dla elektrowni wiatrowej (opracowanie własne na podstawie [7, 8, 9, 10])

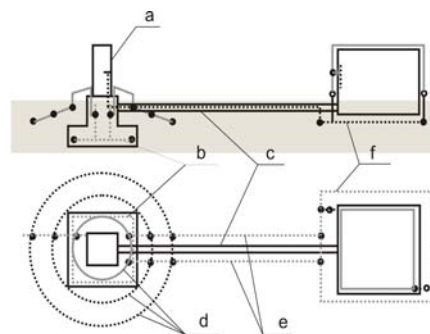
Uziemienia elektrowni wiatrowych

Do instalacji uziemienia elektrowni wiatrowej wykorzystuje się zbrojenie konstrukcyjne fundamentów wieży. Jest to istotne również ze względu na mniejsze zagrożenie instalacji uziemiowej korozją. Uziemioną stopę wieży oraz uziemienia wszystkich znajdujących się w pobliżu obiektów i budynków należących do elektrowni wiatrowej łączy się ze sobą, dzięki temu uzyskuje się cały system sieci uziemień. Połączenia takie mają na celu zapewnienie bezpieczeństwa osób przebywających w pobliżu elektrowni wiatrowej, szczególnie przed porażeniem w wyniku możliwego pojawienia się napięcia krokowego. W związku z tym istotne jest odpowiednie zaprojektowanie uziomu otokowego, który powinien w sposób prawidłowy sterować rozkładem potencjału wokół elektrowni wiatrowej.

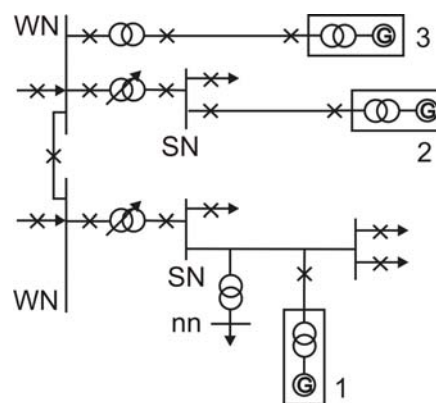
Projektowanie i realizacja systemów uziemień farm elektrowni wiatrowych, zwłaszcza w pasie nadmorskim, może sprawiać wiele trudności. Dlatego na gruntach o małej rezystywności często uzupełnieniem uziomu fundamentowego może być uziom sztuczny w postaci otoku lub kilku otoków (rys. 6). Dodatkowo, w przypadku rozległych farm wiatrowych łączy się uziomy poszczególnych elektrowni ze sobą. Takie poziome uziomy między elektrowniami w skuteczny sposób obniżają rezystancję uziemienia i zapewniają bezpieczną ochronę przeciwporażeniową [10, 11, 12, 13].

Przyłączenie elektrowni wiatrowych do systemu elektroenergetycznego

Pojedynczą elektrownię lub małą grupę elektrowni wiatrowych można przyłączyć do sieci SN lub w przypadku większej mocy elektrowni do sieci WN. Do sieci średniego napięcia elektrownia wiatrowa może być podłączona na dwa sposoby. Do istniejącej linii przesyłowej SN zasilającej innych odbiorców (odległość między elektrownią wiatrową a punktem przyłączenia nie powinna przekraczać kilku kilometrów) (wariant 1 na rys. 7). Może być też bezpośrednio przyłączona do szyn SN w stacji elektroenergetycznej WN/SN przez osobną linię (jeżeli elektrownia wiatrowa znajduje się w niedużej odległości od stacji WN/SN oraz gdy sieć SN jest słaba) (wariant 2 na rys. 7). Możliwe jest także przyłączenie elektrowni wiatrowej oddzielną linią do szyn WN w stacji elektroenergetycznej WN/SN (podłączenie do systemu elektroenergetycznego grupy elektrowni wiatrowych lub pojedynczej elektrowni wiatrowej o mocy kilku MW) (wariant 3 na rys.7) [15].



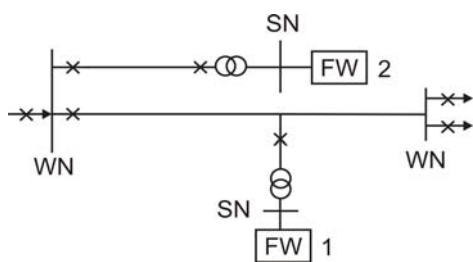
Rys. 6. Rozmieszczenie uziomów elektrowni wiatrowej, gdzie: a - wieża, b - zbrojenie, c - kanał kablowy, d - uziomy otokowe, e - przewód uziemiający, f - uziom fundamentowy stacji elektroenergetycznej (opracowanie własne na podstawie [7, 8, 9, 10])



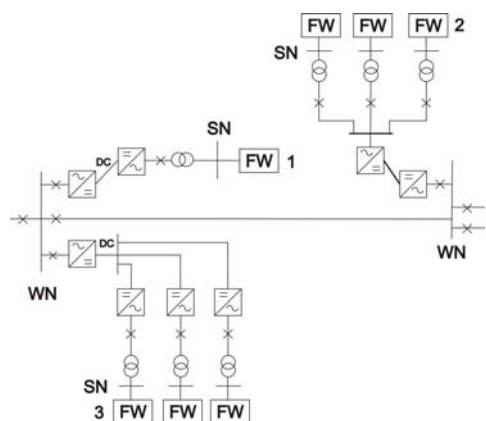
Rys. 7. Sposoby przyłączenia elektrowni wiatrowej do systemu elektroenergetycznego (opracowanie własne na podstawie [15])

Farmy wiatrowe ze względu na ich dużą moc, która osiąga niejednokrotnie kilkadziesiąt i więcej MW, przyłączane są do systemu elektroenergetycznego (do sieci WN) przez transformator sieciowy. Duże farmy wiatrowe mogą być przyłączane do systemu elektroenergetycznego do linii WN za pomocą jej własnego transformatora (wariant 1 na rys. 8) lub do szyn WN stacji elektroenergetycznej za pomocą transformatora WN/SN, należącego do farmy wiatrowej oraz linii WN (wariant 2 na rys. 8). Można również przyłączyć za pomocą transformatora sieciowego (linia WN podłączona jest do szyn stacji elektroenergetycznej poprzez wydzielony transformator nn/WN). Ten ostatni sposób podłączenia farm wiatrowych stosuje się w przypadku, gdy linia wysokiego napięcia 110 kV ma ograniczone zdolności przesyłowe - wówczas farmy wiatrowe przyłączane są do sieci najwyższych napięć 220 kV i 400 kV [15].

Specyficzne rozwiązania stosowane są dla morskich farm wiatrowych. W tym przypadku farmy wiatrowe łączy się z systemem elektroenergetycznym na poziomie WN poprzez łącze prądu stałego AC/DC (wariant 1 na rys. 9) lub za pomocą linii WN prądu przemiennego do osobnego węzła przeznaczony dla kilku farm wiatrowych (wariant 2 na rys. 9). Węzeł ten połączony jest z systemem elektroenergetycznym za pomocą łącza prądu stałego AC/DC. Kolejny wariant przyłączenia farmy wiatrowej do systemu elektroenergetycznego to przyłączenie jej za pomocą linii prądu stałego do osobnego węzła przeznaczony dla kilku farm wiatrowych (wariant 3 na rys. 9). Węzeł ten, zlokalizowany na platformie morskiej, połączony jest z systemem elektroenergetycznym za pomocą łącza prądu stałego AC/DC, tworząc tym samym wielowęzłową sieć elektroenergetyczną prądu stałego [15].



Rys. 8. Sposoby przyłączenia farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego (opracowanie własne na podstawie [15])



Rys. 9. Sposoby przyłączenia morskich farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego (opracowanie własne na podstawie [15])

Połączenia elektryczne morskich farm wiatrowych mogą być zaprojektowane przy użyciu kilku różnych układów w zależności od wielkości farmy i pożądanego poziomu niezawodności. Na rysunku 10 przedstawiono kilka możliwych konfiguracji, a mianowicie: układ promieniowy podłączony do pojedynczego koncentratora (A), jednostronna sieć pierścieniowa (B), pierścień dwustronny (C) oraz układ gwiazdowy (D).

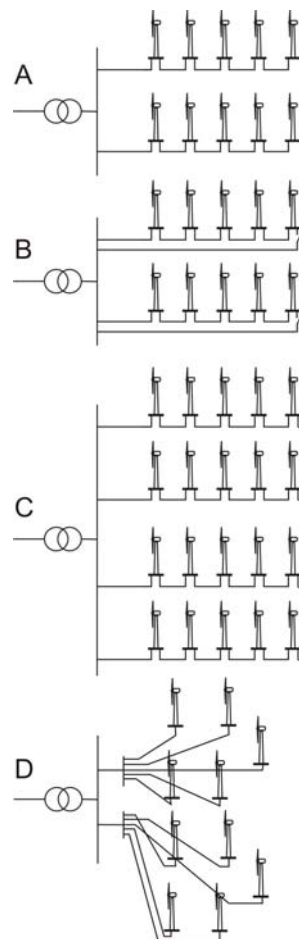
Promieniowe połączenie turbin wiatrowych podłączonych do pojedynczego koncentratora (A) to najprostsze rozwiązanie dla dużej farmy wiatrowej. Główną zaletą tego układu jest niski koszt linii kablowych oraz prosty algorytm sterowania. Jednak wadą jest stosunkowo mała niezawodność. Maksymalna liczba turbin wiatrowych, które mogą być podłączone do jednego łańcucha jest określona przez obciążalność prądową linii oraz moc znamionową generatorów.

Jednostronna sieć pierścieniowa turbin wiatrowych podłączonych do pojedynczego koncentratora (B) może być rozumiana jako ulepszona wersja sieci promieniowej, szczególnie ze względu na niezawodność, jednak jest od pierwszego rozwiązania bardziej kosztowna. Układ ten ma dodatkowe kable równoległe dla każdego stringu, tworząc konstrukcję w kształcie pętli. Kabel ten jest łączony z koncentratora do ostatniej turbiny w stringu za pomocą wyłącznika, który w stanie pracy jest normalnie otwarty.

Pierścień dwustronny (C) umożliwia alternatywne trasy dla przesyłu energii. Rozwiązanie to zwiększa niezawodność w porównaniu z prostym układem promieniowym. Oba łańcuchy są połączone równoległe, w celu zapewnienia redundancji. W normalnym stanie pracy pierścień pracuje w konfiguracji otwartej. Wadą tego rozwiązania jest konieczność znacznego przewymiarowania

okablowania, aby zapewnić pracę całego pierścienia w przypadku awarii jednej z turbin.

Układ gwiazdowy (D) oznacza, że wszystkie turbiny łączone są odrębnie z koncentratorem. Taki wspólny punkt połączenia zazwyczaj znajduje się w samym środku wszystkich turbin wiatrowych. Zaletą tej topologii jest fakt, że znacznie wzrasta niezawodność systemu, ponieważ awaria kabla powoduje utratę tylko jednej elektrowni wiatrowej. Jednakże, ze względu na znacznie większą długość całkowitą kabli, koszty są znacznie wyższe niż w innych konfiguracjach [16, 17, 18, 19].



Rys. 10. Układy połączeń morskich farm wiatrowych (opracowanie własne na podstawie [16, 17, 18, 19])

Nowoczesne technologie stosowane w energetyce wiatrowej

Na świecie prowadzone są liczne badania i projekty związane z wykorzystaniem nowoczesnych technologii w energetyce wiatrowej. Szczególnie morska energetyka wiatrowa czeka na rozwiązania dotyczące możliwości budowy pojedynczych elektrowni wiatrowych o mocy przekraczającej 10 MW. Budowa tego typu elektrowni na chwilę obecną jest bardzo trudna ze względu na gabaryty i masę generatorów turbin wiatrowych. Jednak próby wykorzystania technologii nadprzewodnictwa wykazują, że w najbliższej przyszłości możliwa będzie budowa jednostek o mocy znacznie przekraczającej wspomniane wyżej 10 MW. Zastosowanie materiałów nadprzewodzących, takich jak: MgB₂, Cu(Nb-Ti), Bi-2223 czy YBCO, do budowy przewodów czy elektromagnesów pozwoli na znaczną redukcję masy generatorów, nawet do 50%. Istotnym problemem w tej dziedzinie jest również stworzenie układów nadprzewodnikowych działających w tempera-

turach wyższych niż -100°C oraz wysokie ceny nadprzewodników, co znacznie ogranicza możliwość stosowania tego typu materiałów w masowej produkcji turbin wiatrowych. Należy zwrócić także uwagę na możliwość rozbudowy sieci i połączeń kablowych z wykorzystaniem kabli nadprzewodzących. Wysokotemperaturowe kable nadprzewodnikowe, skrótowo nazywane HTS (ang. *High Temperature Superconducting*), umożliwiają przesył wielokrotnie większej ilości energii niż kable konwencjonalne przy takim samym napięciu. Oceniając rozwój wdrażania tej technologii można zaobserwować zarówno konstruowanie, jak i badania kabli HTS na coraz wyższe poziomy napięcia i o coraz większej długości, a także opracowanie konstrukcji nie tylko do zastosowań w sieci AC, ale także i w sieci DC. Wysoki koszt kabli to przede wszystkim znaczący koszt systemu chłodzenia oraz rozwiązań technicznych zakończeń kabli i nietypowych muf kablowych. Dlatego prowadzone są także prace nad nadprzewodnikami działającymi w temperaturze pokojowej - RTS (ang. *Room Temperature Superconducting*). Obie te technologie razem, czyli generatory oraz kable w technologii nadprzewodzącej, pozwolą w niedalekiej przyszłości na jeszcze szersze możliwości wykorzystania generacji wiatrowej w systemie elektroenergetycznym [20-26].

Podsumowanie

Zmiany, jakie zachodzą w ostatnich tygodniach, dotyczące głównie modyfikacji prawa związanego z elektrowniami wiatrowymi, sprawiają, że coraz większą uwagę sektor wytwórczy będzie zwracał na lokalizacje morskie. Nowe zapisy prawne, które dla branży energetyki odnawialnej są bardzo kontrowersyjne, dotyczą minimalnej odległości nowych instalacji z turbiną wiatrową od zabudowań mieszkalnych. Zgodnie z tymi propozycjami odległość ta od najbliższych zabudowań ma wynosić dziesięciokrotną wysokość elektrowni wiatrowej. Dodatkowo, ustawa ma wprowadzić wyższe podatki od inwestycji oraz częstsze obowiązkowe przeglądy techniczne dla dopuszczenia elektrowni do ruchu. Zapisy te z pewnością znacznie ograniczą budowę nowych elektrowni wiatrowych oraz, co za tym idzie, prognozowane przez Polskę osiągnięcie celów udziału OZE w strukturze wytwarzania energii zgodnie z pakietem klimatycznym. Jednakże na podstawie dotychczasowych badań oraz doświadczeń dotyczących technologii związanej z energetyką wiatrową, można zauważyć, że technologia ta rozwija się bardzo prędko i w przyszłości będzie miała znaczący udział w generacji energii elektrycznej. Ponadto rozwój technologii związanych z bezpieczeństwem użytkowania, nie tylko instalacji wiatrowych sprawia, że elektrownie wiatrowe powinny zapewnić bezpieczeństwo obsługi, która je eksploatuje. A same elektrownie są coraz lepiej chronione przed skutkami różnego rodzaju awarii.

Autorzy: dr inż. Radosław Szczerbowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: radoslaw.szczerbowski@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: aleksandra.rakowska@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] www.ure.gov.pl (dostęp: 05.06.2016)
- [2] Jakobsen C., Reymann-Carlson H., Boogaard J., Martin A., Kragelund N., Balschmidt B., IMIA - Insurance of Wind Turbines, *IMIA - WGP5(99)E*, (1999)
- [3] Vetrne elektrarny – ochrana pred bleskem, PNE 33 3160-2
- [4] Sorensen T., Jensen F. V., Raben N., Lykkegaard J., Saxov J., Lightning Protection for Offshore Wind Turbines, *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Amsterdam, (2001)
- [5] Duraczyński M., Aerodynamika wirnika – rotory stosowane we współczesnych elektrowniach wiatrowych, *Globenergia*, (2009), nr 4, 34-38
- [6] <http://www.windpowerengineering.com> (dostęp: 20.05.2016)
- [7] Wind Turbines fire protection guideline, *CFPA-E No. 22,2012F*
- [8] <https://www.dehn.it/it/blitzplaner-manuale-la-protezione-da-fulmini> (dostęp: 20.05.2016)
- [9] Quaderni di Applicazione Tecnica No. 13, Impianti eolici (bol.it.abb.com – dostęp: 20.05.2016)
- [10] Barwise A., Lightning and surge protection for wind turbines, *energize*, (2014), n. 03, 59-65
- [11] Markovski B., Grcev L., Arnautovski-Toseva V., Kacarska M., Transient performance of interconnected wind turbine grounding systems, *Przeglad Elektrotechniczny*, (2015), n. 6, 72-75
- [12] Saylor S. W., Wind Farm Collector System Grounding, *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference, (2008)
- [13] Elmghairbi A., Haddad A., Griffiths H., Potential Rise and Safety Voltages of Wind Turbine Earthing Systems Under Transient Conditions, *20th International Conference on Electricity Distribution*, Prague, (2009), Paper 0937
- [14] Wojtas S., Uziemienia w zespołach elektrowni wiatrowych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, (2015), nr 45, 67-70
- [15] Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, *WNT* (2009)
- [16] Pan J., Bala S., Callavik M., Sandeberg P., DC Connection of Offshore Wind Power Plants without Platform, *13th Wind Integration Workshop*, Germany, (2014)
- [17] Daniel J. P., Pennock K., Liu S., Ibanez E., Reed G., Hanes S., National Offshore Wind Energy Grid Interconnection Study - Executive Summary, *DOE Award No. EE-0005365*, (2014)
- [18] Mason A., Marine Energy Electrical Architecture - Report 1: Landscape Map and Literature Review, *ORE Catapult*, (2015)
- [19] Sheng J. S., Agelidis V. G., Review of DC System Technologies for Large Scale Integration of Wind Energy Systems with Electricity Grids, *Energies*, (2010), n. 3, 1303-1319
- [20] Rakowska A., Wysokotemperaturowe kable nadprzewodnikowe, *Energia Elektryczna*, (2015), nr 1, 22-25
- [21] Rakowska A., Rozwój wysokotemperaturowych kabli nadprzewodnikowych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2008), nr 2, 12-15
- [22] Kozak J., Badania elektromagnesów nadprzewodnikowych w procesie ich wytwarzania i eksploatacji, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, (2014), nr 265
- [23] Terao Y., Sekino M., Ohsaki H., Electromagnetic Design of 10 MW Class Fully Superconducting Wind Turbine Generators, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, (2012), no. 3
- [24] Mijatovic N., Abrahamsen A. B., Træholt C., Seiler E., Henriksen M., Rodriguez-Zermeno V. M., Pedersen N. F., Superconducting generators for wind turbines: design considerations, *Journal of Physics: Conference Series* 234, (2010)
- [25] Liang Y., Electromagnetic Study of MW-Class HTS Wind Turbine Generators, *Energy and Power Engineering*, (2013), n. 5, 373-376
- [26] Abrahamsen A. B., Magnusson N., Jensen B. B., Runde M., Large superconducting wind turbine generators, *Energy Procedia*, (2012), n. 24, 60-67