

Problematyka stabilności kątowej morskich systemów elektroenergetycznych

Streszczenie. W artykule zostały omówione zagadnienia dotyczące morskich systemów elektroenergetycznych ze szczególnym uwzględnieniem kwestii stabilności kątowej. Omówiono zasadnicze elementy wchodzące w skład typowych morskich systemów elektroenergetycznych: źródła wytwórcze, odbiory mocy, sieci elektroenergetyczne. Przedstawiono główne czynniki mające wpływ na stabilność morskich systemów elektroenergetycznych. Rozważanie teoretyczne uzupełniono o przykładowe wyniki badań stabilności kątowej lokalnej, bazujące na analizie wartości własnych.

Abstract. The paper discusses the issues related to the offshore power systems, particularly regarding to rotor angle stability. Main offshore power systems components: generating units, power load, transmission network, have been described and characterized. The paper shows the important factors that affecting stability of the offshore power systems. Theoretical considerations were supplemented with results of rotor angle stability study based on eigenvalues analysis. **Angle stability of offshore power systems.**

Słowa kluczowe: stabilność kątowa, morskie systemy elektroenergetyczne, DFIG, wartości własne, HVDC.

Keywords: rotor angle stability, offshore power systems, DFIG, eigenvalues, HVDC.

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną pochodzącą ze źródeł odnawialnych oraz wzrost zapotrzebowania na surowce energetyczne, w tym szczególnie na ropę naftową. Obecny rozwój technologii morskich pozwala na szerokie wykorzystanie obszarów morskich w celu pozyskania zasobów energetycznych. W konsekwencji z jednej strony następuje stały rozwój morskiej energetyki wiatrowej oraz źródeł wykorzystujących energię fal morskich, z drugiej zaś opracowywane są rozwiązania umożliwiające pozyskanie ropy naftowej z coraz bardziej odległych obszarów morskich.

Elektroenergetyka morska ma szersze znaczenie gospodarcze związane z rozwojem infrastruktury sieciowej, rozwojem przemysłu stoczniowego, ale także daje szansę na udział Polski w realizacji celów i strategii unijnych w zakresie przeciwdziałania zmianom klimatu.

Budowa morskich systemów elektroenergetycznych musi być tak przeprowadzona, aby zarówno podsystem morski jak i lądowy stanowiły wspólną całość, gdzie zachowanie stabilności kątowej SEE jest jednym z najważniejszych aspektów pracy [1].

W tym artykule zawarto charakterystykę podstawowych elementów systemów morskich, a mianowicie źródeł wytwórczych, odbiorów mocy, układów sieci morskich, a następnie przedstawiono główne czynniki mające wpływ na stabilność kątową lokalną układu zwierającego system lądowy oraz morski.

2. Źródła energii na morzu

2.1. Morskie odnawialne źródła energii

Wprowadzenie

Ustawa prawo energetyczne wprowadziła definicję źródeł odnawialnych. W jej rozumieniu odnawialnym źródłem energii (OZE) jest źródło wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy i biogazu [2].

Morska energetyka odnawialna jest budowana wokół źródeł wiatrowych oraz źródeł opartych na energii prądów i pływów morskich. Optymistyczne prognozy wskazują, że do roku 2030 na wodach Morza Północnego, Morza Bałtyckiego, Morza Irlandzkiego na kanale la Manche mogą być zainstalowane źródła wiatrowe o łącznej mocy 200 GW.

Zainteresowanie wykorzystywaniem energii fal morskich wynika z dużego potencjału wytwórczego. W warunkach Szkocji i Irlandii potencjał ten sięga 75 kW na 1 metr linii brzegowej [3]. Jako atrakcyjne rozwiązanie uważa się również montowanie podwodnych turbin, których zadaniem jest przetwarzanie energii z przyływów, jak i odpływów wód morskich, zmiennych prądów morskich na energię elektryczną.

W warunkach Morza Bałtyckiego główny kierunek rozwoju stanowi morska energetyka wiatrowa, która zgodnie z decyzjami Komisji Europejskiej posiada w całej Europie wysoki priorytet. Ze wstępnych badań potencjału wiatrowego polskich obszarów morskich wynika, że potencjał techniczny morskich farm wiatrowych wynosi około 7,5 GW [4]. Na polskich obszarach morskich jako potencjalne lokalizacje morskich farm wiatrowych wskazuje się Ławicę Słupską, Ławicę Środkową oraz wybrzeże na wysokości miasta Kołobrzeg [4].

Morskie farmy wiatrowe

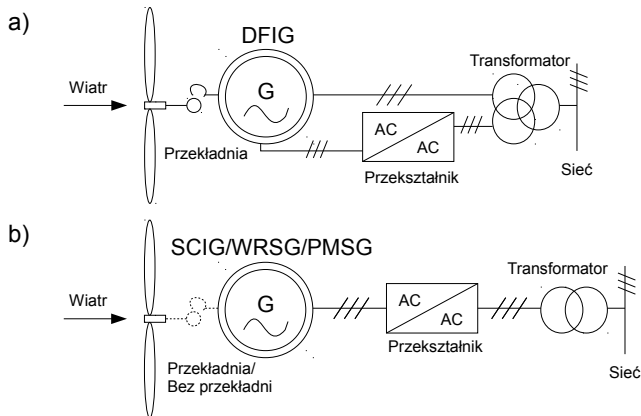
Obecnie w dziedzinie energetyki wiatrowej lądowej oraz morskiej, obserwuje się tendencję do koncentracji wielu jednostek wytwórczych i przyłączania ich razem do sieci. Zgrupowania elektrowni wiatrowych przyłączone do jednego węzła elektroenergetycznej sieci WN lub NN określane są jako Farma Wiatrowa. W odniesieniu do obiektów budowanych na morzu stosowane jest pojęcie Morska Farma Wiatrowa (MFW).

Moc budowanych lub planowanych morskich farm wiatrowych stale wzrasta i sięga obecnie 600 MW. W perspektywie najbliższych lat planowane są MFW o mocach powyżej 1000 MW. Aby uzyskać tak dużą moc stosowane są turbiny wiatrowe o mocach od 2 do 5 MW. Jednocześnie trwają prace nad turbinami o mocy nawet do 10 MW.

Główne typy turbozespołów wiatrowych obecnie instalowanych w morskich farmach wiatrowych przedstawiono na Rys. 1. Turbozespoły wiatrowe pracujące przy zmiennej prędkości obrotowej wyposażane w generatory typu DFIG lub PMSG są najbardziej pożądanym rozwiązaniem dla potrzeb farm wiatrowych, co wynika z korzystniejszych właściwości regulacyjnych w porównaniu do turbozespołów wiatrowych z generatorami o stałej prędkości (generatory indukcyjne).

Aktualnie główną zaletą generatorów dwustronnie zasilanych (DFIG), jest to, że przez obwód z konwerterem przepływa jedynie 30 % mocy. Zmniejsza to koszt budowy

konwertera w porównaniu z generatorem synchronicznym (PMSG), w przypadku którego konwerter musi być dobrany na pełną moc generatora. Z drugiej strony rozwiązanie z generatorem dwustronnie zasilanym sprawia więcej trudności technicznych w pracy systemu, ponieważ w trakcie uszkodzenia może wprowadzać do systemu duży udar prądowy. Wymaga to stosowania dodatkowych układów zabezpieczeń. Takich problemów nie ma w przypadku układu PMSG. Ponadto, generatory synchroniczne są nieznacznie efektywniejsze, mają prostszą budowę, ale są droższe.



Rys. 1. Typy generatorów w elektrowniach wiatrowych:
a) generator indukcyjny dwustronnie zasilany (DFIG)
b) generator synchroniczny (PMSG)

Elektrownie wykorzystujące energię fal morskich

Energia fal jest od dawna uważana za jedną z najbardziej obiecujących technologii odnawialnych. Wynika to z faktu, że ogólny potencjał tego typu energii jest olbrzymi. Ponadto ten rodzaj energii charakteryzuje się znacznie większą dostępnością w porównaniu do innych źródeł odnawialnych. Dla typowych lokalizacji energia fal morskich jest dostępna przez 90% czasu, podczas gdy w przypadku wiatrowych źródeł energia dostępna jest przez około 20÷30% czasu [5].

Istotną trudnością w praktycznej realizacji źródeł energii elektrycznej wykorzystujących energię fal morskich jest sposób realizacji konwersji energii. W konsekwencji opatentowano ponad 1000 rozwiązań dotyczących układów do konwersji energii fal na inny rodzaj energii, w tym energię elektryczną [5]. Układy te wykorzystują między innymi rozwiązania oparte na turbinach powietrznych, hydraulicznej siłowej oraz generatorach elektrycznych [6]. W większości rozwiązań stosowany jest obrotowy generator elektryczny o zmiennej prędkości obrotowej, którego konstrukcja zbliżona jest do stosowanego w turbinach wiatrowych generatora typu DFIG. W przypadku tego rozwiązania, stabilizacja prędkości obrotowej może być osiągnięta poprzez zastosowanie silnika hydraulicznego o zmiennym położeniu. Obecnie intensywnie rozwijana koncepcja układu przetwarzania energii, bazuje na zastosowaniu generatorów liniowych. Generatory liniowe służą do konwersji ruchu postępowego w energię elektryczną bez użycia przekładni lub innych mechanizmów zamieniających ruch liniowy na obrotowy. W literaturze opisywane są różne konstrukcje generatorów liniowych. Najczęściej są to 3-fazowe generatory synchroniczne, które są budowane z wykorzystaniem magnesów trwałych.

Pomimo dużej różnorodności rozwiązań oraz licznych prac badawczych z zakresu wykorzystania energii fal morskich, aktualnie eksploatowane instalacje pilotażowe nie osiągają mocy przekraczającej kilkunastu megawatów. Na obecnym etapie rozwoju technologicznego elektrownie

wykorzystujące energię fal morskich usytuowane blisko linii brzegowej mogą być elementem rozproszonych zasobów energii DER [7], które w przyszłości mogą przekształcić się w układy o większym znaczeniu systemowym.

Elektrownie wykorzystujące energię prądów morskich

Rozwój technologii do konwersji energii prądów i pływów morskich, podobnie jak w przypadku urządzeń do konwersji energii fal morskich, wynika z dużego potencjału energii wód morskich. Elektrownie zaporowe, zlokalizowane głównie w okolicach ujść rzek do morza, przetwarzające energię pływów morskich na energię elektryczną są eksploatowane od lat 60-tych XX wieku. Największa na świecie elektrownia pływowa pracuje we Francji i ma moc 240 MW (24×10 MW) [8].

Oprócz elektrowni zaporowych rozwijane są układy konwersji energii, które są instalowane na dnie morza. Układy te mogą być wyposażane w turbiny o pionowej lub też poziomej osi obrotu o średnicy od kilku do kilkunastu metrów. Działanie tego typu układów przypomina działanie układów turbin wiatrowych, przy czym turbiny wodne charakteryzują się znacznie mniejszą prędkością obrotową (kilka obrotów na minutę). W elektrowniach tego typu mogą być instalowane generatory tych samych typów jak w przypadku turbin wiatrowych.

2.2. Morskie elektrownie gazowe

Morskie platformy produkcyjne służące do wydobywania, przetwórstwa i transportu gazu i ropy naftowej są wyposażane w turbiny gazowe z generatorami synchronicznymi. Takie jednostki wytwórcze są wykorzystywane do zasilania odbiorów usytuowanych na platformie lub w jej pobliżu, ale także, w przypadku budowy systemów morskich, mogą stanowić źródło energii dla odbiorów usytuowanych w znacznej odległości, w tym na lądzie.

Turbiny gazowe do zastosowań morskich przeważnie różnią się od turbin gazowych w innych aplikacjach. Optymalna (minimalna) wielkość oraz wysoki stosunek mocy znamionowej do masy układu turbiny to kluczowe czynniki z punktu widzenia energetyki morskiej. Inne istotne czynniki to szybkość regulacji mocy, dyspozycyjność, niezawodność oraz zdolność do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych.

Z powyższych względów w energetyce morskiej zastosowanie znajdują turbiny gazowe o układzie termodynamicznym prostym. W turbinach gazowych o układach prostych energia elektryczna jest produkowana wyłącznie z wykorzystaniem turbin gazowych, natomiast energia cieplna jest wytwarzana w kotłach odzyskowych zasilanych spalinami opuszczającymi układ [9].

Wśród turbin o obiegu prostym wyszczególnia się turbiny przemysłowe lub lotniczopochodne [9, 10]. Turbiny przemysłowe osiągają niższe sprawności energetyczne ze względu na niższe stopnie sprężania (typowo 16:1) od lotniczopochodnych (stopień sprężania typowo 30:1), lecz charakteryzują się mniejszymi jednostkowymi kosztami inwestycyjnymi. Ze względu na minimalizację wagi w rozwiązaniach morskich znajdują zastosowanie turbiny gazowe lotniczopochodne, które są wykonywane jako turbiny dwu lub wielowalowe. Typowe konstrukcje turbin lotniczopochodnych do zastosowań morskich oferowane są w zakresie 50÷60 MW [10].

W zależności od typu konstrukcji oraz zakresu zastosowań modele turbin gazowych znacznie różnią się od siebie [11]. Dla potrzeb badania stabilności systemu elektroenergetycznego wykorzystać można model turbiny gazowej dwuwalowej przedstawiony w pracy [12].

3. Odbiory mocy na morzu

Zapotrzebowanie na moc i energię na obszarach morskich w dużym stopniu zależy od ich wykorzystania gospodarczego. Do typowych dużych morskich odbiorów mocy i energii należą instalacje wydobywcze ropy i gazu, a także instalacje wydobywcze rud metali oraz materiałów kopalnych.

Najbardziej typowe obciążenia na morskich instalacjach można podzielić na [13]:

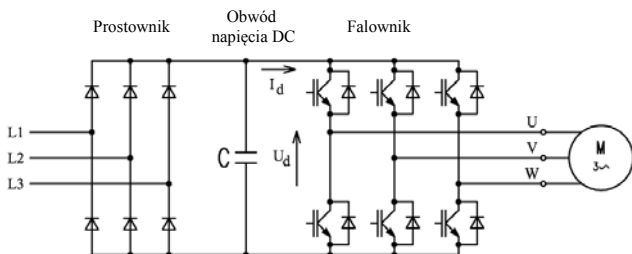
- układy napędowe wykorzystywane w procesach technologicznych oraz układach pomocniczych,
- układy ogrzewania wykorzystywane w procesach technologicznych,
- systemy elektromechaniczne pomocnicze (np. dźwigi i windy),
- oświetlenie, ogrzewanie, wentylacja (pomieszczeń i przestrzeni technologicznych i socjalnych).

Zestawienie typowych mocy urządzeń odbiorczych występujących na platformie wiertniczej służącej do wydobycia ropy przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Typowe odbiory mocy na platformach wiertniczych ropy naftowej [13]

Obszar zużycia energii	Moc	Typ odbioru
urządzenia do przetwarzania ropy	1 + 2 MW	ogrzewanie/napędy
urządzenia do wywozu ropy	2 + 12 MW	duże napędy
systemy regeneracji metanolu/glikolu	0,5 + 3 MW	ogrzewanie/małe napędy
rekompresja gazu	2 + 10 MW	duże napędy
systemy pomocnicze	1 + 2 MW	małe/średnie napędy
systemy wtrysku wody	12 + 25 MW	duże napędy
systemy wiertnicze	3 + 5 MW	średnie napędy
pomieszczenia mieszkalne	0,5 + 2 MW	oświetlenie/ogrzewanie /napędy
oświetlenie/ogrzewanie /wentylacja	0,2 + 2 MW	oświetlenie/ogrzewanie /napędy
systemy grzewcze przewodów	0,1 + 1 MW	ogrzewanie
awaryjne odbiorniki energii	0,5 + 6 MW	oświetlenie/ogrzewanie /napędy

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku napędów największej mocy do 25 MW zastosowanie znajdują układy napędowe średniego napięcia VSD (ang. Variable Speed Drive), o napięciu znamionowym do 6 kV, z regulacją prędkości obrotowej za pomocą przemienników częstotliwości (Rys. 2). Dzięki zastosowaniu napędów VSD uzyskuje się poprawę efektywności energetycznej, płynną regulację odbioru. Dodatkowo układ VSD eliminuje udary prądów rozruchowych.



Rys. 2. Schemat typowego układu VSD z obwodem pośredniczącym napięcia [14]

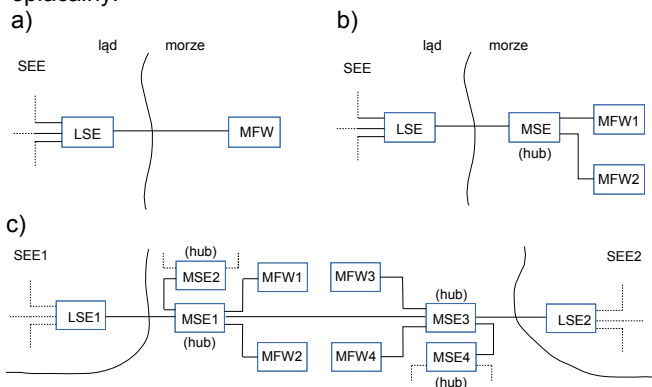
Układ napędowy typu VSD zawiera energoelektroniczną przetwornicę AC/AC, w której przetwarzanie energii odbywa się dwustopniowo, z pośrednim udziałem obwodu napięcia bądź prądu stałego DC. Obwód silnopiętrowy przemiennika częstotliwości stosowanego w układzie VSD składa się z

prostownika, obwodu pośredniczącego napięcia (lub prądu) stałego oraz falownika [14] (Rys. 2).

4. Sieci morskie

Ze względu na warunki środowiskowe, podmorskie elektroenergetyczne układy przesyłowe tworzące morskie sieci elektroenergetyczne są budowane w wykonaniu kablowym.

Obecne aplikacje układów przesyłowych na morzu stanowią układy promieniowe (punkt-punkt), czego przykładem są układy łączące MFW z siecią lądową (Rys. 3.a), lub też układy łączące dwa lądowe systemy elektroenergetyczne. Aktualnie prowadzone są intensywne prace koncepcyjne oraz badawcze z zakresu morskich sieci ockowych, w których zakłada się, że na morzu będą budowane morskie stacje węzłowe (węzły sieciowe) (Rys. 3.b). Morskie stacje węzłowe mogą mieć różne funkcje systemowe, przy czym jedna z nich może dotyczyć grupowania mocy z rozproszonych morskich farm wiatrowych. W przypadku Europy, w dłuższym okresie czasu morskie sieci elektroenergetyczne stanowią szansę na rozwój nowych połączeń międzysystemowych (Rys. 3.c). Przekształcenie morskich sieci elektroenergetycznych w układy z powiązaniem międzysystemowymi daje możliwość wyprowadzania mocy z MFW w różnych kierunkach (do różnych systemów). Może to spowodować, że udział morskich źródeł w rynku energii stanie się bardziej opłacalny.



Rys. 3. Typowe etapy rozwoju morskich sieci elektroenergetycznych. LSE – Lądowa Stacja Elektroenergetyczna, MFW – Morska Farma Wiatrowa, MSE – Morska Stacja Elektroenergetyczna

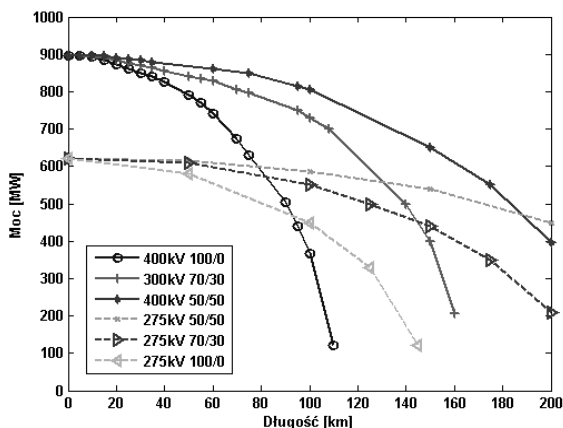
Obecny rozwój energetyki morskiej jest napędzany rozwojem MFW. Większość już wybudowanych i eksploatowanych morskich farm wiatrowych, zostało zlokalizowanych relatywnie blisko lądu, właściwie lądowych stacji elektroenergetycznych stanowiących punkt-węzeł przyłączenia podmorskiego układu przesyłowego do sieci lądowej. W takich przypadkach możliwe jest wykonanie układu przesyłowego łączącego morską farmę wiatrową z siecią lądową za pomocą linii kablowych prądu przemiennego (AC).

Podstawową różnicą pomiędzy liniami napowietrznymi a kablowymi, która ma wpływ na ich pracę w systemie elektroenergetycznym są odmienne parametry poprzeczne i wzdłużne – pojemność i indukcyjność linii. Z porównania wynika, że pojemność linii kablowej jest nawet kilkakrotnie większa od pojemności linii napowietrznej [15].

Prąd pojemnościowy linii kablowej obciąża ją wykorzystując znaczną część jej dopuszczalnej obciążalności prądowej. Prąd ten, określany prądem ładowania, zależy od pojemności jednostkowej oraz długości linii. W skrajnym przypadku, dla określonej długości linii, prąd ten osiąga wartość prądu obciążalności długotrwałej kabla, uniemożliwiając tym samym przepływ

mocy czynnej i powodując w praktyce linię niezdolną do pełnienia jej pierwotnej funkcji – przesyłu mocy czynnej [15]. W celu redukcji mocy biernej generowanej przez linie kablowe AC stosowane są dławiki kompensacyjne w następujących wariantach: na jednym końcu, na dwóch końcach, na obu końcach oraz w węźle pośrednim.

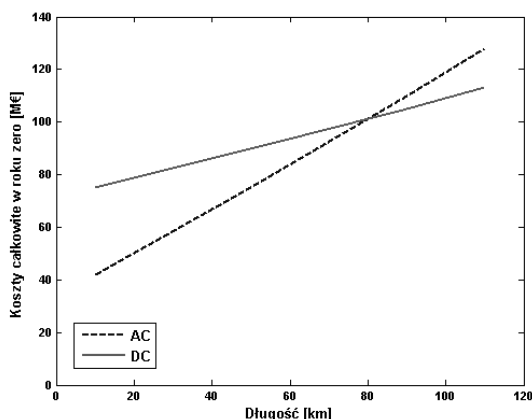
Przybliżone ograniczenia zdolności przesyłowych w funkcji długości kabla HVAC przy założeniu przekroju żyły roboczej kabla 1000 mm² Cu dla napięcia 275 i 400 kV (dla różnych sposobów kompensacji mocy, przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Maksymalne zdolności przesyłowe linii AC 275 kV i 400 kV z kompensacją mocy biernej rozdzieloną 100/0, 50/50, 70/30 pomiędzy sieci lądowe i morskie (dla przewodów Cu 1000 mm²) [16]

W celu zwiększenia sterowalności systemu elektroenergetycznego AC w zakresie przepływów mocy w sieci morskiej oraz kontrolowania mocy na styku sieci morskich i lądowych można rozpatrywać instalowanie w stacjach lądowych (do których są przyłączane morskie sieci) transformatorów regulacyjnych (przesuwników fazowych) lub układów FACTS typu TCPAR. Zaletą stosowania układów TCPAR jest to, że oprócz poprawy sterowalności systemu mogą przyczyniać się do poprawy stabilności kątowej systemu [17].

W przypadku, gdy MFW usytuowane są w znacznej odległości od sieci lądowej lub gdy moc znamionowa MFW osiąga znaczne wielkości, wówczas jedynym praktycznym rozwiązaniem jest zastosowanie układu przesyłowego wysokiego napięcia prądu stałego (HVDC).



Rys. 5. Porównanie kosztów morskiego układu przesyłowego przy przesyłach prądem stałym oraz przy przesyłach prądem przemiennym [16]

W porównaniu do technologii HVAC technologia HVDC wymaga zastosowania stacji przekształtnikowych na obu

końcach układu przesyłowego prądu stałego. W sieciach morskich, spośród dostępnych rozwiązań stacji przekształtnikowych LCC oraz VSC, są stosowane przekształtniki o komutacji wymuszonej VSC. Wynika to z jednej z głównych zalet przekształtników VSC, a mianowicie ich zdolności do współpracy z siecią pasywną (w której nie ma źródeł napięciowych). Stacje przekształtnikowe VSC charakteryzują się dużym kosztem i ograniczoną przepustowością (mocą znamionową). Mimo to uzasadnienie ekonomiczne do zastosowania układu HVDC w sieciach morskich uzyskuje się dla znacznie mniejszych odległości przesyłu (ok. 90 km) niż w przypadku układów lądowych (ok. 600 km). Relacje pomiędzy kosztami budowy morskiego układu przesyłowego HVAC oraz HVDC pokazano na Rys. 5.

5. Stabilność morskich SEE

Budowa podmorskich połączeń kablowych, a w dalszej perspektywie morskich sieci i systemów elektroenergetycznych musi być tak przeprowadzona, aby zarówno podsystem morski jak i lądowy stanowiły wspólną całość, charakteryzującą się jednakowymi właściwościami z punktu widzenia bezpieczeństwa systemu oraz możliwości prowadzenia ruchu. Stąd, przyłączenie podmorskich połączeń kablowych do sieci lądowych nie może wpłynąć negatywnie na pracę już istniejących układów lądowych, w tym nie może wpłynąć na stabilność systemu elektroenergetycznego.

Stabilność systemu elektroenergetycznego jest podstawową cechą tego układu i z technicznego punktu widzenia oznacza zdolność do odzyskania równowagi, ustalonego punktu pracy, po wystąpieniu zakłócenia [1].

Spośród różnych typów stabilności sklasyfikowanych w referacie [18], w dalszej części artykułu uwagę skupiono na problemie stabilności kątowej lokalnej, która dotyczy zachowania synchronizmu maszyn elektrycznych pracujących w systemie elektroenergetycznym po wystąpieniu małego zakłócenia. Różnorodność oscylacji związanych ze stabilnością kątową lokalną powoduje, że okres czasu jaki należy rozpatrywać w przypadku przebiegów czasowych wynosi 10÷20 s po ustąpieniu zakłócenia.

Wzrost złożoności oraz znaczenia elektroenergetycznych sieci oraz systemów morskich ma swoje odzwierciedlenie w badaniach z zakresu stabilności kątowej systemów elektroenergetycznych. Przykładem tego typu publikacji są prace [19,20,21,22]. W publikacjach tych rozważano układy testowe o różnym stopniu złożoności oraz o odmiennej charakterystyce technologicznej. Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że do czynników mających wpływ na stabilność kątową lokalną układów morskich systemów elektroenergetycznych można zaliczyć:

- wielkość generowanej mocy w źródłach morskich (analizowane są przypadki gdy źródła generują moc równą mocy znamionowej lub źródła pracują z mocą częściową);
- konfigurację układu (analizowane są układy promieniowe punkt- punkt oraz wielowęzłowe układy zamknięte);
- typy generatora zastosowanego w morskiej farmie wiatrowej (DFIG, PMSG) i/lub obecność źródeł innego typu (np. gazowych);
- sposób przyłączenia turbin wiatrowych (analizowane są przypadki sieci wewnętrznych AC lub DC);
- technologię przesyłu mocy (analizowane są przypadki układów HVAC, HVDC oraz mieszanych HVAC-HVDC);

- parametry elektryczne sieci lądowej, a w szczególności poziom mocy zwarciowej w węźle przyłączenia sieci morskiej do sieci lądowej,
- parametry układu VSC HVDC (pojemność kondensatora DC, filtrów AC oraz DC);
- tryby regulacji mocy i napięcia w stacjach przekształtnikowych VSC HVDC (po stronie AC jak i DC) oraz parametry regulatorów;
- odbiory dynamiczne (analizowane są układy z silnikami średniego napięcia bezpośrednio przyłączonymi do sieci oraz pracujące w układach VSD);
- urządzenia FACTS wykorzystywane do poprawy warunków napięciowych lub do poprawy sterowalności w zakresie mocy czynnej.

6. Badanie stabilności kątowej lokalnej

Stabilność kątowa lokalna systemu elektroenergetycznego może być badana za pomocą różnych metod. Jednakże jedno z najpopularniejszych podejść wykorzystuje pierwszą metodę Lapunowa, która może mieć zastosowanie dla zlinearyzowanego modelu systemu elektroenergetycznego [23]. W celu przeprowadzenia badania stabilności kątowej lokalnej dokonuje się linearyzacji nieliniowych równań różniczkowych i algebraicznych w otoczeniu punktu pracy systemu opisujących system, co prowadzi do uzyskania równań zlinearyzowanych oraz macierzy stanu **A**. Na

podstawie macierzy stanu **A** wyznaczyć można wartości własne λ_i , a także częstotliwość oscylacji oraz współczynnik tłumienia ζ .

W celu zobrazowania złożoności problematyki stabilności kątowej morskich systemów elektroenergetycznych w tym artykule przedstawiono przykładowe wyniki stabilności kątowej dla wybranych dynamicznych elementów SEE: generatora DFIG o mocy 5 MW, silnika indukcyjnego o mocy 11 MW oraz generatora synchronicznego o mocy 20 MW. Wyniki badań stabilności przedstawia Tabela 2, przy czym poszczególne warianty oznaczają:

- a) elementy pracują przy mocy $P=1,00$ pu oraz $U=1,00$ pu;
- b) elementy pracują przy mocy $P=0,30$ pu oraz $U=1,00$ pu.

Przedstawione w Tabeli 2 wyniki badań, uzyskane za pomocą programu Matlab, pokazują, że spośród badanych elementów tylko generator synchroniczny jest mocno wrażliwy na warunki pracy (obciążenie mocą). Pozostałe elementy (generator DFIG oraz silnik indukcyjny dużej mocy) wykazują relatywnie niewielką wrażliwość (mała zmiana częstotliwości oscylacji oraz współczynnika tłumienia). Jednocześnie generator DFIG oraz silnik indukcyjny charakteryzują oscylacje o dużym zakresie częstotliwości.

Tabela 2. Wyniki badań stabilności lokalnej dla różnych warunków pracy

	Generator DFIG			Silnik Indukcyjny			Generator Synchroniczny		
	$\lambda=\sigma\pm j\omega$	f_{osc} [Hz]	ζ	$\lambda=\sigma\pm j\omega$	f_{osc} [Hz]	ζ	$\lambda=\sigma\pm j\omega$	f_{osc} [Hz]	ζ
a)	-16,130 ± j313,300	49,863	0,051	-7,012 ± j314,020	49,978	0,022	-20,340		1,000
	-8,629 ± j61,733	9,825	0,138	-3,484 ± j40,201	6,398	0,086	-2,646 ± j16,634	2,647	0,157
	-17,355		1,000	-6,761	0,000	1,000	-10,086		1,000
	-3,096 ± j13,327	2,121	0,226				-1,024 ± j0,420	0,067	0,925
						-1,131		1,000	
b)	-16,130 ± j313,300	49,889	0,051	-7,013 ± j314,020	49,978	0,022	-20,813		1,000
	-8,627 ± j61,733	9,825	0,138	-3,484 ± j40,201	6,401	0,086	-3,847 ± j15,705	2,499	0,238
	-17,355	0,000	1,000	-6,761	0,000	1,000	-7,143		1,000
	-3,114 ± j13,322	2,120	0,228				-1,331		1,000
						-0,957 ± j0,059	0,009	0,998	

7. Wnioski

Rozwój morskiej energetyki, a w tym morskiej elektroenergetyki jest procesem, który może mieć wpływ na stabilność systemu elektroenergetycznego. Specyfiką morskich systemów elektroenergetycznych jest ich oparcie na odnawialnych źródłach energii oraz kablowych sieciach elektroenergetycznych. W przypadku braku odbiorów mocy na morzu cała wyprodukowana energia musi być przesłana do systemu lądowego. Ze względu na trudności techniczne związane z przesyłem mocy za pomocą linii kablowych HVAC w wielu przypadkach konieczne staje się zastosowanie technologii HVDC. Zmienność generacji wiatrowej oraz duże dynamiczne odbiory mocy na morzu istotnie komplikują prace morskich systemów elektroenergetycznych i mogą mieć wpływ na ich stabilność. W artykule przedstawiono podstawowe czynniki wpływające na stabilność morskich systemów elektroenergetycznych oraz przedstawiono przykładowe wyniki badania stabilności kątowej.

Praca finansowana ze środków na działalność statutową.

LITERATURA

- [1] Machowski J., Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
- [2] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. - Prawo energetyczne. (Dz.U. 1997 nr 54 poz. 348).

- [3] Bielski M., Energia morskiego smoka, *Urządzenia dla energetyki*, nr 7, 2008.
- [4] Polskie sieci morskie, Założenia koncepcyjne przesyłowej podmorskiej sieci elektroenergetycznej w polskich obszarach morskich, 2009.
- [5] Pelc R., Fujita R.M., Renewable energy from the ocean, *Environmental Defense, Marine Policy*, 26 (2002), 471–479.
- [6] Falcao A., Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010), 899–918.
- [7] Robak S., Rasolomampionona D.D., Rozproszone zasoby energii – przegląd zagadnienia. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 87, Issue 6, 2011, str. 63-66.
- [8] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, WNT, 2006.
- [9] Górnictwo i środowisko, *Prace Naukowe GIG*, nr 3, (2003).
- [10] Krzysztof Badyda, Andrzej Miller, Energetyczne turbiny gazowe oraz układy z ich wykorzystaniem, Kaprint 2014.
- [11] Yee S. K., Milanovic J.V., Hughes F. M., Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies, *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 23, 1 (2008), 108-118.
- [12] Hannett L.N., Jee G., B. Fardanesh, A governor/turbine model for a twin-shaft combustion turbine, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, 1 (1995), 133-140.
- [13] Myhre J., Electrical power supply to offshore oil installations by high voltage direct current transmission, 2001.
- [14] Duda P., Energoelektronika w układach napędowych – problemy aplikacji i eksploatacji, *Elektroenergetyka*, nr 4, 6 (2010), 86-98.
- [15] Rendecki R., Kompensacja mocy biernej w sieciach kablowych WN, *Praca dyplomowa inżynierska*. Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2015.

- [16] Offshore transmission technology, *European Network of Transmission System Operators for Electricity*, 2011.
- [17] Robak S., Rasolomampionona D.D., Januszewski M., Damping of power swings using FACTS device of the TCPS type: modelling and laboratory experiments. *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 44, No. 3, July 2007, pp 263-279.
- [18] Kundur P., Paserba J., Ajarapu V., Andersson G. Bose A., Canizares C., Hatziaargyriou N., Hill D., Stankovic A., Taylor C., Cutsem T. V., Vittal V., Definition and classification of power system stability, *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 19, 2 (2004), 1387-1401.
- [19] Zadeh M., Amin M., Suul J.A., Molinas M., Fosso O.B., Small-signal stability study of the Cigre DC grid test system with analysis of participation factors and parameter sensitivity of oscillatory modes.
- [20] Amin M., Zadeh M., Suul J. A., Tadeschi E., Molinas M., Fosso O. B., Stability analysis of interconnected AC Power systems with multiterminal DC grids based on the Cigre DC grid system.
- [21] Kalcon G. O., Adam G. P., Anaya-Lara O., Lo S., Uhlen K., Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems, *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 27, 4 (2012), 1818-1830.
- [22] Wang L., Thi, M., Comparative stability analysis of offshore wind and marine-current farms feeding into a power grid using HVDC links and HVAC line, *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 28, 4 (2013), 2162-2171.
- [23] Machowski J., Bialek J., Bumby J., Power system dynamics. stability and control, John Wiley & Sons, Chichester, New York, 2008.

Autorzy: dr hab. inż. Sylwester Robak, prof. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: sylwester.robak@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Michał Piekarczyk, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny E-mail: michal.piekarczyk@ien.pw.edu.pl.



**POLSKI KOMITET MATERIAŁÓW
ELEKTROTECHNICZNYCH
STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH**



Email: a.sikora@iel.wroc.pl lub s.talik@iel.wroc.pl

**XXV KONKURS PRAC DYPLOMOWYCH
o nagrodę
im. Profesora Jerzego I. Skowrońskiego**

Uprzejmie informujemy, że w 2015 roku odbędzie się XXV Konkurs im. Profesora Jerzego I. Skowrońskiego na najlepszą pracę dyplomową z zakresu elektrotechnologii, wysokich napięć i materiałów elektrotechnicznych.

1. Cel Konkursu:

Rozwijanie nowoczesnej krajowej elektrotechnologii i materiałoznawstwa elektrotechnicznego dla uczczenia pamięci Profesora Jerzego I. Skowrońskiego, twórcy polskiej szkoły materiałoznawstwa elektrotechnicznego.

2. Uczestnictwo:

Pracę dyplomową do Konkursu może zgłosić absolwent wyższej uczelni, opiekun pracy dyplomowej, dziekan wydziału. Temat pracy dyplomowej powinien być związany z elektrotechnologią, materiałoznawstwem elektrotechnicznym i techniką wysokich napięć.

Do Konkursu można zgłosić pracę dyplomową realizowaną w roku akademickim 2014/2015.

Przy zgłaszaniu udziału w Konkursie należy przedstawić:

- pracę dyplomową, w wersji elektronicznej - przesłaną pocztą elektroniczną oraz wersję papierową przesłaną na adres podany poniżej,
- opinie opiekuna i recenzenta o pracy dyplomowej,
- w przypadku pracy zespołowej należy podać udział autorów w realizacji pracy,
- ankietę wypełnioną przez dyplomanta lub zgłaszającego pracę (zał. nr 1),
- Autorzy nagrodzonych prac zaproszeni zostaną do przedstawienia swoich wyników w dniu rozdania nagród, tj. 10.12.2015.

3. Zgłaszanie prac:

Prace wraz z dokumentacją wymienioną w pkt.2 należy przesłać na adres:

**Instytut Elektrotechniki Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego
ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61
50-369 Wrocław**

z dopiskiem:

KONKURS PKME SEP

PKME przyjmuje zgłoszenia w terminie do **03 listopada 2015**. Ogłoszenie wyników Konkursu oraz rozdanie nagród odbędzie się 11 grudnia 2015 na zebraniu PKME SEP.

Informacje o konkursie dostępne są także na stronie WWW:
http://www.iel.wroc.pl/?Page=_lshejue0dmm2g9