

doi:10.15199/48.2024.12.09

# Sterowanie napięciem pracy kabli eksportowych morskich farm wiatrowych

**Streszczenie.** Referat przedstawia problematykę doboru napięcia pracy kabli eksportowych morskich farm wiatrowych. Wskazano, że praca przy napięciu odbiegającym od napięcia znamionowego kabli może skutecznie ograniczyć straty energii jakie występują w sieci farmy. Zaproponowano uzależnienie napięcia pracy kabla od generowanej przez farmę mocy czynnej, na wzór stosowanych w przeszłości w regulatorach napięcia transformatorów układów kompensacji prądowej. Dla przykładowej farmy morskiej o mocy zainstalowanej 510 MW uzyskano zmniejszenie rocznych strat energii o około 3%.

**Abstract.** The paper discusses the issue of selecting the operating voltage of export cables for offshore wind farms. It is shown that operating at a voltage different from the rated voltage of the cables can effectively reduce energy losses in the farm network. It was proposed that the operating voltage of the cable should depend on the active power generated by the farm. The idea is based on current compensation function used in the past in transformer controllers. For an example offshore wind farm with an installed capacity of 510 MW, a reduction in annual energy losses of approximately 3% was achieved. **Voltage control of export cables in offshore wind farms.**

**Słowa kluczowe:** morskie farmy wiatrowe, straty mocy, kable eksportowe, regulatory transformatorów.

**Keywords:** offshore wind farms, power losses, export cables, transformers controllers.

## Wstęp

Obecnie wiele krajów zmienia strukturę wytwarzania energii elektrycznej, starając się zastąpić paliwa kopalne odnawialnymi źródłami energii. Jednym z powszechnie stosowanych sposobów ograniczenia wykorzystania paliw kopalnych jest wykorzystanie energii wiatru. Dane dotyczące końca roku 2022 [1] wykazują łączną zainstalowaną moc turbin wiatrowych na świecie przekraczającą 900 GW. Coraz większy udział w zainstalowanej mocy mają morskie farmy wiatrowe, których moc zainstalowana przekroczyła na koniec 2022 roku 64 GW. Zgodnie z przewidywaniami [1], w ciągu 10 lat spodziewany przyrost mocy zainstalowanej w instalacjach morskich może osiągnąć 380 GW.

Pewnym problemem w przypadku dużych farm morskich jest efektywne przesłanie wytworzonej przez turbiny wiatrowe energii do sieci lądowej. Stosowane obecnie struktury wyprowadzania mocy z morskich farm wiatrowych powodują, że pewna część wytworzonej mocy jest tracona w układzie przesyłowym.

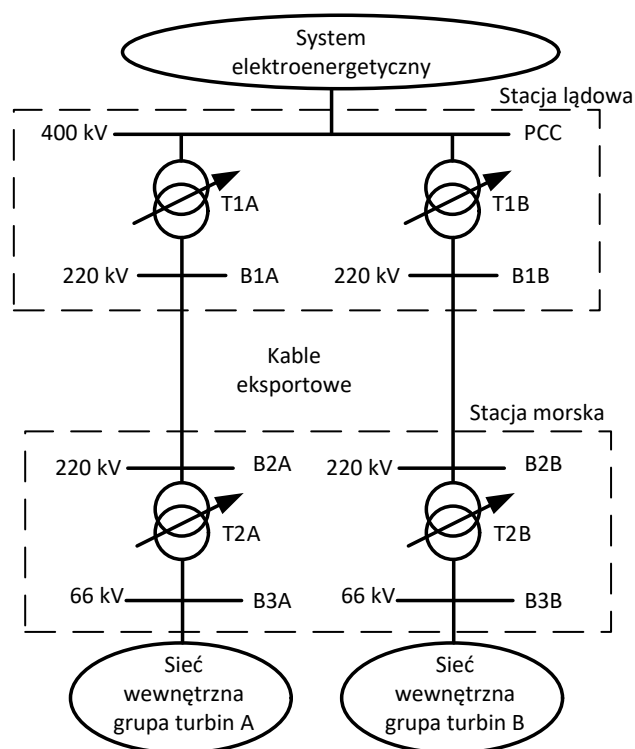
Typowy układ farmy morskiej składa się z następujących elementów:

- elektrowni wiatrowych z transformatorami,
- sieci wewnętrznej farmy wiatrowej,
- morskiej stacji transformatorowej,
- kabli eksportowych,
- lądowej stacji transformatorowej,
- linii przyłączeniowej.

Uproszczoną strukturę przyłączenia morskiej farmy wiatrowej przedstawiono na rysunku 1.

Dla kabli eksportowych, tj. służących do przesłania wytworzonej mocy z farmy morskiej do stacji lądowej obecnie stosuje się głównie technologię prądu przemiennego AC, wykorzystując trójfazowe układy kabli (jedno lub trzyżyłowych) [2].

Jedynie w przypadku farm położonych daleko od brzegu celowe staje się zastosowanie technologii prądu stałego HVDC [3], gdzie kable pracują przy stałym napięciu DC, a w stacji morskiej i stacji lądowej stosowane są układy przekształtnikowe AC/DC. Technologia stałoprądowa mimo szeregu swoich zalet, jak chociażby mniejsze straty mocy, większe możliwości sterowania, mniejsze problemy z kompensacją mocy bierną, nie są tak chętnie wykorzystywane ze względu na wyższy koszt inwestycji [4].



Rys.1. Uproszczona struktura przyłączenia morskiej farmy wiatrowej do systemu elektroenergetycznego.

Również planowane do budowy na Bałtyku, w polskiej strefie ekonomicznej, farmy wiatrowe mają być przyłączane za pomocą kabli pracujących przy napięciu przemiennym. Przyjmuje się [5], że linie eksportowe projektowane będą na napięcie znamionowe 220 lub 275 kV.

## Straty mocy i energii w farmach wiatrowych

Wymienione wcześniej elementy farmy morskiej i układu wyprowadzenia mocy charakteryzują się powstawaniem strat mocy czynnej w trakcie swojej pracy. Straty wydzielone w postaci ciepła powstają w szczególności w:

- transformatorach elektrowni wiatrowych,

- kablach sieci wewnętrznej farmy,
- transformatorach w stacji morskiej,
- kablach eksportowych,
- transformatorach w stacji lądowej,
- układach kompensacji mocy biernej,
- linii przyłączeniowej.

Dobór wszystkich powyższych urządzeń oparty jest o wymagania techniczne jakie musi spełnić cały układ, ale też o przesłanki ekonomiczne, tak aby w perspektywie okresu życia całej instalacji osiągnąć założony przychód i zysk. Dlatego dąży się do ograniczenia strat mocy i uzyskania możliwie dużego wolumenu energii elektrycznej oddanej do sieci, przy jednoczesnym ograniczeniu nakładów finansowych.

Niniejszy artykuł wskazuje, że możliwe jest uzyskanie częściowego zmniejszenia strat mocy czynnej w układzie poprzez umiejętne sterowanie napięciem w kablu eksportowym. Jest to działanie charakteryzujące się względnie małym nakładem finansowym, a przynoszącym bardzo wymierne oszczędności.

Straty mocy w linii kablowej, przyjmując elementarny schemat zastępczy typu  $\pi$ , można podzielić na zależne od napięcia (straty jałowe) i zależne od obciążenia (straty obciążeniowe). Zatem, aby obniżyć straty jałowe, korzystne jest obniżanie napięcia. Jednak straty obciążeniowe są proporcjonalne do kwadratu wartości prądu płynącego linią. Obniżenie napięcia, przy jakim pracuje linia będzie skutkowało wzrostem prądu i tym samym wzrostem strat obciążeniowych. Obniżenie napięcia przy przesyłaniu linią znacznej mocy może w konsekwencji doprowadzić do zwiększenia obciążenia powyżej wartości prądu dopuszczalnego długotrwale, spowodować przekroczenie dopuszczalnej temperatury izolacji i przyspieszone starzenie kabla. Nie jest to zatem dobry kierunek. Z kolei praca linii przy podwyższonym poziomie napięcia zwiększy straty jałowe, ale zmniejszy straty obciążeniowe w kablu, co może w pewnych sytuacjach być korzystne. Zbyt duży wzrost napięcia może być niekorzystny dla samej linii kablowej i powodować degradację izolacji, ale utrzymywanie linii kablowej w granicach napięć określonych w IRIESP [6], tj. w zakresie napięcia  $\pm 10\%$  względem napięcia znamionowego nie będzie miało negatywnych skutków.

Opisany mechanizm wpływu poziomu napięcia na straty mocy czynnej będzie dotyczył również transformatorów.

W przypadku dławików stosowanych do kompensacji mocy biernej wzrost napięcia będzie się przekładał na wzrost pobieranej przez dławik mocy biernej oraz większe straty mocy czynnej. Podobnie jak dla strat jałowych w liniach i transformatorach (dławik traktowany jest na schemacie zastępczym sieci jako element poprzeczny), wartość strat zależna będzie od kwadratu napięcia zasilającego dławik. Z punktu widzenia ograniczania strat mocy praca dławika przy obniżonym napięciu może być w pewnych stanach korzystna.

### Regulacja napięcia morskiej farmy wiatrowej

Z punktu widzenia regulacji napięć obiekt jakim jest farma morska jest układem złożonym, gdzie występuje wiele obiektów oddziałujących na poziomy napięć.

Przede wszystkim, typowo, transformatory w stacji lądowej i transformatory w stacji morskiej wyposaża się w podobciążeniowe przełączniki zaczepów umożliwiając utrzymanie napięć w kablu eksportowym oraz w sieci wewnętrznej farmy na określonym poziomie. Czynniki jakie wpływają na zmienność tych napięć są czynniki zewnętrzne i wewnętrzne.

Wahania napięcia w punkcie przyłączenia (PCC na rys. 1) związane są ze zmianami obciążeń, generacji i topologii

sieci w systemie elektroenergetycznym. W stanach normalnych, gdy praca farmy wiatrowej jest nieograniczona czasowo, zmienność napięcia w punkcie przyłączenia, zgodnie z [5] może wynosić od 0,9 do 1,1 (do 1,05 przy napięciu sieci 400 kV) znamionowej wartości napięcia. Są to zatem dość szerokie granice. Zadaniem regulatora transformatora w stacji lądowej jest niejako ograniczenie propagacji tych wahań napięcia do sieci farmy. Stąd zazwyczaj transformatory w stacji lądowej (T1A, T1B na rys. 1) utrzymują wartość zadaną napięcia na szynach niższego napięcia 220 kV (szyny B1A, B1B na rys.1). W ten sposób zmienność napięcia na końcu linii eksportowej (w stacji lądowej) jest skutecznie ograniczona, nawet przy zmianie napięcia w punkcie przyłączenia w szerokich granicach. Regulacja napięcia odbywa się automatycznie przez dedykowany regulator napięcia transformatora.

Czynnikiem wewnętrznym, również wpływającym na zmienność poziomów napięć w sieci farmy jest zmienność generacji mocy czynnej i biernej przez elektrownie wiatrowe. Przepływ mocy pomiędzy elektrowniami wiatrowymi a punktem przyłączenia powoduje powstawanie strat napięcia w liniach kablowych i transformatorach. Powyższe powoduje, że w sieci farmy pracującej z pełną mocą obserwuje się kilkuprocentowe wzrosty napięć. Największe wzrosty napięcia występują dla elektrowni wiatrowych najbardziej oddalonych od stacji. Elektrownie wiatrowe są zwykle wyposażone w zabezpieczenia, które przy nadmiernym poziomie napięcia wyłączają jednostkę z pracy. Dlatego wzrosty poziomów napięcia w sieci wewnętrznej spowodowane dużą generacją muszą być ograniczane. Wykorzystuje się do tego transformatory z regulacją przekładni, jakie instalowane są w stacjach morskich (T2A, T2B na rys. 1). Typowo [7] transformatory w stacji morskich utrzymują wartość zadaną napięcia bliską wartości znamionowej na szynach niższego napięcia 66 kV (szyny B3A, B3B na rys. 1). W ten sposób zmienność i wzrosty napięcia w głębi sieci wewnętrznej (przy oddalonych od stacji morskiej elektrowniach wiatrowych) są skutecznie ograniczone, nawet przy dużych zmianach generowanej mocy.

### Kompensacja prądowa

W referacie zaproponowano rozwiązanie, w którym napięcie zadane, utrzymywane przez regulator transformatora w stacji lądowej (napięcie na szynach 220 kV na końcu linii eksportowej) nie jest niezmiennie, jak w typowych rozwiązaniach, ale uzależnione od aktualnej generacji mocy przez farmę wiatrową. Proponowane rozwiązanie nawiązuje ideą do implementowanej powszechnie od dawna w regulatorach transformatorów [8], ale praktycznie nie wykorzystywanej funkcji, kompensacji prądowej.

Już w latach 80-tych w analogowych wówczas rozwiązaniach regulatorów transformatorów WN/SN wprowadzono funkcję kompensacji prądowej, uzależniając wartość napięcia zadanego od wartości płynącego przez transformator prądu, zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad U_z = \left| U_{z0} + \underline{I} (R_k + jX_k) \right|$$

gdzie:  $U_{z0}$  – napięcie zadane stanu bez obciążenia,  $I$  – prąd transformatora,  $R_k$ ,  $X_k$  – nastawialne wartości współczynników kompensacji prądowej.

W ten sposób można było, przynajmniej teoretycznie, uzyskać kompensację spadków napięcia dla linii zasilającej odległego odbiorcę, poprzez podnoszenie napięcia na początku linii zasilającej (na szynach SN transformatora). Im większe było obciążenie linii i większy był spadek

napięcia na linii zasilającej, tym wyższą wartość napięcia regulator utrzymał na szynach SN. Dzięki takiemu zabiegowi zmienność napięcia u odbiorcy zostawała ograniczona. Jednak w praktyce, przy typowej rozległej, rozgałęzionej sieci SN, możliwości efektywnego wykorzystania tego rozwiązania były ograniczone, dlatego rozwiązanie nie było powszechnie wykorzystywane.

Współczesne układy regulacji np. URT [9] czy TCC 300 [10] również mają zaimplementowaną funkcję kompensacji prądowej bazującą na zasadzie działania starszych układów analogowych. Nic natomiast nie stoi na przeszkodzie aby w regulatorach mikroprocesorowych implementować inne charakterystyki, które uzależniają wartość zadaną napięcia na szynach transformatora od wielkości takich jak natężenie prądu, moc czynna, moc bierna, moc pozorna czy ich kombinacje. Dodatkowo zależność napięcia zadanego od mierzonej wartości kryterialnej nie musi być liniowa jak w tradycyjnych układach kompensacji prądowej, a mieć ogólną postać:

$$(2) \quad U_z = U_{z0} + f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

gdzie:  $U_{z0}$  – napięcie zadane stanu początkowego,  $x_1 - x_n$  – wektor wartości kryterialnych.

### Analiza modelowa farmy 510 WW

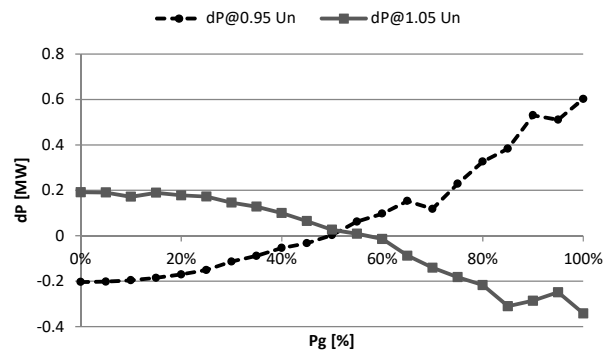
Zaproponowaną koncepcję uzależnienia napięcia pracy kabla eksportowego od generowanej przez farmę mocy czynnej przeanalizowano na przykładowej strukturze farmy wiatrowej. Przyjęto, że farma składa się z 34 turbin wiatrowych o mocy 15 MW każda. Turbiny połączone są w dwie grupy – A i B przyłączone niezależnie do sieci lądowej. Uproszczony schemat układu jest zgodny z rys.1. W układzie występują dwa kable eksportowe, pracujące niezależnie. W normalnym stanie pracy ani transformatory w stacji lądowej T1A, T1B, ani transformatory w stacji morskiej T2A, T2B nie pracują równolegle. Założono, że kable eksportowe, o napięciu znamionowym  $U_n = 220$  kV mają długość 40 km każdy. Natomiast kable w sieci wewnętrznej 66 kV mają łączną długość 42 km dla grupy A turbin wiatrowych oraz 31 km dla grupy B turbin wiatrowych. Turbiny przyłączane są w typowej dla farm wiatrowych strukturze promieniowej zawierającej po 4 stringi dla każdej grupy turbin. Szczegółowa struktura sieci wewnętrznej przyjęta do rozważań nie będzie prezentowana w referacie z racji jej niewielkiego wpływu na rozważany problem.

Założono, że w stacji lądowej zainstalowane są dwa dławiki do kompensacji mocy biernej przyłączone do szyn 220 kV (szyny B1A, B1B). Przyjęto, że dławiki te mają znamionową moc 70 Mvar każdy, nie mają możliwości regulacyjnych i pozostają przyłączone przez cały czas pracy farmy, niezależnie od poziomu generacji.

Dla tak przygotowanego modelu określono wartości strat mocy powstających w całej sieci farmy w zależności od generowanej przez elektrownie wiatrowe mocy czynnej. Upraszczając analizy przyjęto, że każda z turbin wiatrowych pracuje z taką samą wartością mocy czynnej. Przyjęto, że elektrownie wiatrowe nie biorą udziału w wymianie mocy biernej z siecią, tj. każda z nich pracuje przy współczynniku mocy  $\cos(\phi)$  wynoszącym 1. Wartości strat mocy w całej farmie obliczono dla generacji mocy czynnej zmieniającej się w zakresie 0-100%, przyjmując że wszystkie turbiny pracują z taką samą wartością mocy. Wartości strat wyznaczono w modelu dla trzech poziomów napięć zadanych na szynach 220 kV w stacjach lądowych –  $0,95 U_n$ ,  $1,0 U_n$ ,  $1,05 U_n$ . Następnie wyznaczono zmianę strat mocy w zależności od poziomu napięcia. Na rysunku 2 prezentowane są dwie krzywe:

-  $dP@0,95 U_n$  przedstawia różnicę pomiędzy stratami mocy przy napięciu obniżonym ( $0,95 U_n$ ) a stratami przy napięciu znamionowym ( $U_n$ )

-  $dP@1,05 U_n$  przedstawia różnicę pomiędzy stratami mocy przy napięciu podwyższonym ( $1,05 U_n$ ) a stratami przy napięciu znamionowym ( $U_n$ ).



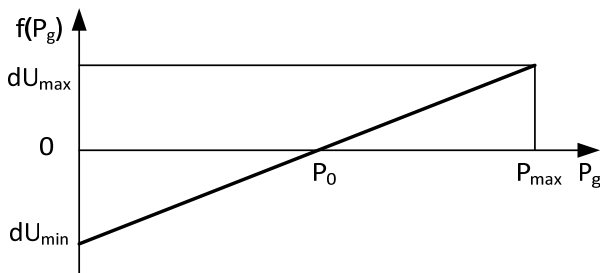
Rys. 2. Zmiana strat mocy czynnej w farmie wiatrowej w zależności od poziomu napięcia pracy kabla.

Zgodnie z oczekiwaniami praca z małym poziomem generacji mocy czynnej (do około połowy znamionowej mocy czynnej) przy napięciu obniżonym, powoduje zmniejszenie strat mocy względem stanu pracy przy napięciu znamionowym. Natomiast przy większym poziomie generacji mocy czynnej przez farmę obserwuje się zwiększenie (dodatnia wartość dP na wykresie) strat mocy względem układu pracującego przy znamionowym poziomie napięcia. Z kolei praca farmy przy podwyższonym napięciu w kablu skutkuje zwiększeniem strat dla małej generacji mocy czynnej, natomiast pozwala na ograniczenie strat mocy przy dużej generacji mocy czynnej. Obserwowana na rysunku pewna nieciągłość krzywych związku jest z dyskretnym działaniem układu regulacji napięcia transformatorów i faktem, że przełączenia zaczepek transformatorów dla trzech analizowanych poziomów napięć nie następują przy tej samej wartości generowanej mocy czynnej.

Na podstawie uzyskanych krzywych można zaproponować układ regulacji, który pozwoli na optymalizację poziomu napięcia pracy kabla powodując ograniczenie strat mocy w sieci farmy. W referacie prezentowane są wyniki uzyskane dla regulatora kształtującego napięcie zadane w zależności od generowanej mocy czynnej farmy. Funkcja ogólna (1) przyjmie w tym przypadku postać:

$$(3) \quad U_z = U_{z0} + f(P_g)$$

Gdzie:  $U_{z0}$  – napięcie zadane stanu początkowego,  $P_g$  – moc generowana farmy.



Rys. 3. Proponowana charakterystyka układu regulacji napięcia.

Zaproponowana funkcja kształtująca napięcie zadane dla regulatora transformatora ma postać przedstawioną graficznie na rys. 3.

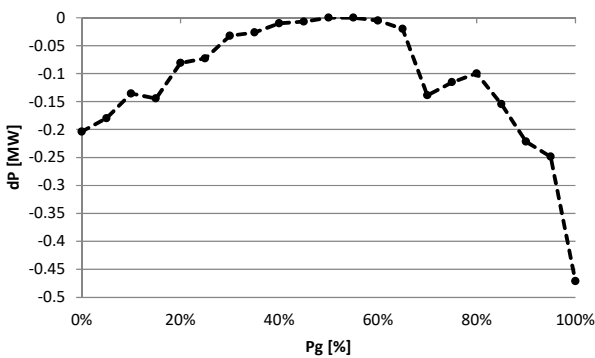
W referacie przyjęto charakterystykę symetryczną, liniową, definiowaną przez punkty określone w Tabeli 1. Nie ma jednak przeciwwskazań, aby w zależności od potrzeb danej farmy charakterystyka była nieliniowa.

Tabela 1. Zestawienie punktów definiujących charakterystykę.

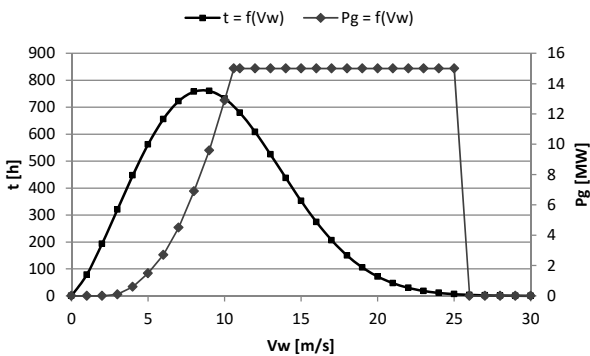
Oznaczenie	Znaczenie	Przyjęta wartość
$P_{max}$	Maksymalna generowana moc farmy	250 MW <sup>1</sup>
$P_0$	Moc generowana, przy której utrzymywane jest bazowe napięcie zadane	125 MW
$dU_{min}$	Wartość obniżenia napięcia przy braku generacji farmy	-0.05 $U_n$
$dU_{max}$	Wartość wzrostu napięcia przy pełnej generacji farmy	+0.05 $U_n$

<sup>1</sup> Maksymalna moc czynna przepływająca przez pojedynczy transformator jest połową mocy zainstalowanej farmy, a dodatkowo jest ona pomniejszona o straty.

Na rys. 4 prezentowana jest różnica pomiędzy stratami mocy uzyskanymi dla napięcia zadane uzależnionego od generowanej mocy, a stratami mocy przy założeniu stałego napięcia zadane ( $U_n = 1$ ). Ujemne wartości wskazują, że uzyskano zmniejszenie strat mocy od 0,2 MW przy braku generacji, do nawet 0,45 MW przy maksymalnej generacji mocy. Dla farmy pracującej z około połową mocy znamionowej napięcie zadane regulatorów transformatorów bliskie jest jedności (Rys. 3). Dlatego nie obserwuje się (Rys. 4) różnic w stratach mocy względem układu pracującego zawsze przy stałej wartości napięcia zadane.



Rys. 4. Zmniejszenie strat mocy czynnej po zastosowaniu uzależnienia napięcia zadane od wartości generowanej mocy czynnej.

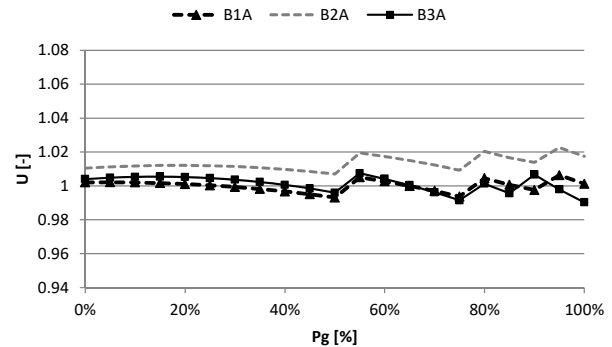


Rys. 5. Rozkład prędkości wiatru i krzywa mocy turbin wiatrowych.

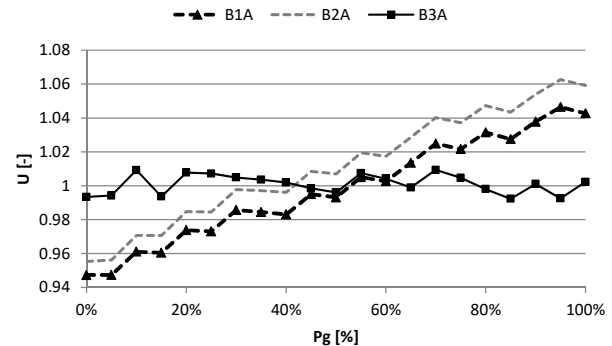
Następnie wyznaczono roczne straty energii w farmie wiatrowej. W tym celu przyjęto dla turbin wiatrowych krzywą mocy na podstawie [11]. Założono roczną zmienność prędkości wiatru opartą o rozkład Weibula charakterystyczny dla obszarów morskich [12]. Przyjęty rozkład prędkości wiatru  $t = f(V_w)$  oraz krzywą mocy  $P_g = f(V_w)$  przedstawiono na rysunku 5.

Dla tak założonych warunków pracy, porównano roczne straty energii dla układu pracującego ze stałą wartością napięcia zadane na końcu kabla eksportowego (szyny B1A, B1B) do układu gdzie napięcie zadane uzależnione jest od bieżącej generacji mocy czynnej. W pierwszym przypadku wyznaczono straty energii na poziomie 94,6 GWh w ciągu roku, natomiast po zastosowaniu proponowanego układu regulacji straty energii obniżyły się do 91,4 GWh w ciągu roku. Ograniczenie strat energii wyniosło zatem około 3,2 GWh. Stanowi to około 3% rocznych strat w farmie wiatrowej. Można zatem ostrożnie szacować, że niewielkim nakładem inwestycyjnym, wyposażając regulatory transformatorów w układy kompensacji, możliwe jest uzyskanie oszczędności na poziomie przynajmniej 1,3 mln zł rocznie. Powyższe wyliczenie oparte jest o średnioważone ceny energii z Towarowej Giełdy Energii [13] z maja 2024 roku, wynoszące 408 zł /MWh.

Mimo tak optymistycznych rezultatów zastosowania proponowanego układu można mieć obawę o poziomy napięć w kablu eksportowym i sieci wewnętrznej. Dlatego na rys. 6 i 7 przedstawiono zależność napięć na szynach B1A (szyny 220 kV na końcu kabla eksportowego), szynach B2A (szyny 220 kV na początku kabla eksportowego) oraz szynach B3A (szyny 66 kV transformatora w stacji morskiej).



Rys. 6. Zmienność napięć przy stałej wartości napięcia zadane.



Rys. 7. Zmienność napięć przy wartości napięcia zadane uzależnionego od generacji mocy czynnej

Rysunek 6 przedstawia poziomy napięć w sytuacji gdy transformatory T1A i T2A utrzymują stałą wartość napięcia zadane odpowiednio na szynach B1A i B3A. Napięcie na

końcu kabla eksportowego (szyna B1A) zmienia się w wąskim zakresie, zgodnie z napięciem zadany ( $U_z = 1$ ) i przyjętą strefą nieczułości ( $\pm 0.7\%$ ). Podobnie napięcie na szynach transformatora w stacji morskiej, w sieci wewnętrznej farmy (szyna B3A) utrzymywane jest na praktycznie stałym poziomie. Z kolei, wraz ze wzrostem generowanej przez farmę mocy czynnej rośnie spadek napięcia w kablu eksportowym, czego efektem jest wzrost napięcia na początku kabla eksportowego (szyna B2A). Można zauważyć, że wzrost napięcia na początku kabla (B2A) względem napięcia na końcu (B1A) sięga około 2% przy pełnej mocy generowanej przez farmę.

W sytuacji gdy napięcie zadane jest kształtowane w zależności od generowanej mocy czynnej obserwuje się napięcie na końcu kabla (szyna B1A) niższe od znamionowego dla mniejszych mocy generowanych. Napięcie to rośnie osiągając wartość 1,04 dla pełnej mocy generowanej przez farmę. Napięcie na początku kabla (szyna B2A) jest znów (jak na rys. 6) o 2% większe od napięcia na końcu i osiąga wartość 1,06  $U_n$ . Jest to wartość bezpieczna dla kabla, transformatorów w stacji morskiej i aparatury 220 kV. Z kolei napięcie w sieci 66 kV pozostaje praktycznie takie same jak w sytuacji wcześniejszej (rys. 6) zapewniając właściwe warunki pracy dla elektrowni wiatrowych. Powyższe wskazuje, że zaproponowany sposób sterowania napięciem pracy kabla nie powoduje zagrożeń dla urządzeń i aparatury farmy morskiej.

Można też zauważyć, że ze względu na powstający w kablu spadek napięcia, wartość wzrostu napięcia przy pełnej generacji farmy (parametr charakterystyki  $dU_{max}$  – rys. 3, tabela 1) nie powinien być nastawiany na maksymalne dopuszczalne napięcie pracy kabla, a na wartość mniejszą, uwzględniając maksymalny spadek napięcia w kablu eksportowym.

### Podsumowanie

Zaprezentowana w referacie koncepcja uzależnienia napięcia roboczego w kablu eksportowym od generowanej mocy czynnej może być interesująca dla inwestorów i operatorów morskich farm wiatrowych. Wykazano, że możliwe jest uzyskanie wymiernych oszczędności energii. Jednocześnie nie stwierdzono zagrożenia dla pracy farmy z powodu utrzymywania w kablu eksportowym napięć odbiegających od znamionowych.

Ocena możliwości obniżenia strat energii musi być w każdym przypadku wykonana indywidualnie, dla konkretnego układu farmy wiatrowej. Jedynie w ten sposób możliwe jest ustalenie charakterystyki sterowania napięciem w kablu eksportowym, aby zapewnić właściwy zakres zmienności napięcia, nie powodujący problemów technicznych.

Można zauważyć, że pewnym ograniczeniem dla proponowanego rozwiązania będzie długość kabli

eksportowych i związane z tym spadki napięcia na kablu. W przypadku gdy będą one znaczne, podnoszenie napięcia w na końcu kabla będzie musiało być ograniczone, a efekty oszczędności będą mniejsze.

Jednocześnie referat pokazuje pewną drogę dla nowych rozwiązań w zakresie sterowania napięciem roboczym kabli farm morskich. W dalszym etapie prac badawczych możliwe są dalsze modyfikacje zaproponowanego algorytmu sterowania, takie jak uwzględnienie przepływu mocy biernej przez kabel, uwzględnienie pomiarów napięć z początku kabla eksportowego czy innych.

Osobnym zagadnieniem, również mający potencjał badawczy jest optymalizacja i sterowanie wartościami napięć w sieci wewnętrznej farmy na podobnej zasadzie jak proponowana w referacie.

**5xAutor:** dr hab. inż. Jacek Klucznik, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: jacek.klucznik@pg.edu.pl

### LITERATURA

- [1] Global Wind Energy Council GWEC, Global Wind Report 2023, Brussels, Belgium, 2023
- [2] Cigre Working Group B1.40, Offshore generation cable Connection, Cigre report 610, 2015
- [3] D. Wu et al., Grid Integration of Offshore Wind Power: Standards, Control, Power Quality and Transmission, IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 5, pp. 583-604, 2024.
- [4] Szewczyk M. Sterowanie i regulacja w różnych konfiguracjach układów morskich sieci farm wiatrowych - wybrane analizy stosowanych rozwiązań i propozycje nowych kierunków badań. Przegląd Elektrotechniczny Nr 6/2015
- [5] Wymagania PSE, Linie eksportowe HVAC do wyprowadzenia mocy z morskich farm wiatrowych, Konstancin-Jeziorna 2022
- [6] Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej, Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci, Warszawa 2023
- [7] Hoseinzadeh, B., Blaabjerg, F., A novel control technique for on-load tap changer to enlarge the reactive power capability of wind power plants, IET Generation, Transmission & Distribution 16, 2022.
- [8] Hellman W., Szczerba Z., Regulacja częstotliwości i napięcia w systemie elektroenergetycznym. WNT, Warszawa, 1978
- [9] Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, Układ regulacji transformatorowej typu URT - dokumentacja techniczno-ruchowa, 2012
- [10] ABB, Digital Tapchanger Control TCC300 User Manual, 2019
- [11] Gaertner, et al., IEA Wind TCP Task 37, Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory, 2020
- [12] Hübler, C., Gebhardt, C. G., Rolfes, R., Development of a comprehensive database of scattering environmental conditions and simulation constraints for offshore wind turbines, Wind Energy Science, 2017
- [13] Strona internetowa Towarowej Giełdy Energii, <https://tge.pl/energia-elektryczna-rdb> (data dostępu 20.05.2024)