

Dr inż. Aleksander
ABB Power Grids Poland Sp. z o.o.
ekspert SEP , członek PKWSE

SPECYFIKA DOBORU URZĄDZEŃ ŁĄCZENIOWYCH WN ORAZ TRANSFORMATORÓW MOCY , Z UWZGLĘDNIENIEM TRUDNYCH WARUNKÓW EKSPLOATACJI W MORSKICH FARMACH WIATROWYCH.

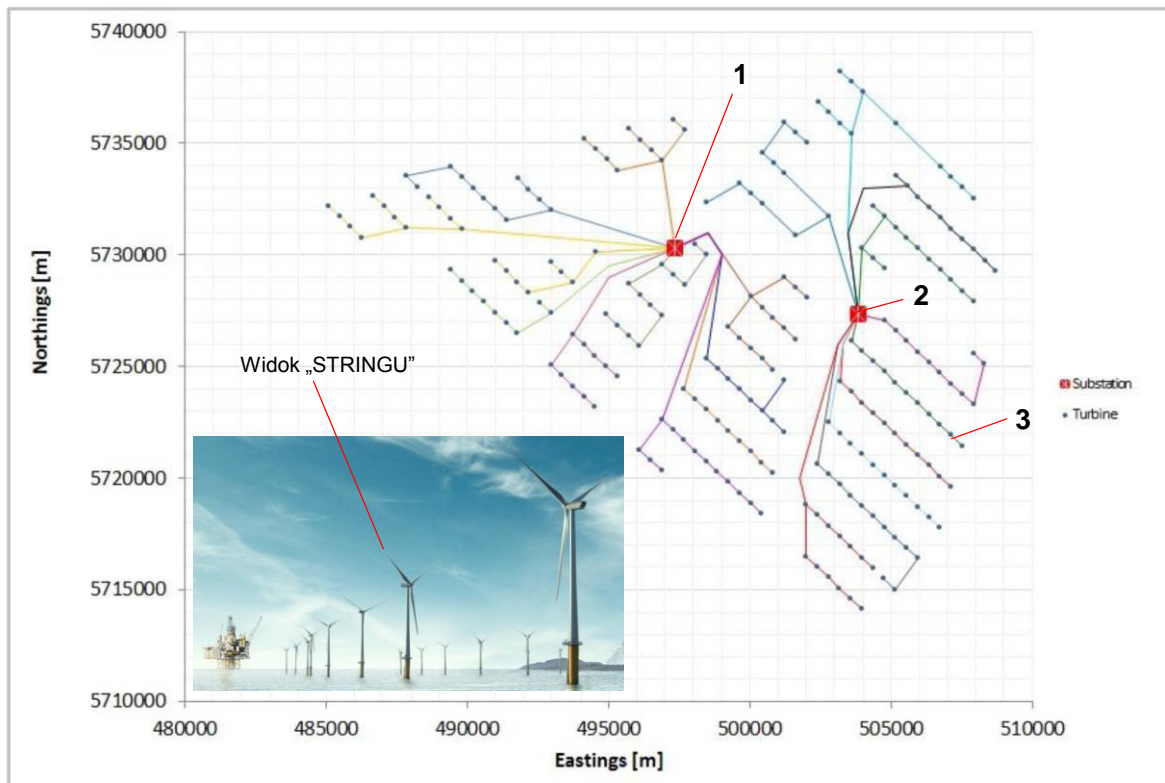
WSTĘP

Trudne warunki eksploatacji urządzeń w Morskich Stacjach Kolektorowych (MSK) , ze względu na podwyższoną wilgotność oraz zasolenie otaczającego powietrza , dodatkowo z utrudnionym dostępem służb serwisowych (stacje oddalone dziesiątki kilometrów od wybrzeża plus okresy długotrwałych sztormów) wymagają bardzo dopowiedzianego doboru urządzeń łączeniowych oraz transformatorów mocy , spełniających kryteria niezawodności , porównywalnego z doбором komponentów dla elektrowni jądrowych ! Obecnie w pojedynczej MST dużej mocy 66 kV/220 kV lub 66 kV/ 275 kV , moc grupy transformatorów od 800...do 1600 MVA , co w warunkach morskich wymusza zastosowanie bardzo wyspecjalizowanego systemu chłodzenia transformatorów, oraz specjalnej konstrukcji pól rozdzielczych w izolacji gazowej (GIS) na napięcia : $U_n = 72,5 \text{ kV}$; $U_n = 300 \text{ kV}$ wyposażonych w niezawodne napędy , przystosowane do wieloletniej eksploatacji w warunkach morskich , co zostanie wyeksponowane w niniejszym referacie. Innym ważnym aspektem rozważań będzie dobór urządzeń łączeniowych w przypadku wyprowadzenia mocy z pojedynczej Morskiej Turbiny Wiatrowej (MTW), która już obecnie osiąga moc 12,0 MW , a w niedalekiej przyszłości moc MTW może osiągnąć wartość 15 - 20 MW !

1. Grupa „Offshorowych” Transformatorów Mocy we wnętrzu obudowy Morskiej Stacji Kolektorowej , specyfika konstrukcji , dobór.

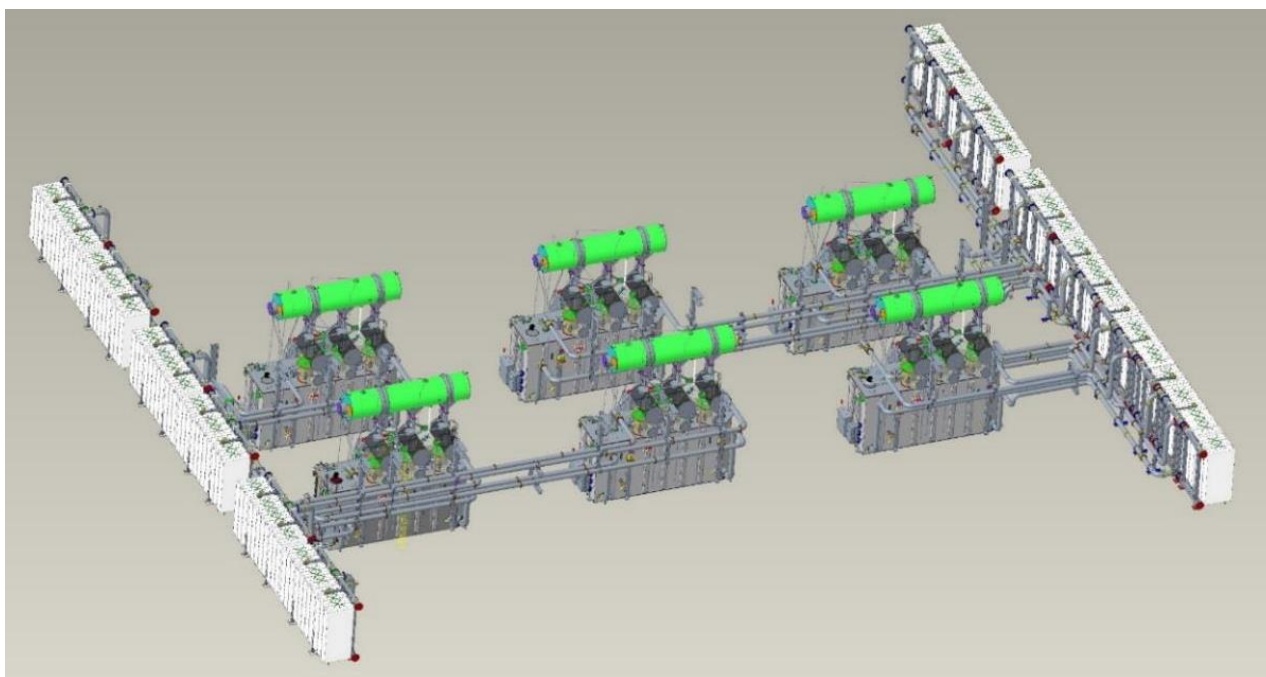
Planowane inwestycje związane z Morskimi Farmami Wiatrowymi na Morzu Bałtyckim , dotyczą kompleksów o łącznej mocy od 20 do... 30 GW ! , gdzie panują dobre warunki dla ich budowy , ze względu na małą głębokość morza oraz sprzyjające warunki wiatrowe , ale to akwen z ograniczonym miejscem dla tak wielkich inwestycji , co jest związane m.in. z pozostałościami II Wojny Światowej zalegającymi na dnie (wraki ; niewypały ; broń chemiczna). Wspomniane warunki wymuszają budowę Morskich Stacji Kolektorowych (MSK) z dużą - sumaryczną mocą grupy „Offshorowych” Transformatorów Mocy (OTM) , np. na poziomie 1600 MVA (patrz RYS. 2) , zamiast większej ilości MSK , względnie małej mocy, połączonych między sobą morskimi kablami na napięcie 220 kV . Postęp technologiczny w konstrukcji Morskich Turbin Wiatrowych (MTW) spowodował wzrost napięcia wyjściowego z MTW z 33 kV do ... 66 kV , co umożliwia podłączenie ponad 110 jednostek MTW o mocy 10-12 MW do jednej MSK (patrz RYS.1). Grupa OWT o mocy 1600 MVA , rozmieszczona wewnątrz obudowy MSK o niewielkich wymiarach , wydzielając dużą energię cieplną strat obciążeniowych , wymaga skutecznego systemu chłodzenia tych jednostek (patrz RYS. 2) , co jest niełatwym zadaniem ze względu na stosowanie autonomicznego systemu chłodzenia , w którym ze względu na warunki morskie , nie stosuje się wentylatorów oraz pomp dla wymuszonej cyrkulacji oleju! Tak złożony system chłodzenia transformatorów z wyżej wymienionymi ograniczeniami natury technicznej , wymagał zastosowania względnie złożonych obliczeń , jakie wykonano w fabryce ABB Power Grids Poland Sp. z o.o. w Łodzi , wiodącej fabryce w grupie ABB , produkującej OTM. Ze względu na lokalizację , OTM są narażone na częste i wysokie energetyczne przebiegi , związane z wyładowaniami piorunowymi , co wymaga bardzo skutecznej ochrony tych transformatorów. Im dystans między transformatorem a ogranicznikiem ZnO jest mniejszy , tym skuteczniejsza ochrona przed szybko narastającymi przebiegami. Na RYS. 3 przedstawiono OTM spełniający to wymaganie , gdzie ZnO jest zamontowany nad przyłączem kablowym , skutecznie chroniąc zarówno transformator jak i rozłączne połączenie kablowe typu wtykowego.

Możliwie bezprzerwowo przesył energii generowanej w Morskiej Farmie Wiatrowej do stacji energetycznej na lądzie (Onshore) , wymaga zastosowania odpowiedniej liczby OTM z optymalnym doбором mocy poszczególnych jednostek zainstalowanych w MSK , aby w przypadku przeglądu serwisowego lub naprawy na miejscu zainstalowania jednego z wybranych OTM , była możliwość przesłania maksymalnej mocy generowanej w Morskiej Farmie Wiatrowej (MFW) za pośrednictwem pozostałych , pracujących OTM , co jest podstawowym wymogiem respektowania minimalnego poziomu redundancji w grupie OTM. Przykład : w przypadku grupy OTM o mocy 800 MVA jeśli nie respektować redundancji , to wystarczyłoby zainstalować w MSK dwie jednostki OTM o mocy 400 MVA (patrz RYS. 4) , a w przy-



RYS. 1. Przykład rozmieszczenia morskich turbin wiatrowych wokół dwóch stacji kolektorowych, podłączonych do „STRINGÓW” kablami morskimi 66 kV, źródło : DNV-GL, Raport No.:113799-UKBR-R02,Rev.2 [2].

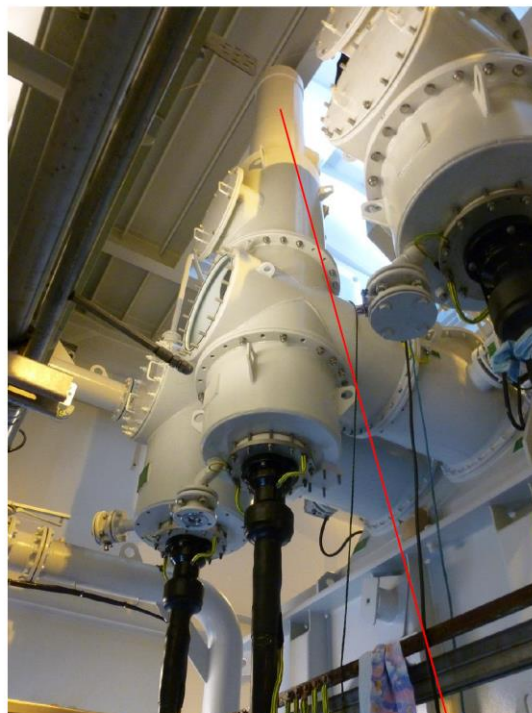
1 ; 2 - stacje kolektorowe (stacja kolektorowa No. 1 zasilana z 117 turbin wiatrowych !)
 3 - ”STRING” 66 kV, zbierający moc z 11 turbin wiatrowych



RYS. 2. Przykład : grupa sześciu „Offshorowych” Transformatorów Mocy 270 MVA /66 kV/220 kV, przeznaczonych do zainstalowania wewnątrz obudowy Morskiej Stacji Kolektorowej HVAC o mocy 1620 MVA, z autonomicznym systemem chłodzenia (niewymuszona cyrkulacja oleju, radiatory poza wnętrzem obudowy platformy morskiej), zaprojektowana i wyprodukowana w fabryce ABB Power Grids Poland Sp. z o.o. w Łodzi [1].



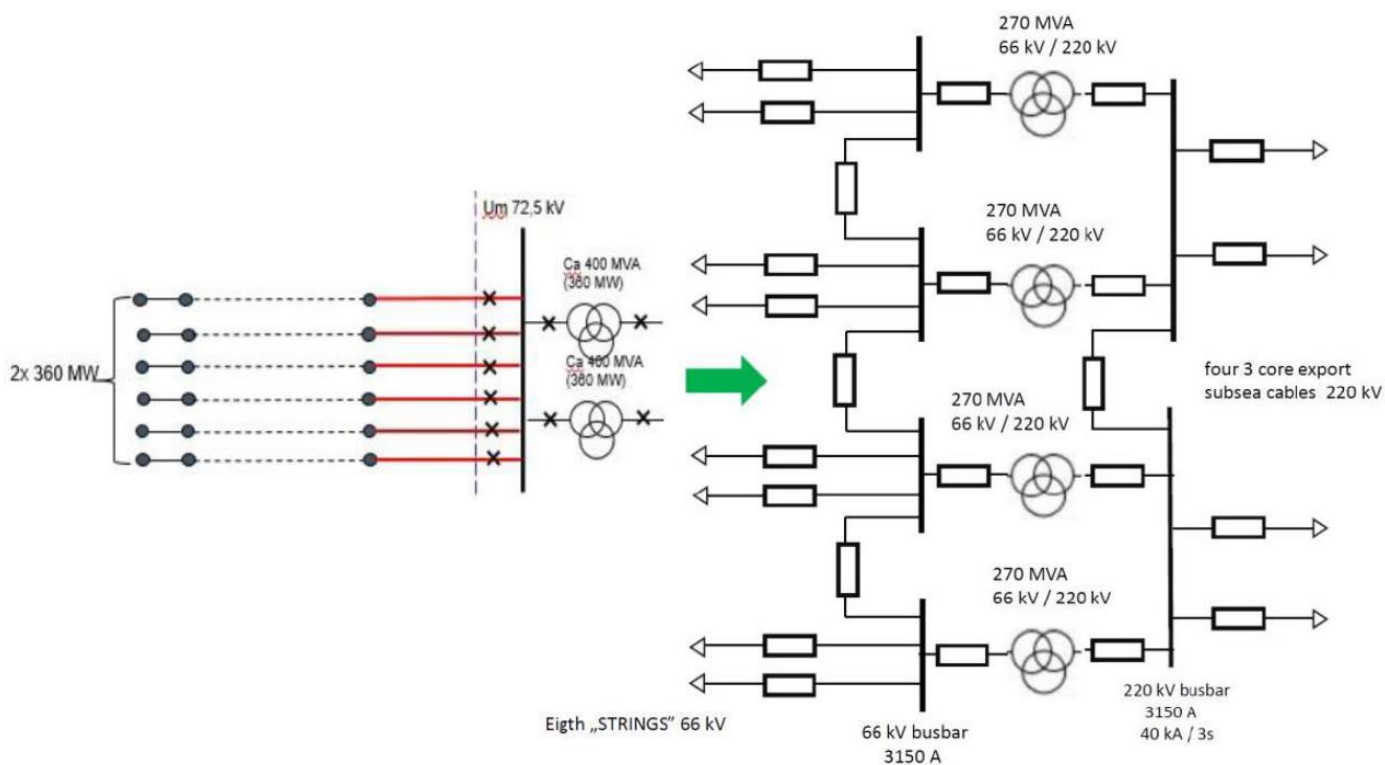
1



2

RYS. 3. "Offshorowe" Transformatory Mocy (OTM) w Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK) 66 kV/220 kV [1].

1 - podłączenie trzech wstawek kablowych - jednożyłowych 66 kV do danej fazy (prąd roboczy do 4000 A) ;
 2 - przykład podłączenia ogranicznika przepięć ZnO do przyłącza kablowego transformatora , w celu zachowania minimalnej odległości ogranicznika ZnO od transformatora.

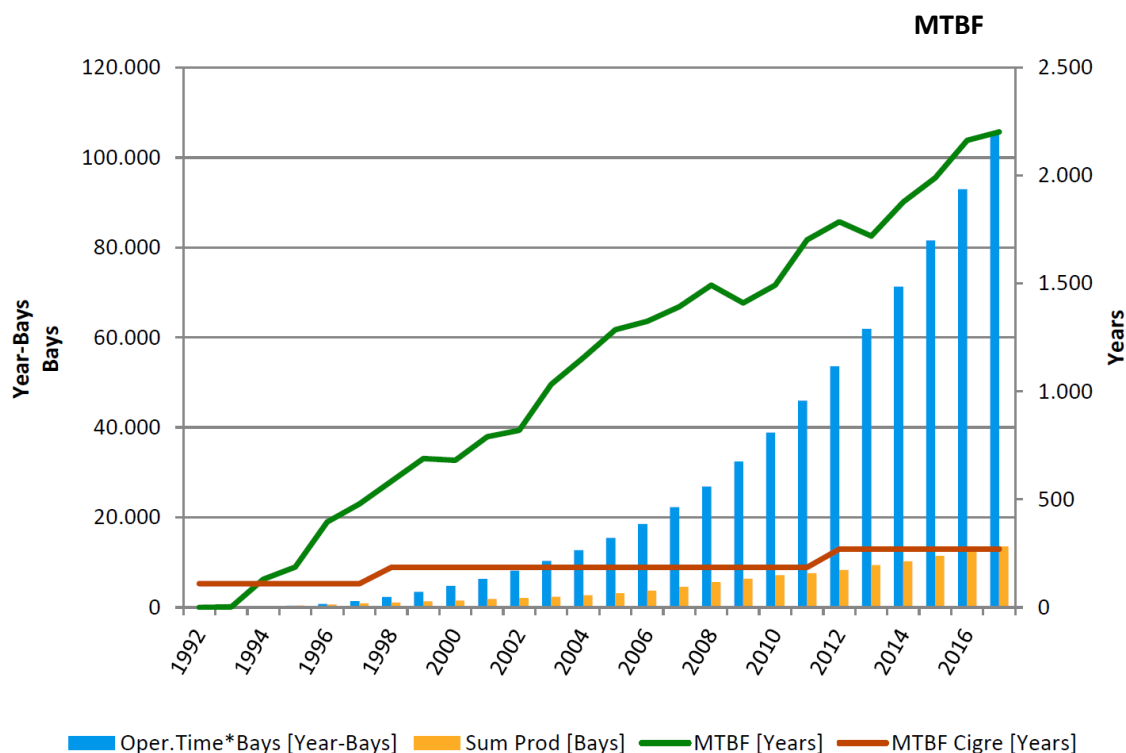


RYS. 4. Przykład Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK) o mocy 800 MVA : bez redundancji - dwa „Offshorowe” Transformatory Mocy (OTM) o mocy 400 MVA ; z respektowaniem redundancji - cztery OTM o mocy 270 MVA.

padku respektowania wymogu redundancji w grupie OTM należy zainstalować cztery jednostki o mocy 270 MVA , gdyż w przypadku przestoju jednego z OTM , grupa OTM posiada moc 810 MVA. Fabryka ABB w Łodzi jest przygotowana do wyprodukowania jednostek OTM o znacznie większej mocy, tzn. jednostki o mocy do ... 550 MVA czyli jeszcze transportowalne jednostki trójfazowe - koleją (ograniczenie : gabaryty skrajni kolejowej) , ale praktyczne zastosowania w MSK dużej mocy , mają jednostki OTM o mocy do 400 MVA , co jest związane z respektowaniem w/w redundancji w grupie OTM. Przykład schematu głównego pogładowego MSK o mocy 1600 MVA , z zastosowaniem czterech jednostek OTM o mocy 400 MVA każda , omówiono w [1]. Założono redundancję : jeden OTM/400 MVA wyłączony czasowo z eksploatacji , to w MSK do dyspozycji moc grupy OTM : 1200 MVA , wystarczająca dla zasilenia Morskiej Stacji Konwerterowej +/- 362 kV o mocy do 1,1 GW.

2. Rozdzielnice GIS , wymagania oraz konfiguracja pól , dostosowanych do specyfiki pracy w Morskich Stacjach Kolektorowych dużych mocy.

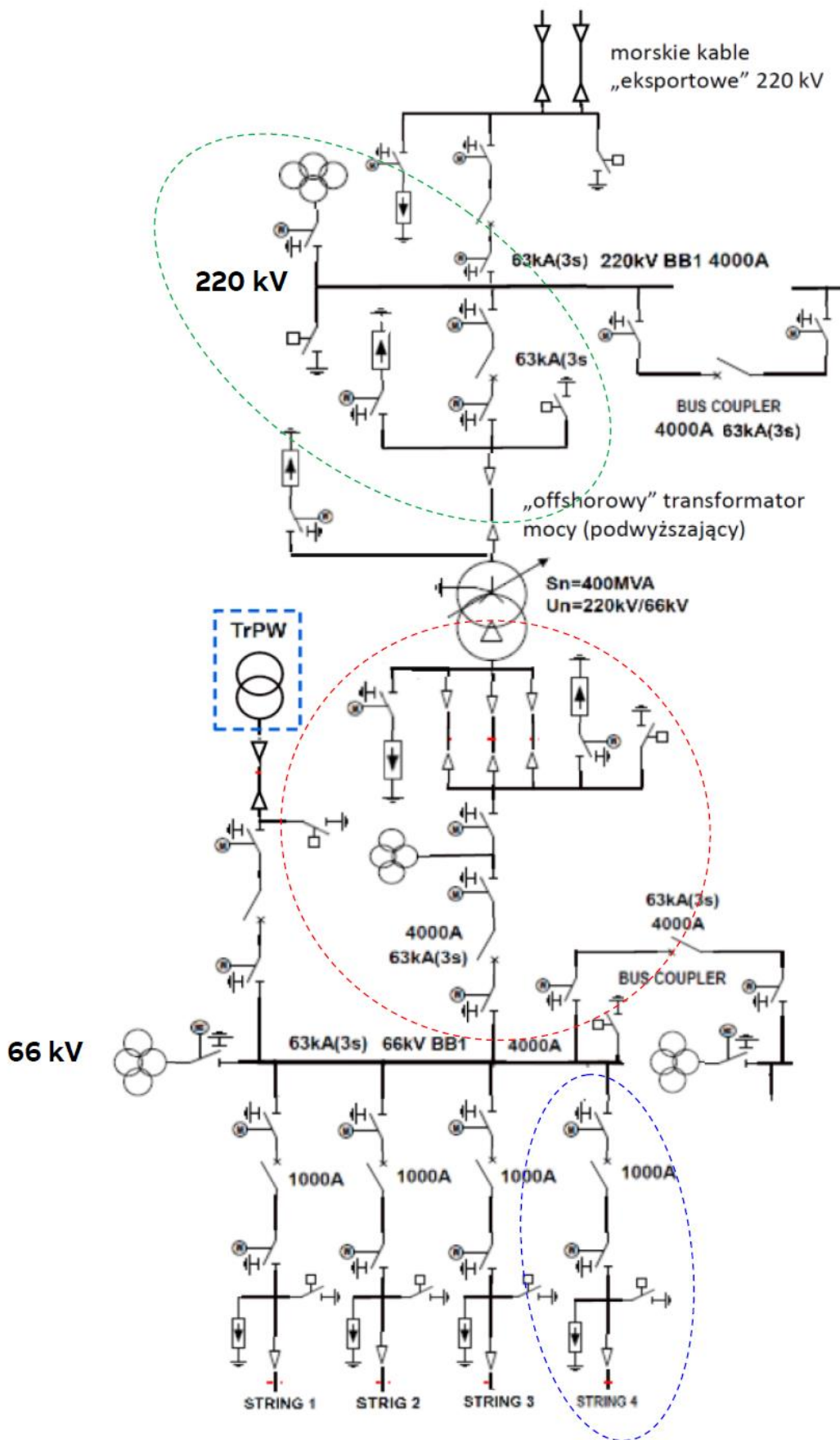
Szybki rozwój technologii , związany z Morskimi Turbinami Wiatrowymi (MTW) już obecnie otworzył drogę dla zastosowań jednostek o mocy 12 MW. Napięcie wyjściowe z MTW obecnie wynosi 66 kV , ale jeszcze niedawno napięcie rozgałęzionej , morskiej sieci kablowej łączącej MTW wynosiło 33 kV. Rozdzielnice GIS , aplikowane w Morskich Stacjach Kolektorowych (MSK) bazują na sprawdzonej technologii , doskonałej od kilkudziesięciu lat , jednakże maksymalnie ograniczone gabaryty MSK , oraz warunki pracy GIS w warunkach morskich (zasolenie ; wilgotność ; duża odległość MSK od brzegu) wymuszają bardzo odpowiedzialny dobór tych urządzeń , z niezawodnością porównywalną z tymi , jakie pracują w obwodach potrzeb własnych elektrowni jądrowych.



RYS. 5. Przykład charakterystyki z wykresem parametru MTBF - czas między awariami danego typu GIS , zielony wykres dotyczy MTBF w przypadku GIS typu ELK-04 produkcji ABB na napięcia 72,5 kV ...145 kV oraz 170 kV, obecnie MTBF = 2200 lat , dla okresu eksploatacji : 106.000 polo-lat ! .

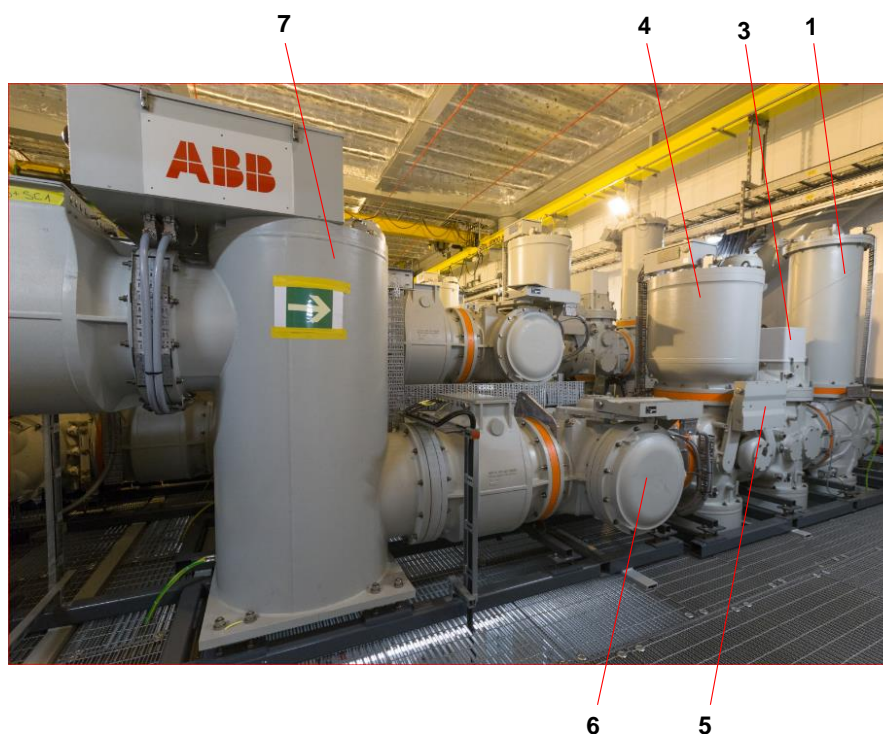
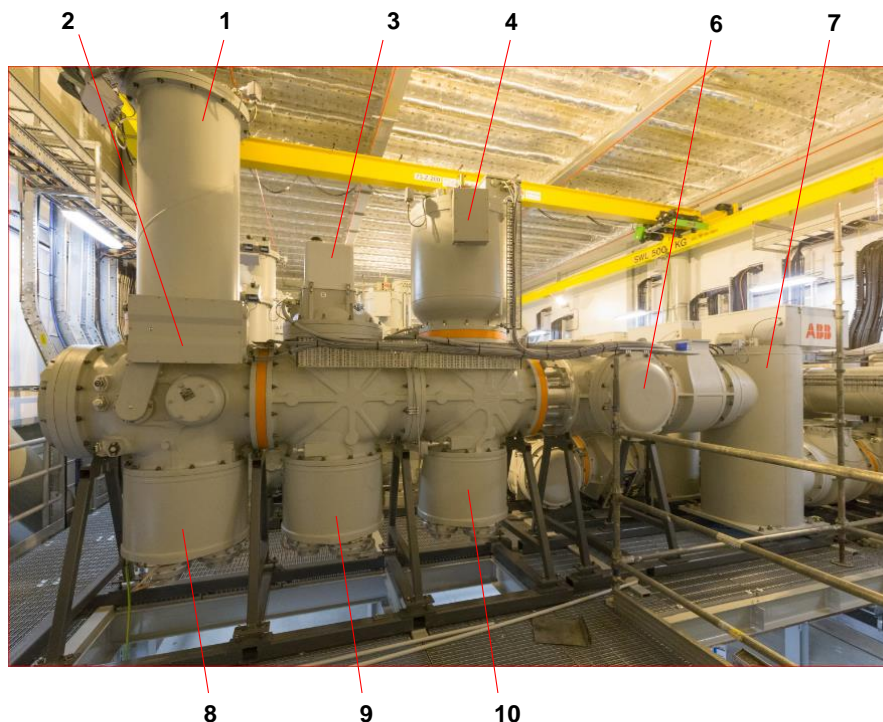
Ważnym parametrem doboru GIS dla MSK ze względu na niezawodność , jest parametr MTBF (patrz RYS. 5) , czyli czas potwierdzony przez producenta dla danego typu GIS .

Konfiguracja GIS oprata o zoptymalizowane moduły , ułatwia zarówno badania wysokonapięciowe jak i serwis GIS w w MSK z napięciami roboczymi 66 kV oraz 220 kV w warunkach morskich , zwłaszcza że MSK są zwykle usytuowane z znacznej odległości od brzegu. Patrząc na fragment pogładowego schematu głównego MSK (patrz RYS. 6) , z zastosowaniem GIS na napięcia $U_n = 72,5 \text{ kV}$ oraz $U_n = 300 \text{ kV}$ (patrz RYS. 7 oraz RYS. 8) , można zauważyć , że spełnione jest wymaganie : odłączenie przekładników napięciowych oraz ograniczników przepięć , na czas prób wysokonapięciowych w stacji MSK , z zastosowaniem trójpołożeniowego odłączniko-uziemiajaka , czyli aparatu który w drugim położeniu jest otwarty , a w trzecim położeniu styki ruchome są połączone ze stykiem stałym uziemiającym.



RYS. 6. Fragment poglądowego schematu Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK) z zastosowaniem GIS z $U_n=72,5$ kV oraz GIS z $U_n= 300$ kV , (napięcie pracy MSK : 66 kV oraz 220 kV) [1].

Owalem koloru czerwonego (patrz RYS.6) wyodrębniono schemat pola transformatorowego „silnoprowadowego” GIS na napięciu 72,5 kV typu ELK-04 (patrz RYS. 7) , we wnętrzu MSK na Morzu Północnym.

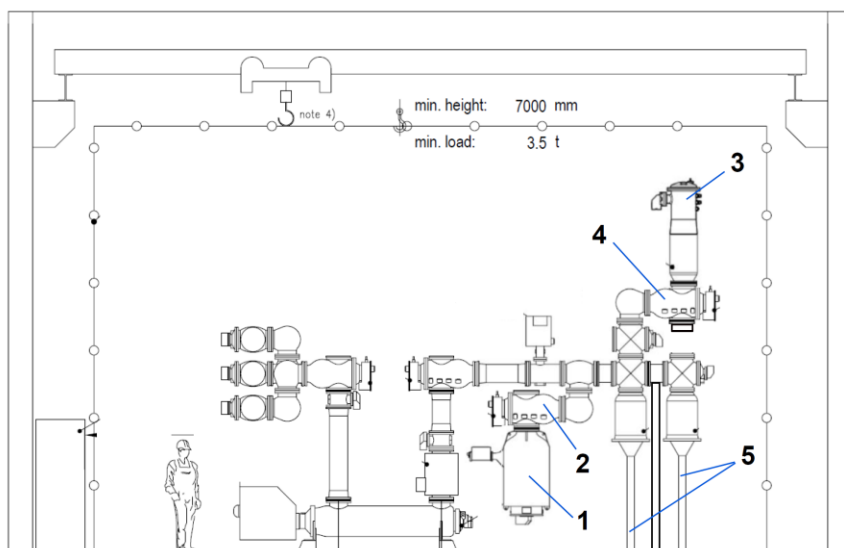


RYS. 7. Przykład konfiguracji pola „silnoprowadowego” GIS typu ELK-04 , na napięciu $U_n = 72,5 \text{ kV} \dots 145 \text{ kV}$ ($I_n = 4000 \text{ A}$; $I_{sc} = 63 \text{ kA}$) w Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK) , zasilającego „Offshorowy” Transformatorów Mocy (OTM) o mocy 400 MVA [1].

- 1- ograniczniki przepięć ZnO poszczególnych faz we wspólnej obudowie
- 2- napęd odłączniko-uziemnika dla odłączenia ZnO od kabli 66 kV , a następnie jego uziemienia
- 3- napęd uziemnika szybkiego dla uziemienia kabli 66 kV , podłączonych do wspólnej szyny
- 4- przekładnik napięciowy (VT)
- 5- napęd odłączniko-uziemnika dla odłączenia VT od kabli a następnie jego uziemienia
- 6- odłączniko-uziemnik za wyłącznikiem
- 7- wyłącznik (72,5 kV/4000 A/63 kA)
- 8,9,10 - przedziały dla podłączenia kabli (po trzy kable na fazę , w sumie 9 kabli)

gdzie wyspecyfikowano podstawowe elementy funkcjonalne pola , zoptymalizowane dla MSK dużej mocy . „Silno-prądowe” pole GIS typu ELK-04 (patrz RYS. 7) zasila OTM o parametrach : napięcie dolne - 66 kV ; napięcie górne - 220 kV ; moc do jednostki do 400 MVA.

W przypadku OTM o mocy 400 MVA , prąd roboczy ELK-04 przy napięciu roboczym 66 kV wynosi 3500 A. Owalem koloru zielonego (patrz RYS. 6) zaznaczono schemat pola GIS na napięcie $U_n = 300$ kV (patrz RYS. 8) , aplikowane dla napięcia w MSK 220 kV lub 275 kV. Obecnie najbardziej rozpowszechnionym napięciem morskich kabli „eksportowych” jest 220 kV , ale rozpoczęto już w MTW stosowanie trójżyłowych kabli „eksportowych” na wyższe napięcie , czyli 275 kV .

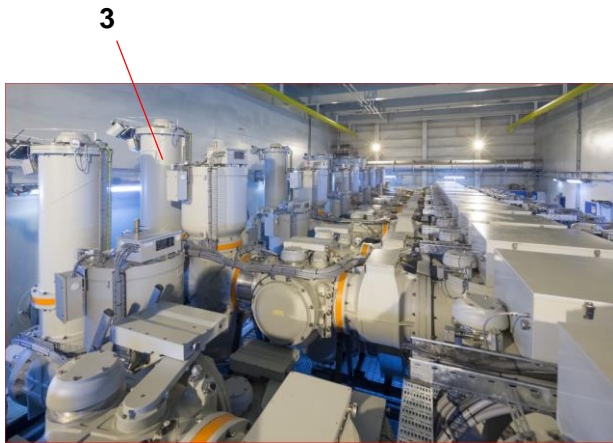
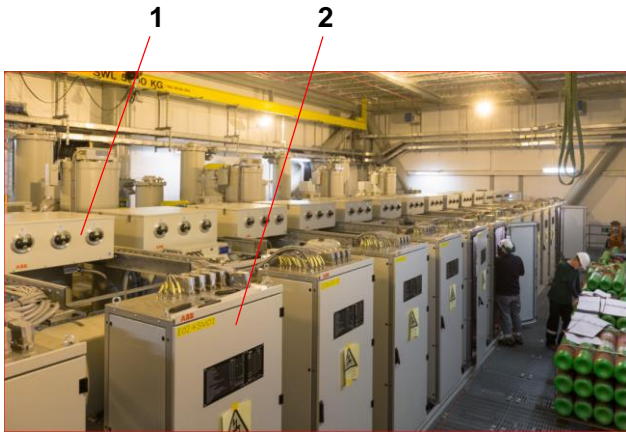


RYS. 8. Konfiguracja kompletnego pola rozdzielnic na napięcie $U_n = 300$ kV w izolacji gazowej , typu ELK-14/300 stosowana w Morskich Stacjach Kolektorowych (MSK) z napięciami roboczymi 220 kV lub 275 kV [1].

- 1- przekładnik napięciowy (VT) podłączony do GIS poprzez odłączniko-uziemnik
- 2- odłączniko-uziemnik zintegrowany z VT
- 3- ogranicznik przepięć ZnO podłączony do GIS poprzez odłączniko-uziemnik
- 4- odłączniko-uziemnik zintegrowany z ZnO
- 5- podłączenie dwóch kabli 220 kV lub 275 kV do jednej fazy

Konfiguracja pola ELK-14/300 zachowuje cechy funkcjonalne jak w przypadku GIS na napięcie 72,5 kV (patrz tekst wyżej) , i umożliwia podłączenie dwóch morskich kabli „eksportowych” na napięcie 220 kV lub 275 kV na fazę. Nie chodzi tu o obciążalność kabla (OTM 400 MVA , to prąd po stronie 220 kV o wartości : 1050 A) , a o redundancję związaną z ilością (zapasem) „eksportowych” kabli morskich , ułożonych na dnie morza , zasilających stacje lądowe „onshore” dużych mocy na napięcia 220kV oraz 400 kV , zintegrowane z krajowym system energetycznym.

Pole dopływowe w MSK , zasilane np. z 11 MTW (patrz RYS. 1) , którego schemat zaznaczono owalem koloru niebieskiego (patrz RYS. 6) , powinno być wyposażone w ograniczniki przepięć ZnO (patrz RYS. 9) , z licznikami zadziałań ZnO , co pozwala kontrolować proces starzeniowy struktury chemicznej ZnO , ograniczający czas pracy tych urządzeń.



RYS. 9. Przykład wielopolowej rozdzielnic w izolacji gazowej typu ELK-04 , $U_n = 72,5 \text{ kV}$, w Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK) dużej mocy , zainstalowanej po stronie 66 kV „Offshorowego” Transformatora Mocy (prąd szyn zbiorczych 4000 A prąd wyłączalny 63 kA) [1].

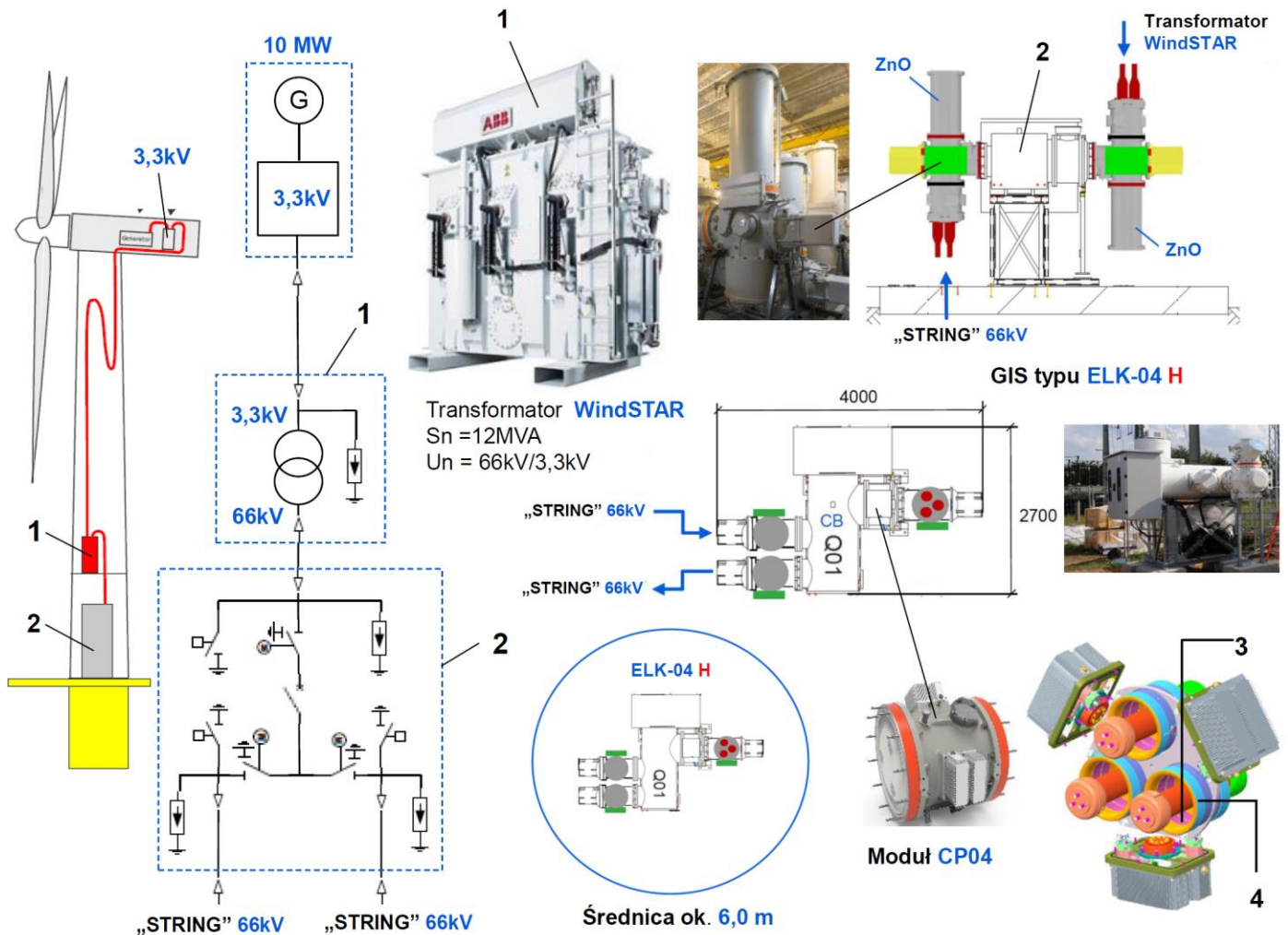
- 1- napęd hydrauliczno-sprężynowy wyłącznika typu HMB
- 2- szafy sterujące z przekaźnikami zabezpieczeniowymi
- 3- ograniczniki przepięć ZnO trzech faz we wspólnej obudowie
- 4- liczniki zadziałań ograniczników ZnO w poszczególnych fazach
- 5- uziemniki szybkie szyn zbiorczych

3. Wyprowadzenie mocy z Morskiej Turbiny Wiatrowej , konfiguracja pola GIS w aspekcie bezpieczeństwa obsługi , cyfrowe wykonanie urządzenia .

Obecnie budowane Morskie Farmy Wiatrowe (MFW) mają moc od 800 do 1400 MW i więcej. Jeśli dla uproszczenia przyjąć moc MFW np. 1200 MW oraz moc Morskiej Turbiny Wiatrowej (MTW) 12 MW , to na obszarze takiej MTW należy rozmieścić 100 jednostek MTW. Inwestorzy rozważają budowę kompleksów MTW na Bałtyku o mocy od 20 do 30 GW , a to oznacza instalację od 2.000 do 3.000 jednostek MTW. Jeśli zastosować pole GIS dla wyprowadzenia mocy z jednostki MTW (patrz RYS. 10) , to takie pole składa się z co najmniej 4 oddzielnych przedziałów gazowych . W przypadku pracy 2.000 OTW w kompleksie MTW , pod napięciem 66 kV (a w przyszłości 110 kV) - 8.000 (osiem tysięcy) przedziałów gazowych ! . Jeśli wziąć pod uwagę obszar kompleksu MTW ok. 4.000 km² oraz okresy sztormów na morzu (okres wiosenno-jesienny) , to logicznym jest pytanie : jakie rozwiązania należy zastosować w przypadku powolnej utraty szczelności danego przedziału GIS (rozważany 30 letni okres eksploatacji GIS) .W takim wypadku ciśnienia gazu izolacyjnego w danym przedziale GIS może się zrównać z ciśnieniem atmosferycznym , czyli 0,1 MPa (ciśnienie absolutne) !

Innowacyjne pole GIS typu ELK-04 H produkcji ABB , skonstruowane dla zakresu napięć od 72,5 kV do ...145 kV (patrz RYS. 10) , to urządzenie , jakie pozwala pozytywnie odpowiedzieć na powyższe pytanie , gdyż przez określony czas może pracować przy spadku ciśnienia do wartości 0,1 MPa (abs.) , oraz wyłączyć prąd roboczy OTW z napięciem wyjściowym 66 kV o mocy 12 MW , równy 105 A. Inną zaletą techniczną pola GIS typu ELK-04 H jest możliwość realizacji schematu głównego , gwarantującego wysoki poziom bezpieczeństwa obsługi , włączając naprawy serwisowe gdyż zestaw aparatów zastosowanych w ELK-04 H umożliwia odłączenie i uziemienie kabla 66 kV od strony transformatora podwyższającego typu WindSTAR , jak i dwóch kabli 66 kV , podłączonych do ELK-04 H , pracujących w

„STRING”-u , z użyciem własnych uziemników szybkich (patrz schemat RYS. 10) . Kable 66 kV podłączone do ELK-04 H są zabezpieczone ogranicznikami przepięć ZnO , ze względu na przepięcia generowane na skutek częstych uderów piorunowych w warunkach morskich , które mogą narazić izolację transformatora podwyższającego zarówno od strony OTW j jak i z obydwu kierunków od strony „STRING”- ów. Trójpołożeniowe odłączniko-uziemniki pozwalają wyizolować i uziemić wyłącznik ELK-04 H , co pozwala w bezpieczny sposób wykonać np. okresowy przegląd komór gaszeniowych tego aparatu. Z końcem 2020 roku będzie dostępne wykonanie pola typu ELK-04 H w „wersji cyfrowej” (patrz Rys. 10) , gdzie w kompaktowym module typu CP04 są zastosowane sensory napięciowe (U) oraz prądowe (I) klasy 0,2 , zapewniające liniowy pomiar U/I w całym zakresie pomiarowym ! .



RYS. 10. Innowacyjne urządzenia produkcji ABB , przeznaczone dla wyprowadzenia mocy z Morskiej Turbiny Wiatrowej (MTW) o mocy 10 - 12 MW , podłączonej do kabla morskiego napięciem roboczym 66 kV [1].

- 1- transformator podwyższający 66 kV/ 3,3 kV typu WindSTAR , z biodegradowalną cieczą izolacyjną (w przypadku morskiej turbiny 12 MW , moc transformatora WindStar - 14 MVA)
- 2- pole rozdzielnic GIS , $U_n = 72,5$ kV typu ELK-04 H , z horyzontalnym położeniem komór gaszeniowych wyłącznika
- 3- sensory napięciowe (U) w module CP04 dla cyfrowego wykonania pola GIS typu ELK-04 H
- 4- sensory prądowe (I) w module CP04 (cewki Rogovskiego).

WNIOSKI

Należy przewidzieć taką liczbę „Offshorowych” Transformatorów Mocy (OTM), oraz moc poszczególnych jednostek zainstalowanych na Platformie Morskiej , aby w przypadku przeglądu serwisowego lub naprawy na miejscu zainstalowania OTM , była możliwość przesłania 100% maksymalnej mocy generowanej w Morskiej Farmie Wiatrowej (MTW) , za pośrednictwem pozostałych pracujących OTM.

Producent grupy OTM , zainstalowanych we wspólnej obudowie Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK) , jest odpowiedzialny za konstrukcję , dobór , oraz uruchomienie urządzeń wymuszających obieg oleju transformatorowego , oraz

elementów łączących każdą OTM z systemem chłodzenia, wyposażonym w chłodnice, zwykle zainstalowane na zewnątrz obudowy MSK.

Tylko dobrze sprawdzona konstrukcja rozdzielnic z izolacją gazową (GIS) może zostać zaaprobowana w przypadku zastosowania GIS w Morskich Stacjach Kolektorowych (MSK), co należy potwierdzić referencjami, związanymi z pracą GIS w MSK. Wymiernym wskaźnikiem tych referencji jest parametr MTBF, tzn. liczba pól GIS w eksploatacji pomnożona przez czas ich eksploatacji („pola x lata”), podzielona przez liczbę awarii powodujących przerwę w eksploatacji danego typu pola GIS. Ze względu na utrudniony dostęp oraz trudne warunki eksploatacji (duża wilgotność oraz zasolenie otaczającego powietrza), rekomendowana liczba „pola x lata” dla danego typu GIS powinna być równa lub większa od 60.000 lat (sześćdziesiąt tysięcy „pola x lat”), i dla tej wartości lub dla wartości wyższej producent GIS powinien potwierdzić parametr MTBF.

Producenci pól GIS przeznaczonych do instalacji w zespole Morskiej Turbiny Wiatrowej (MTW), przekazujących generowaną moc w MTW do Morskiej Stacji Kolektorowej (MSK), powinni wyznaczyć laboratoryjnie poziom wytrzymałości izolacji GIS, podnosząc to napięcie o częstotliwości sieciowej, znacząco powyżej napięcia roboczego (obecnie napięcie wyjściowe z MTW: 66 kV), i ten test wysokonapięciowy należy wykonać dla wszystkich przedziałów gazowych GIS w przypadku obniżenia ciśnienia gazu izolacyjnego do wartości ciśnienia atmosferycznego, tj. do 0,1 MPa (abs). Czas testu: 60 sekund. Wymagany jest również specjalny test łączeniowy, polegający na skutecznym wyłączeniu dopuszczalnego prądu roboczego, i wartość tego prądu dopuszczalnego należy określić odpowiednimi próbami laboratoryjnymi, także w przypadku spadku ciśnienia w komorze gaszeniowej wyłącznika, do poziomu ciśnienia atmosferycznego, tzn. do 0,1 MPa (abs).

Literatura :

[1] A. Gul, „Innowacyjne rozwiązania zastosowane w Kompleksie Morskich Farm Wiatrowych Wielkiej Mocy, z uwzględnieniem wymagań dla zabezpieczenia morskiej sieci kablowej prądu stałego”. Studium rozmieszczone na stronie SEP, 2019.

[2] DNV-GL Raport No.:113799-UKBR-R02,Rev.2