

Dr inż. Aleksandr Gul
ABB Sp. z o.o.
Ekspert SEP

WYPROWADZENIE MOCY Z KOMPLEKSU MORSKICH FARM WIATROWYCH

***Streszczenie:** Artykuł dotyczy innowacyjnych rozwiązań w zakresie schematów obwodów głównych, oraz sposobu wyprowadzenia mocy z morskiej farmy wiatrowej wielkiej mocy, w której Stacja Kolektorowa 1600MVA prądu przemiennego (AC) jest przystosowana do zasilania Stacji Konwerterowej prądu stałego (DC) o mocy rzędu 1000MW. Wspomniane stacje energetyczne są instalowane na wielkogabarytowych platformach morskich z masą dochodzącą do 20 tysięcy ton, w których z racji złożoności schematu stacji konieczne jest zastosowanie rozdzielnic w izolacji gazowej (GIS). Zastosowanie GIS umożliwia zainstalowanie kilku transformatorów mocy (np. 4-6 jednostek) zintegrowanych z GIS, z zastosowaniem połączeń kablowych. Moc obecnie produkowanych morskich turbin wiatrach dochodzi do 10 MW, a napięcie transformatora zasilającego morskie kable łączące morskie turbiny wiatrowe wzrosło z 33kV do 66kV, co zostało uwzględnione zarówno w schematach poglądowych Stacji Kolektorowych, jak i w zakresie doboru transformatorów mocy oraz urządzeń łączeniowych, co zaprezentowano w artykule.*

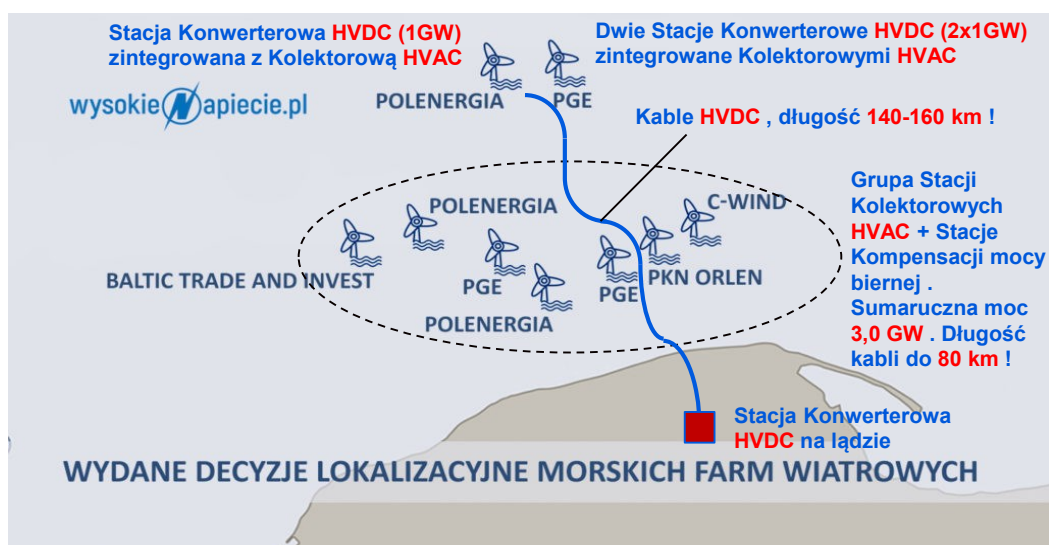
WPROWADZENIE

Dalszy wzrost poziomu emisji spalin z elektrowni opalanych węglem kamiennym lub brunatnym związany z budową nowych bloków energetycznych z powodu nieuchronnego wzrostu zapotrzebowania na generowaną moc w Polsce, będzie związany z dalszym pogorszeniem stanu zanieczyszczenia powietrza w Polsce, oraz wysokimi karami płaconymi za prawo emisji tychże spalin. Dodatkowym problemem są wyczerpujące się pokłady węgla brunatnego, zlokalizowane w pobliżu wielkich elektrowni opalanych węglem brunatnym. Wzrost mocy generowanej w polskim systemie energetycznym można zapewnić w oparciu o budowę elektrowni jądrowych, lub odnawialnych źródeł w oparciu o morskie farmy wiatrowe wielkiej mocy, oddalone od lądu, a przez to niewidoczne gołym okiem, oraz nieuciążliwe dla miejscowej ludności ze względu na generowane fale dźwiękowe. Do publicznej wiadomości podano informację odnośnie przyznania lokalizacji kompleksów morskich farm wiatrowych na Bałtyku o łączonej mocy 6,0GW (patrz Rys. 1). Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie problematyki stacji energetycznych wielkiej mocy instalowanych na platformach morskich, z uwzględnieniem alternatywnych schematów głównych Stacji Kolektorowych HVAC wielkiej mocy, przystosowanych do zasilania morskiej Stacji Konwerterowej HVDC. W artykule przedstawiono liczne zdjęcia podstawowych urządzeń takich jak transformatory mocy oraz rozdzielnice w izolacji gazowej GIS, zainstalowane w morskich stacjach energetycznych HVAC/HVDC wielkiej mocy, rozmieszczonych wewnątrz obudowy wielkogabarytowych platform morskich, dostarczonych i uruchomionych przez firmę ABB. Innymi ważnymi urządzeniami w morskich farmach wiatrowych są transformatory oraz rozdzielnice GIS, przystosowane do zainstalowania wewnątrz dolnej części wieży, zwieńczonej turbiną wiatrową dużej mocy rzędu 10MW, zasilającą transformator podwyższający 3,3kV/66 kV.

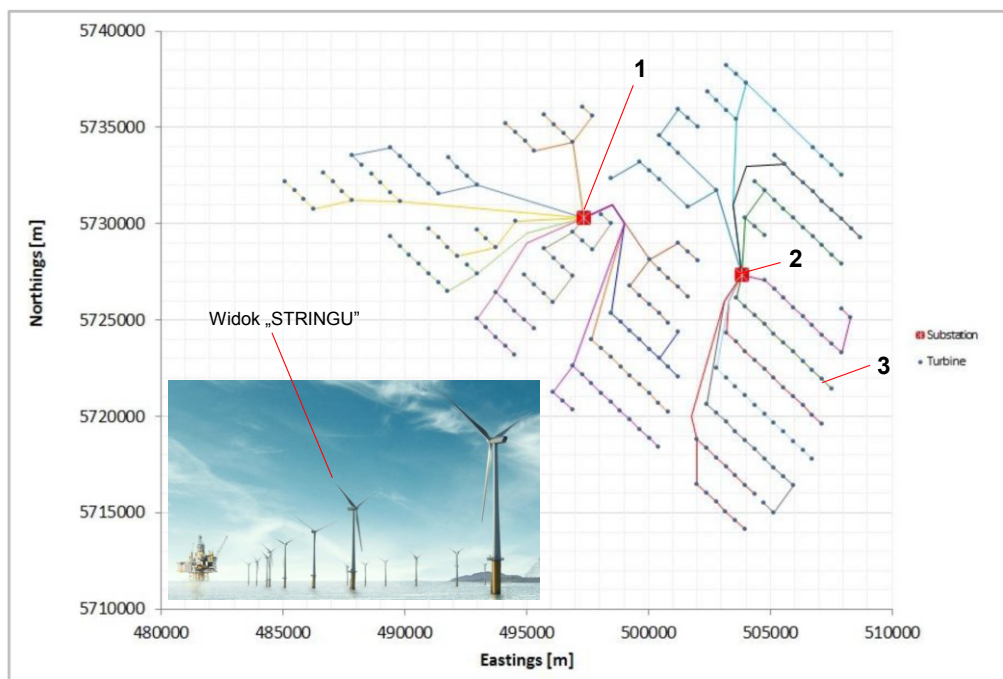
1. Postęp w zakresie doprowadzenia mocy z morskich turbin wiatrowych do Stacji Kolektorowej HVAC, w rezultacie wzrostu napięcia wyjścia z zespołu turbiny z 33kV do 66kV.

Wiodący producenci morskich turbin wiatrowych prowadzą intensywne prace mające na celu dalszy wzrost mocy generowanej przez pojedynczą jednostkę. Jeszcze kilka lat temu budowano morskie farmy wiatrowe z napięciem wyjścia z zespołu turbiny 33kV, co przy mocy turbin 4-6MW ograniczało ilość do 5 jednostek połączonych kablem morskim AC w tzw. „STRINGU” z powodu strat w tym względnie długim kablu. W chwili obecnej są już produkowane turbiny wiatrowe o znacznie większej mocy np. 9,5MW typu MHI Vestas V164, i dzięki podwyższeniu napięcia wyjścia z zespołu turbiny z 33kV do 66kV w „STRINGU” jest możliwe połączenie grupy 10-11 jedno-

stek kablem morskim 66kV (patrz Rys. 2) . W rezultacie poziom mocy dostarczanej z pojedynczego „STRINGU” do Stacji Kolektorowej HVAC (patrz Rys. 3) może osiągnąć wartości 60-90MW!



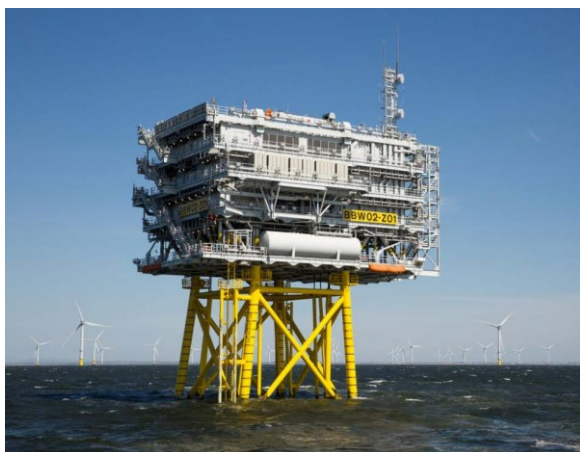
Rys. 1. Planowane lokalizacje kompleksów morskich farm wiatrowych na Bałtyku o łącznej mocy 6,0 GW [źródło: WysokieNapięcie.pl]



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

1,2 - stacje kolektorowe (stacja kolektorowa No. 1 zasilana z 117 turbin wiatrowych !)

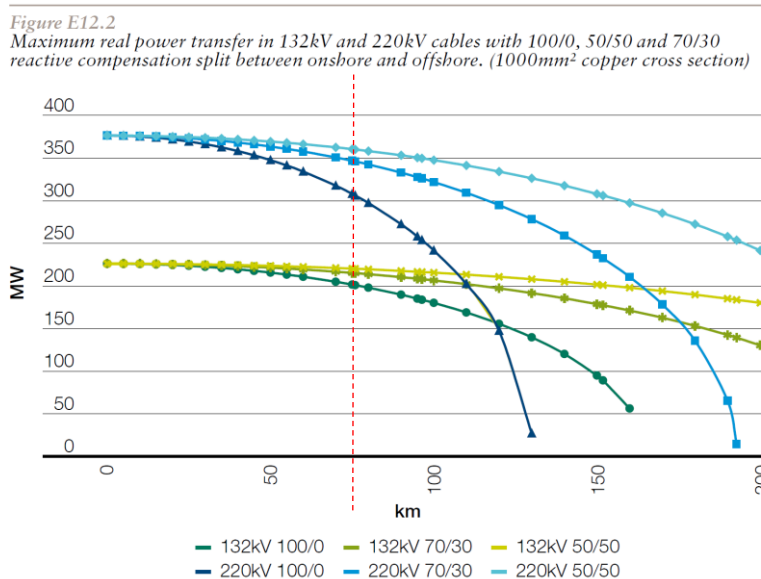
3 - ”STRING” 66 kV , zbierający moc z 11 turbin wiatrowych



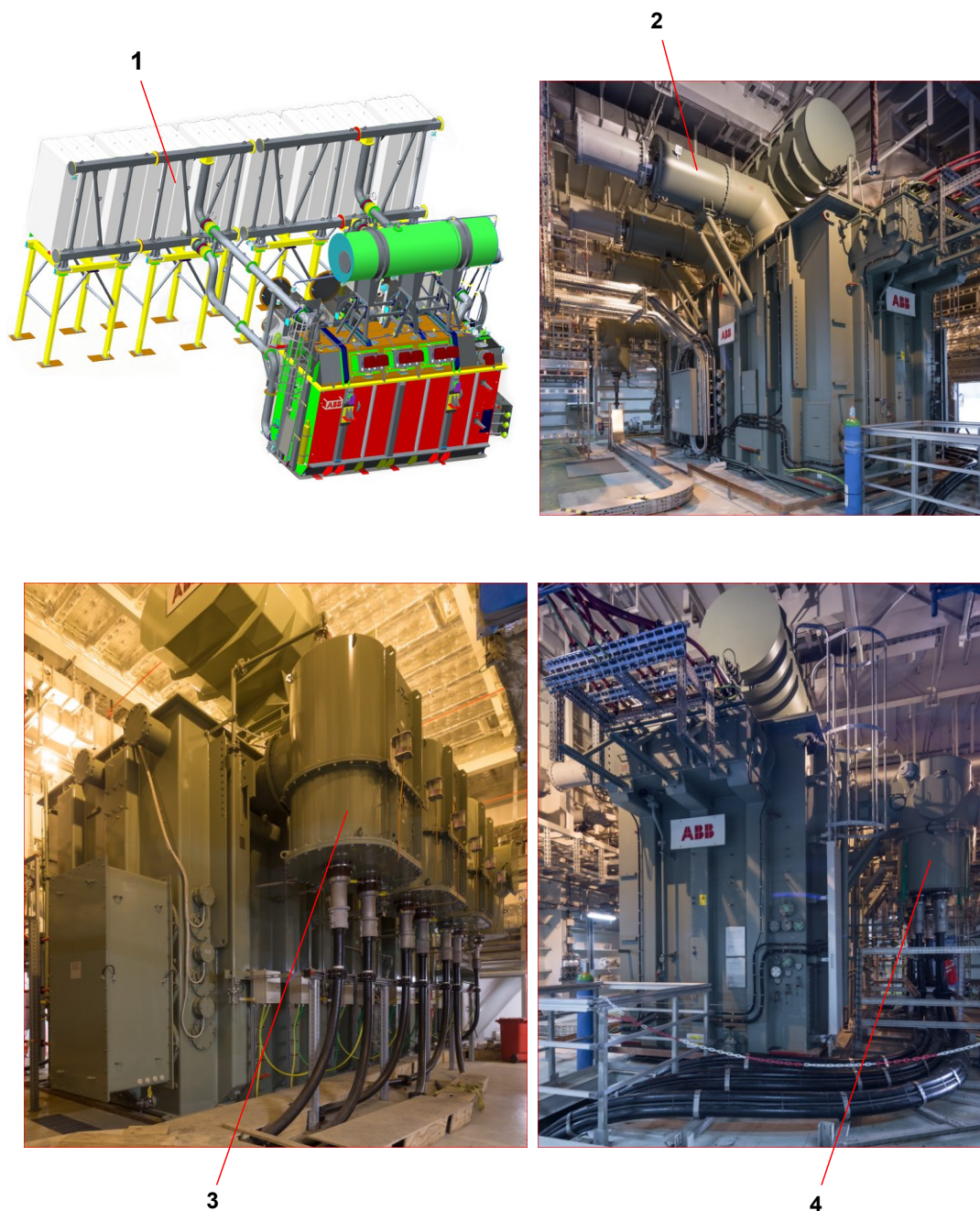
Rys. 3. Widok platform ze stacjami kolektorowymi HVAC , 66kV/132 -220kV

2. Techniczne i ekonomiczne przyczyny dla budowy Stacji Kolektorowych HVAC z kompensacją mocy biernej , oraz Stacji Kolektorowych HVAC zintegrowanych ze Stacją Konwerterową HVDC .

Morskie kable „eksportowe” HVAC o długości kilkudziesięciu kilometrów , łączące morskie Stacje Kolektorowe ze Stacjami Energetycznymi na lądzie , to z reguły kable 220 kV. Zwykle Stacje Kolektorowe HVAC wielkich mocy są budowane w odległości powyżej 30-40 km od brzegu morza. W przypadku lokalizacji przyznanych na Bałtyku (patrz Rys. 1) najbliższe farmy wiatrowe o łącznej mocy 3,0GW wymagają ułożenia kabli „eksportowych” 220 kVAC o długości około 70-80 km (z uwzględnieniem przeszkód na dnie morskim) , co wymusza zastosowanie dławików kompensacyjnych po obu stronach kabla 220 kV, ze względu na poziom strat w ich pojemności (patrz Rys. 4) Najbardziej oddalone lokalizacje bałtyckich farm wiatrowych z sumaryczną mocą 3,0GW (patrz Rys. 1) wymagają ułożenia kabla o długości 140-160km , a w takim przypadku konieczne jest zastosowanie kabla „eksportowego” HVDC np. +/- 320 kV, z czym związana jest budowa zarówno morskich Stacji Kolektorowych HVAC , oraz z nimi zintegrowanych Stacji Konwerterowych , i taki przypadek jest przedmiotem rozważań w niniejszym artykule.

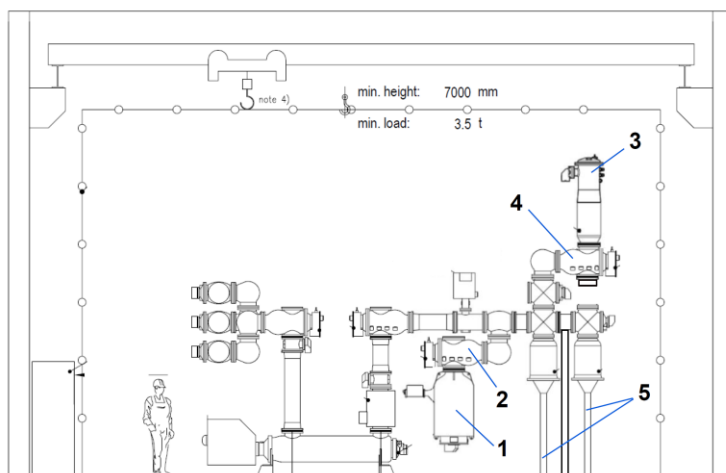


Rys. 4. Maksymalna moc jaka może być przekazana kablem morskim AC 132 kV oraz 220 kV z podziałem kompensacji mocy biernej - dławiki kompensacyjne z dwóch stron kabla „eksportowego” HVAC , w funkcji długości tego kabla . Przekrój żyły Cu 1000mm² [źródło: Electricity Ten Year Statement 2015, Appendix E , Technology] .



Rys. 6. Specyficzne cechy konstrukcyjne transformatorów mocy instalowanych na platformach morskich w Stacjach Kolektorowych HVAC (po prawej stronie moc transformatora 960MVA).
 1- autonomiczny system chłodzenia transformatora (radiatory na zewnątrz stacji)
 2- bezpośrednie podłączenie transformatora mocy do GIS szynoprzewodem po stronie 400kV
 3,4- podłączenie dwóch lub trzech kabli 66kV lub 110kV na fazę , z dużym przekrojem żyły

Jak już wcześniej wspomniano moc generowana w pojedynczym „STRINGU” 66kV może osiągać wartości 60-90MW . Na schemacie Stacji Kolektorowej 1600MVA/66kV/220kV pokazano podłączenie 16 „STRINGÓW” - po 4 w każdej sekcji (patrz Rys. 5). Zastosowanie czterech „offshorowych” transformatorów mocy 400MVA/66kV/220kV z autonomicznym systemem chłodzenia (patrz Rys. 6) jest związane z założeniem , że w przypadku odstawienia jednej jednostki trzy pozostałe są w stanie przenieść 100% mocy generowanej w farmie wiatrowej , zasilającą pobliską Stację Kolektorową o mocy 1000MW. Do transformatorów 400MVA po stronie 66 kV podłączono trzy kable na fazę , w rezultacie do przedziałów kablowych pola transformatorowego GIS typu



Rys. 7. Konfiguracja kompletnego pola rozdzielnic 220kV w izolacji gazowej Typu ELK-14/300 stosowana w morskich Stacjach Kolektorowych HVAC dużej mocy.

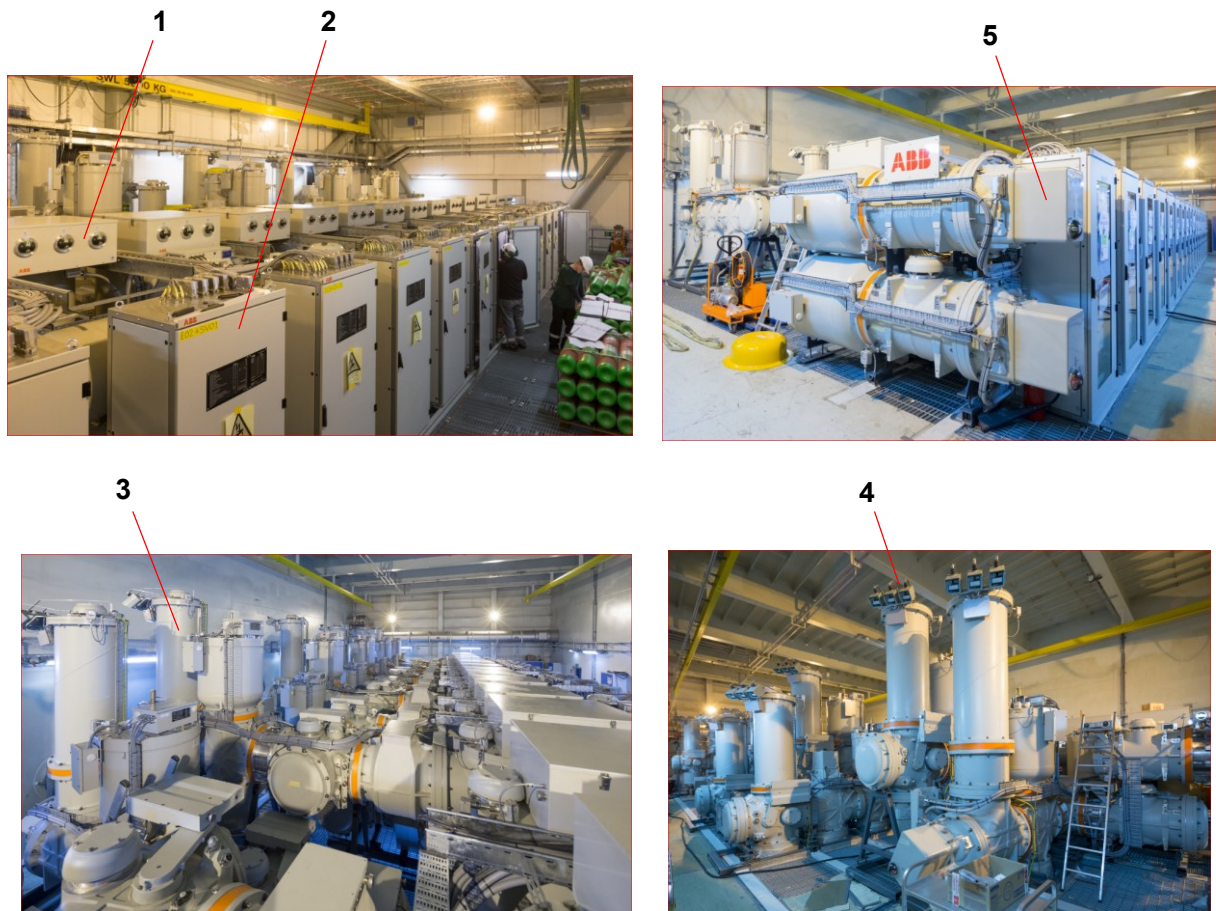
- 1- przekładnik napięciowy (VT) podłączony do GIS poprzez odłączniko-uziemnik
- 2- odłączniko-uziemnik zintegrowany z VT
- 3- ogranicznik przepięć ZnO podłączony do GIS poprzez odłączniko-uziemnik
- 4- odłączniko-uziemnik zintegrowany z ZnO
- 5- podłączenie dwóch kabli 220 kV do jednej fazy

ELK-04 można podłączyć 9 kabli (patrz Rys. 9), co pozwala przewodzić prąd na poziomie 4000A. W celu ułatwienia prób zdawczo-odbiorczych (próby HV/50Hz/1min. na miejscu) ograniczniki przepięć ZnO oraz przekładniki napięciowe VT na napięciu 66kV i 220 kV, są podłączone poprzez odłączniko-uziemnik (patrz Rys. 5). W przypadku pola dopływowego 66 kV transformatora 400MV (patrz Rys. 5) przekładnik napięciowy VT jest odłączany z obydwu stron po otwarciu odłączniko-uziemników 5 oraz 6 (patrz Rys. 9).

Po stronie 220kV transformatorów 400 MVA zastosowano rozdzielnicę GIS typu ELK-14 z wyłącznikami 4000A/63kA (patrz Rys. 5 oraz Rys.7). Do pól ELK-14 wyprowadzających moc ze Stacji Kolektorowej HVAC 1600MVA do Stacji Konwerterowej HVDC 1000MW są podłączone dwa kable morskie 220 kV na fazę, aby w wypadku uszkodzenia pozostałych kabli 220 kV przenieść 100% mocy między tymi stacjami. Powszechnie wiadomo, że najbardziej awaryjnym elementem urządzeń łączeniowych są ich napędy, zwłaszcza pracujące w warunkach otoczenia z wilgotnym i zasolonym powietrzem. Napędy hydrauliczno-sprężynowe typu HMB stosowane w GIS 66-400 kV wyróżniają się wysoką niezawodnością w porównaniu z innymi typami napędów (patrz Rys. 12), co znalazło praktyczne potwierdzenie także w przypadku GIS pracujących na platformach morskich. W morskich farmach wiatrowych szczególnie ważnym zagadnieniem do rozwiązania jest właściwy dobór, oraz miejsce zainstalowania ograniczników przepięć ZnO (patrz Rys. 5). W warunkach morskich należy się liczyć z bardzo częstymi wyładowaniami atmosferycznymi z względnie dużą energią, narażającymi nie tylko izolację turbin wiatrowych, ale i urządzenia wewnątrz Stacji Kolektorowych oraz Konwerterowych. Z tego względu są montowane liczniki zadziałań ograniczników ZnO (patrz Rys. 8), zwłaszcza w polach GIS podłączonych do „STRINGÓW”, co pozwala ocenić stan ich gotowości go pracy.

4. Koncepcja morskiej Stacji Kolektorowej HVAC 1600MVA/66kV/400kV zintegrowanej ze Stacją Kolektorową HVDC 1000MW.

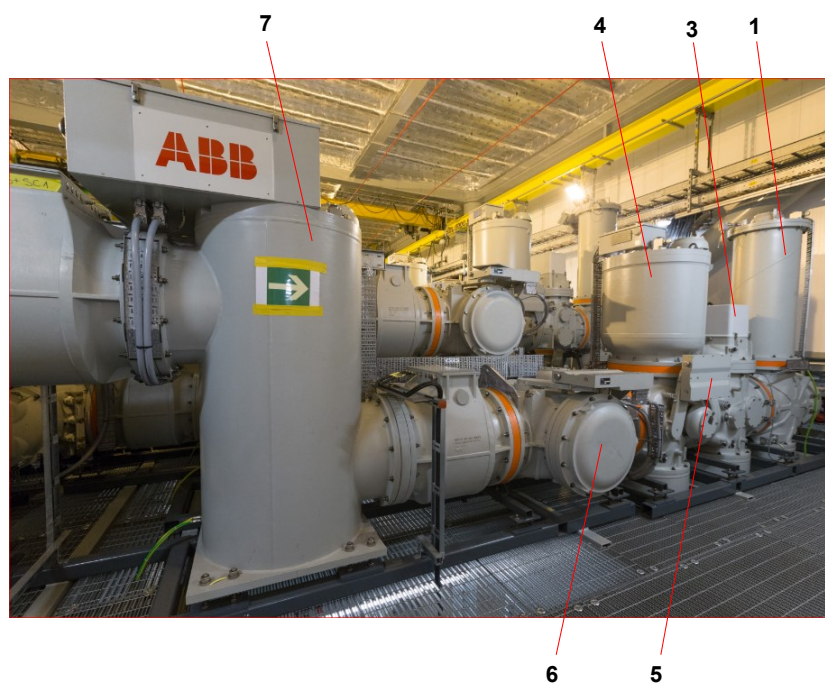
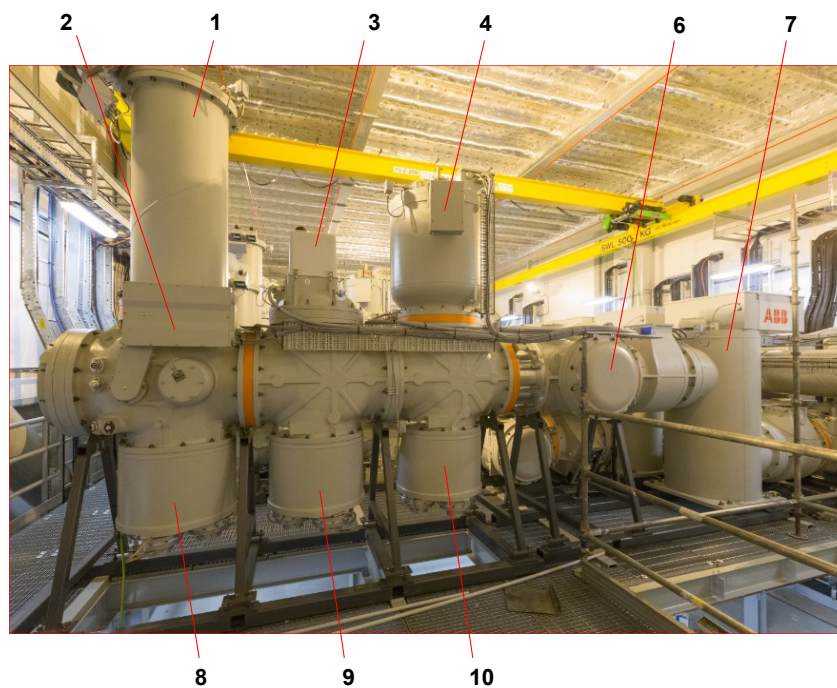
Transfer mocy z morskich turbin wiatrowych zainstalowanych w kompleksie farm wiatrowych wielkiej mocy na napięciu 66 kV ułatwia zastosowanie trójzwojowego transformatora wielkiej mocy np. 960 MVA, spełniającego wymagania środowiskowe i konstrukcyjne dla zainstalowania takich jednostek na platformie morskiej. Schemat poglądowy Stacji Kolektorowej HVAC 1600MVA/66kV/400kV zintegrowanej ze Stacją Kolektorową HVDC 1000MW przedstawiono na



Rys. 8. Przykład wielopolowej rozdzielnicy w izolacji gazowej typu ELK-04 , zainstalowanej w morskiej Stacji Kolektorowej HVAC wielkiej mocy po stronie 66 kV (prąd szyn zbiorczych 4000A prąd wyłączalny 63 kA).

- 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

na Rys. 13. Zastosowanie dwóch transformatorów trójzwojeniowych 960 MVA oraz GIS typu ELK-04 z podwójnym układem szyn zbiorczych z podłączeniem 8 „STRINGÓW 66kV do każdej sekcji, pozwala przesłać całą moc dostarczaną z 16 „STRINGÓW” do jednego z dwóch transformatorów, co gwarantuje bezprzerwową pracę Stacji, w sytuacji odstawienia jednego z transformatorów. Transformatory trójzwojeniowe 960MVA Stacji Kolektorowej HVAC połączono ze Stacją Konwerterową stosując pola rozdzielnicy GIS na napięcie 400 kV typu ELK-3 (patrz Rys. 11). Względny ekonomiczny przemawiają za integracją Stacji Kolektorowej HVAC wielkiej mocy ze Stacją Konwerterową, co umożliwia wielkogabarytowe platformy morskie przeznaczone dla stacji energetycznych wielkiej mocy takie jak DolWin-2 (patrz Rys. 10). Niektórzy inwestorzy ze względu na zagrożenie pożarowe preferują jednak oddzielne platformy morskie dla Stacji Kolektorowej HVAC oraz Konwerterowej HVDC, rozmieszczone w niewielkiej odległości od siebie, i połączone ze sobą kablem morskim (patrz Rys. 5).



Rys. 9. Przykład konfiguracji pola wieloprądowego 66 kV (4000A/63kA) rozdzielnicy gazowej typu ELK-04 stosowanego w morskich Stacjach Kolektorowych HVAC dla zasilania transformatorów mocy.

- 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 (4000A/63kA)
- 8,9,10 - przedziały dla podłączenia kabli (po trzy kable na fazę , w sumie 9 kabli)



Rys. 10. Widok platformy DolWin-2 ze Stacją Konwerterową DC, z kompletem wyposażenia produkcji ABB , o mocy 924 MW (masa platformy ok. 20.000 ton).

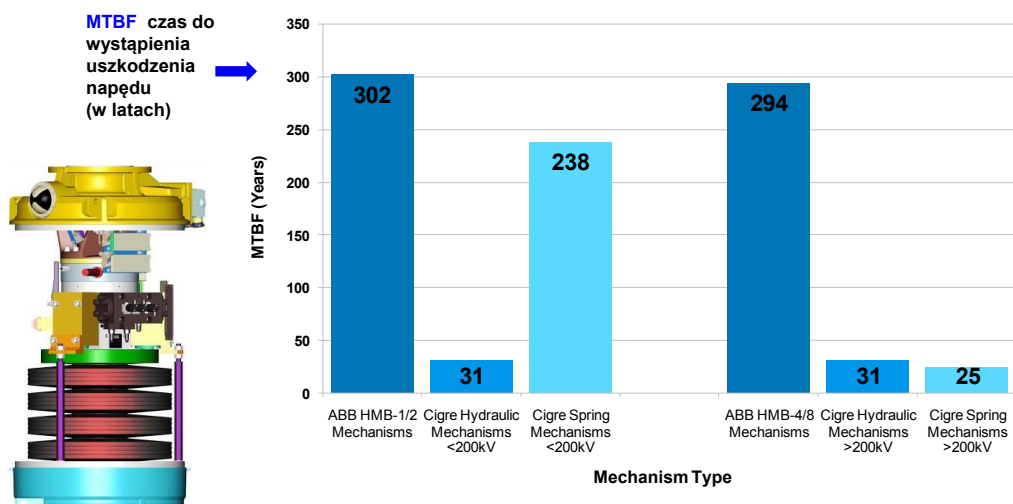
5. Innowacyjne urządzenia , dla wyprowadzenia mocy z morskich turbin wiatrowych dużej mocy , z napięciem wyjścia 66kV.

Morskie turbiny wiatrowe w nieodległej przyszłości mogą generować moc na poziomie 15 MW wy-prowadzaną na napięciu 66kV. Taki poziom napięcia wyjścia pozwala na zintegrowanie 10-11 turbin połączonych ze sobą kablem morskim w „STRINGU” (patrz Rys. 2) , i w takim wypadku pojedynczy „STRING” podłączony do szyn Stacji Kolektorowej HVAC (patrz Rys. 5 oraz Rys. 13) będzie dostarczał moc rzędu 150 MW!, co wymusza stosowanie GIS z dużym prądem szyn zbiorczych (co najmniej 4000A) , oraz z prądem wyłączalnym 63kA. Biorąc pod uwagę dużą moc pojedynczego „STRINGU” , oraz bezpieczeństwo personelu odpowiedzialnego za okresowe przeglądy w jednostce turbiny wiatrowej , zaproponowano zastosowanie w zespole turbiny specjalne wykonanie GIS typu ELK-04 H , z horyzontalnym położeniem wyłącznika (patrz Rys. 14) oraz transformator podwyższający 3,3kV/66kV typu WindSTAR , izolowany biodegradowalną cieczą izolacyjną. Transformator WindSTAR o mocy do 12 MVA przy względnie dużej wysokości jest wąski, także dzięki specjalnemu systemowi chłodzenia , co znakomicie ułatwia jego wprowadzenie przez otwór drzwiowy przy podstawie konstrukcji wsporczej turbiny wiatrowej.

Zestaw aparatów zastosowanych w GIS typu ELK-04 H umożliwia odłączenie i uziemienie kabla 66 kV zarówno od strony transformatora podwyższającego jak i dwóch kabli od strony „STRINGU” z użyciem uziemników szybkich . 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 turbiny wiatrowej jak i z obydwu kierunków od strony „STRINGU”. Trójpołożeniowe odłącznik-uziemniki pozwalają odłączyć i uziemić wyłącznik , co pozwala w bezpieczny sposób wykonać np. okresowy przegląd komór gaszeniowych tego aparatu. Z końcem 2018 roku będzie dostępne wykonanie GIS typu ELK-04 H w „wersji cyfrowej” (patrz Rys. 14) , 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 .

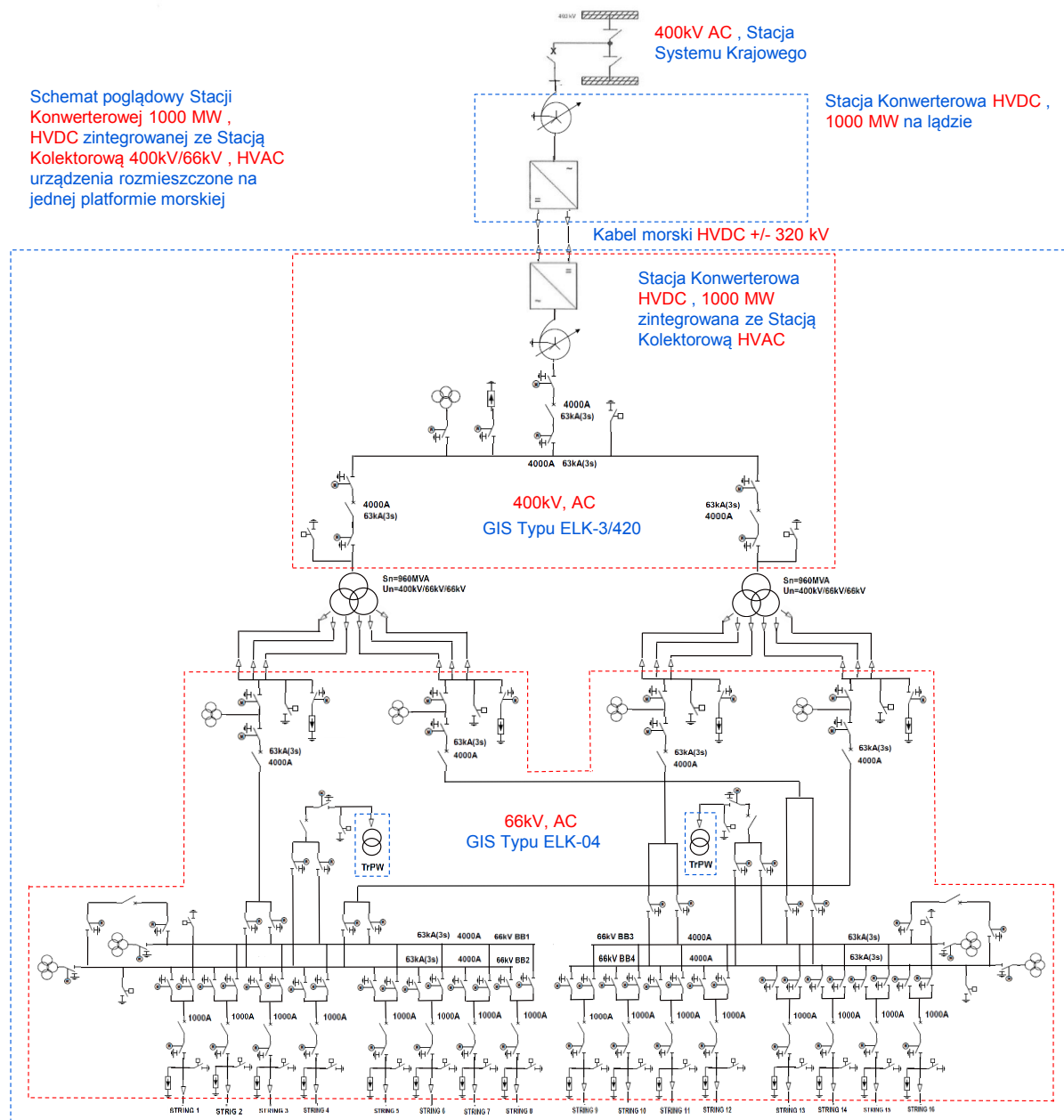


Rys. 11. Rozdzielnica gazowa 400kV typu ELK-3 zainstalowana na platformie DolWin-2 w Stacji Konwerterowej DC o mocy 924 MW , po stronie zasilania autotransformatora zintegrowanego z zespołem konwerterów.



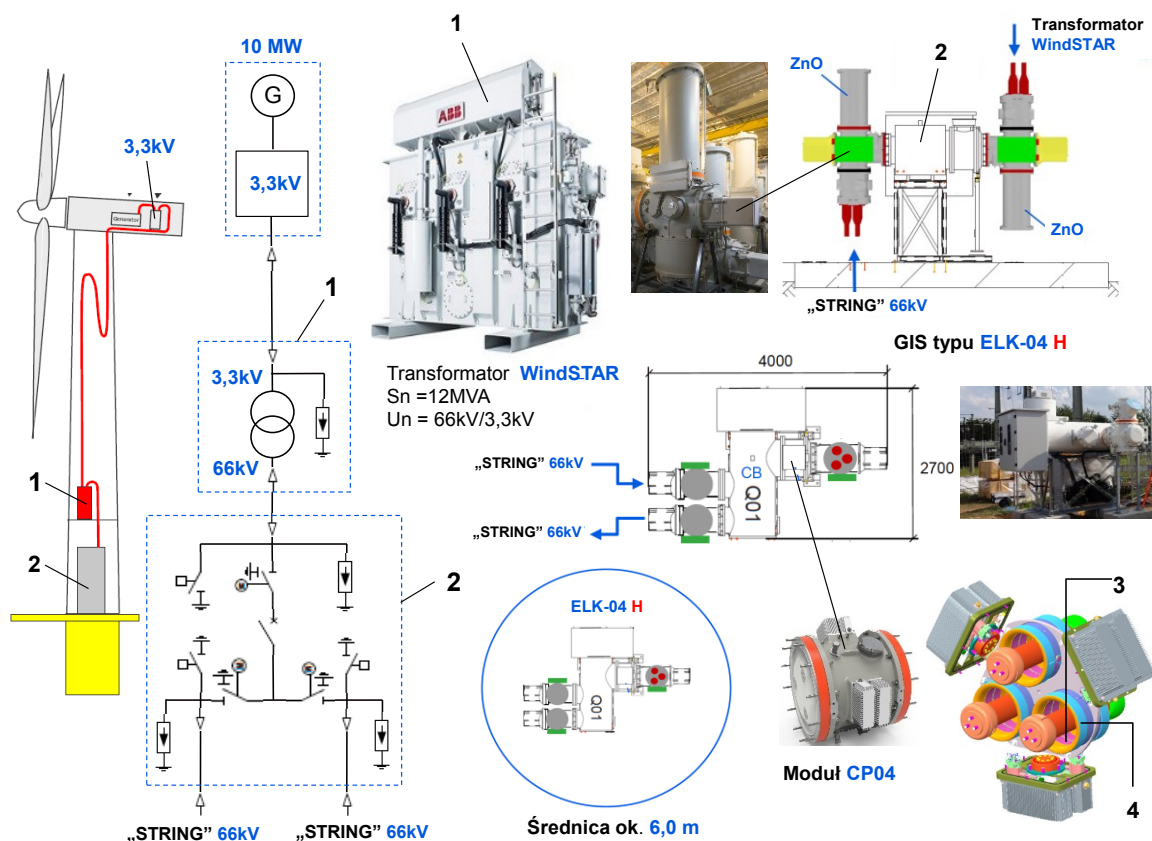
Napędy wyłączników 145 -1200 kV typu HMB.... **niezawodność**
Doświadczenie ponad **650.000 lat** /liczba wyłączników x okres eksploatacji/

Rys. 12. Niezawodność napędów hydrauliczno-sprężynowych typu HMB , przystosowanych do długotrwałej eksploatacji GIS 72,5 kV ; 220kV ; 400kV w warunkach środowiskowych Stacji Kolektorowych HVAC oraz Konwerterowych HVDC , instalowanych na platformach morskich .



Rys. 13. Schemat poglądowy morskiej Stacji Kolektorowej HVAC 66kV/400kV z trójzwojowymi transformatorami wielkiej mocy, zintegrowanej ze Stacją Konwerterową HVDC o mocy 1000MW, zespół stacyjny zasilany z 16 „STRINGÓW” 66kV.

Fabryka Transformatrów Mocj ABB Sp. z o.o. w Łodzi dostarczyła i uruchomiła ponad 40 „offshorowych” transformatorów mocy w różnych regionach świata , i w oparciu o ujednoliconą technologię produkcji TrafoSTAR , wrdżoną we wszystkich fabrykach Koncernu ABB , jest w stanie dos-tarczyć transformatory „offshorowe” dla bałtyckich farm wiatrowych o mocy do 500MVA. Grupa serwisowa ABB Sp. z o.o. posiada uprawnienia dopuszczające do pracy na platformach morskich , posiadając kompetencje w zakresie uruchomienia kompleksowego monitoringu transformatorów, umożliwiającego zdalną kontrolę ich gotowości do parcy.



Rys. 14. Innowacyjne urządzenia produkcji ABB , przeznaczone dla wyprowadzenia mocy z morskiej turbiny wiatrowej o mocy 10 MW , podłączonej do kabla morskiego 66 kV.

- 1- transformator 3,3kV/66kV typu WindSTAR z biodegradowalną cieczą izolacyjną
- 2- pole rozdzielnic GIS 66 kV typu ELK-04 H z horyzontalnym położeniem obudowy 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)

POWER TRANSFER FROM OFFSHORE WIND FARM COMPLEX

Abstract: The article concerns innovative solutions in the field of main circuit diagrams, important for the method of power output from high power offshore wind farm, in which an HVAC Collector Station 1600MVA is used to transfer a power to the HVDC Converter Station with a power value 1000MW . The mentioned power stations are installed on extremely large size offshore platforms with mass reaching up to 20,000 tons, in which due to the complexity of the station's scheme, it is necessary to use gas insulated switchgears (GIS). The use of GIS enables the installation of several power transformers (eg 4-6 units) integrated with GIS, using cable connections. The power of the currently produced offshore wind turbines reaches value 10 MW, and the voltage of the transformer energized the sea cables connecting wind turbines has increased from 33kV to 66kV, which was taken into account both in the Collector Station schemes and in the selection of power transformers , and switching devices, as presented in article.

Słowa kluczowe: schematy i urządzenia dla morskich Stacji Kolektorowych 1600MVA zintegrowanych ze Stacjami Konwerterowymi 1000 MW ; wyspecjalizowane urządzenia dla turbin wiatrowych 10MW z napięciem wyjścia 66kV.

Aleksandr Gul , PhD. (El. Eng.)

ABB Sp. z o.o.

SEP (Association of Polish Electrical Engineers) , Expert

POWER TRANSFER FROM OFFSHORE WIND FARM COMPLEX

***Abstract:** The article concerns innovative solutions in the field of main circuit diagrams, important for the method of power output from high power offshore wind farm, in which an HVAC Collector Substation 1600MVA is used to transfer a power to the HVDC Converter Station with a power value 1000MW . The mentioned power stations are installed on extremely large size offshore platforms with mass reaching up to 20,000 tons, in which due to the complexity of the station's scheme, it is necessary to use gas insulated switchgears (GIS). The use of GIS enables the installation of several power transformers (eg 4-6 units) integrated with GIS, using cable connections. The power of the currently produced offshore wind turbines reaches value 10 MW, and the voltage of the transformer energized the sea cables connecting wind turbines has increased from 33kV to 66kV, which was taken into account both in the Collector Station schemes and in the selection of power transformers , and switching devices, as presented in article.*

INTRODUCTION

A further increase in the level of exhaust emissions from coal-fired or brown coal-fired power plants associated with the construction of new power blocks due to the inevitable increase in demand for power generated in Poland, will be associated with further deterioration of air pollution in Poland, and high penalties for the right to generate these exhaust. An additional problem is the exhausting lignite deposits, located near large brown coal-fired power plants. The increase of power generated in the Polish energy system can be provided based on the construction of nuclear power plants, or renewable sources based on offshore wind farms, remote from the land, and thus invisible to the naked eye, and not burdensome to the local population , due to the generated sound waves . Information on the location of offshore wind farm complexes on the Baltic Sea with a combined power of 6.0GW has been made public (see Fig. 1). The purpose of this article is to present the specific solutions in high power stations installed on offshore platforms, taking into account alternative schemes of the HVAC High Power Collector Substations, adapted to the offshore HVDC Converter Stations. The article presents numerous pictures of basic equipment such as power transformers and GIS - gas insulated switchgears, installed in offshore high power stations HVAC / HVDC , deployed inside the housing of large-size offshore platforms, supplied and launched through ABB. Other important devices in offshore wind farms are transformers and GIS switchgears developed for installing inside the lower part of the tower, crowned with a high-power 10MW wind turbine, powering a 3.3 kV/66 kV transformer.

1. Progress in the field of power transfer from offshore wind turbines to the HVAC Collector Substation , as a result of rising output voltage from the turbine set from 33kV up to 66kV.

Leading manufacturers of offshore wind turbines are conducting intensive work to further increase the power generated by a single unit. A few years ago, offshore wind farms were built with the output voltage 33kV from the wind turbine set with the power value 4-6MW , limited the number of units up to 5 units , connected by the AC sea cable in the so-called. "STRING", mainly due to losses in this relatively long cables. At present, wind turbines with much higher power, eg 9.5 MW like type MHI Vestas V164 , are already produced and thanks to the increase of the output voltage from the turbine from 33kV to 66kV in "STRING", it is possible to integrate a group of 10-11 turbines , using 66kV sea cables (see Fig. 2) . As a result, the level of power delivered from a single "STRING" to the HVAC Collector Station (see Fig. 3) , can reach 60-90MW!

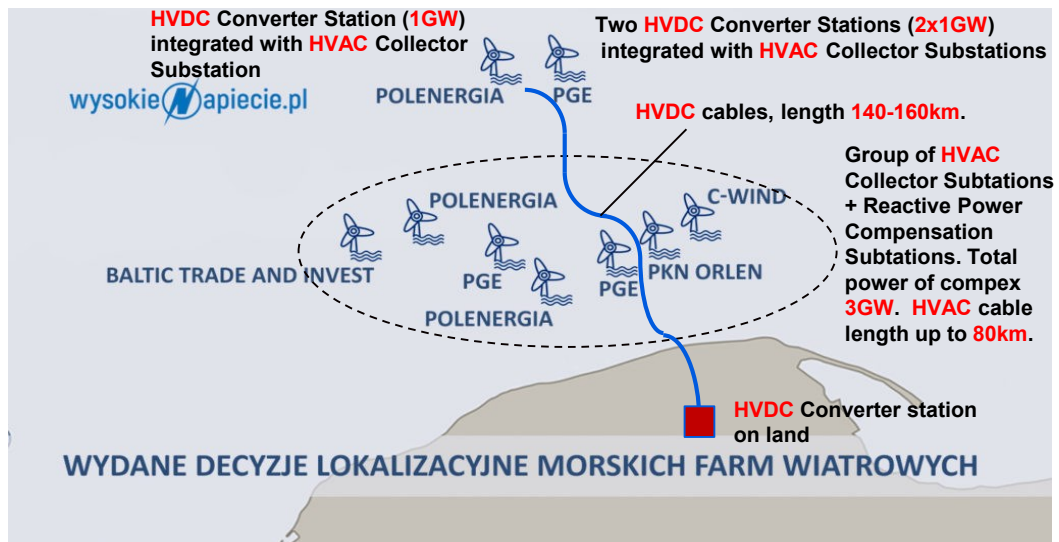


Fig. 1. Planned locations of offshore wind farm complexes on the Baltic Sea with a total power value 6.0 GW [source: WysokieNapiecie.pl]

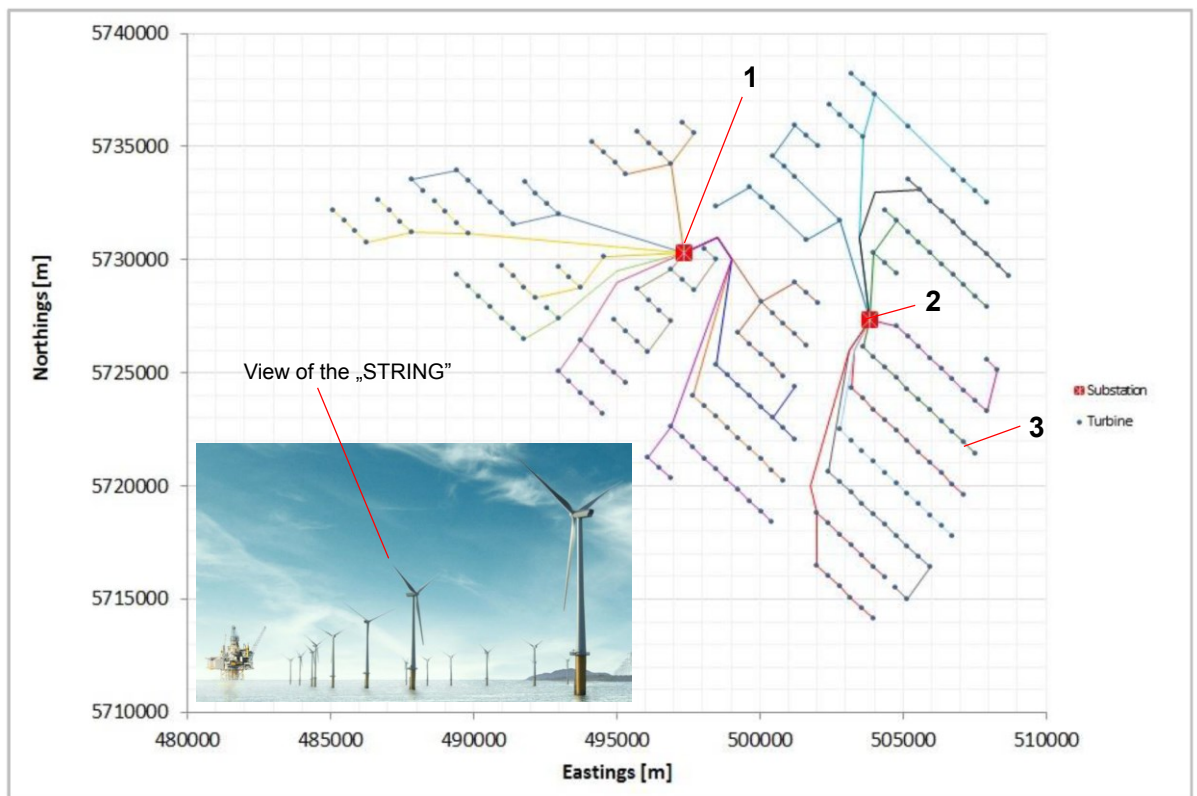


Fig. 2. An example of the wind turbines located around the Collector Substations, integrated with 66kV "STRINGS", using sea cables [source: DNV-GL Report No.:113799-UKBR-R02,Rev.2]
 1,2 - Collector Substations (No. 1... single Collector Station energized from 117 wind turbines!)
 3 - "STRING" 66 kV, collecting power from 11 wind turbines



Fig. 3. View of platforms with HVAC Collector Substations.

2. Technical and economic reasons for the construction of HVAC Collector Substations with reactive power compensation, and HVAC Collector Stations integrated with the HVDC Converter Station.

Sea "export" HVAC cables with a length of several dozen kilometers, connecting sea-based Collector Stations with Power Stations on land, are usually 220kV cables. Typically, HVAC high power Collector Stations are built at a distance 30-40km from the sea coast. In the case of locations granted in the Baltic Sea (see Fig. 1), the nearest wind farms with a total capacity of 3.0GW require the installation of 220kV AC "export" cables with a length of around 70-80 km (respecting obstacles on the seabed), which enforces the use of shunt reactors - on both sides of the 220kV sea cables, due to the level of losses in their capacity (see Fig. 4). The most remote locations of the Baltic wind farms with a total capacity of 3.0GW (see Fig. 1) require a cable length of 140-160km, in this case it is necessary to use a sea HVDC "export" cable, eg +/- 320kV, which involves the construction of HVAC Collector Stations and integrated with them HVDC Converter Station, and this case is discussed in this article.

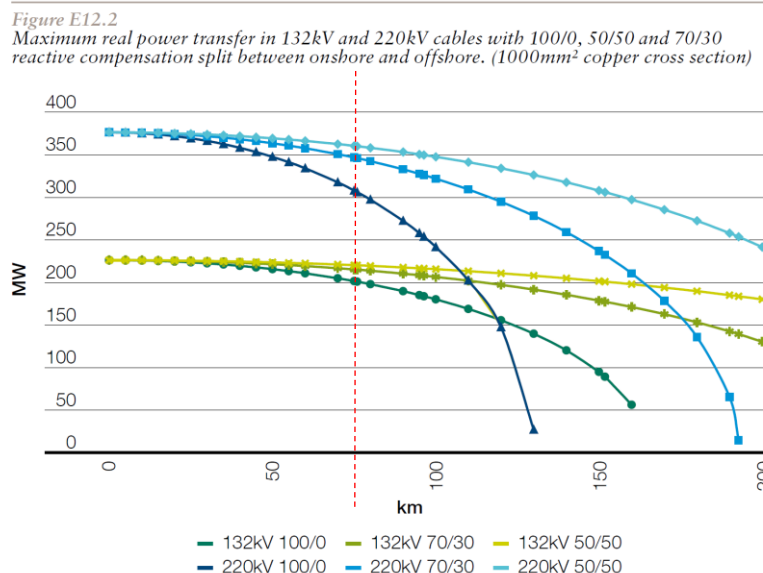
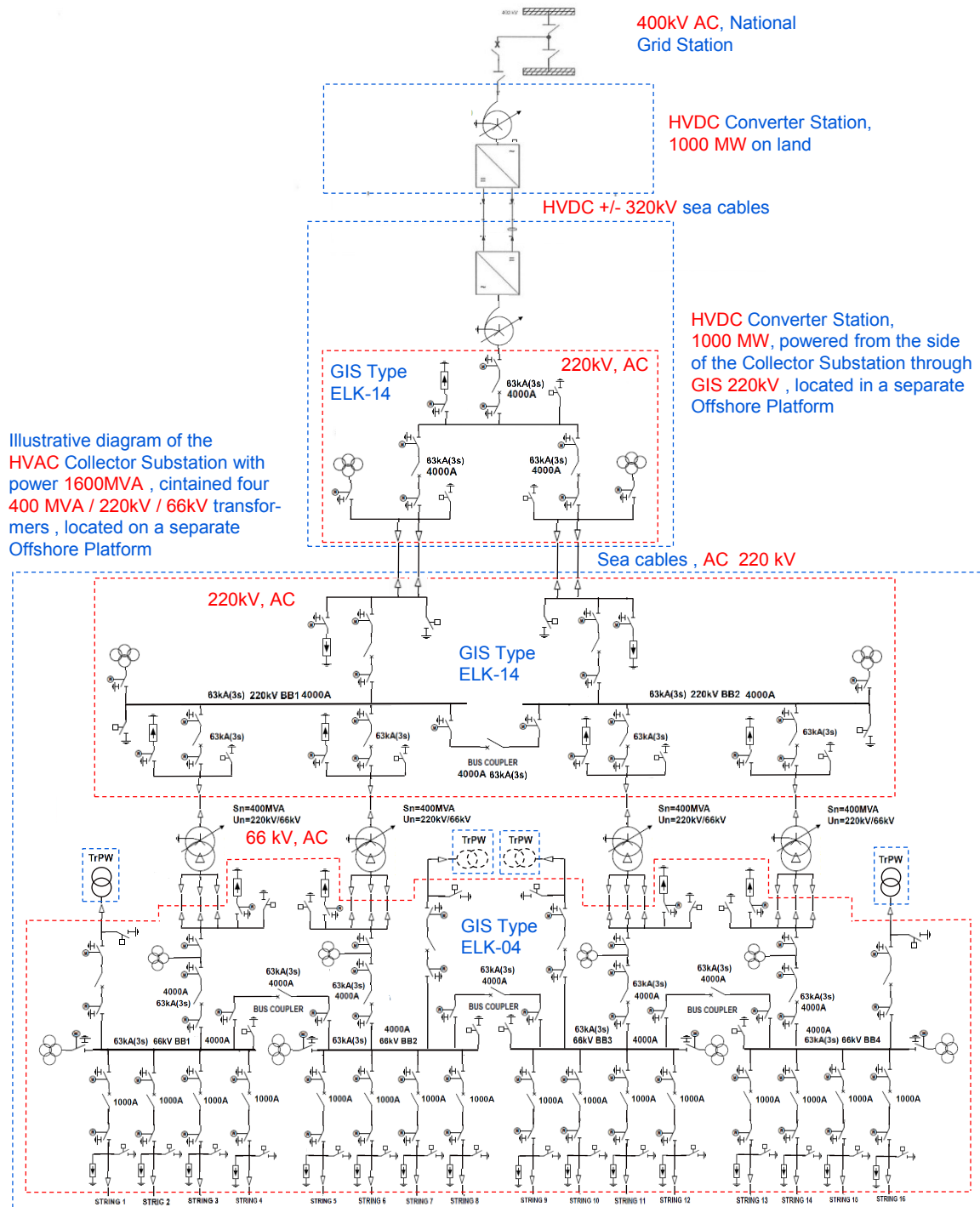


Fig. 4. The maximum power that can be transferred by the 132kV and 220kV AC "export" sea cables with the splitting of the reactive power compensation, using shunt reactors on the two sides of the HVAC "export" cable, as a function of the length of the cable. Cross-section of Cu 1000mm² wire [source: Electricity Ten Year Statement 2015, Appendix E, Technology].



Rys. 5. Illustrative diagram of the HVAC Offshore Collector Station 66kV/220kV with a summary power of 1600MVA, contained 4 transformers, powered from 16 "STRINGS" 66kV, provided for energizing of the 1000MW HVDC Converter Station.

3. Requirements for devices installed in HVAC Collector Substation 1600MVA with four power transformers, based on the example of illustrative substation diagram 66kV/220kV.

The set of devices shown on the illustrative diagram of HVAC Collector Substation (see Fig. 5) contained 4 transformers with power value 400MVA, can now be deployed inside the housing of single offshore platform, taking into account for example the dimensions of very large ABB platform, called DolWin-2, see Fig. 10.

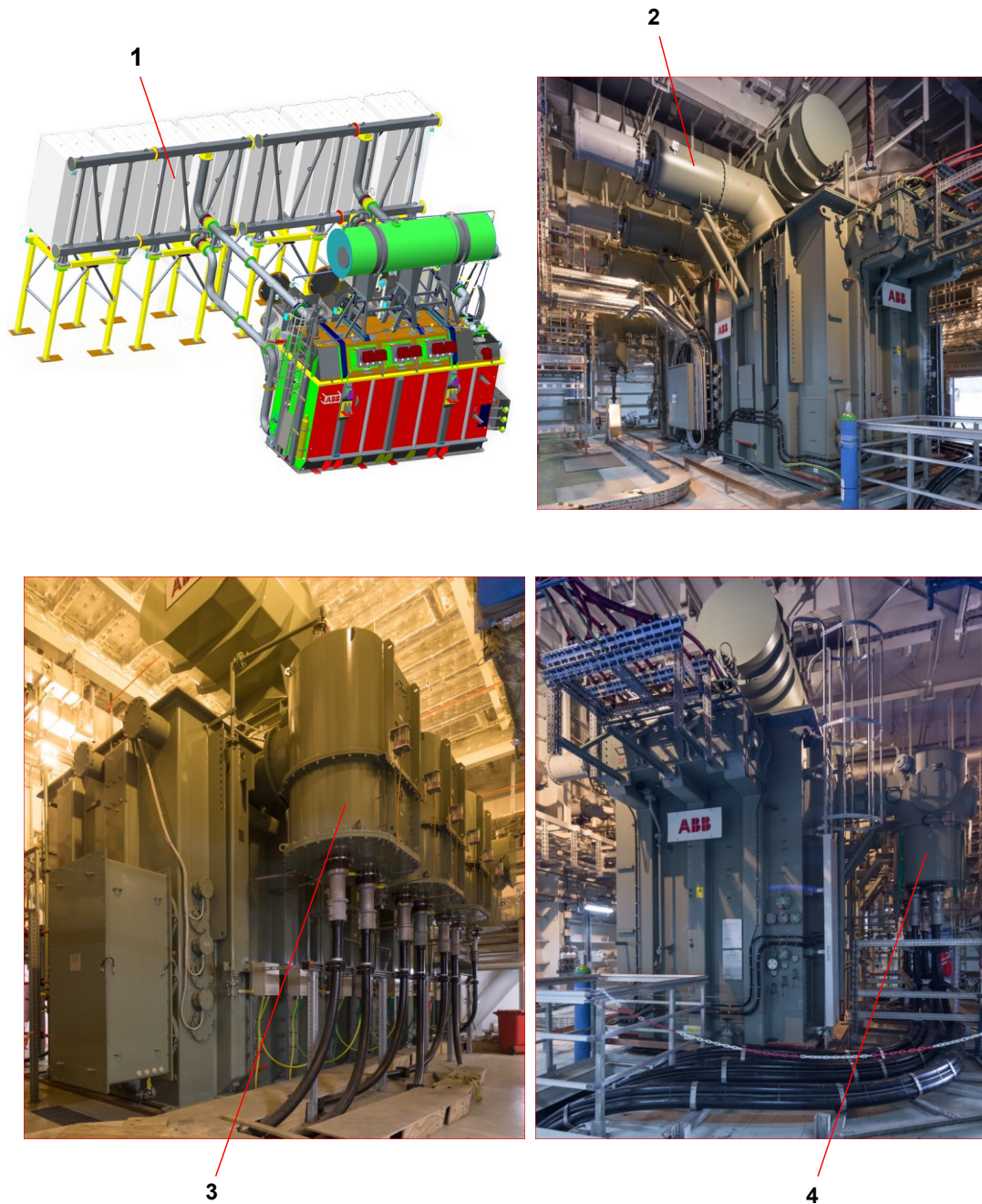


Fig. 6. Specific constructional features of power transformers installed on offshore platforms at HVAC Collector Substations (transformer with the power value 960MVA on the right).

- 1- autonomous transformer cooling system (heatsinks outside the station)
- 2- direct connection of the GIS with the power transformer using SF6 busbar on the 400kV side
- 3,4- cable connector installed in case of two or three 110kV(or 66kV) cables per phase

As mentioned before, the power generated in a single "STRING" 66kV can reach 60-90MW. The diagram of 1600MVA/66kV/220kV Collector Substation shows the connection of 16 "STRINGS", 4 in each section (see Fig. 5). The use of four 400MVA/66kV/220kV "offshore" power transformers with an autonomous cooling system (see Fig. 6) is related to the assumption, that in the event of one unit being in the fault, the other three are able to transfer 100% of the power generated in the wind farm, energized the 1000MW Collector Station. Three cables per phase are connected to the 400MVA transformers on the 66kV side, and in result is required application of high current GIS type ELK-04, which allows to connect 9 cables (see Fig. 9) to the 3 cable compartments of GIS, what is an optimal solution, taking into account the service current with value 4000A!

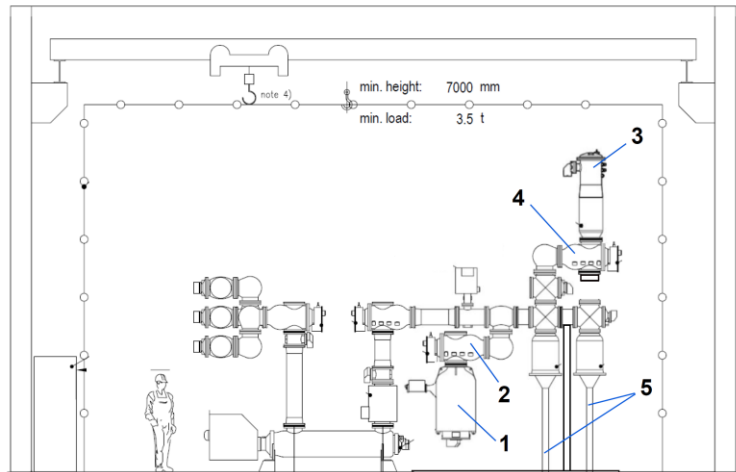


Fig. 7. Configuration of the complete 220kV bay SF6 insulated type ELK-14/300, used in offshore HVAC High Power Collector Substations.

- 1- Voltage transformer (VT) connected to the GIS via disconnecter-earthing switch
- 2- disconnecter-earthing switch (3-positional apparatus) integrated with VT
- 3- ZnO surge arrester connected to the GIS via disconnecter-earthing switch
- 4- disconnecter-earthing switch (3-positional apparatus) integrated with ZnO
- 5- two 220 kV cables integrated to one phase

In order to facilitate the acceptance HV tests on side (50Hz /1min), the surge arresters ZnO and voltage transformers VT installed on voltage level 66kV and 220kV can be disconnected through 3 positional switch (see Fig. 5). In the case of the 66 kV GIS bay powered the 400MV transformer (see Fig. 5), the voltage transformer VT can be disconnected (insulated) from both sides after opening of the 3-positional switches No. 5 and 6 (see Fig. 9) and next earthed through switch No. 5. On the 220 kV side of 400 MVA transformers, is recommended an installing of GIS type ELK-14 with 4000A/63kA circuit breakers (see Fig. 5 and Fig.7). The ELK-14 bays were selected for transmission of power from the HVAC 1600MVA Collector Substation to the HVDC 1000MW Converter Station, having doubled cable compartments (see Fig. 7) for integration of two 220 kV sea cables per phase , so that in case of damage to the other 220 kV cables, 100% of the power between these stations can be transferred. It is well known that the most emergency element of switching apparatus are their drives, especially those operating in ambient conditions with moist and saline air. Hydraulic-spring drives HMB type used in GIS 66-400 kV are distinguished by high reliability in comparison with other types of drives (see Fig. 12), which was also confirmed by GIS working on offshore platforms . In offshore wind farms, the proper selection and installation location of surge arresters ZnO is a particularly important issue to solve (see Fig. 5). In sea conditions one should take into account very frequent atmospheric discharges with relatively high energy, exposing not only the insulation of wind turbines, but also devices inside the Collector and Converter Stations. For this reason are mounted the counters, making possible to check the condition of ZnO arresters (see Fig. 8), what is especially important in the GIS bays connected with the 66kV "STRINGS", in to which can be transferred high overvoltage's , generated after a lightning stroke into a wind turbine tower.

4. The concept of main diagram HVAC 1600MVA/66kV/400kV Offshore Collector Substation , integrated with the 1000MW HVDC Collector Station.

Power transfer from offshore wind turbines , installed in the complex of 66kV high-power wind farms facilitates can be realized using of a three windings large-power transformer, e.g. 960 MVA, meeting very limited space and functional requirements for installing such units on the offshore platform. Schematic diagram of the HVAC 1600MVA/66kV/400kV Collector Substation integrated with the 1000MW HVDC Collector Station is shown Fig. 13.

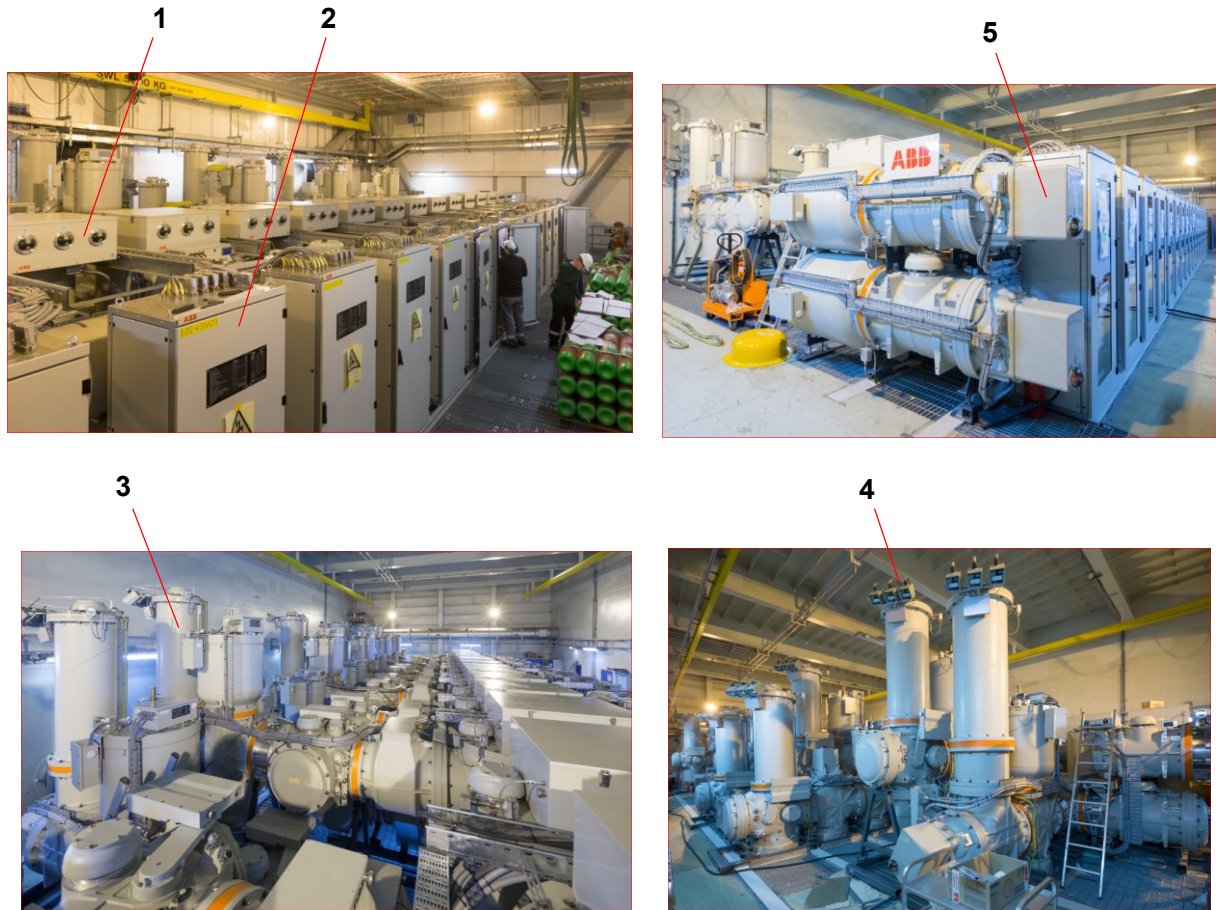


Fig. 8. Example of multi-bays gas insulated switchgear type ELK-04, installed in the high-power HVAC Collector Substation offered for 66 kV (busbar current 4000A, circuit current 63 kA/3s).

- 1- hydraulic-spring drive type HMB for circuit breaker
- 2- control cabinets with protection relays
- 3- ZnO surge arresters of three phases in a common housing
- 4- operation counters of ZnO arresters in individual phases
- 5- high-speed earthing switch for busbars

The use of two 960 MVA three-winding transformers and GIS type ELK-04 with a double busbar system with 8 "STRINGS" 66kV connected to each section, allows transfer of full power delivered from 16 "STRINGS" in to one of two 960 MVA transformers, which guarantees uninterrupted operation of the Substation, in case of withdrawal of one of the transformer from the work. The 960MVA three-winding transformers of the HVAC Collector Substation are connected to the Converter Station using the GIS switchgear 400 kV type ELK-3 (see Fig. 11). Technical advantages of GIS type ELK-04, recommended on 66kV voltage level, were presented earlier, see Pos. No. 3.

Economic considerations support the integration of the HVAC High Power Collector Substation with the Converter Station, which enables large-scale marine platforms designed for high-power power stations such as DolWin-2 (see Fig. 10). Some investors, however prefer separate offshore platforms for the HVAC Collector Substation and for the HVDC Converter Station, located close to each other, and connected by a marine cable (see Fig. 5), mainly due to the fire hazard.

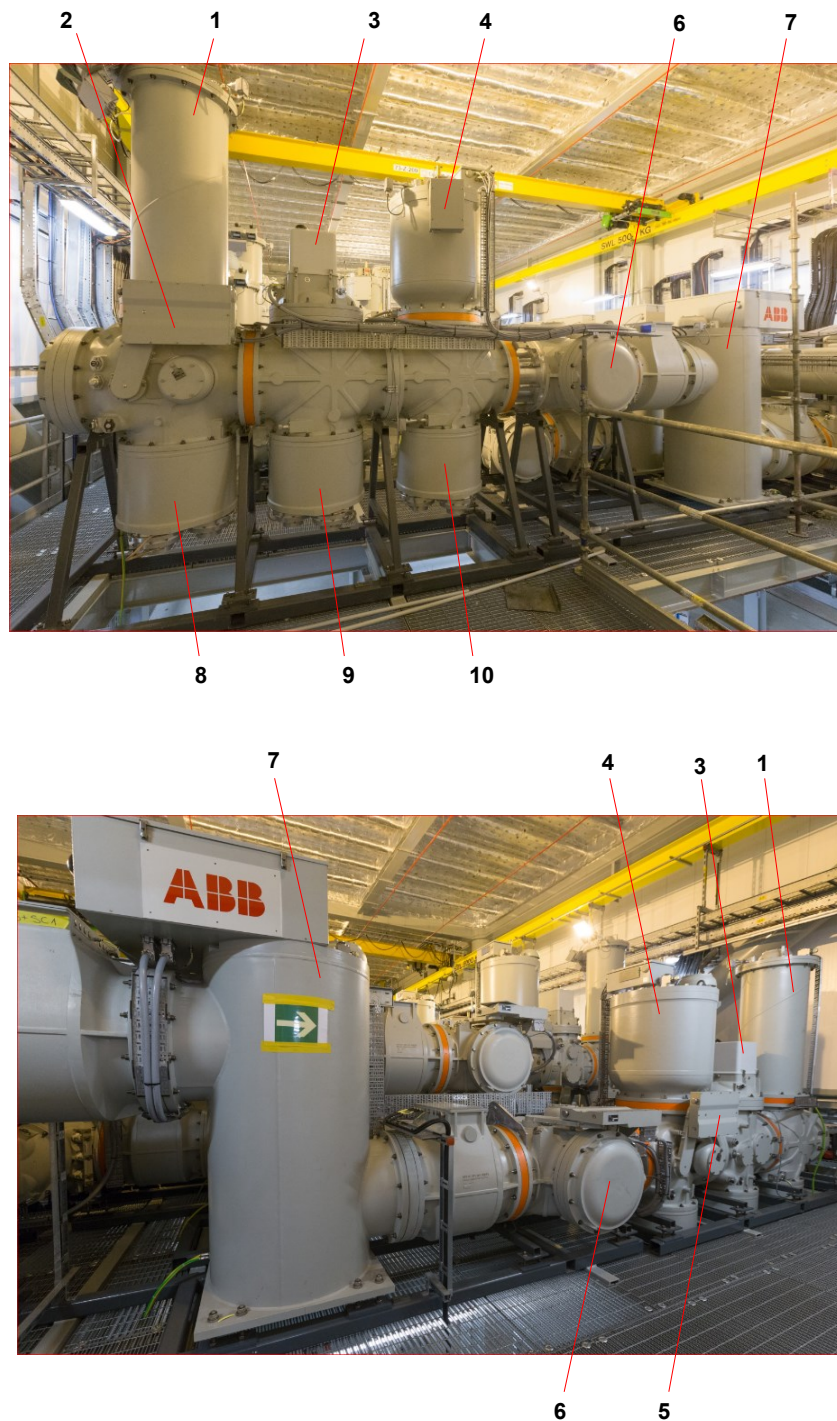


Fig. 9. Example of high-current bay (4000A/63kA/3s) , GIS type ELK-04 installed in offshore HVAC Collector Substation , offered for integration with power transformer on 66kV side.

- 1- surge arresters ZnO worked in individual phases - in a common housing
- 2- drive of 3-positional switch, disconnecting ZnO from 66kV cables, (ZnO grounded in third pos.)
- 3- drive of fast acting earthing switch for grounding of 9 cables, connected to a common 66kV bus
- 4- voltage transformer (VT)
- 5- drive of 3-positional switch for disconnecting VT from cables and then VT earthing in third pos.
- 6- integrated disconnecter-earthing switch (3-positional switch) behind the circuit breaker
- 7- circuit breaker (4000A/63kA)
- 8,9,10 - compartments for connecting of 66kV cables (three cables per phase, a total of 9 cables)



Fig. 10. View of the DolWin-2 offshore platform with the HVDC Converter Station, with a complete set of devices manufactured by ABB, power value 924 MW (platform weight approx. 20.000 tons).

5. Innovative devices from ABB for power transfer from high power offshore Wind Turbines with the 66kV output voltage.

Offshore wind turbines in the near future can generate power value 15 MW transmitted through 66kV sea cables. This level of output voltage allows to integrate 10 - 11 turbines connected together using a sea cables in "STRING" (see Fig. 2), and the single "STRING" is connected to the HVAC Collector Substation bus (see Fig. 5 and Fig. 13). Will be realistic to provide power value 150 MW from single "STRING", what forces the use of GIS with high busbar current (at least 4000A), and circuit breakers with short circuit breaking current 63kA at list. Considering the high power of the single "STRING" and the safety of personnel responsible for periodic inspections in the Wind Turbine unit, it was proposed to use a special configuration of GIS type ELK-04 H inside the housing of turbine tower (in space over base frame), with the horizontal position of the circuit breaker compartment (see Fig. 14) under the upgrading transformer i.e. 3.3kV/66kV type WindSTAR, insulated with a biodegradable insulating liquid. The WindSTAR transformer with power up to 12 MVA at a relatively high height is narrow, also thanks to a special cooling system, which greatly facilitates its introduction through the door/whole in the housing tower supported the Wind Turbine gondol. A set of apparatus used in the GIS type ELK-04 H enables the safety disconnection and earthing of 66 kV sea cables from transformer and from both sides integrated with the "STRING", using for grounding of each 66kV cable own fast acting earthing switch (see diagram Fig. 14). Sea cables 66kV connected to ELK-04 H are protected with ZnO surge arresters, due to overvoltage's generated as a result of frequent lightning strikes in marine conditions that may expose the insulation of the upgrading transformer both from : the Wind Turbine side and the left and right positioned 66kV cables in "STRINGS". Three-position apparatus i.e. disconnector integrated with the earthing switch allow disconnection and grounding of the circuit breaker from both sides, what allows safety to provide works during the periodic checking of the circuit breaker condition. At the end of 2018, will be launched on the market an "digitized" GIS type ELK-04 (see Fig. 14), where in the compact

module type CP04, are installed the voltage (U) and current (I) sensors, class 0.2, what ensure a linear U / I measurement over the entire measurement range.

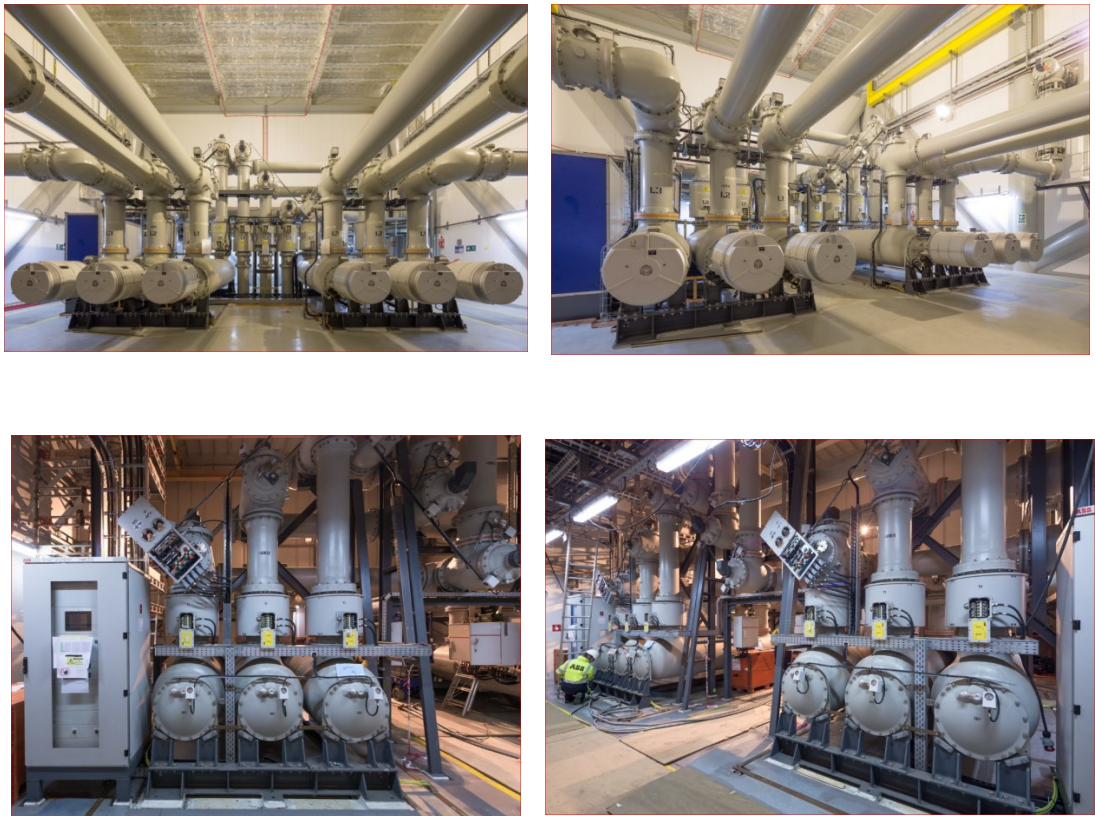
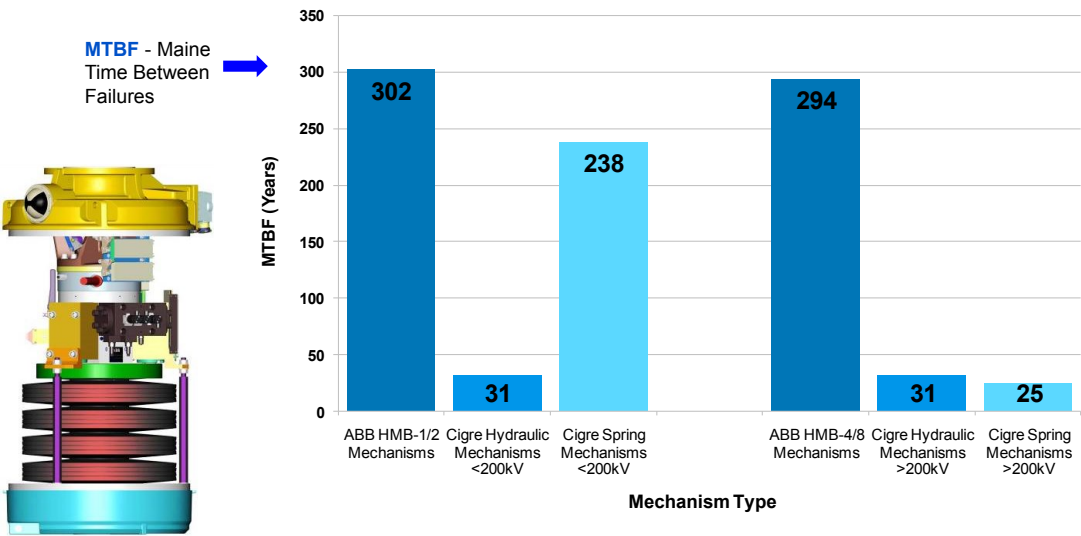


Fig. 11. View of GIS 400kV type ELK-3 installed on the DolWin-2 platform : HVDC Converter Station with a power value of 924 MW, protected autotransformer and converter devices against short circuit current , generated in large Wind Farm Complex.



Circuit Breakers Drives type HMB..., installed in GIS 66-1200kV – RELIABILITY.
 Experience over 650.000 years / number of breakers x operation period /

Fig. 12. Reliability of hydraulic-spring drives type HMB... adapted for long-term operation of GIS with voltage range from 66kV...up to 400kV, in case impact of environmental conditions existing in offshore HVAC Collector Substations and HVDC Converter Stations.

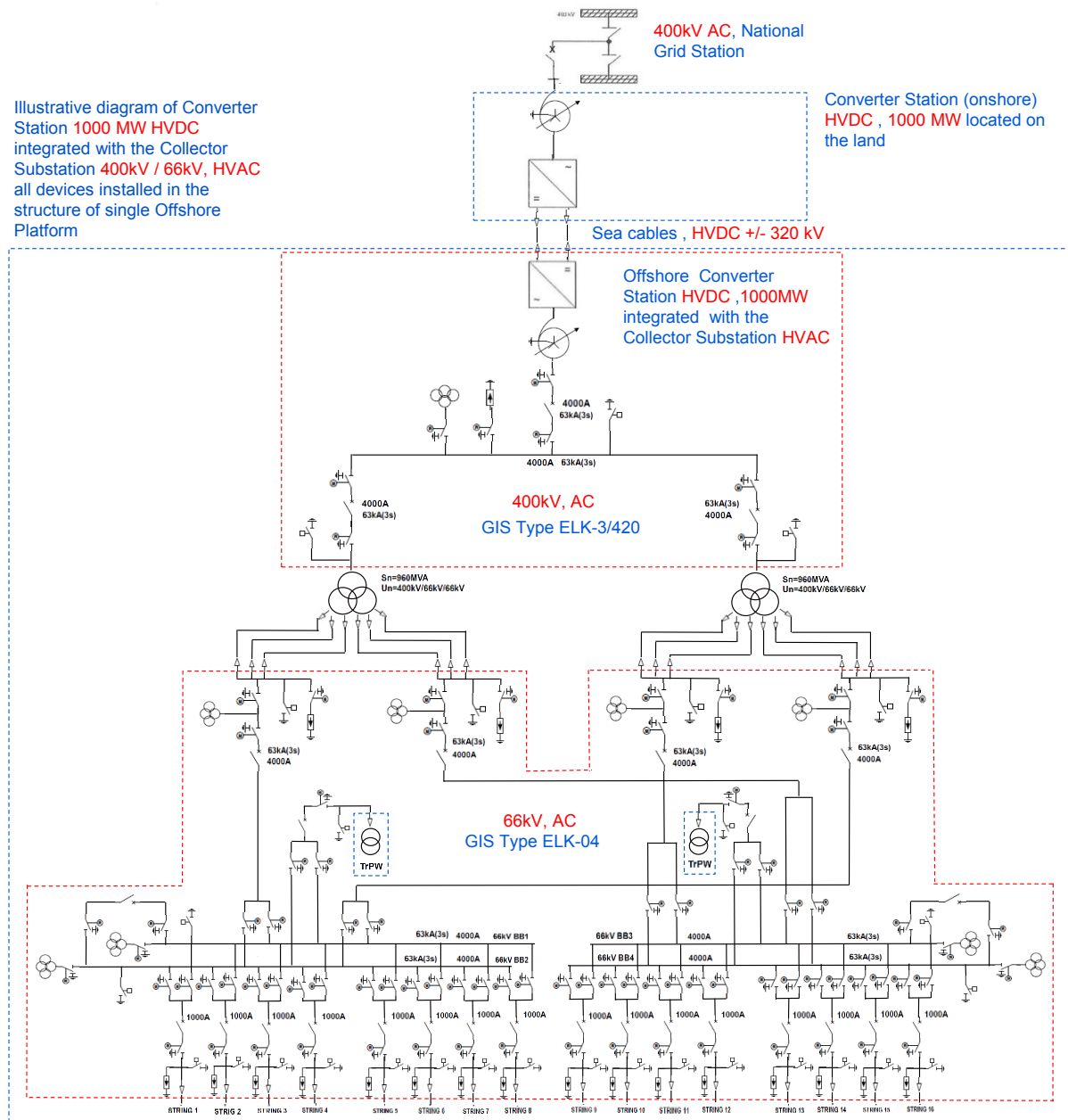


Fig. 13. Illustrative diagram of the HVAC 66kV/400kV offshore Collector Substation with two three-windngs Power Transformers 960 MVA, integrated with the HVDC Converter Station, with a power value 1000MW, Stations unit powered from 16 "STRINGS" 66kV.

6. Experience collected in ABB Sp. z o.o., PT factory in Lodz, in the scope of supply and commissioning of "offshore" Power Transformers, installed in the Collector Substations.

ABB Sp. z o.o., Power Transformer Factory in Lodz, has delivered and launched in to operation more than 40 units of offshore Power Transformers in various regions of the world, and based on unified designing and production technology called TrafoSTAR, implemented in all ABB Group Factories, is prepared to design and manufacture of offshore Power Transformers for Baltic Wind Farms Complex with unit power value up to 500MVA. ABB Sp. z o.o. Service Team has the international permission to work on offshore platforms, having competence in the launch of comprehensive monitoring of transformers, enabling remote control of their readiness for the work.

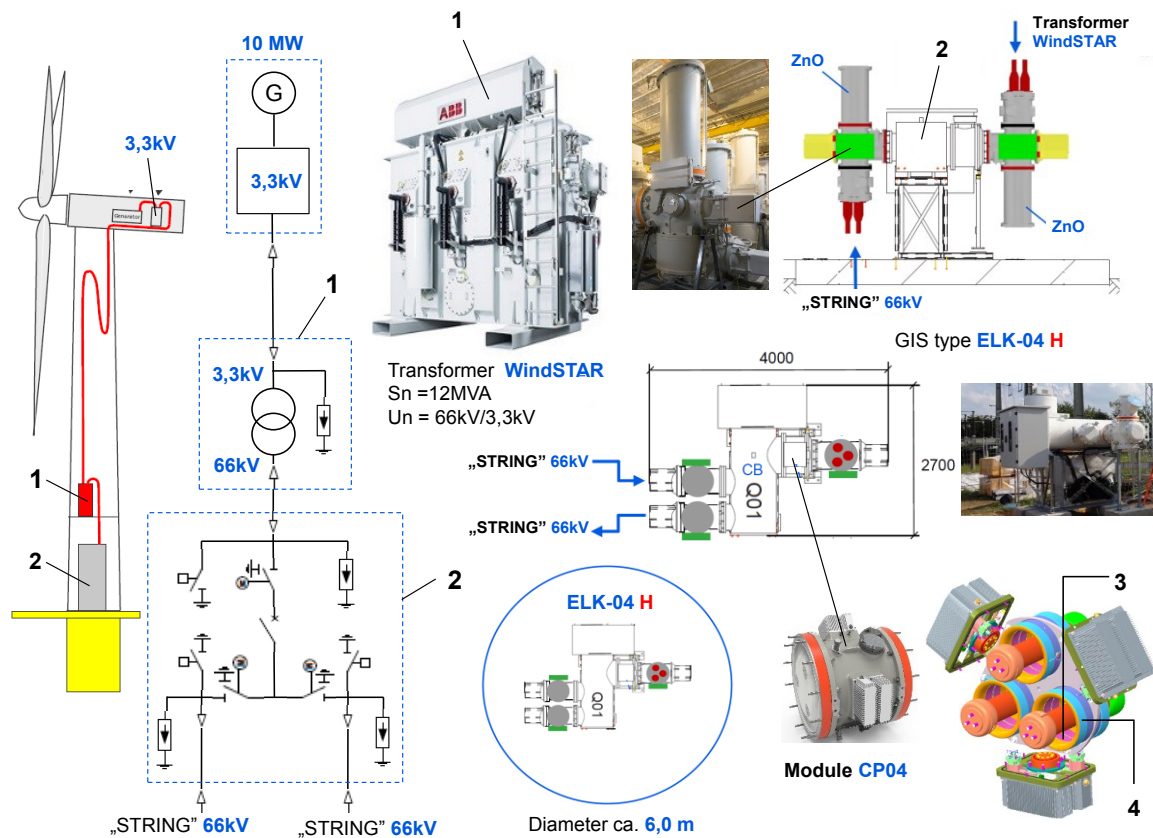


Fig. 14. Innovative devices manufactured by ABB, designed for power transfer from a Wind Turbines with unit power value 8-10MW, connected to the 66kV sea cables in “STRINGS”.

- 1- step-up transformer 3.3kV/66kV type WindSTAR with a biodegradable insulating liquid
- 2- bay of 66kV GIS type ELK-04 H , with horizontal position of circuit breaker compartment
- 3- voltage sensors (U) in the CP04 Module in the case of digital execution of bay type ELK-04 H
- 4- current sensors (I) in the CP04 Module (Rogovsky coils), digital execution of bay type ELK-04 H