

Kablowe linie morskie – perspektywy rozwoju i nowe technologie

Streszczenie. *Na całym świecie obserwuje się dynamiczny rozwój linii kablowych na coraz wyższe poziomy napięcia. Odnotowuje się również ogromne zainteresowanie liniami kablowymi prądu stałego (DC). Linie morskie, ze względu na swoje znaczące długości są głównie liniami prądu stałego. Aktualnie najdłuższą linią kablową morską jest linia NorNed, łącząca systemy elektroenergetyczne Norwegii i Holandii, która przy napięciu ± 450 kV posiada zdolność przesyłową równą 700 kW. Linia ta ma imponującą długość 580 km, a ciekawostką jest fakt, że w zależności od lokalizacji danego odcinka linii zastosowano różne konstrukcje kabli i na dodatek inwestor użył kable dostarczone przez dwóch różnych producentów. Wysokonapięciowe systemy przesyłowe prądu stałego stają się coraz bardziej atrakcyjne przede wszystkim ze względów: środowiskowych, ekonomicznych, możliwości łączenia systemów asynchronicznych, łatwiejszego kontrolowania przepływu energii elektrycznej oraz korzystnego przesyłu energii (stabilność systemu, jakość energii, itd.). Analiza planowanych do realizacji w najbliższych latach projektów linii morskich prądu stałego może budzić podziw nad tak dynamicznym rozwojem tej technologii przesyłu energii elektrycznej.*

Słowa kluczowe: kablowe linie morskie, linie prądu stałego, rozwój technologii DC

Wprowadzenie

Powrót do szerokiego zainteresowania się wykorzystywaniem prądu stałego w elektroenergetyce skłania do spojrzenia na początki wdrażania tej technologii. Historia wykorzystywania energii elektrycznej rozpoczyna się od prądu stałego. Także i pierwsze linie do przesyłu energii były liniami prądu stałego (DC – *Direct Current*). Pierwsza stacja energetyczna zaprojektowana przez Thomasa A. Edisona w Nowym Jorku została oddana do eksploatacji w 1882 i z niej zasilano w energię elektryczną fragment miasta w promieniu około 1,6 km. Z kolei francuski inżynier M. Rene Thury opracował i zaprojektował system przesyłowy DC, który został uruchomiony w 1883 roku. Najśłynniejszym zaprojektowanym przez Thury'ego był system Moutiers-Lyon – oddany do eksploatacji w 1906 roku o zdolności przesyłowej 4,5 MW (przy napięciu 60 kV DC i prądzie 75 A). Długość linii wynosiła 180 km i została trochę przebudowana w roku 1912, gdy podwyższono napięcie do 125 kV. Linia ta pracowała do połowy lat trzydziestych poprzedniego wieku [1].

Jednakże już w 1890 technologia generatorów i transformatorów prądu zmiennego (AC – *Alternative Current*) została na tyle udoskonalona, że uznano zdecydowaną wyższość tego rodzaju napięcia do generacji, przesyłu i rozdzielenia energii elektrycznej. Związane to było z prostszą budową generatorów oraz łatwiejszym przechodzeniem z jednego poziomu napięcia na inny. Pomimo, że szczególny rozwój technologii AC nastąpił od momentu wdrożenia systemów trójfazowych, to nadal część energetyków podkreślała wyższość systemów DC do przesyłu energii na dalsze odległości. Już w roku 1922 po raz pierwszy zaczęto dyskutować nad uruchomieniem linii Skagerrak pomiędzy Danią i Norwegią, a wówczas inżynier Tury zaproponował połączenie linią

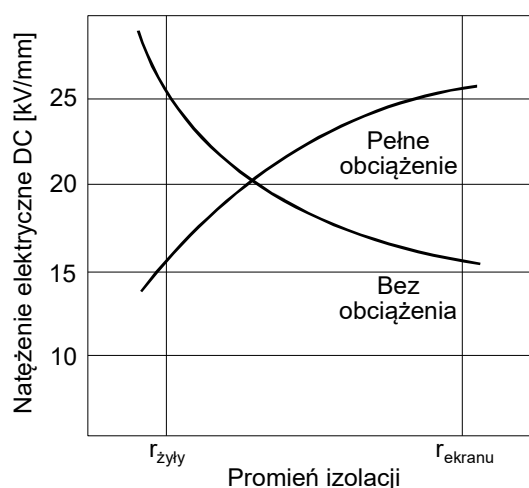
o napięciu 110 kV DC i zdolności przesyłowej 42 MW. Linia ta, o nieco innych parametrach, doczekała się realizacji jednak znacznie później [2].

Do przemysłowego przesyłu energii elektrycznej zaczęto stosować prąd stały w latach pięćdziesiątych poprzedniego wieku. Między innymi w roku 1950 uruchomiono próbny układ przesyłowy Kaszyca-Moskwa, zbudowany z dwóch kabli 200 kV. Jednakże, jako za pierwszy komercyjny system HVDC uważa się morską linię kablową Gotland I. Przed podjęciem ostatecznej decyzji o budowie tej linii w 1950 roku wykonano w zachodniej Szwecji instalację doświadczalną. Była to linia o długości około 30 km pomiędzy Trollhätten i Mellerund. Na linii tej eksperymentowano i wykonano wiele testów, aby uruchomić także i stację przekształtnikową w Trollhätten. Natomiast udowa kablowej linii morskiej Gotland Link trwała od 1951 do 1954 [3].

Kolejnym krokiem milowym w rozwoju technologii DC było opracowanie stacji przekształtnikowych określanymi jako „stacje lekkie” oraz wdrożenie kabli o izolacji wytłaczanej i konstrukcji typu Light opatentowanej przez koncern ABB. Opracowanie zmodyfikowanego gatunku polietylenu usieciowanego o zwiększonej odporności na tworzenie ładunku przestrzennego otworzyło drogę do szerokiego stosowania tej izolacji w kablach prądu stałego. Należy podkreślić, że XLPE stosowany w kablach prądu stałego różni się właściwościami od polietylenu usieciowanego przeznaczonego na izolację kabli AC. Przyjęto oznaczać go jako XLPE-DC [3]. Dodatkowo wymaga podkreślenia fakt, że właściwości elektryczne, termiczne i mechaniczne obu materiałów są odmienne. Skróceniowo można to określić następująco:

XLPE-AC + wypełniacz nieorganiczny = XLPE-DC
właściwości XLPE-AC \neq właściwości XLPE-DC

Odmienność rozważań przy projektowaniu kabli HVDC wynika z faktu, że rozkład natężenia pola elektrycznego w przypadku kabli prądu stałego jest odmienny od rozkładu pola obserwowanego w izolacji kabli prądu przemiennego. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego dla różnych stanów pracy izolacji przykładowego kabla DC. W kablach AC rozkład natężenia pola, niezależnie od obciążenia, ma zawsze jednakowy charakter: największe pole rejestrowane w izolacji jest przy żyłce roboczej, najmniejsze w izolacji przy półprzewodzącym ekranie zewnętrznym, czyli charakter rozkładu pola jak w przypadku kabla DC nieobciążonego.



Rys. 1. Rozkład natężenia pola elektrycznego w izolacji kabla DC [4].

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Przykładowe linie morskie

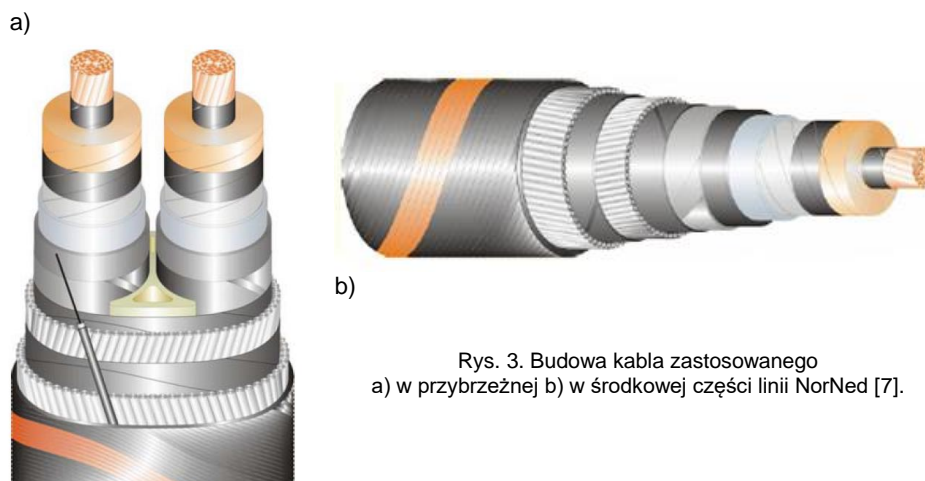
Przegląd przykładowych linii DC powinno się rozpocząć od linii Polska-Szwecja, czyli od połączenia nazwanego SwePol Link. Linii tej poświęcono jednakże wiele publikacji, więc może tylko należy podać jej podstawowe parametry: napięcie ± 450 kV, zdolność przesyłowa 600 MW, długość linii morskiej to 239 km i części lądowej 15 km – a izolacja zastosowanego kabla to papier+syciwo. Konstrukcja tego kabla i izolacja jest zgodna z konstrukcją kabla z Baltic Cable – rysunek 2.



Rys. 2. Kabel DC – zastosowany w linii Gotland I (150 kV, 30 MW) oraz ułożony 40 lat później Baltic Cable (450 kV, 600 MW) [1].

Jak dotychczas najdłuższą morską linią kablową DC jest linia NorNed – ułożona kablami także o izolacji papier+syciwo. Zadaniem tej linii jest połączenie dwóch systemów, czyli umożliwienie przesyłu energii pochodzącej z norweskich elektrowni wodnych do Holandii oraz w okresach suchych lub w porze nocnej – przesył energii w kierunku odwrotnym, czyli z Holandii do Norwegii [5]. Dodatkowo praca tej linii stabilizuje pracę systemu elektroenergetycznego podczas podłączania kolejnych farm wiatrowych. Jest to linia o zdolności przesyłowej 700 MW przy napięciu DC ± 450 kV i natężeniu prądu 824 A. Długość linii wynosi 580 km, a głębokość ułożenia na niektórych odcinkach dochodzi do 410÷420 m. Inwestorami linii były firmy Statnett (Norwegia) i TenneT (Holandia), a koszt inwestycji oszacowano na 495 milionów euro [6]. Realizację projektu NorNed rozpoczęto w styczniu 2005 roku, układanie kabla wiosną 2006 roku, a linię oddano do eksploatacji 31 grudnia 2007 roku. Planowana jest już budowa linii NorNed 2 [6]. Realizację projektu NorNed rozpoczęto w styczniu 2005, układanie kabla wiosną 2006, a linię oddano do eksploatacji 31 grudnia 2007 roku. Natomiast w maju 2008 rozpoczęto komercyjne użytkowanie połączenia NorNed. Zdecydowano się na układ bipolarny między innymi ze względu na uzyskanie niskich strat przesyłowych oraz nie wykorzystywanie morza jako elektrody powrotnej. Przyjęto również zastosowanie dwóch odmiennych konstrukcji kabla. Linia morska składa się z 270 km kabla dwużyłowego oraz 2 razy po 310 km kabla jednożyłowego (rys. 3), zastosowanego w najgłębiej ułożonej części środkowej linii. Budowa kabla zastosowanego w środkowej części linii NorNed: żyła Cu, izolacja papierowa

przesycona, powłoka ołowiana jak bariera promieniowa, osłona polietylenowa, wzmocnienie taśmą stalową galwanizowaną, dwie warstwy drutów stalowych oraz osłona zewnętrzna; masa kabla 37,5 kg /m; średnica kabla 112 mm [6]. Natomiast w części przybrzeżnej użyto kabel dwużyłowy o wymiarach 217 x 136 mm i masie w powietrzu równej 85 kg/m [5]. Dodatkowo w odcinkach najbliższych zakończeń po obu stronach linii (około 30 km) zastosowano kabel ze światłowodem – rysunek 3. Kable dla linii NorNed zostały wyprodukowane przez koncern ABB i Nexans.



Rys. 3. Budowa kabla zastosowanego
a) w przybrzeżnej b) w środkowej części linii NorNed [7].

Opracowanie technologii Light spowodowało dynamiczny rozwój linii kablowych DC z izolacją XLPE-DC – także linii morskich. W tym miejscu należy wspomnieć o linii Estlink, ponieważ jest to linia morska stanowiąca fragment Baltic Ring, którego elementem jest także nasza linia SwePol Link. Linia Estlink łączy system elektroenergetyczny Estonii i Finlandii, a stacje przekształtnikowe tej linii zlokalizowane są w Espoo koło Helsinek i w Harku koło Tallinna. Linia o długości 105 km pracuje na napięciu ± 150 kV DC, a jej zdolność przesyłowa to 350 MW. Linia została wykonana w technologii Light i zbudowana jest z dwóch kabli o jednakowej konstrukcji – w części morskiej (2 x 74 km) zastosowano kable o żyłach miedzianych o przekroju 1000 mm^2 , natomiast w części lądowej (2 x 31 km a w tym 22 km na terenie Finlandii i 9 km w Estonii) użyto kabli z żyłami aluminium o przekroju 2000 mm^2 [8, 9]. Budowa linii trwała 19 miesięcy od momentu podpisania kontraktu do ukończenia inwestycji w grudniu 2006 i oddania do eksploatacji w styczniu 2007 roku [9].

W technologii Light wykonana jest także jedna z najnowszych linii kablowych morskich – linia NordBalt, której instalacja została ukończona już pod koniec 2015 r., ale jak wynika z opublikowanej informacji w lutym 2016 – jeszcze około dwóch miesięcy będą trwały prace mające na celu oddanie tego połączenia do eksploatacji. Jest to obecnie najdłuższa linia kablowa morska ułożona kablami o izolacji wytłaczanej w technologii HVDC Light, a producentem kabli jest koncern ABB. Linia kablowa łączy system elektroenergetyczny Szwecji i Litwy. Parametry tej linii to: zdolność przesyłowa 700 MW, napięcie ± 300 kV, długość kabli morskich 2x400 km i kabli lądowych 2x50 km [10]. Linia połączy stacje przekształtnikowe Nybro w Szwecji i Klaipėda na terenie Litwy.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Planowane kablowe linie morskie DC

Morskie linie kablowe są także jedynym rozwiązaniem technicznym służącym do wyprowadzania energii elektrycznej z farm wiatrowych *off-shore*. Obserwowany w ostatnich latach wyjątkowo dynamiczny przyrost liczby farm wiatrowych zlokalizowanych na morzu oraz coraz większe liczby instalowanych w ramach danej farmy pojedynczych siłowni wiatrowych o coraz wyższych mocach wytwórczych – potwierdza dynamikę tego rozwoju [11]. W tablicy 1 pokazano połączenia kablowe morskich farm wiatrowych lub platform wiertniczych z systemem elektroenergetycznym Niemiec, budowanych lub eksploatowanych tylko przez jednego z operatorów sieci TenneT. Wszystkie te linie to linie wykonane w systemie HVDC Light.

Tab. 1. Linie kablowe morskie łączące farmy wiatrowe off-shore [11].

Nazwa linii	Zdolność przesyłowa [MW]	Napięcie [kV]	Długość kabli HVDC [km]
BorWin1	400	150	400
BorWin2	800	300	400
DoWin1	800	320	343
DoWin2	900	320	268
HelWin 1	576	250	260
HelWin2	690	320	260
SylWin1	864	320	410
DoWin3	900	320	322

Wyraźny jest również rozwój linii kablowych morskich łączących systemy energetyczne różnych państw czy łączenia lokalnych sieci np. na wyspach z lądem itp. Analizując plany rozwoju linii kablowych morskich do roku 2020, można zauważyć, że wiele projektów linii DC będzie stanowiło przełamywanie kolejnych barier technicznych. Przykładowo planowane jest oddanie do eksploatacji w latach 2017-2020 m.in. linii EuroAsia Interconnector (Izrael – Grecja) o zdolności przesyłowej 2000 MW, ± 600 kV, linii Moray Firth (Szkocja ląd – wyspy) pozwalającej przesłać 1200 MW, a w latach 2020-2022 linii Celtic Interconnector (Francja – Irlandia, około 600 km, a w tym część morska ok. 500 km) oraz wcześniej planowanych linii NorthConnect (Norwegia – Szkocja) 1400 MW lub DK-UK (Wielka Brytania – Dania) 1400 MW [12]. Wszystkie te przykłady potwierdzają ogromne zainteresowanie operatorów systemów elektroenergetycznychorskimi liniami kablowymi. Szczególnie interesujący jest projekt EuroAsia Interconnector, ponieważ przewidywana długość tej linii to prawie 1000 km linii, a na dodatek linia ta na dość długim odcinku będzie zlokalizowana na głębokości prawie dwóch kilometrów od poziomu wody.

Dla wielu planowanych linii morskich określone są już dokładnie parametry połączenia oraz zastosowane technologie. Coraz więcej linii będzie budowane właśnie z wykorzystaniem kabli o izolacji XLPE-DC. Coraz więcej linii będzie budowane właśnie z wykorzystaniem kabli o izolacji XLPE-DC. Miedzy innymi Nemo Link Interconnector, czyli połączenie pomiędzy Wielką Brytanią a Belgią, którego oddanie do eksploatacji planowane jest na koniec 2019 roku. Także planowane do uruchomienia w 2022 roku

połączenie Kriegers Flak to linia morska ułożona kablami o izolacji wytłaczanej na napięcie 320 kV [12].

Obserwowany na całym świecie dynamiczny rozwój linii kablowych prądu stałego znalazł swoje odzwierciedlenie w fakcie organizowania w ostatnim czasie konferencji naukowych poświęconych tylko tej tematyce. Wśród tych konferencji najważniejsze to: CIGRE *Colloquium on HVDC*, San Francisco (marzec 2012) oraz *European Seminar on material for HVDC cables and accessories*, Jicable HVDC'13, Perpignan (listopad 2013). Potwierdzeniem ważności tematyki linii DC jest przede wszystkim fakt, że organizatorzy największej kablowej konferencji światowej, odbywającej się tradycyjnie tylko co cztery lata (od 1981 r.) w Wersalu, złamali po raz pierwszy tę zasadę i zdecydowali się na zorganizowanie dodatkowego seminarium poświęconego tylko liniom DC, z udziałem ekspertów za całego świata. Tematyce linii kablowych morskich DC poświęcono również wiele publikacji na ostatniej konferencji JICABLE 2015 oraz podczas World Energy Transmission System Workshop WETS'15, który odbył się w czerwcu 2015 roku w Wersalu.

Literatura

1. Haimbl W., *Compendium of HVDC schemes throughout the World CIGRE*, Technical Brochure 003, 1987, WG 14-04 (DC Links).
2. Rakowska A., *Linie kablowe prądu stałego – wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2011.
3. Rakowska A., *Dynamiczny rozwój linii kablowych prądu stałego*, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 2015.
4. Rakowska A., *Kable morskie prądu stałego – najnowsze technologie*, Zeszyty Naukowe PP, Energetyka, Zeszyt 49 Komisji Nauk Elektrycznych Oddziału PAN w Poznaniu, Poznań, 2005.
5. Worzyk T., Sjöberg M., Skog J-E, Koreman, *The NorNed HVDC Link, cable design and performance*, in: JICABLE, Versailles, 2007, paper B.7.2.
6. *Achievement and experience in service of long length high voltage electric links by AC and DC insulated power cables*, World Energy Transmission System, Workshop WETS'11, Versailles, 2011.
7. *The NorNed HVDC transmission link, The longest underwater high-voltage cable in the world*, ABB broszura, POW-0048 rev.3.
8. Ronström L., Hoffstein M L., Pajo R., Lahtinen M., *The Estlink HVDC Light Transmission System*, CIGRE Regional Meeting, June 18-20, 2007, Tallinn, Estonia.
9. Estlink, *Interconnecting grids*, broszura ABB Id No: POW0047.
10. *The world's longest HVDC Light cable. NordBalt HVDC Light connection*, Sweden-Lithuania, ABB broszura 2011-10, 2GM5076 GB.
11. Zhang D., Werle V., Jung J. *The first HVAC and HVDC grid connection projects for wind power integration in German North Sea: experience, challenge and outlook*, 2014 CIGRE Session, paper B1-105.
12. Penserini Paul, *HVDC Projects, World Energy Transmission System*, Workshop WETS'15, Versailles, 2015.

Autor: prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska; Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań,
e-mail: aleksandra.rakowska@put.poznan.pl