

Linie kablowe prądu stałego – dynamiczny rozwój

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). W latach minionych dotyczyło to głównie linii morskich. Od momentu wdrożenia zmodyfikowanego polietylenu usieciowanego o zwiększonej odporności na tworzenie się ładunku przestrzennego XLPE-DC oraz opracowanie konstrukcji kabli typu Light z tą izolacją w wielu krajach budowane są tego typu linie, zarówno jako linie lądowe jak i morskie. W chwili obecnej najwyższy poziom napięcia linii DC ułożonych kablami o izolacji XLPE-DC to 320 kV, chociaż opracowano już konstrukcje kabli do 500 kV.

Słowa kluczowe: linie kablowe prądu stałego, izolacja kablowa wytłaczana, XLPE-DC

Wprowadzenie

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 przekazywała 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 rozdziału 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.

Do przemysłowego przesyłu energii elektrycznej zaczęto stosować prąd stały w latach pięćdziesiątych. Między innymi w roku 1950 uruchomiono próbny układ przesyłowy Kaszyca-Moskwa, zbudowany z dwóch kabli 200 kV. Jednakże, za jako 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. Budowa kablowej linii morskiej Goltland Link trwała od 1951 do 1954 [1].

Kolejnym krokiem milowym w rozwoju technologii DC było opracowanie stacji przekształtnikowych określanych 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 przemiennego różni się właściwościami od polietylenu usieciowanego przeznaczonego na izolację kabli DC. Przyjęto oznaczać go jako XLPE-DC.

Wysokonapięciowe systemy przesyłowe prądu stałego stają się coraz bardziej atrakcyjne przede wszystkim ze względów: środowiskowych, ekonomicznych (coraz tańsze rozwiązania), możliwości łączenia systemów asynchronicznych, łatwiejszego kontrolowania przepływu energii elektrycznej oraz korzystnego przesyłu energii (stabilność systemu, jakość energii, itd.) [2].

Charakterystyka linii kablowych DC

Zalety stosowania układów przesyłowych prądu stałego to m.in. [1, 3]:

- możliwość sprzęgania systemów pracujących asynchronicznie (o różnych lub niezależnie regulowanych częstotliwościach);
- nie pogarszanie stabilności łączonych systemów niezależnie, od długości linii prądu stałego, w przeciwieństwie do połączeń prądu zmiennego;
- węższy pas terenu zajmowany pod trasę (tzw. pas technologiczny ROW) w porównaniu z liniami prądu przemiennego o tej samej zdolności przesyłowej;
- znacznie mniejsze straty przesyłowe (znacznie mniejsze straty ulotowe w liniach napowietrznych oraz brak strat dielektrycznych – w liniach kablowych);
- łatwiejsza kontrola przepływu i dostosowywania poziomu mocy przesyłowych w zależności do potrzeb;
- wyższa zdolność przesyłowa bez konieczności budowania stacji dla poszczególnych sekcji linii;
- możliwość ograniczania mocy biernej na końcach linii,
- niższe straty przesyłowe, a więc niższe koszty eksploatacji;
- przesył energii elektrycznej praktycznie bez ograniczania długości linii.

Wśród wad systemów prądu stałego należy jednak wymienić:

- wysoki koszt budowy stacji przekształtnikowych;
- wprowadzanie przez te stacje wyższych harmonicznych, zarówno po stronie prądu przemiennego jak i stałego, co powoduje konieczność stosowania filtrów wyższych harmonicznych;
- dużo trudniejsze warunki wyłączenia prądu stałego w porównaniu z obwodami prądu przemiennego;
- trudności w odbiorze mocy z punktów pośrednich linii, powodowane brakiem odpowiedniej aparatury łączeniowej prądu stałego o dużej mocy wyłączalnej.

Liczba zalet i ich waga jednak zdecydowanie przewyższa wady stosowania linii kablowych prądu stałego. Należy się więc spodziewać, że linie te będą się nadal bardzo dynamicznie rozwijały, a przede wszystkim wysokonapięciowe linie kablowe prądu stałego z izolacją wytłaczaną [4].

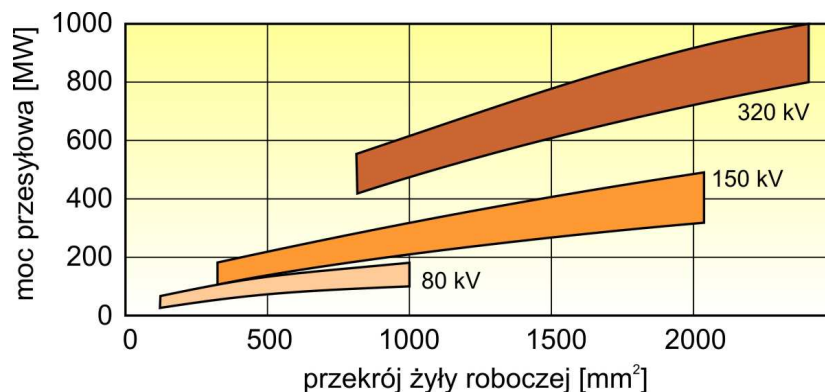
Opracowanie nowoczesnego systemu przesyłu z użyciem technologii Light stwarza nowe możliwości dostarczania energii elektrycznej. System ten pozwala na zminimalizowanie ingerencji w środowisko naturalne, a istniejące linie potwierdzają tę zaletę. System Light może być stosowany zarówno w liniach lądowych, jak i morskich [5, 6]. Wdrażanie tej technologii pozwala wypuklić wiele zalet jej stosowania. Najważniejszą zaletą technologii Light jest brak ograniczeń dotyczących długości, utrudniających

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

stosowanie linii prądu przemiennego, zarówno napowietrznych, jak i kablowych. Nowe rozwiązanie techniczne pozwala nie tylko przesłać energię elektryczną z punktu do punktu, ale również połączyć system z wieloma skupiskami ludzkimi oraz z małymi źródłami wytwarzania energii, takimi jak farmy siłowni wiatrowych oraz elektrownie wodne [7]. Przed opracowaniem tej technologii, budowa takich jednostek była nieopłacalna ze względu na wysoki koszt przesyłu energii elektrycznej oraz małą zdolność przesyłową.

Na wystawie towarzyszącej Sesji Generalnej CIGRE w 2010 roku w Paryżu zaprezentowano lądowe kable typu Light na napięciu 320 kV, ale już w roku 2008 zaprezentowano wszystkie szczegóły techniczne dotyczące wdrożenia kabli DC o izolacji XLPE-DC na napięciu 320 kV [8]. Główną zaletą kabli HVDC linii Light w porównaniu z równoważnymi kablami HVAC jest między innymi ich mniejsza masa i średnica.

Moc przesyłana w systemie HVDC nie zależy od długości linii, maksymalna wartość natężenia prądu osiągana jest w najwyższej dopuszczalnej temperaturze i zależy od przekroju żyły oraz od warunków ułożenia kabla (rys.1), takich jak: głębokość zakopania (ułożenia w dnie morskim), odległość między kablami, temperatura i rezystywność termiczna gruntu. Przykładowo, gdy para kabli ułożona jest w regionie o wysokiej temperaturze i głęboko zakopana w ziemi o dużej rezystywności termicznej oraz gdy kable są ułożone blisko siebie, wówczas zdolność przesyłowa takiej linii jest znacznie mniejsza niż linii z kablami zakopanymi na mniejszej głębokości, w ziemi o małej rezystywności termicznej na terenie, gdzie panuje niska temperatura.



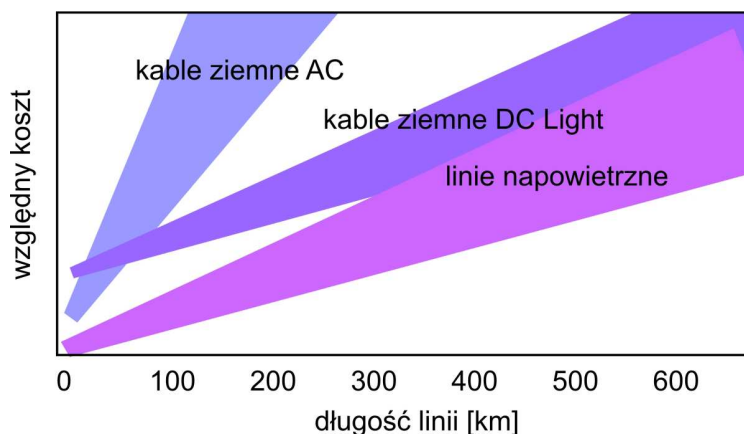
Rys. 1. Zakresy zdolności przesyłowych linii kablowych typu Light wykonanych kablami z żyłami aluminiowymi [wg.8]

Morskie linie HVDC typu Light układane są w zbiornikach wodnych na coraz większych głębokościach. Głębokość, na której kabel może być ułożony, zależy od jego masy własnej (co wynika z konstrukcji) i od dynamicznego obciążenia mechanicznego podczas instalowania linii. Obciążenie to jest związane także z warunkami pogodowymi i wysokością fal podczas układania linii. Przy obecnym poziomie technologii układania przyjmuje się, że przykładowo maksymalna głębokość ułożenia linii kablowych morskich 150 kV (wykonanych w technologii Light) wynosi 1200÷1500 m [9].

Systemy HVDC umożliwiają szybką i bardzo precyzyjną kontrolę przepływu energii elektrycznej, a z użyciem układu bipolarnego można bardzo szybko zmienić jego kierunek. Linią typu Light nie zwiększa się mocy zwarciowej w miejscu połączenia z systemem, a zatem nie jest konieczne np. wymienianie wyłączników w istniejącej sieci.

Zdolność przesyłowa linii HVDC jest zdecydowanie większa niż linii prądu przemiennego o tych samych wymiarach przewodu czy żyły roboczej. Instalacja wykonana w technologii Light wymaga znacznie mniejszego „korytarza kablowego” w porównaniu z linią prądu przemiennego. Dodatkowo system ten charakteryzuje się dużą dyspozycyjnością i niezawodnością; można prognozować, że czas jego niezawodnej eksploatacji wyniesie więcej niż 30 lat. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych urządzeń do mechanicznego układania linii kablowych w systemie Light można znacząco skrócić czas instalowania. W zależności od warunków otoczenia, istniejących przeszkód terenowych i rodzaju podłoża dziennie można ułożyć równocześnie parę kabli lądowych o długości od 300 m do 1000 m. Zanotowano nawet przypadki ułożenia w ciągu jednego dnia 3000 m linii HVDC Light [8].

W wyniku rozwoju i wdrażania technologii Light można obniżyć zarówno koszt elementów linii, jak i prac instalacyjnych. Na rysunku 2 porównano koszt budowy linii HVDC Light z kosztami budowy równoważnych linii HVAC oraz linii napowietrznych. Zgromadzone do chwili obecnej doświadczenia badawcze oraz eksploatacyjne potwierdziły, że system Light jest bardzo dobrym rozwiązaniem technicznym, pozwalającym na zminimalizowanie ingerencji w środowisko naturalne [1].



Rys. 2 Względny koszt linii – łącznie z kosztem instalacji [wg 8]

Przykłady linii kablowych DC

Rozwój wysokonapięciowych linii kablowych to nie tylko linie lądowe i morskie w technologii Light, ale także budowanie nowych linii – szczególnie morskich – o izolacji i konstrukcji tzw. tradycyjnej czyli o izolacji papier+syciwo. Jedną z najdłuższych linii kablowych prądu stałego jest linia NorNed, ułożona kablami o takiej izolacji. 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 [10]. 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 – do 410-420 m. Inwestorami linii były firmy Statnett (Norwegia) i TenneT (Holandia), a koszt inwestycji oszacowano na 495 milionów euro [10]. 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 [2].

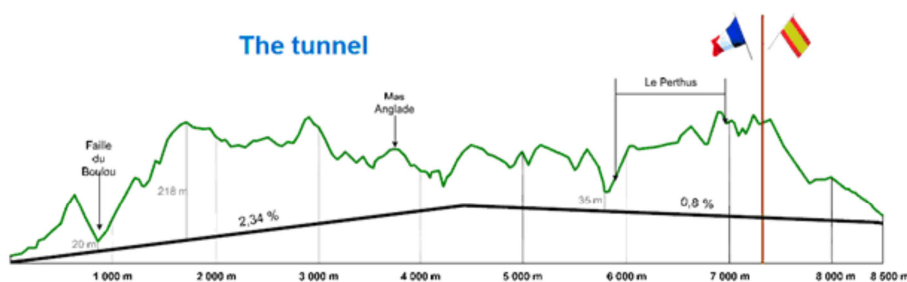
VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

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. Na ważność tematyki linii DC wskazuje przede wszystkim fakt, że organizatorzy największej kablowej konferencji światowej, odbywającej się tradycyjnie tylko co cztery lata w Wersalu, złamali tę tradycję i zdecydowali się na zorganizowanie dodatkowego seminarium poświęconego tylko liniom DC, z udziałem ekspertów z całego świata.

Poza nowymi i coraz dłuższymi liniami DC typu Light realizowanymi na całym świecie, do szczególnie interesujących linii DC (także z izolacją XLPE-DC) aktualnie powstających należy zaliczyć linię INELFE, łączącą system energetyczny Francji i Hiszpanii. Długość linii wynosi 65 km. Jest to linia dwutorowa ± 320 kV, a każdy tor składa się z dwóch jednakowych kabli DC o izolacji XLPE-DC. Zdolność przesyłowa linii to 2×1000 MW. Kable ułożone są bezpośrednio w ziemi (rys.3), lecz najciekawszy odcinek linii to przejście przez Pireneje (rys.4) na długości 8500 m w tunelu o średnicy 3,5 m [11].



Rys. 3. Układanie linii INELFE, listopad 2013 (fot. autorka)



Rys. 4. Przejście linii INELFE przez Pireneje [12]

Przejście linii przez wysokie góry nie jest jedyną trudnością techniczną dla inwestorów tej linii, czyli RTE i REE. Budowana linia zlokalizowana jest bardzo blisko linii kolejowej dużej szybkości TGV oraz na znacznej długości ułożona jest równoległe do autostrady.

Wykonawcą linii i stacji przekształtnikowych jest koncern SIEMENS, a dostawcą kabli PRYSMIAN. Spodziewany termin zakończenia inwestycji i oddanie linii do eksploatacji to przełom 2014 i 2015 roku.

Podsumowanie

Szybki rozwój linii kablowych DC o izolacji wytłaczanej stał się faktem od momentu opracowania przez koncern ABB technologii Light. Izolację w kablach DC typu Light stanowi polietylen usieciowany zmodyfikowany (XLPE-DC) w celu zwiększenia odporności tej izolacji na tworzenie się ładunku przestrzennego w polu elektrycznym. Główną zaletą kabli HVDC linii Light, w porównaniu z równoważnymi kablami HVAC, jest między innymi ich mniejsza masa i średnica. Prowadzi to do wzrostu tzw. gęstości przesyłanej mocy energii elektrycznej. Należy pamiętać, że system prądu przemiennego składa się z trzech kabli, a system prądu stałego w przypadku linii typu Light – z dwóch kabli. Należy spodziewać się dalszego, dynamicznego rozwoju linii kablowych DC w systemie Light, gdy spojrzeć na porównanie kosztów budowy linii HVDC Light z kosztami budowy równoważnych linii HVAC oraz linii napowietrznych.

Obecnie najwyższy poziom napięcia na którym pracują linie HVDC Light to 320 kV. Kable HVDC Light na napięcie 320 kV, zarówno w wykonaniu morskim, jak i lądowym, ułożone zostały m.in. w liniach DoIWin1 i DoIWin2 Offshore Wind Project [12].

Literatura

- [1] Rakowska A., Linie kablowe prądu stałego – wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2011.
- [2] 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.
- [3] Kujszczyk Sz., Flisowski Z., Elektroenergetyczne układy przesyłowe, WNT, Warszawa, 1997.
- [4] Rakowska A., Kable morskie prądu stałego – najnowsze technologie, Zeszyty Naukowe PP, Energetyka, Zeszyt 49 KNE O/PAN w Poznaniu, 2005.
- [5] HVDC Light Cables, Submarine and land power cable, ABB, katalog ABB HVC 2GM5001-gb 3000.
- [6] Rakowska A., Hajdrowski K., Podziemne linie kablowe prądu stałego – budowa linii w systemie „lekkim”, Energetyka, 2002, nr 7.
- [7] ABB, It's time to connect – technical description of HVDC Light technology, Katalog POW-0038, Rev. 2.
- [8] Jeroense M., Gustafsson A., Bergkvist M., HVDC Light cable system extended to 320 kV, in: CIGRE Session, Paris, 2008, paper B1-304.
- [9] Bergkvist M., Hansson O., Jeroense M., Sonesson C., Development of extruded single core cables for deep water, in: JICABLE, Versailles, 2007, paper B.7.1.
- [10] Worzyk T., Sjoberg M., Skog J-E, Koreman, The NorNed HVDC Link, cable design and performance, in: JICABLE, Versailles, 2007, paper B.7.2.
- [11] Decoeur Y., The underground HVDC interconnection line between France and Spain BAIXAS – Santa LLOGAIA, *European Seminar on material for HVDC cables and accessories*, Jicable HVDC'13, Perpignan, November 2013.
- [12] Submarine Power Cables, Cables for offshore wind farms, ABB HVC 2GM5010-gb WIND, rev. 2012-02, Elanders Sverige AB

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