

Rola prądu stałego w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia

The role of direct currents in low voltage power distribution network

Michał Czyż

Słowa kluczowe:

Keywords:

Rozważania słuszności wykorzystania prądu stałego DC (Direct Current) lub przemiennego AC (Alternating Current) do przesyłania energii elektrycznej i zasilania urządzeń sięgają XIX w. Najsłynniejszymi przedstawicielami świata nauki toczącymi dyskusje w tej kwestii byli Alva Edison i Nikola Tesla.

Mimo, iż zwycięstwo prądu przemiennego dotyczyło sporu w zakresie budowy i konstrukcji maszyn elektrycznych, przede wszystkim generatorów, to zwycięstwo to spowodowało również tworzenie infrastruktury wykorzystującej AC. Niedługo później, już w XX w. energia elektryczna stała się powszechnym i szeroko wykorzystywanym dobrem, najpierw w przemyśle, a później w gospodarstwach domowych [3].

Rozwój techniki umożliwił swobodną transformację energii elektrycznej w układach DC, tak jak wcześniej transformator umożliwił to dla sieci AC [2, 4]. Dzięki temu możliwy jest powrót do koncepcji wykorzystywania prądu stałego zamiast prądu przemiennego, co obecnie uwidacznia się zarówno na poziomie źródeł energii, które coraz częściej wykorzystują energię odnawialną, jak i odbiorników, którymi coraz częściej są różnego rodzaju urządzenia elektroniczne na prąd stały [2].

Testowanie koncepcji wykorzystania prądu stałego odbywa się w różnych krajach i na różnych napięciach. Prace nad wykorzystaniem sieci dystrybucyjnych DC trwają w Korei Południowej, Finlandii, a także w mniejszej skali w innych krajach. Mimo to, na-

dal istnieje niedobór informacji na temat efektów zmiany pracy sieci elektroenergetycznej z AC na DC dla odbiorców i samej sieci oraz na temat uzasadnienia takiej zamiany. Obecnie większość sieci elektroenergetycznych opiera się na prądzie przemiennym, jednakże długość linii przesyłowych prądu przemiennego jest ograniczona. Długość graniczna linii zależy od jej obciążenia oraz typu napowietrzna czy kablowa. W przypadku linii kablowych długości graniczne są znacznie mniejsze niż napowietrznych [8]. W sytuacji, gdy rzeczywista długość linii prądu przemiennego jest większa od długości granicznej, konieczne jest zastosowanie linii prądu stałego. Dla linii prądu stałego pojęcie długości granicznej nie istnieje [8].

KONCEPCJE ELEKTROENERGETYCZNYCH SIECI PRĄDU STAŁEGO

W przypadku linii DC wyróżnia się cztery główne koncepcje stacji i linii umożliwiających przesyłanie energii elektrycznej za pomocą prądu stałego [2]:

- monopolarna linia z powrotem przez grunt,
- monopolarna z powrotem przez metaliczny przewód,
- bipolarna linia z powrotem przez grunt,
- bipolarna z powrotem przez metaliczny przewód.

Ciągły przepływ prądu stałego przez grunt w przypadku instalacji z powrotem przez grunt powoduje negatywny wpływ na instalacje podziemne, takie jak np. gazociągi. Z tego powodu

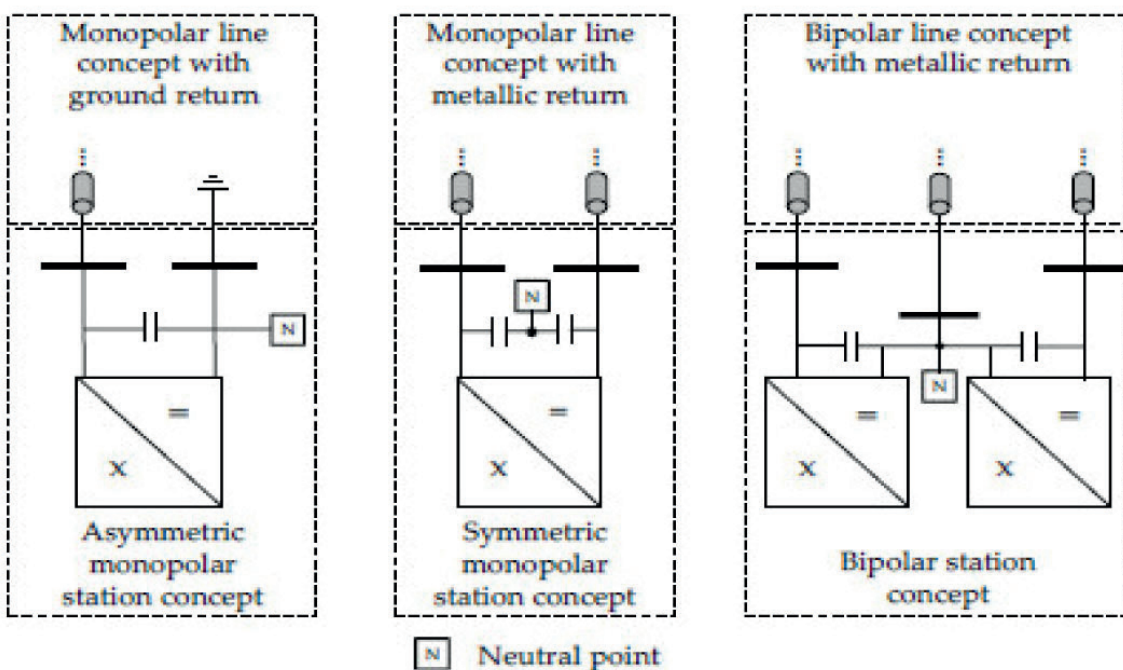
zarówno instalacje monopolarne z powrotem przez grunt, jak i bipolarne z powrotem przez grunt są rzadko stosowane i nie są rozwijane [1, 4]. Na rys. 1 przedstawiono 3 spośród 4 przedstawionych koncepcji. Pierwsza z nich przedstawia układ monopolarny z powrotem przez grunt, zaś druga i trzecia to układy kolejno mono – i bipolarne z powrotem zrealizowanym przez metaliczny przewód. Ze względu na opinię publiczną oraz jej niechęć do napowietrznych linii, większości nowo powstających linii DC planuje się jako linie kablowe [4], dlatego w dalszej części artykułu będą poruszane kwestie tylko linii kablowych.

W dwóch pierwszych przypadkach przedstawiono pojedynczy układ przekształtnikowy, zaś w trzecim podwójny. Warto także zauważyć, iż stację bipolarną można stworzyć z połączenia dwóch stacji monopolarnych o przeciwnej biegunowości [1]. Rozwiązaniem pozwalającym na zwiększenie niezawodności sieci DC jest tworzenie połączeń hybrydowych z stacjami o niskim priorytecie. Takie rozwiązanie, ukazane na rys. 2, w przypadku uszkodzenia połączenia pomiędzy stacjami w jednym punkcie, pozwala podstacji na prawidłowe funkcjonowanie i zasilanie dalszych elementów sieci oraz odbiorców.

Dzięki swojej zdolności przesyłowej, system LVDC (Low Voltage Direct Current) ± 750 V/1500 V może być efektywnie używany

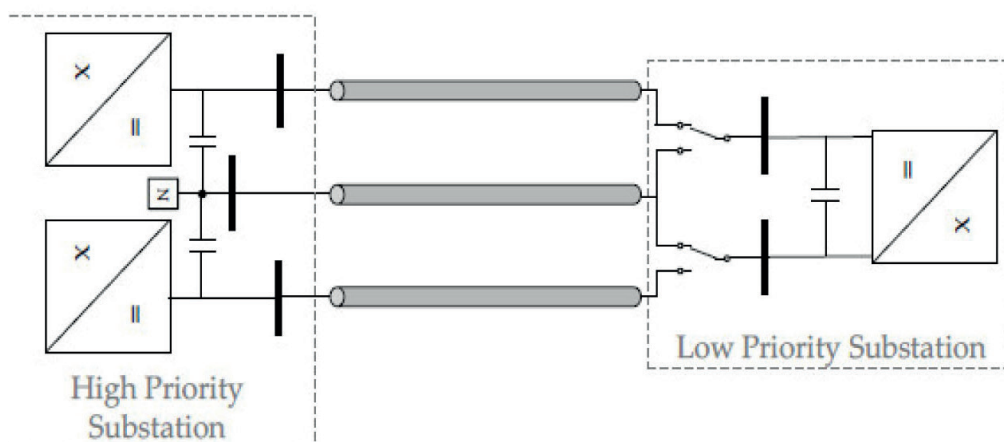
zamiast sieci nn na prądzie przemiennym, ale także do wymiany odgałęzień linii średniego napięcia (SN). W konsekwencji cała sieć skracą się, zwiększa się liczba stref ochronnych i zmniejsza się liczba i czas trwania przerw, których doświadczają użytkownicy końcowi [6]. Bezpieczeństwo dostaw można dodatkowo poprawić, wykorzystując lokalnie dostępne zasoby wytwórcze i magazynowe oraz umożliwiając działanie systemu LVDC w trybie wyspowym [6]. Rozproszone źródła energii zmniejszają podatność na długie przerwy w dostawie energii i są doskonałą okazją dla operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) do poprawy bezpieczeństwa dostaw bez kosztownego, wielkoskalowego okablowania podziemnego [6].

Technologia LVDC może mieć znaczący wpływ na rolę mikro-sieci i sieci prywatnych w publicznej dystrybucji energii, a także na integrację rozproszonych odnawialnych źródeł energii i magazynów energii elektrycznej. Na przykład sieć LVDC może zapewnić infrastrukturę dla społeczności zajmujących się zieloną energią, np. zrzeszonych w klastrach energii. Zintegrowany system teleinformatyczny umożliwia efektywne wykorzystanie rozproszonych zasobów w celu świadczenia usług dla wszystkich zainteresowanych stron: klientów, sprzedawców energii elektrycznej, lokalnego przedsiębiorstwa dystrybucyjnego i operatora systemu



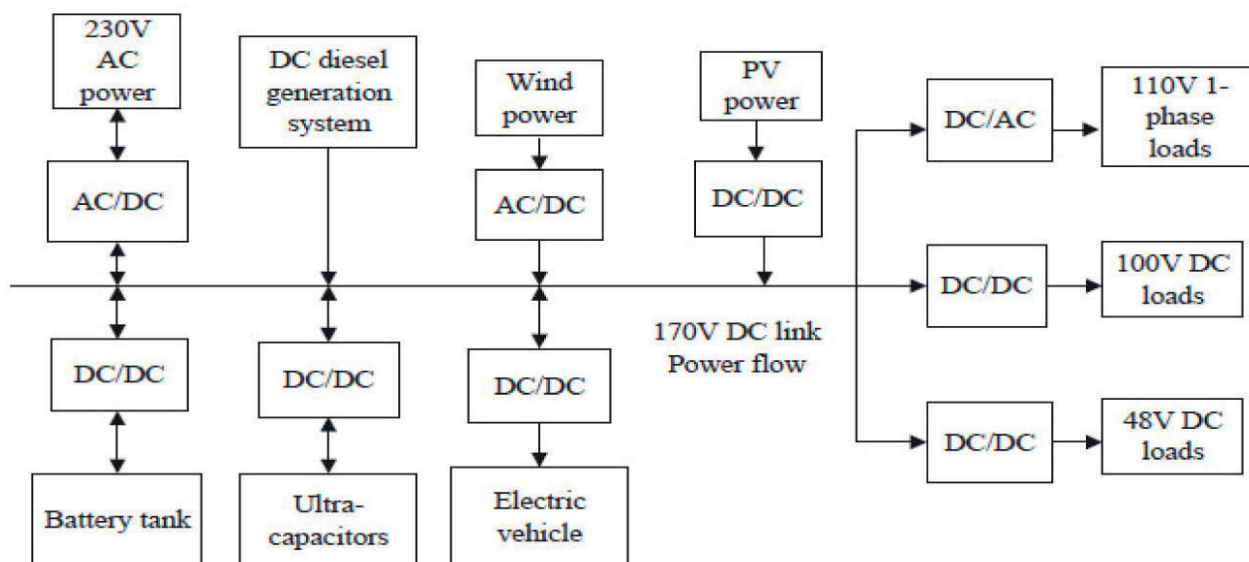
Rys. 1. Koncepcje linii DC [4]

Fig. 1. DC line concepts [4]



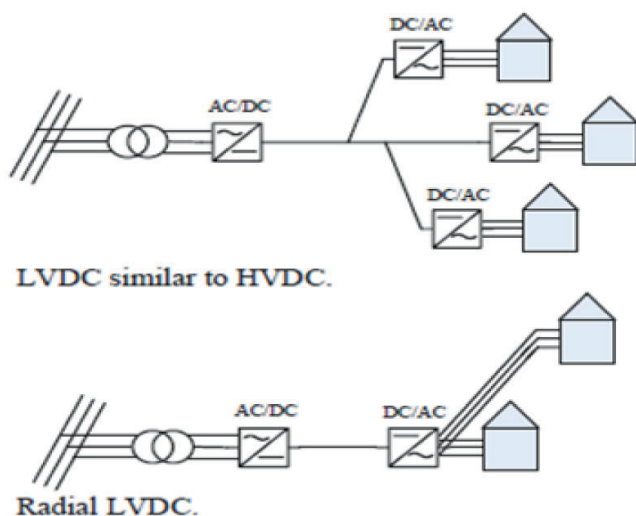
Rys. 2. Połączenie hybrydowe [1]

Fig. 2. Hybrid connections [1]



Rys. 3. Sieć dystrybucyjna DC [2]

Fig. 3. DC distribution grid [2]



Rys. 4. Przykłady hybrydowych sieci dystrybucyjnych DC [4]

Fig. 4. Examples of hybrid DC distribution networks [4]

elektroenergetycznego. Przykładem takiej usługi są dynamicznie zmieniające się stawki za energię bierną oraz czynną. Niektóre usługi pomocnicze opierają się na nieodłącznych funkcjach konwerterów i są dostępne prawie bez żadnej komunikacji. Są to np. możliwości sterowania wymianą mocy biernej oraz korygowanie odchyłen jakości energii w połączonych sieciach prądu przemiennego.

Połączenia na prąd stały w sieci elektroenergetycznej można zaimplementować na kilka sposobów. Poza pełnym zastąpieniem wszystkich połączeń w sieci elektroenergetycznej jak na rys. 3 możliwy jest wariant wykorzystania sieci DC tylko na konkretnych odcinkach.

Rozwiązanie przedstawione na rys. 4 pozwala na zastosowanie sieci DC w sposób niewymagający zmian u odbiorcy [4]. Takie połączenie pozwala na podniesienie jakości zasilania odbiorców, gdyż liczba odkształceń harmonicznych zależy od jakości zastosowanego inwertera i filtrów. Zakłócenia pochodzące z sieci nie

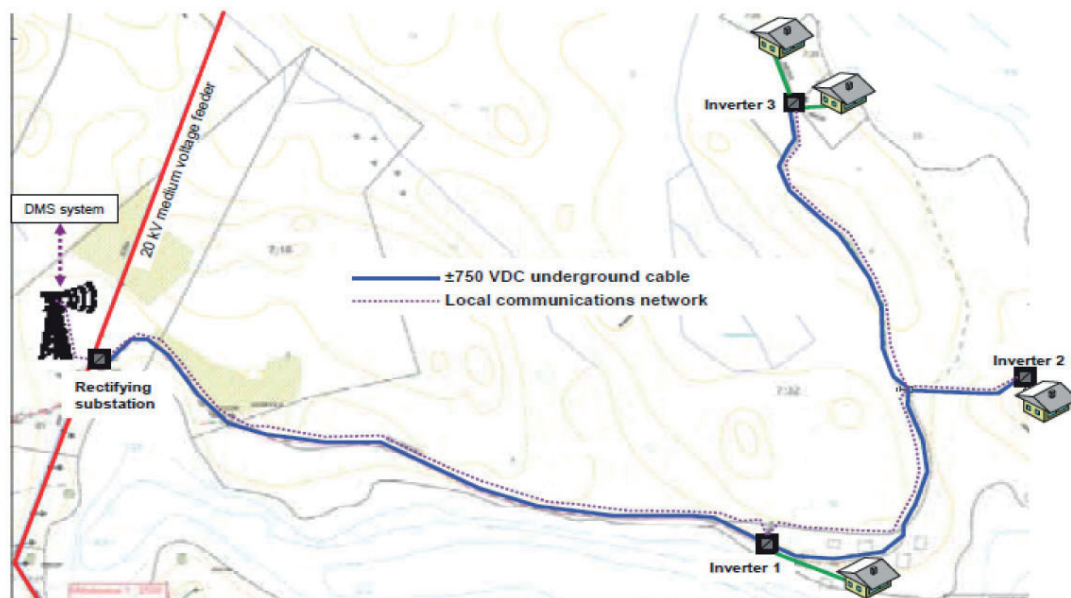
są przenoszone na odbiorniki u odbiorców. Energia bierna nie jest przesyłana przez fragment sieci DC, w związku z tym przy tym samym napięciu skutecznym można przesłać więcej energii czynnej. Ponadto, podczas modernizacji linii na DC, można zastosować te same kable, jakie były wykorzystywane przy AC [4], co ogranicza koszty.

PRZYKŁADY FUNKCJONUJĄCYCH SIECI PRĄDU STAŁEGO

Dystrybucja energii za pomocą prądu stałego jest uznawana za potencjalne rozwiązanie w przypadkach, takich jak renowacja istniejących sieci publicznych, czy elektryfikacja odległych obszarów za pomocą autonomicznych systemów opartych na odnawialnych źródłach energii [6]. W ciągu ostatniej dekady badania nad wykorzystaniem prądu stałego w dystrybucji energii przeszły od teoretycznych rozważań do badań stosowanych, w których ważną rolę odgrywają eksperymenty w rzeczywistym środowisku aplikacji. Zainicjowano i zakończono kilka działań badawczych na całym świecie, wiele z nich zaowocowało realizacją rzeczywistych sieci i instalacji [6].

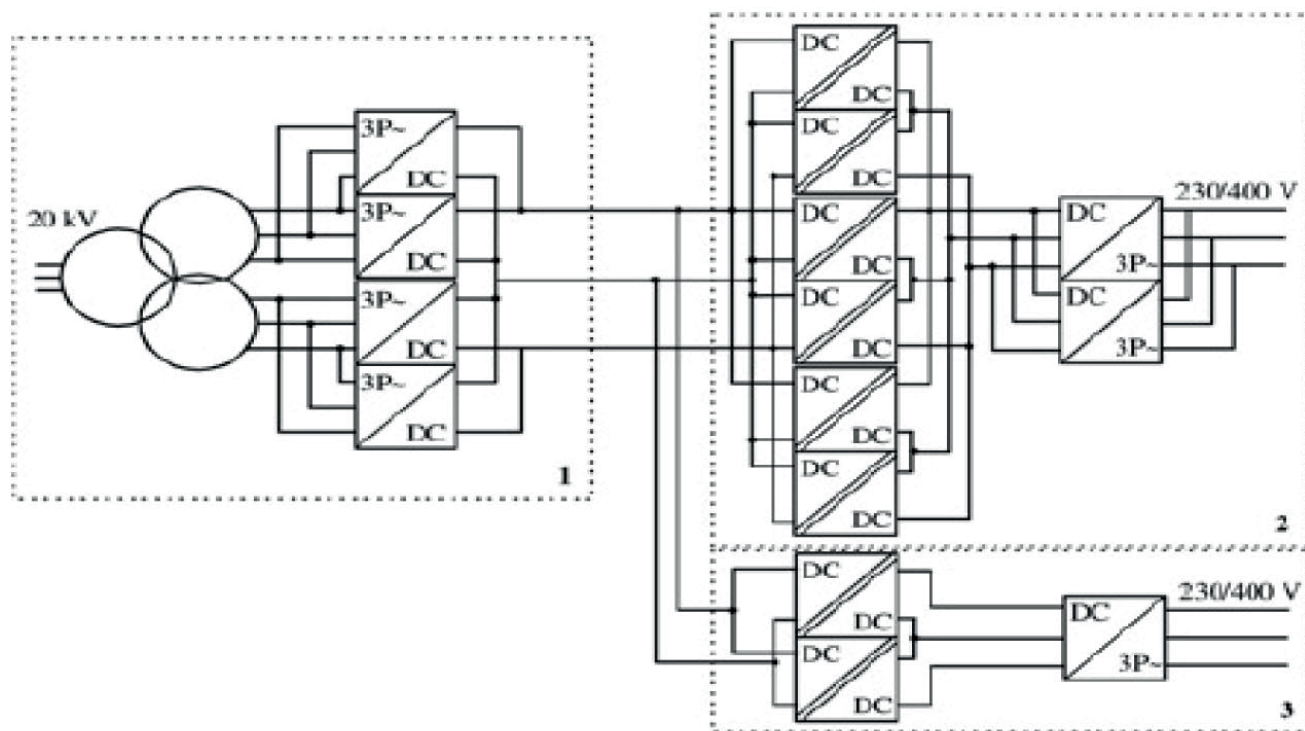
LVDC W FINLANDII

Pierwsze próby terenowe w Finlandii przeprowadzono w 2008 r., kiedy Ensto Finland Oy i Porvoon Energia Oy przekształciły istniejący odcinek linii AC w linię DC. Chociaż linia przed modernizacją była w stanie zasiląć obciążenia zgodnie z planem, miała problemy związane z kontrolą napięcia i spełnianiem wymagań ochronnych po stronie klienta [6]. Okazało się, że sama koncepcja technologii jest funkcjonalna, ale potrzebne są dalsze badania. Drugie stanowisko testowe zostało uruchomione około dwa lata później, w 2010 r., przez Elenia Oy i ABB Oy Drives. Przez testy udowodniono, że konwertery wbudowane w sieć mogą zapewnić obsługę sieci i poprawić jakość energii [6]. Wcześniejsze konfiguracje zostały wycofane i zastąpione przez kolejne dwa projekty w 2012 i 2014 r. Oba nowe produkty pracują w trybie ciągłym w ramach lokalnych sieci energetycznych. Pierwszy został zrealizowany przez LUT i Suur-Savon Sähkö Oy i wykorzystuje ± 750 V DC do zasilania czterech klientów indywidualnych, tak jak pokazano to na rys. 5, zaś drugi został zbudowany przez Elenia Oy i ABB Oy Drives i opiera się na wykorzystaniu 750 V DC. Obie konfiguracje działały zgodnie z planem i pozwoliły na potwier-



Rys. 5. Linia badawcza jednego z projektów na terenie Finlandii [7]

Fig. 5. Line one of the research projects in Finland [7]



Rys. 6. Sieć dystrybucyjna LVDC stworzona w ramach projektu LVDC RULES [10]

Fig. 6. LVDC distribution network created as part of the LVDC RULES project [10]

dzenie wykonalności rozwiązań technicznych, a zwłaszcza tego, że możliwe jest zbudowanie bezpiecznych i niezawodnych sieci dystrybucyjnych LVDC [6, 7].

Próby terenowe wykazały potrzebę projektowania urządzeń, a zwłaszcza konwerterów, w oparciu na optymalizacji kosztów w cyklu życia [6]. Pokazano również, że technologia LVDC zapewnia platformę do wdrażania złożonych funkcji sterowania i monitorowania. Na podstawie badań terenowych stwierdzono, że technologia jest wystarczająco dojrzała do komercjalizacji [10].

Dystrybucja LVDC została określona jako opłacalna opcja renowacji sieci o znacznym potencjale techniczno-ekonomicznym. Według przeprowadzonego studium przypadku kilkadziesiąt procent istniejących sieci dystrybucyjnych prądu przemiennego można by zastąpić w nordyckim środowisku operacyjnym sieciami prądu stałego [6].

Jesienią 2015 r. rozpoczęto w Finlandii kolejny projekt badawczy – LVDC RULES. Powstał on w celu rozwoju idei wykorzystania sieci dystrybucyjnych prądu stałego w skali przemysłowej



LVDC W KOREI POŁUDNIOWEJ

energii odnawialnej, systemu magazynowania energii, systemu zarządzania energią i systemu odpowiedzi ze strony odbioru. Ponieważ elementy infrastruktury elektroenergetycznej takie jak fotowoltaika i magazyny energii elektrycznej, to systemy prądu stałego, sieć prądu stałego ma wysoką sprawność, ze względu na mniejszą liczbę konwersji energii w porównaniu z siecią prądu przemiennego. W sieci prądu stałego dodatkowo nie jest wymagane uwzględnienie głównych problemów systemu prądu przemiennego, takich jak częstotliwość i harmoniczne, które są bardzo problematyczne w małych sieciach elektroenergetycznych na wyspach [5].

Wyspa Geochado ma średnie obciążenie na poziomie $P_{sr} = 124$ kW i obciążenie szczytowe $P_{max} = 305$ kW. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną było obsługiwane przez istniejące trzy generatory wysokoprężne (150 kW na jednostkę). Nowo zainstalowane jednostki wytwórcze to turbina wiatrowa o mocy 100 kW, PV o mocy 111 kW i nowy generator diesla 200 kW, a oprócz tego zainstalowano także magazyn energii o pojemności 500 kWh. W celu przedstawienia systemu dystrybucji LVDC, z istniejących obciążeń elektrycznych wyspy wybrano dziesięć odbiorników mieszkalnych i dwa obciążenia komercyjne. Ponadto planuje się zainstalowanie czterech stacji V2G i „dom DC”, który korzysta

tylko z zasilania DC. W wybranych domach zainstalowane będą urządzenia zasilanie tylko za pomocą prądu stałego. W przypadku odbiorników mieszkalnych i komercyjnych, które wykorzystują zarówno prąd stały, jak i przemienny, przetwornica DC/AC zostanie zainstalowana po stronie obciążenia. Sieć prądu stałego planowana jest zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 7. Niebieskie linie to istniejąca sieć prądu przemiennego o napięciu 380 V AC. Linie złote i pomarańczowe to nowe linie prądu stałego z odpowiednio 750 V AC i ± 750 V AC.

SZANSE NA ROZWÓJ SIECI PRĄDU STAŁEGO

Do rozważań nad szerszym wykorzystaniem prądu stałego w sieciach elektroenergetycznych przyczynia się gwałtowny rozwój odnawialnych źródeł energii. Panele fotowoltaiczne wytwarzają energię w postaci prądu stałego, a obecnie instalacje fotowoltaiczne to nie tylko duże farmy fotowoltaiczne, ale także instalacje elektroenergetyczne w zakładach pracy, obiektach użyteczności publicznej czy w prywatnych domach. W wielu krajach, także w Polsce, rządy zachęcają do tworzenia domowych instalacji fotowoltaicznych ze wsparciem w postaci: dotacji, ulg podatkowych i innych działań politycznych oraz prawnych. W przypadku innych źródeł energii odnawialnej również stosuje się prąd stały do połączenia generatorów z siecią, nawet jeżeli dane źródło nie wytwarza energii elektrycznej w tej postaci. Najczęściej zabieg ten stosuje się ze względu na zmienność energii i wytwarzanej mocy [2].

Udział odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym produkowanej na świecie energii rośnie, a naciski polityczne sugerują, że ten trend się utrzyma. Aktualnie obowiązujący w Europie plan 3×20 zakładający redukcję energochłonności o 20%, redukcję emisji gazów cieplarnianych o 20% i 20-procentowy udział OZE w produkcji energii dobiega końca, a w perspektywie są kolejne plany zakładające dalsze zwiększenia tych procentowych udziałów. W związku z nowym reżimem klimatycznym oczekuje się, że światowy rynek energii odnawialnej szybko się rozwinie.

Rozwój branży akumulatorowych pojazdów elektrycznych BEV (Battery Electric Vehicle), których szybkie ładowanie najczęściej odbywa się za pomocą energii prądu stałego sugeruje, iż udział odbiorników DC w sieci również będzie się zwiększał. Dodać należy, że dzięki technologii V2G (Vehicle To Grid) samochody to nie tylko odbiorniki, ale także potencjalne magazyny energii elektrycznej. Aktualnie nie ma możliwości magazynowania energii elektrycznej w dużej skali i niskim koszcie. Znałe sposoby dotyczą w zasadzie magazynowania innych rodzajów energii, np. w elektrowniach szczytowo-pompowych. Powoduje to, że energia elektryczna czynna wytwarzana musi być w każdej chwili równa energii użytkowanej powiększonej o straty energii w systemie elektroenergetycznym [8]. Odpowiednio duża liczba samochodów elektrycznych może zostać wykorzystana do magazynowania energii elektrycznej w akumulatorach pojazdów, co z kolei pozwalałoby na regulację obciążenia systemu elektroenergetycznego. Wymagałoby to jednak także rozbudowy istniejącej elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej, zwłaszcza w miastach. W istniejących magazynach energii także wykorzystuje się prąd DC, gdyż najczęściej pozyskanie zmagazynowanej energii z takiego magazynu oznacza konwersję z jakiegoś innego rodzaju energii na energię elektryczną w formie prądu stałego. Dowodzi to, że nie tylko nowoczesne źródła energii operują na prądzie stałym, ale także nowe urządzenia i instalacje techniczne.

W rozwój sieci wykorzystujących prąd stały wpisuje się także idea smart grid. Połączenie wielu źródeł OZE, magazynów, odbiorników i przekształtników jest wymagającym wyzwaniem, z którym elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna nie poradzi so-

bie bez zaawansowanej aparatury monitorującej stan sieci i odpowiednich selektywnych zabezpieczeń. Smart grid wydaje się wsparciem dla sieci dystrybucyjnych prądu stałego (LV DC – Low Voltage Direct Current), gdyż ułatwi dołączanie rozproszonych źródeł i magazynów energii do sieci, a także zwiększy niezawodność sieci [4].

W wielu krajach bloku wschodniego, nie tylko w Polsce, istniejące sieci elektroenergetyczne to w dużej części instalacje budowane kilkadziesiąt lat temu, będące w eksploatacji ponad 40 lat [4]. W niedługim czasie konieczna będzie ich wymiana na nowe, co jest dobrą okazją na rozważenie zmiany podejścia do tworzenia systemu elektroenergetycznego. Nowo powstające sieci prawdopodobnie także będą miały czas eksploatacji na poziomie dziesiątek lat, więc muszą być w stanie odpowiadać na stawiane im w przyszłości wymagania, jakie narzuca im m.in. OZE, elektromobilność czy konsumenci, których zapotrzebowanie na energię elektryczną rośnie.

LITERATURA

- [1] Bleilevens r., J. Priebe, N. Wehbring, A. Moser. 2019. Reliability Analysis of DC Distribution Grids, Institute of Power Systems and Power Economics, RWTH Aachen University.
- [2] Cao W., J. Wen, s. Zhou, s. LV. Application and prospect od direct current in modern socjety. North China Electric Power University, Changping 102206, Beijing, China.
- [3] Dragicevic T., J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, D. Škrlec. 2014. Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids. 2014 A step toward a new generation of power distribution networks. *IEEE Electrification Magazine*.
- [4] Hakala T., P. Jarventausta, T. Lahedeaho. 2013. The utilization potential of LVDC distribution. 22nd International Conference on Electricity Distribution, Paper 1151.
- [5] HongJoo K., C. Youngpyo, K. Jaehan, C. Jintae, K. Juyong. 2017. Demonstration Of The LVDC Distribution System In an Island. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED).
- [6] Kaipia T., J. Karppanen, P. Nuutinen, A. Pinomaa, A. Mattsson, P. Peltoniemi, P. Silventoinen, J. Partanen. 2016. LVDC Rulez – Towards Industrial-Scale Application of Low-Voltage Direct Current In Public Power Distribution. Lappeenranta University of Technology – Finland. CIRED Workshop – Helsinki.
- [7] Kaipia T., P. Nuutinen, A. Pinomaa, A. Lana, J. Partanen, J. Lohjala, M. Matikainen. 2012. Field Test Environment For LVDC Distribution – Implementation Experiences. CIRED Workshop – Lisbon.
- [8] Kanicki A. 2010. Systemy elektroenergetyczne.
- [9] Kujaszczyk S. 1994. Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [10] Nuutien P., T. Kaipia, J. Karppanen, A. Mattsson, A. Lana, A. Pinomaa, P. Peltoniemi, J. Partanen, M. Luukkanen, T. Hakala. 2017. LVDC rules – technical specifications for public LVDC distribution network. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED).
- [11] Youngpyo C., K. HongJoo, K. Jaehan, C. Jintae, K. Juyong. 2017. Construction of actual LVDC distribution line. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED).