

## Układy HVDC we współczesnych systemach elektroenergetycznych

**Streszczenie.** Układy przesyłowe HVDC, ze względu na oferowane właściwości, stają się coraz bardziej popularne we współczesnych systemach elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono spotykane obecnie rozwiązania układów przesyłowych wysokiego napięcia prądu stałego. Omówiono cechy przesyłu prądem stałym, występujące topologie przekształtników oraz zwrócono uwagę na prowadzone aktualnie prace badawcze, dotyczące m. in. struktur złożonych. Przedstawiono również stan obecnego unormowania i ustandaryzowania omawianych systemów przesyłowych.

**Abstract.** The paper describes an overview of High Voltage Direct Current transmission in modern power systems. In the article there are presented: characteristic of high voltage DC transmission, power converter designs, their comparison and current research related to aspects of multiple HVDC links. Furthermore, achieved levels of normalization and standardization of technical and functional requirements relating to these transmission systems are described. (HVDC transmission systems in modern power systems).

**Słowa kluczowe:** układy przesyłowe wysokiego napięcia prądu stałego, HVDC, LCC, VSC

**Keywords:** High Voltage Direct Current Transmission Systems, HVDC, LCC, VSC

### Wstęp

Współczesny rozwój przyrządów energoelektronicznych, będących elementami urządzeń wielkiej mocy, przyczynia się do zwiększenia udziału układów HVDC (ang. High Voltage Direct Current – wysokie napięcie prądu stałego) w systemach elektroenergetycznych. Dodatkowo nowe topologie przekształtników i zaawansowana konstrukcja kabli prądu stałego sprawiają, że dokonywany jest postęp pozwalający na zwiększenie obszaru zastosowań oferowanych przez dzisiejsze układy HVDC.

Układy przesyłowe HVDC zaliczają się do podstawowych elementów przyszłościowych inteligentnych sieci elektroenergetycznych określanych jako Smart Grid. Stworzenie takiej sieci ma na celu zwiększenie bezpieczeństwa systemu i efektywności energetycznej, między innymi poprzez: wykorzystanie nowoczesnych urządzeń, integrację źródeł odnawialnych, wdrożenie instrumentów regulacyjnych i odpowiedniej konkurencji. Zastosowanie układów HVDC ma kluczowe znaczenie w zakresie wsparcia rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE), w takich projektach jak DESERTEC (m. in. wykorzystanie energii słonecznej) [1] czy SUPERGRID (przesyłanie ogromnych ilości energii z OZE na duże odległości) [2].

Przypuszcza się, że rosnąca liczba morskich farm wiatrowych przyłączonych do systemu elektroenergetycznego za pomocą układów HVDC, spowoduje przekształcenie się tradycyjnych układów przesyłowych z dwoma stacjami w układy wieloterminalowe [3, 4]. Nowoczesne konstrukcje przekształtników instalowanych w układach HVDC rozszerzają zakres zastosowań, np. poprzez zwiększenie przesyłanej mocy, zasilanie sieci pasywnych, czy stabilizację napięcia w sieci. W artykule przedstawiono charakterystykę obecnie dostępnych układów przesyłowych HVDC. Zaprezentowano oddziaływanie układów wysokiego napięcia prądu stałego na system elektroenergetyczny. Zwrócono również uwagę na obecny stan standaryzacji związany z układami HVDC.

### Główny podział układów HVDC

Tradycyjne układy HVDC, czyli połączenia wysokiego napięcia prądu stałego, są realizowane za pomocą układu przesyłowego składającego się ze stacji przekształtnikowych i linii napowietrznej lub kablowej prądu stałego. Obecnie dostępnych jest wiele konfiguracji układów, które zasadniczo można zaliczyć do dwóch grup: układów „Back-to-Back” (BtB), które służą do łączenia systemów AC pracujących asynchronicznie oraz układów służących do przesyłu mocy na odległość [5]. Typowo stosowane są dwie odrębne stacje, każda z nich, w zależności od kierunku przesyłu mocy, może spełniać funkcję prostownika lub falownika. Natomiast w układach BtB, czyli wstawkach prądu stałego [6] (określanych również jako sprzęgła [7]), oba przekształtniki znajdują się w obrębie tej samej stacji elektroenergetycznej. W układach BtB nie występuje tradycyjny przesył energii prądem stałym, stąd uważane są za układy „zerowej długości”. W połączeniach HVDC wykorzystywane są dwie podstawowe topologie przekształtników:

- przekształtniki prądu CSCs (ang. Current Source Converters):
  - o komutacji sieciowej, naturalnej, określane jako LCC (ang. Line Commutated Converters) CSC [5],
  - przekształtniki komutowane kondensatorowo CCC (ang. Capacitor Commutated Converters) [5, 8],
- przekształtniki napięcia (ang. Voltage Source Converters) o komutacji wymuszonej FCC (ang. Forced Commutated Converters) [5].

Układy HVDC z wykorzystaniem przekształtników pracujących jako źródła prądowe CSC są układami konwencjonalnymi, określanymi jako „classical HVDC”, natomiast układy HVDC z przekształtnikami pracującymi jako źródła napięciowe VSC są układami nowoczesnymi [9].

### Przykłady współczesnych układów HVDC

Pierwsze układy przesyłowe HVDC, wykorzystujące przekształtniki LCC, zbudowane były w oparciu o zawory ręcienne, których prawidłowa praca była utrudniona ze względu na pojawiające się przypadkowo zapłony wsteczne i przebiecia. Zalety eksploatacyjne tyrystorów mocy, wprowadzonych zamiast zaworów ręciovych w latach 70-tych. XX wieku, spowodowały utrwalenie popularności tej technologii, aż do obecnych czasów. Układy te chętnie stosowane są przy wyprowadzaniu mocy z elektrowni wodnych i przy przesyłach mocy na duże odległości m. in. w Chinach, będących pionierem w zakresie wykorzystania ultra wysokiego napięcia prądu stałego (UHVDC).

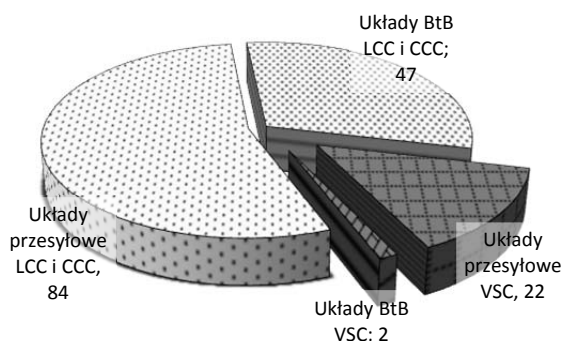
W roku 1997, w projekcie Hellsjon, dokonano pierwszego na świecie przesyłu energii prądem stałym z wykorzystaniem przekształtników VSC. Od tego momentu zauważa się intensyfikację badań i prac nad wykorzystaniem przekształtników VSC w układach HVDC, włączonych do systemu elektroenergetycznego. Efekty tych działań spowodowały, że oferowane obecnie układy przesyłowe z przekształtnikami VSC, mają większy zakres zastosowań niż układy z przekształtnikami LCC.

Wybrane układy HVDC wraz z ich podstawowymi parametrami zostały przedstawione w tabeli 1. Zestawienie przygotowano biorąc pod uwagę moc znamionową połączeń HVDC oraz różne warianty wykonania układów, występujące na świecie.

Tabela 1. Przykłady współczesnych układów HVDC oraz ich podstawowe parametry

Nazwa projektu/ kraj	Rok uruchomienia	Przekształtnik	Moc/napięcie łącza HVDC	Długość połączenia HVDC [km]	Zastosowanie
<b>Układy z przekształtnikami VSC</b>					
Hellsjon/ Szwecja	1997	VSC dwupoziomowy	3 MW/ ±10 kV	10	Układ testowy VSC
Mackinac/ USA	2014	VSC dwupoziomowy	200 MW/ ±71 kV	0	Układ BtB, poprawa stabilności napięciowej, regulacja przepływów mocy
INELFE/ Hiszpania/ Francja	2014	VSC MMC	2000 MW/ ±320 kV	64	Użycie kabli podziemnych/ poprawa wymiany mocy
BorWin2/ Niemcy	2015	VSC MMC	800 MW/ ±300 kV	200	Użycie kabli podmorskich/ przyłączanie morskiej farmy wiatrowej
<b>Układy z przekształtnikami LCC</b>					
Xiangjiaba-Shanghai/ Chiny	2010	LCC	6400 MW/ ±800 kV	1980	Przesył mocy na duże odległości
Jinping – Sunan/ Chiny	2013	LCC	7200 MW/ ±800 kV	2090	Przesył mocy na duże odległości
Xiluodu - West Zhejiang/ Chiny	2014	LCC	8000 MW/ ±800 kV	1680	Przesył mocy na duże odległości

Na świecie obecnie eksploatowanych jest ponad 150 układów wykorzystujących systemy przesyłowe HVDC (z łączną mocą znamionową przekraczającą 140 GW). Z tego około 85% jest oparte o przekształtniki zbudowane z zaworów tyrystorowych: LCC oraz CCC, natomiast jedynie około 15% wykorzystuje tranzystorowe przekształtniki VSC. Obecny rozwój tranzystorów mocy i związany z tym wzrost osiąganych parametrów znamionowych, umożliwiające zmniejszanie liczby przyrządów pracujących w stosach, powoduje stopniowe zwiększenie udziału układów przesyłowych opartych o przekształtniki VSC. Orientacyjne liczby występujących na świecie układów HVDC zostały przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Orientacyjne liczby występujących współcześnie układów HVDC na świecie

### Przesył energii układami przesyłowymi HVDC

Przesył energii za pomocą układów przesyłowych HVDC znajduje zastosowania i jest uważany za korzystny w następujących przypadkach [10, 11]:

- przy przesyłach energii elektrycznej na duże odległości,
  - w sytuacji przekraczania obszarów morskich,
  - podczas łączenia systemów pracujących asynchronicznie,
  - przy wyprowadzaniu mocy z rejonów wytwarzania energii elektrycznej,
  - w przypadku zasilania obszarów mocno zurbanizowanych i zaludnionych.
- Wymienione zastosowania wynikają z zalet układów HVDC, do których można zaliczyć [10, 11]:
- brak ograniczeń związanych z długością linii (ze względu na brak prądu ładowania),
  - nie występowanie strat mocy na prądy wirowe indukowane w ziemi i przewodach odgromowych,
  - mniejsze straty powodowane ulotem (szczególnie przy złej pogodzie),
  - brak efektu naskórkowości (energia elektryczna przepływa całym przekrojem linii),
  - nie występowanie ograniczeń związanych z mocą bierną (współczynnik mocy wynosi zawsze jeden),
  - mniejsze zakłócenia radioelektryczne i hałas powodowane przez linie prądu stałego.
- Ponadto linia przesyłowa prądu stałego zajmuje mniejszy pas terenu w porównaniu do linii prądu przemiennego (przy jednakowej mocy przesyłanej).
- Niemniej jednak z przesyłem energii prądem stałym związane są pewne ograniczenia, zmniejszające jego wykorzystanie. Główną barierą w zastosowaniu układów HVDC jest [10, 11]:
- wysoki koszt stacji przekształtnikowej, opłacalność przesyłu prądem stałym staje się realna od odległości ok. 500 km dla linii napowietrznych, dla linii kablowej jest to odpowiednio 40 km,

- złożoność procesu przekształcania energii elektrycznej, związana zwykle z generowaniem wyższych harmonicznych, wymagających stosowania filtrów,
- skomplikowane sterowanie stacjami przekształtnikowymi, które podczas swojej pracy wymagają zwykle energii biernej,
- trudniejsza praca wyłączników i innej aparatury (w porównaniu do prądu przemiennego), stwarzając dodatkowe przeszkody w procesie odbioru mocy z linii z punktów pośrednich.

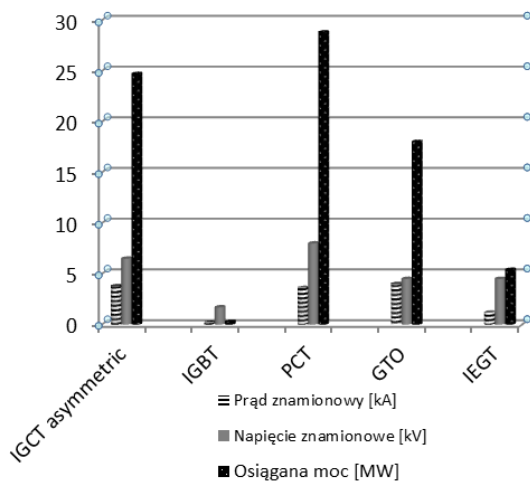
### Energoelektroniczne przyrządy mocy

W układach HVDC stosowane są energoelektroniczne przyrządy mocy w postaci tyrystorów oraz tranzystorów. Nowoczesne przyrządy energoelektroniczne, mające zastosowanie w stacjach przekształtnikowych HVDC, ulegają nieustannemu rozwojowi w zakresie osiąganych wartości znamionowych. Orientacyjne wartości znamionowe osiągnięte przez współczesne przyrządy energoelektroniczne przedstawione zostały na rysunku 2.

Bardzo wysokie napięcia oraz duże układy przesyłowych HVDC stawiają duże wymagania jakim muszą sprostać przyrządy energoelektroniczne. Oferowane obecnie pojedyncze zawory są elementami średniego napięcia. W związku z tym elementy te łączone są szeregowo w stosy, aby uzyskać przesył przy napięciu rzędu setek kilowoltów (w celu ograniczenia strat przesyłowych).

Obecnie największe moce w systemach HVDC uzyskuje się z wykorzystaniem tyrystorów konwencjonalnych (SCR i PCT) oraz ich modyfikacji: GTO (tyrystor wyłączalny prądem bramki) i IGCT (tyrystor ze zintegrowaną bramką), przy czym ich wersje symetryczne znalazły zastosowanie w przekształtnikach prądu, natomiast asymetryczne w przekształtnikach napięcia.

Na przestrzeni ostatnich lat zauważa się silny rozwój przyrządów opartych na strukturze tranzystorowej, np. tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką (IGBT) czy tranzystorów ze specjalną konstrukcją bramki (IEGT).



Rys. 2. Osiągalne aktualnie parametry znamionowe przyrządów energoelektronicznych [12, 13, 14]

### Podstawowe typy przekształtników

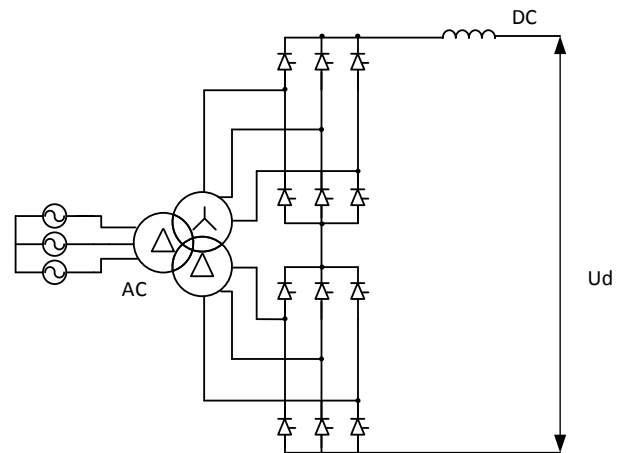
#### Przekształtniki LCC

Jako najstarsze, a tym samym konwencjonalne rozwiązanie przyjmuje się przekształtniki LCC. Topologia przekształtnika LCC została pokazana na rysunku 3. Układy HVDC zbudowane w oparciu o przekształtniki LCC pozwalają na przesył największych mocy. Ponadto topologia ta znalazła zastosowanie w łączeniu systemów pracujących asynchronicznie (głównie za pomocą układów

BtB), przekraczaniu cieśnin i obszarów morskich oraz wyprowadzaniu mocy z elektrowni wodnych.

Przekształtniki prądu do poprawnej pracy wymagają sztywnego źródła napięcia w celu umożliwienia naturalnej komutacji sieciowej, zależnej od napięcia przemiennego trzech faz zasilających. Układy LCC mogą pracować wyłącznie z prądem sieci AC, opóźniającym się względem napięcia, dlatego proces przekształcania wymaga mocy biernej. Zapotrzebowanie na moc bierną jest pokrywane za pomocą urządzeń kompensacyjnych: filtrów, kondensatorów i innych, natomiast nadwyżka czy niedobór mocy musi być dostarczany z sieci AC. Ta różnica w mocy biernej musi być w określonym zakresie, aby utrzymać odpowiedni poziom napięcia przemiennego, co wymaga sieci o dość wysokiej sztywności [11, 15]. Zmiana kierunku przepływu mocy, w układach zbudowanych w oparciu o przekształtniki LCC, wymaga zmiany polaryzacji układu, w obu stacjach przekształtnikowych.

Przekształtniki prądu są zbudowane z wykorzystaniem mostków sześciopulsowych. We współczesnych układach, dwa mostki sześciopulsowe łączone są szeregowo w mostki dwunastopulsowe, w celu zwiększenia napięcia prądu stałego oraz poprawy jakości energii poprzez eliminację części harmonicznych. Te dwa mostki wymagają źródła napięciowego, przesuniętego o 30 stopni elektrycznych, co jest realizowane za pomocą połączenia uzwojeń jednego z transformatorów zasilających w gwiazdę, a drugiego w trójkąt. Podczas pracy dwunastopulsowej pojawiają się charakterystyczne harmoniczne w prądzie przemiennym ( $12n \pm 1$ ) oraz w napięciu stałym ( $12n$ ) [16]. Dzięki pracy dwunastopulsowej, nie są wymagane filtry związane z pracą sześciopulsową m.in. 5-tej i 7-mej harmonicznej.



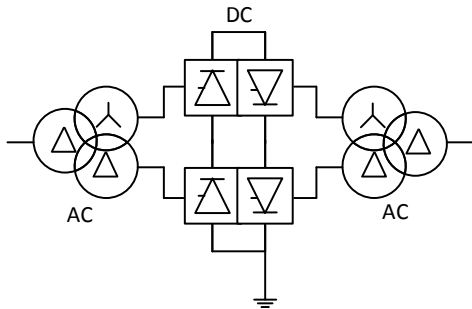
Rys. 3. Poglądowy schemat układu LCC (z wykorzystaniem mostka 12-pulsowego)

Sterowanie tyrystorami stosowanymi w układach przekształtnika prądu posiada pewne ograniczenia ze względu na możliwość jedynie ich włączania. W układach opartych o LCC, zawory tyrystorowe pracują na częstotliwości sieciowej i za pomocą kąta wysterowania możliwa jest zmiana poziomu napięcia. Pozwala to na uzyskanie wysokiej sprawności oraz na szybkie sterowanie z punktu widzenia potrzeb systemu elektroenergetycznego. Kąt wysterowania (zwany również kątem opóźnienia zapłonu) od 0 do 90 stopni elektrycznych odpowiada za pracę prostownikową, natomiast od 90 do 180 stopni za pracę falownikową przekształtnika [17]. Za pomocą zmiany kąta wysterowania istnieje możliwość regulacji napięcia po obu stronach łącza HVDC, pozwalająca na zmianę przepływów mocy (zwiększając wartość kąta wysterowania, zmniejsza się napięcie stałe na wyjściu układu).

Zaletą przekształtników LCC jest duże doświadczenie eksploatacyjne oraz relatywnie niska cena. Większość współczesnych systemów przesyłowych prądu stałego jest wykonana w oparciu właśnie o przekształtniki LCC. Niemniej jednak brak możliwości zasilania sieci pasywnej, zapotrzebowanie na moc bierną oraz wymóg sztywnego źródła napięciowego do poprawnej pracy sprawiają, że układy LCC mają znaczne ograniczenia w zastosowaniu.

#### Line Commutated Back-to-Back

W układach typu BtB (rys. 4) nie następuje klasyczny przesył prądu stałego. Falownik oraz prostownik znajdują się w obrębie tej samej stacji elektroenergetycznej, co pozwala na wykorzystanie wspólnego systemu sterowania, chłodzenia oraz innych dla obu przekształtników. W układach BtB stosowane jest niższe napięcie, gdyż nie występuje przesył energii elektrycznej na odległość i w związku z tym nie występują typowe straty przesyłowe. Ponadto cena tyrystorów silnie zależy od wartości napięcia niż od wartości prądu, co pozwala na zastosowanie mniejszej ilości przyrządów w stosach [18]. Układy BtB znajdują głównie zastosowanie przy łączeniu systemów pracujących asynchronicznie. Ponadto umożliwiają poprawę stabilności słabych ciągów przesyłowych [19] oraz poprawę tłumienia kołysań [20].



Rys. 4. Poglądowy schemat układu Back-to-Back

#### Przekształtniki VSC

Rozwój półprzewodników mocy, w tym urządzeń w pełni sterowalnych, takich jak tyrystory GTO oraz tranzystory IGBT, doprowadził do zastosowania przekształtników VSC w układach HVDC. Przykładowa topologia przekształtnika VSC została pokazana na rysunku 5. Układy HVDC z przekształtnikami VSC pozwalają na niezależne oraz niemal natychmiastowe sterowanie mocą czynną i bierną. Ponadto przekształtniki VSC cechuje wysoka jakość energii związana z dużą liczbą przełączeń zaworów. Niemniej jednak częste przełączanie przyrządów powoduje duże straty mocy (straty są około dwa razy wyższe niż w przypadku pracy przekształtników LCC) oraz dodatkowe problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną. Do wad można zaliczyć również wyższą cenę realizacji układu HVDC, większą zawodność związaną z łączeniem dużej liczby tranzystorów w stosy (zamiast mniejszej liczby tyrystorów w przypadku LCC) oraz mniejsze opanowanie technologii [21].

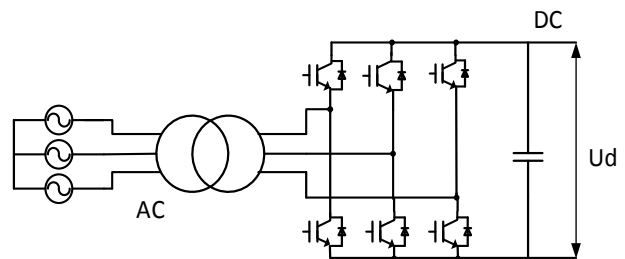
Proces komutacji przyrządów energoelektronicznych mocy w układach VSC nie jest zależny od warunków napięciowych w sieci prądu przemiennego. Pozwala to na zastosowanie przekształtników VSC w miejscach o niskim poziomie mocy zwarciowej, a nawet w łączeniu sieci pasywnych (bez generacji), co nie jest możliwe w przypadku przekształtników LCC. Co więcej, przekształtniki VSC pozwalają na tzw. „black start”, czyli przywrócenie zasilania bez korzystania z zewnętrznych sieci przesyłowych AC [22]. Ponadto inny sposób przełączania zaworów powoduje, że przekształtniki VSC nie mają zapotrzebowania na moc bierną, a układy te są w stanie nawet zasilać tą mocą sieć AC, gdy istnieje taka potrzeba.

Moc bierna może być regulowana po każdej ze stron połączenia, niezależnie od napięcia w łączu HVDC.

W związku z oferowanymi przez przekształtniki VSC właściwościami, rozwiązanie to znalazło zastosowanie przy łączeniu słabych systemów prądu przemiennego i zasilaniu obszarów odizolowanych od systemu elektroenergetycznego, a także przyłączaniu farm wiatrowych [23].

Wyjątkowe cechy układów HVDC z przekształtnikami VSC (zmiana kierunku przepływu mocy, bez zmiany kierunku przepływu prądu oraz bez potrzeby mechanicznych przełączeń, brak ograniczeń związanych z niską sztywnością sieci tj. możliwość zasilania sieci pasywnych, odporność na przewroty falownikowe, niezależne sterowanie mocą czynną i bierną) sprawiają, że istnieje duży potencjał do zastosowania tych przekształtników w systemach sieci zamkniętych prądu stałego.

We współczesnych rozwiązaniach przekształtników VSC, poza najprostszymi układami dwupoziomowymi (jak np. w układzie DirectLink w Australii), spotykane są przekształtniki trójpoziomowe, zmniejszające poziom harmonicznych, w tym popularny układ z diodami poziomującymi NPC - Neutral Point Clamped (zastosowany m.in. w stacji VSC typu BtB Eagle Pass w USA) oraz przekształtniki o zmiennym potencjale Flying Capacitor (FC) Converters. Ponadto na rynku elektroenergetycznym zaczynają pojawiać się przekształtniki modułowe wielopoziomowe MMCs (ang. Modular Multilevel Converters) [24]. Pierwszy raz zostały one zastosowane w Trans Bay Cable w 2010 roku, przy połączeniu kablem podmorskim w USA. Z wyżej wymienionych układów, przekształtniki MMC oferują najlepszą jakość napięcia, niemniej jednak odbywa się to kosztem złożoności procesu generacji impulsów sterujących. Ponadto dość prosta budowa i sterowanie, a także niskie straty (nawet rzędu 1% [25]) sprawiają, że układy tego typu zyskują na popularności [26]. W pracy [27] zostały porównane topologie NPC i MMC oraz wskazano przewagę drugiego z wymienionych układów.



Rys. 5. Schemat poglądowy układu VSC

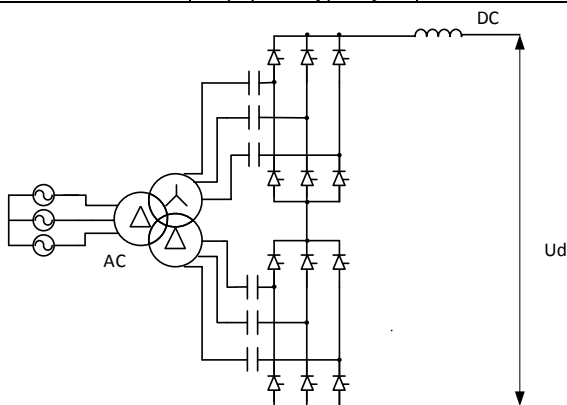
Aktualnie zauważalny jest znaczny rozwój układów HVDC z przekształtnikami VSC. Na świecie pojawiły się już pierwsze układy typu BtB z przekształtnikami VSC, są to: stacja Mackinac o mocy 200 MW oraz Eagle Pass o mocy 36 MW.

Przesył mocy w układach z przekształtnikami VSC odbywa się zwykle za pomocą regulacji napięcia stałego po stronie prostownika i trybu regulacji częstotliwości lub mocy po stronie falownika. Po obu stronach połączenia HVDC występuje ponadto tryb sterowania mocy biernej lub napięcia sieci prądu przemiennego. W normalnych stanach pracy układu przesyłowego HVDC, wykorzystującego przekształtniki LCC, przepływ mocy w połączeniu prądu stałego odbywa się za pomocą trybu regulacji prostownika, utrzymującego stałą wartość prądu DC oraz trybu pracy falownika, regulującego napięcie prądu stałego. Metody regulacji różnych układów HVDC, z przekształtnikami LCC jak i VSC, zostały opisane w [28].

Syntetyczne porównanie cech oraz właściwości układów HVDC, z przekształtnikami LCC oraz VSC, zostało przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie właściwości współczesnych topologii przekształtników w układach HVDC

Cecha	Przekształtniki LCC	Przekształtniki VSC
Rodzaj komutacji	Sieciowa (naturalna)	Wymuszona
Przyrządy energoelektroniczne	Tyristory	Tranzystory
Układ sterowania	Prosty	Dość skomplikowany
Poziom osiąganey mocy	Największy osiągalny	Średni
Straty mocy	Niewielkie	Duże (zależne od częstotliwości przełączeń)
Zmiana kierunku przepływu mocy	Poprzez zmianę polaryzacji napięcia	Poprzez zmianę kierunku przepływu prądu
Kompensacja mocy biernej	Utrudniona (wymaga urządzeń kompensacyjnych)	Łatwa
Przechowywanie energii w obwodzie DC	W indukcyjności cewki	W pojemności kondensatora
Koszt inwestycyjny	Mniejszy	Większy
Zajmowany obszar	Większy	Mniejszy
Niezawodność	Duża	Średnia
Połączenie z siecią AC	Wymaga średniej lub wysokiej mocy zwiarcowej w węźle systemu	Możliwość podłączenie do sieci słabych, nawet sieci pasywnych
Poziom harmonicznych	Wysoki (wymagane filtry)	Niski
Zakłócenia w sieci AC	Powodują pojawienie się przewrotów komutacyjnych, uniemożliwiających poprawną pracę	Powodują jedynie zmniejszenie przesyłanej mocy



Rys. 6. Schemat poglądowy układu CCC

#### Układy CCCs (Capacitor Commutated Converters)

Przekształtniki CCC (rys. 6) stanowią modyfikację klasycznych przekształtników LCC. Różnica polega na szeregowym włączeniu kondensatora pomiędzy transformatorem i łącznikiem tyristorowym. Dzięki takiej realizacji zapewnione jest dostarczanie mocy biernej wymaganej przez układ, zależnie od obciążenia. Umożliwia to również zmniejszenie wymiarów, poprawę procesu komutacji w przypadku sieci słabych, poprawę stabilności napięciowej oraz uniemożliwia przepływ składowej zerowej [29]. Przekształtniki tej topologii, ze względu na swoje zalety,

znajdują zastosowanie w łączeniu węzłów systemu elektroenergetycznego o niewielkich mocach zwiarcowych [30].

#### Linie kablowe prądu stałego

W układach HVDC przesył energii może być realizowany za pomocą linii napowietrznych lub kablowych. W przypadku układów kablowych przeważnie stosowane są kable z izolacją przesyconą syciwem nieściekającym (ang. Mass Impregnated) oraz z izolacją wytłaczaną z polietylenu usieciowanego XLPE. Pierwsze z wymienionych są najczęściej używane, jest to dobrze opanowana technologia, wykorzystująca przewodnik o przekroju poprzecznym do 2500mm<sup>2</sup>, pozwalające na przesył dwoma biegunami do 1320 MW [31]. Kable z izolacją z XLPE mogą być stosowane jedynie w układach VSC, ze względu na brak konieczności zmiany polaryzacji napięcia w celu zmiany kierunku przepływu mocy. Najnowsze osiągnięcia, w dziedzinie tego typu kabli, pozwalają na osiągnięcie przesyłu 2600 MW za pomocą pary przewodników o przekroju 3000 mm<sup>2</sup>. Ponadto obecna konstrukcja kabla umożliwia ograniczenie jego wagi oraz właściwie pozbycie się problemów z niestabilnością cieplną [32].

#### Budowa stacji przekształtnikowych

Typowa stacja przekształtnikowa zawiera przekształtniki, w zależności od topologii: LCC, VSC lub CCC, transformatory dopasowujące, osprzęt sterowniczy oraz chłodzący (stosowana jest zwykle woda jako środek chłodzący), filtry wyższych harmonicznych. Przekształtniki LCC oraz CCC zbudowane są w oparciu o zawory przełączane sygnałem prądowym, głównie tyristory, natomiast przekształtniki VSC o zawory w pełni sterowalne, przełączane sygnałem napięciowym – tranzystory.

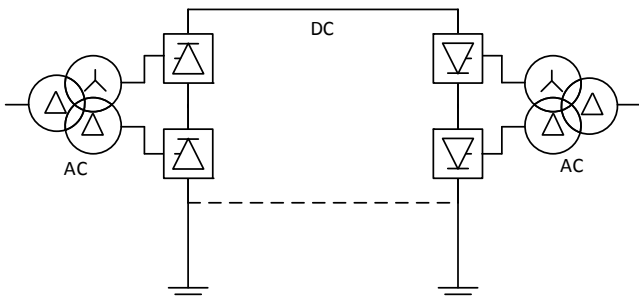
Transformatory dopasowujące, poza podstawową funkcją zmiany napięcia, w przekształtnikach LCC zapewniają odpowiednią reaktancję komutacyjną, niezbędną w procesie komutacji sieciowej. W układach tej topologii, po stronie łącza prądu stałego znajduje się dławik, który ogranicza powstawanie tętnień oraz zmniejsza wartości prądów zwiarcowych. Praca przekształtników LCC powoduje generację wyższych harmonicznych, co wiąże się z koniecznością stosowania filtrów częstotliwości charakterystycznych.

Proces komutacji zaworów w przekształtniku VSC nie jest związany z parametrami sieci zasilającej, gdyż układ sam generuje impulsy przełączające zaworami. Niewrażliwość na warunki napięciowe w sieci prądu przemiennego umożliwia podłączenie układu nawet do sieci pasywnej. Przekształtniki VSC zbudowane są w oparciu o tranzystory, do których antyrównolegle podłączone są diody, umożliwiające pracę czterokwadrantową przekształtnika. W łączu prądu stałego na wyjściu przekształtnika VSC, po stronie DC, znajduje się kondensator spełniający funkcję magazynu energii, umożliwiając odpowiedni przepływ mocy oraz dodatkowo filtrując prąd stały.

Obszar zajmowany przez stacje przekształtnikowe wykorzystujące przekształtniki VSC jest znacznie mniejszy, niż teren wymagany przez stacje z układami LCC. Pozwala to na spełnienie szczególnych wymagań środowiskowych, w przypadku zastosowania stacji z układami VSC.

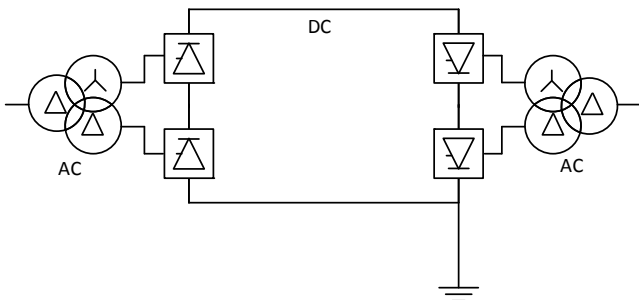
#### Struktury układów przesyłowych HVDC

Obecnie w systemach elektroenergetycznych wykorzystywane są układy HVDC w różnych wariantach wykonania. Dla dużych odległości i w przypadku przekraczania obszarów morskich stosowany jest układ jednobiegunowy jednoprzewodowy (rys. 7), realizowany za pomocą jednej linii napowietrznej lub kablowej oraz drugiej w postaci ziemi lub wody. Główną zaletą tego układu jest niska cena, natomiast wadą - elektrokorozja instalacji znajdujących się w ziemi.

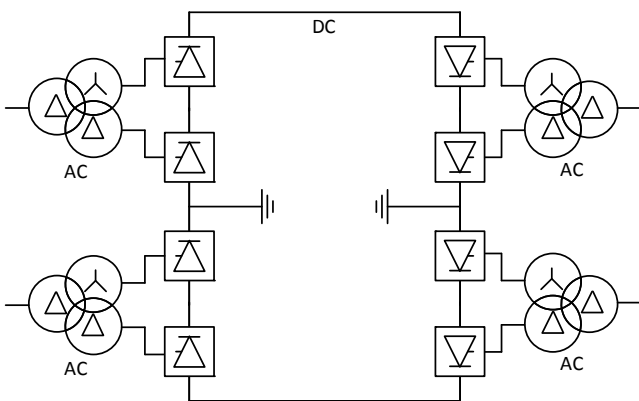


Rys. 7. Struktura układu jednobiegunowego jedнопrzewodowego

Zastosowanie układu jednobiegunowego w postaci dwuprzewodowej (rys. 8) pozwala na uniknięcie elektrokorozji. W takim wariantcie drugi przewód jest wykonany jako metaliczny, uziemiony w jednej ze stacji przekształtnikowych. Układy tego typu stosowane są zwykle przy wysokiej rezystywności gruntu.



Rys. 8. Struktura układu jednobiegunowego dwuprzewodowego



Rys. 9. Struktura przykładowego układu dwubiegunowego

Najczęściej wykorzystywanym we współczesnych systemach elektroenergetycznych, przy przesyłach prądem stałym, jest układ dwubiegunowy dwuprzewodowy (rys. 9), gdzie dwa układy przekształtnikowe są połączone szeregowo, a pomiędzy przekształtnikami o tej samej funkcji znajdują się uziemienia, pozwalające na transmisję z połową mocy znamionowej, w sytuacjach awaryjnych. Z kolei przy przesyłach o największych mocach stosowane są układy jednakobiegunowe, wykorzystujące wiele przewodów z tą samą biegunowością oraz przewód powrotny w postaci ziemi [10, 11].

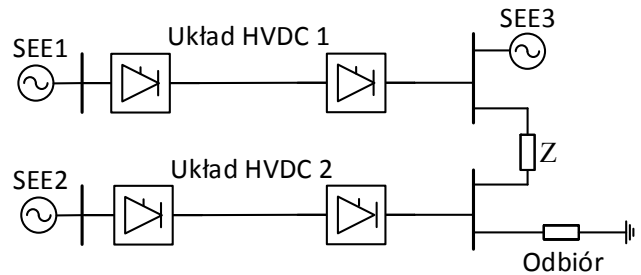
### Układy HVDC o strukturze złożonej

W systemach elektroenergetycznych, w których zainstalowano więcej niż jeden układ HVDC, mogą powstawać układy HVDC o strukturze złożonej. Złożoność układów HVDC może wynikać z wzajemnego oddziaływania układów HVDC poprzez sieć prądu przemiennego (AC) lub też sieci prądu stałego (DC).

### Struktury złożone wynikające z wzajemnego oddziaływania układów HVDC w węzłach sieci AC

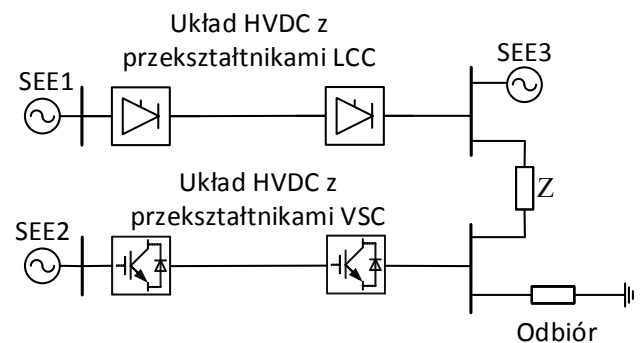
Rosnąca liczba pracujących układów HVDC może powodować przyłączenie przekształtników do bliskich elektrycznie węzłów AC, sprawiając, że przekształtniki będą na siebie oddziaływać. Wzajemne oddziaływanie tak przyłączonych przekształtników powodują konieczność przeprowadzania badań, w różnych konfiguracjach układów prądu stałego. Obecnie prowadzone prace badawcze i eksperymentalne dotyczą m. in. niżej wymienionych systemów, wykorzystujących układy przesyłowe HVDC.

Układ typu Multi-Infeed (MIDC) – system przesyłowy zawierający układy HVDC, których przekształtniki są przyłączone do węzłów sieci elektroenergetycznej prądu przemiennego usytuowanych w bliskiej odległości elektrycznej, wyrażonej impedancją  $Z$  (rys. 10) [33-36].

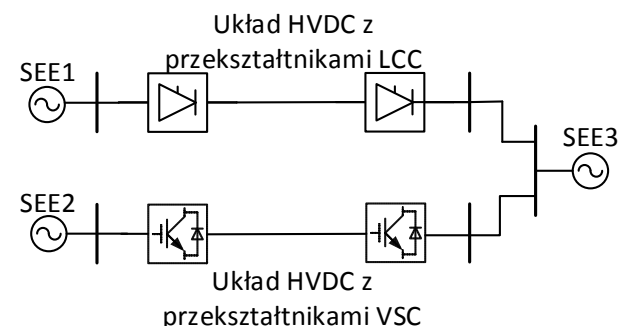


Rys. 10. Schemat poglądowy układu MIDC [36]

Układ typu Multi-Infeed może składać się z układów HVDC wykorzystujących różne przekształtniki (LCC, VSC). Wówczas układ taki określany jest jako układ typu Hybrid Multi-Infeed (HMIDC) [37-39]. Schemat przykładowego systemu z układem HMIDC pokazano na rysunku 11.

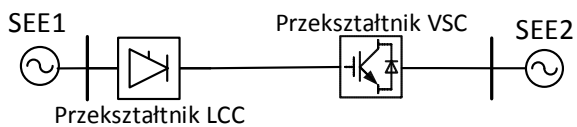


Rys. 11. Schemat poglądowy układu typu HMIDC

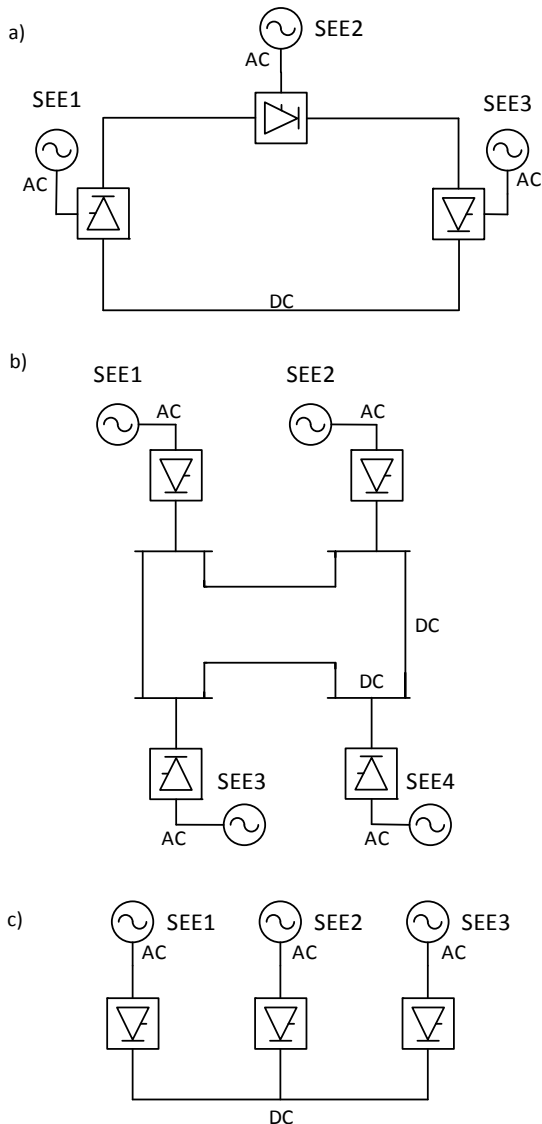


Rys. 12. Schemat poglądowy układu typu Double-Infeed

Przypadkiem szczególnym układu MIDC jest układ typu Double-Infeed HVDC, składający się z dwóch układów HVDC (z przekształtnikami LCC i/lub VSC), w którym impedancja  $Z=0$ , co oznacza, że poszczególne układy HVDC są przyłączone do wspólnego węzła sieci AC (rys. 12) [40-42].



Rys. 13. Schemat poglądowy układu hybrydowego HVDC



Rys. 14. Schematy poglądowe układów typu MTDC: a) szeregowy b) równoległy oczkowy, c) równoległy promieniowy [45]

Do układów HVDC o strukturze złożonej zaliczyć można również układ hybrydowy HVDC (rys. 13), w którym jedna stacja elektroenergetyczna zawiera przekształtnik LCC, podczas gdy w drugiej stacji zainstalowano przekształtnik VSC [43].

#### Struktury złożone wynikające z wzajemnego oddziaływania układów HVDC w węzłach sieci DC

Łączenie układów HVDC po stronie prądu stałego, a tym samym tworzenie sieci prądu stałego jest rozważane od momentu wprowadzenia układów HVDC. Istotną barierą w rozwoju tego typu układów jest brak odpowiednich wyłączników DC, co utrudnia eliminację zakłóceń. Układy sieci DC w literaturze zagadnienia są określane jako Multiterminal HVDC, w skrócie MTDC [44, 45], czyli wieloterminalowe układy przesyłowe DC. W układach tych część przekształtników pracuje jako prostowniki, a część jako falowniki. W przypadku ogólnym przekształtniki mogą być łączone szeregowo lub równolegle. Przykładowe struktury układów typu MTDC pokazano na rysunku 14.

#### **Oddziaływanie układów HVDC na system elektroenergetyczny**

Oddziaływanie układów HVDC na system elektroenergetyczny związane jest m. in. z następującymi zagadnieniami:

- przepięciami,
- stabilnością napięciową,
- stabilnością częstotliwościową,
- zjawiskami rezonansu,
- poziomem mocy zwarciowej,
- powrotem do poprawnych warunków pracy, następującym po zakłóceniach,
- niską inercją systemu,
- kołysaniami torsyjnymi występującymi w jednostkach wytwórczych.

#### Przepięcia

Przepięcia powodowane są przez większe zakłócenia i zjawiska rezonansowe. Możliwość ich wystąpienia powoduje konieczność uwzględnienia ograniczników przepięć w budowie stacji przekaźnikowych oraz zmiany parametrów znamionowych niektórych elementów w tym zaworów energoelektronicznych.

#### Stabilność napięciowa

Warunki stabilności napięciowej określają rodzaj regulacji napięcia oraz ilość wymaganej mocy biernej układu HVDC z przekształtnikami LCC. Przy obciążeniu układu HVDC mocą znamionową, zapotrzebowanie na moc bierną obu stacji przekaźnikowych LCC kształtuje się na poziomie 60% mocy czynnej przesyłanej. Układy wykorzystujące przekształtniki VSC zwiększają zapas stabilności napięciowej systemu, dzięki niezależnemu sterowaniu mocy czynnej i biernej (bez konieczności stosowania dodatkowych urządzeń kompensacyjnych jak ma to miejsce w przypadku LCC). Załamanie napięcia (lawina napięciowa) pojawia się po wystąpieniu zakłócenia w mocno obciążonym systemie, czemu towarzyszy nadmiar mocy biernej odbieranej nad wytwarzaną, prowadzący do znacznego obniżenia się napięcia (na skutek deficytu mocy biernej). Przekształtniki VSC mają możliwość pracy podobnej do układów FACTS typu SVC lub STATCOM podczas lub po wystąpieniu zakłócenia [46]. Dzięki tym funkcjonalnościom, szybkie zmiany napięcia mogą być zminimalizowane. Pozwala to przyspieszyć powrót do poprawnej pracy układu HVDC podczas oraz po wystąpieniu stanów dynamicznych. Szybka zmiana przepływu mocy biernej może umożliwić dostarczenie brakującej mocy biernej podczas stanów nieustalonych i dzięki temu utrzymać system w granicach stabilności. Dla stanów długookresowych, uwzględniających zmiany przełącznika zaczepek transformatora oraz układy wzbudzenia generatorów, przekształtniki VSC pozwalają na zapobiegnięcie załamaniu się napięcia poprzez stopniową zmianę mocy czynnej i biernej, w tym zmniejszenie przepływu mocy czynnej, w celu zwiększenia przepływu mocy biernej, jeżeli istnieje taka potrzeba.

#### Stabilność częstotliwościowa

Stabilność częstotliwościowa dwóch pracujących asynchronicznie systemów może być utrzymana dzięki układowi HVDC. W takim przypadku prostownik i falownik są połączone do dwóch systemów i dzięki połączeniu prądu stałego jeden system może wspomóc w stabilizacji częstotliwości systemu zaburzonego za pomocą zmiany przesyłanej mocy w łączu HVDC. Układy regulacji łącza HVDC pozwalają na zmianę kierunku przesyłanej mocy zależnie od odchylenia częstotliwości. Ponadto przekształtniki VSC pozwalają na wsparcie częstotliwości podczas pracy wyspowej jednego z połączonych systemów,

umożliwiają również „Black-start” systemu będącego w stanie poawaryjnym. Układ regulacji częstotliwości przekształtnika VSC może być skoordynowany z układami częstotliwościowego odciążania w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się poważnych zakłóceń [47].

#### Zjawiska rezonansu

Podczas współpracy przekształtnika z siecią AC, może dojść do problemów związanych z niestabilnością harmoniczną, pojawiającą się przy występowaniu harmonicznym niecharakterystycznych. Trudności te często pojawiają się przy niskich mocach zwarciowych: wysoka impedancja systemu wchodzi w rezonans z pojemnościami filtrów i kondensatorów. Częstotliwość rezonansowa jest tym niższa im większa jest moc bierna zastosowanego kondensatora bocznikowego w stosunku do mocy zwarciowej w węźle systemu [48].

#### Niska inercja systemu elektroenergetycznego

Pracujące turbozespoły w systemie elektroenergetycznym stanowią dużą masę wirującą, zapewniającą odpowiednią inercję, umożliwiającą utrzymanie stabilności systemu. Jeżeli cała moc do systemu jest przenoszona za pomocą układu prądu stałego i nie istnieją lokalne generatory, wtedy taki system nie ma mechanicznej inercji. Zdolność systemu elektro-energetycznego do utrzymania wymaganego napięcia i częstotliwości zależy od momentu bezwładności mas wirujących, których energia kinetyczna jest oddzielana za pomocą układu prądu stałego. Niemniej jednak istnieje możliwość wprowadzenia tzw. „sztucznej inercji” za pomocą odpowiedniego układu sterowania pracą przekształtnika LCC. Układy z przekształtnikami VSC mają znacznie większe możliwości w zakresie stworzenia sztucznej inercji (niż układy z przekształtnikami LCC), np. za pomocą układu sterowania wykorzystującego energię zgromadzoną w pojemnościach kondensatora DC [49]. Wprowadzenie sztucznej inercji ma szczególne znaczenie w słabych systemach, gdzie występują wahania częstotliwości związane z niską inercją mas wirujących. Taka implementacja pozwala na wzmocnienie stabilności lokalnej systemu.

#### Kołysania torsyjne występujące w jednostkach wytwórczych

Wirujący układ mas turbin i generatora jest narażony na działanie momentów skrętnych w wałach łączących poszczególne części, szczególnie w nienormalnych stanach pracy, takich jak zwarcia. Prowadzą one do szybszego zużycia materiałów, z których wykonane są wały turbozespołu. Oddziaływania torsyjne (podsynchroniczne) są związane ze zjawiskami występującymi pomiędzy systemem SEE a jednostką wytwórczą i objawiają się drganiami torsyjnymi układu mechanicznego generatora i turbiny. Wpływ na oscylacje podsynchroniczne mają również układy sterowania występujące w systemie elektroenergetycznym. Jedną z przyczyn pojawienia się kołysań torsyjnych, w systemach z układami HVDC, są regulatory przekształtników HVDC.

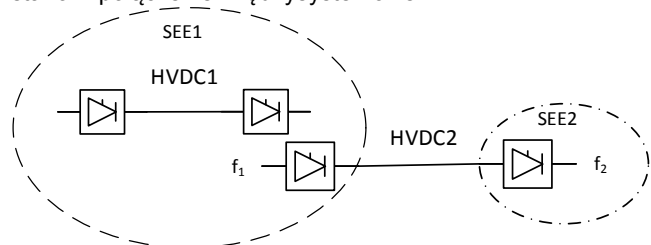
Tryby regulacji prądu oraz mocy, w układach wykorzystujących przekształtniki LCC, są głównymi przyczynami pojawienia się oscylacji podsynchronicznych (szczególnie w przypadku pracy stacji jako prostownik [50]). Wzrost kąta opóźnienia zapłonu w układach z przekształtnikami LCC, powodujący zmianę przepływu mocy przez łącze, wzmacnia oscylacje torsyjne na skutek wpływu na moment elektryczny pobliskiego generatora [51]. Wzajemne oddziaływanie generatora i układu HVDC zależy od dzielących ich odległości oraz zaimplementowanych dodatkowych układów regulacji (np. SSDC Subsynchronous supplementary damping control – układ uwzględniający

wpływ ruchu wałów i dodający odpowiedni sygnał tłumiący, pozwalający na tłumienie oscylacji torsyjnych [52, 53]).

Układy HVDC z przekształtnikami VSC mają zdolność do tłumienia oscylacji podsynchronicznych niezależnie od tego jaką funkcję spełnia stacja (prostownika, falownika czy układu STATCOM). Oscylacje torsyjne są tłumione za pomocą kąta przesunięcia fazowego, dostosowywanego do aktualnej częstotliwości w połączonej sieci. Praca tych układów pozwala w ten sposób na zmniejszenie lub zwiększenie przepływu mocy, w zależności od potrzeby i możliwe jest utrzymanie częstotliwości [54].

#### Wpływ sposobu włączenia układów HVDC na system AC

Generalnie układy HVDC mogą być włączane do systemu (sieci) AC na dwa sposoby. Pierwszy sposób polega na takim włączeniu układu HVDC, że stanowi on połączenia dwóch węzłów AC w systemie pracującym synchronicznie (połączenie HVDC1 przedstawione na rysunku 15). W tym wariancie włączenia, układ HVDC stanowi połączenie wewnątrzsystemowe. W przypadku drugiego sposobu (połączenie HVDC2), układ HVDC stanowi połączenie dwóch węzłów AC w systemach pracujących asynchronicznie (na rysunku 15 przedstawione jako HVDC2). W tym wariancie włączenia układ HVDC stanowi połączenie międzysystemowe.



Rys. 15. Sposoby włączenia układów HVDC do systemu przemiennoprądowego

Porównanie właściwości różnie podłączonych układów HVDC, z punktu widzenia współpracy z systemem przemiennoprądowym, zostało przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie właściwości układów HVDC w zależności od usytuowania w systemie elektroenergetycznym [55].

Właściwość	Układy HVDC włączone w jeden system elektroenergetyczny		Układy HVDC łączące systemy pracujące asynchronicznie	
	LCC	VSC	LCC	VSC
Utrzymanie stabilności częstotliwościowej	Nie dotyczy	Nie dotyczy	+++	+++
Sztuczna inercja	Nie dotyczy	Nie dotyczy	+	+++
Poprawa stabilności napięciowej	+	+++	+	++
Poprawa tłumienia oscylacji mocy	+	++	+	++
Możliwość „Black startu”	0	+	0	+++
Ograniczenie rozprzestrzeniania się zakłóceń	0	+	++	+++
Połączenie handlowe	++	++	+++	+++

#### Normy i standardy odnoszące się do układów HVDC

W warunkach rozwoju generacji rozproszonej, szczególnie morskich farm wiatrowych (MFW) oraz postępu w zakresie półprzewodnikowych elementów mocy, należy się spodziewać, że liczba stacji i połączeń prądu stałego



będzie stale wzrastać. W przyszłości nastąpi powolne przekształcanie się tradycyjnych układów dwustacyjnych w układy wielostacyjne, które ostatecznie stworzą sieć prądu stałego (składającą się z wielu stacji przekształtnikowych oraz wzajemnych połączeń pomiędzy nimi). Przekształtniki różnych producentów muszą być kompatybilne, aby umożliwić podłączenie do wspólnej sieci prądu stałego. Ponadto istnieje potrzeba unormowania m. in. poziomu napięcia, regulacji przepływów mocy oraz automatyki zabezpieczeniowej, gdyż brak takich wymagań oraz określonych zasad współpracy może uniemożliwić podłączenia różnych urządzeń, we wspólną sieć prądu stałego [56].

Poczyniono już pierwsze kroki w kierunku przyjęcia norm dotyczących układów wielostacyjnych (MTDC). Raport techniczny [57] dotyczy, m. in. systemów HVDC mających więcej niż dwie stacje przekształtnikowe, podłączone do wspólnej sieci prądu stałego. Dokonano w nim podsumowania wniosków i koncepcji układów HVDC, pozwalającego na przyjęcie podstaw do uchwalenia norm dotyczących takich systemów. Określono wymagania funkcjonalne oraz specyfikacje umożliwiające stosowanie układów różnych producentów w sieci HVDC.

Niezbędne staje się ujęcie odpowiednich wymagań dotyczących różnych aspektów układów HVDC w obowiązujące przepisy i normy. Doświadczenia chińskie w zakresie ultra wysokich napięć prądu stałego (UHVDC) przyczyniły się do powstania komitetu technicznego IEC TC 115, zajmującego się przesyłem prądem stałym o napięciu powyżej 100 kV. Zadaniem komitetu jest opracowanie norm międzynarodowych dotyczących, m. in. projektowania, budowy, niezawodności oraz wymagań technicznych, jakim muszą sprostać nowobudowane układy HVDC [58].

#### **Przegląd wymagań operatorów elektroenergetycznych sieci przesyłowych dotyczące układów HVDC**

W związku z rosnącą liczbą połączeń HVDC, istnieje potrzeba ustalenia reguł dotyczących współpracy tych układów z systemami elektroenergetycznymi. W związku z koniecznością unormowania zasad zarządzania układami HVDC wraz z wymaganiami technicznymi jakie muszą one spełniać, Europejska Sieć Operatorów Elektroenergetycznych Systemów Przesyłowych (ENTSO-E) zdecydowała się opracować instrukcję ruchu i eksploatacji połączeń prądu stałego (NC HVDC – Network Code on HVDC Connections and DC-connected Power Park Modules), dotyczącą układów HVDC i połączeń z morskimi farmami wiatrowymi. Opracowywany dokument (aktualnie dostępny w formie projektu [59]) ma w swoim założeniu: zwiększenie bezpieczeństwa dostaw energii, promowanie przyłączania odnawialnych źródeł energii, dążenie do skoordynowanego rozwoju infrastruktury HVDC oraz intensyfikację prac nad układami przesyłowymi HVDC poprzez odpowiednią konkurencję na rynku elektroenergetycznym. Określone w dokumencie [59] wymagania i zasady pracy układów HVDC mają na celu dążenie do połączenia wszystkich linii prądu stałego oraz stworzenie europejskiej sieci prądu stałego. Odpowiednie zaadoptowanie reguł wyszczególnionych w [59] do wymagań krajowych pozwoli na poprawną pracę sąsiadujących ze sobą układów HVDC, uniemożliwi dyskryminację poszczególnych dostawców układów przesyłowych HVDC oraz zapewni zrównoważony rozwój nowobudowanych połączeń prądu stałego.

Niektórzy operatorzy przesyłowi w Europie rozpoczęli wprowadzanie odpowiednich wymagań dotyczących przyłączania morskich farm wiatrowych (MFW) za pomocą układów przesyłowych prądu stałego HVDC. Takie wymogi są już określone w standardach: niemieckim [60], północnoirlandzkim [61] oraz brytyjskim [62].

Na świecie w fazie opracowywania są odpowiednie standardy jakim powinny sprostać nowopowstające układy HVDC, wraz z wyposażeniem i współpracującymi urządzeniami. Przykładowo projekt [63] wymagań technicznych jakie muszą spełniać kable podmorskie na Hawajach określa wymóg stosowania przekształtników VSC, we współpracy z systemem kabli DC.

#### **Podsumowanie**

Rozwój energoelektronicznych przyrządów mocy przyczynia się do zwiększenia udziału układów HVDC we współczesnych systemach elektroenergetycznych. Następuje ciągły postęp w zakresie osiągniętych parametrów znamionowych oraz poprawa niezawodności budowanych układów (m. in. poprzez ograniczenie liczby elementów znajdujących się w stosach). Poza dobrze znanymi przekształtnikami o topologii LCC, które stanowią największy udział w rynku elektroenergetycznym, następuje zwiększenie liczby zastosowań, będącej obecnie w fazie intensywnych prac i rozwoju, topologii VSC. Układy z przekształtnikami napięcia pozwalają na znaczne poszerzenie obszaru dotychczasowych funkcjonalności (umożliwiają np. zasilanie sieci pasywnych czy niezależną regulację mocy czynnej i biernej).

Zauważalna jest intensyfikacja prac badawczych dotyczących układów złożonych, w tym wielostacyjnych. Rozwój morskich farm wiatrowych i rosnąca liczba połączeń prądu stałego sprawiają, że układy HVDC prawdopodobnie stworzą w przyszłości sieć szkieletową prądu stałego. Budowa takich sieci wiąże się jednak z koniecznością odpowiedniego unormowania i ustandaryzowania wymagań technicznych i funkcjonalnych, dotyczących połączeń prądu stałego. Obecny postęp prac w zakresie standaryzacji układów HVDC nie jest jednak wystarczający. Właściwy rozwój połączeń HVDC powinien dążyć do stworzenia możliwości współpracy urządzeń różnych producentów, pozwalając na odpowiednią konkurencję na rynku elektroenergetycznym.

*Praca finansowana ze środków na działalność statutową.*

**Autorzy:** dr hab. inż. Sylwester Robak, prof. PW, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: Sylwester.Robak@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Mateusz Polewaczyk, E-mail: Mateusz.Polewaczyk@ien.pw.edu.pl.

#### **LITERATURA**

- [1] <http://www.desertec.org/concept/technologies/>
- [2] <http://www.friendsofthesupergrid.eu/about/what-is-the-supergrid/>
- [3] Jacobson A., Developments in Multiterminal HVDC Drivers, Building Blocks (Cables, Offshore), EU and US Examples, GridEnabled HVDC, LCC-MTDC, IEEE EPEC 2011, [www.ieee.ca](http://www.ieee.ca)
- [4] Hausler M., Multiterminal HVDC for High Power Transmission in Europe, [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [5] Błajszczak G., Wasiluk-Hassa M., Malinowski M., Kaźmierkowski M. P., Jasiński M., Współczesne systemy przesyłu energii prądem stałym HVDC, Elektroenergetyka (7), 2011
- [6] <http://www.litpol-link.com/>
- [7] <http://www.cire.pl/pliki/2/mozer1.pdf>
- [8] Błajszczak G., Wdrażanie europejskiego prawa energetycznego, Elektroenergetyka, (5) 2014, 267-273
- [9] Kłos M., Roslaniec Ł., Paska J., Pawlak K., Stacje przekształtnikowe HVDC umożliwiające integrację morskich farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym, APE'15
- [10] Kujaszczyk S., et al., Elektroenergetyczne układy przesyłowe, WNT, 1997
- [11] Bahrmann M. P., Overview of HVDC Transmission, Power Systems Conference and Exposition, 2006, 18-23
- [12] <http://new.abb.com/>
- [13] High power semiconductors, katalog ABB, 2015

- [14] High power electronic solution, katalog Toshiba 2014
- [15] Okba M. H., Saied M. H., Mostafa M. Z., Abdel- Moneim T. M., High voltage direct current transmission – a review, Part II – converter technologies, IEEE Energytech, 2012, 1-7
- [16] Bahrmann M. P., HVDC Transmission Overview, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, 1-7
- [17] Mohan N., Undeland N., Robbins T., Power Electronics-converters, application, and design. Wiley, 2003
- [18] HVDC for beginners and beyond [online], www.alstom.com
- [19] Power Engineering Guide 7.1: Power Transmission and Distribution Solutions, Erlangen Siemens AG, 2014, <http://www.energy.siemens.com/>
- [20] Faried S.O., Guosheng T., Aboreshaid S., Power system stability enhancement using a Voltage Source Converter HVDC back-to-back link, 11th International Middle East Power Systems Conference, 2006, 175–179
- [21] Flourentzou N. [et al.], VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview, IEEE Transactions on Power Electronics, 24 (2009), n. 3, 592-602
- [22] Petersson A., Edris A., Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie, 7th International Conference on AC-DC Power Transmission, 2001, 220-225
- [23] Bresesti P., Kling W.L., Hendriks R.L., Vailati R., HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System, IEEE Transactions on Energy Conversion, 22 (2007), n. 1, 37-43
- [24] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Bin Wu, Rodriguez J., Perez M.A., Leon J.I. Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (2010), n. 8, 2553 - 2580
- [25] Callavik E.M.[et al], HVDC technologies for the future onshore and offshore grid, Cigré Conference in Calgary, 2013
- [26] Geetha R.S., et al., Converter Topologies in VSC-HVDC Systems-an overview, International Journal of Engineering Research & Technology, 3 (2014), n. 8
- [27] Adam G.P.[et al], Comparison between Two VSC-HVDC Transmission Systems Technologies: Modular and Neutral Point Clamped Multilevel Converter, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society and ICELIE, 2009
- [28] Shah S., Hassan R., Sun J., HVDC Transmission System Architectures and Control – A Review, IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2013, 1-8
- [29] Rudervall R, Charpentier J.P., Raghuvier S., High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper, Energy Week, 2000
- [30] Balzer G., Muller H., Capacitor commutated converters for high power HVDC transmission, Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission (Conf. Publ. No. 485), 2001, 60-65
- [31] <http://www.europacable.com/home/energy-cables/hvdc-cables.html>
- [32] Gustafsson A., et al., New developments within the area of extruded HVDC cables 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, (2015), 1-5
- [33] Andersson G., Fischer P., Liss G., HVDC Multi-Infeed Performance, www.abb.com
- [34] Lips H.P., Aspects of Multiple Infeed of HVDC Inverter Stations Into a Common A.C. system, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 92(1973), n. 2., 775-779
- [35] Zhou C., Xu Z., Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system. PowerCon 2002. International Conference on Power System Technology, 4 (2002), 2462 - 2466
- [36] Shao Y., Tang Y., Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems using small signal stability assessment, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010, 1-6
- [37] Yan L., Zhe C., A Flexible Power Method of VSC-HVDC Link for the Enhancement of Effective Short-Circuit Ratio in a Hybrid Multi-Infeed HVDC System, IEEE Transactions on Power Systems, 28(2012), n. 2, 1568-1581
- [38] Shilpa G., Manohar P., Hybrid HVDC System for Multi-infeed Applications, International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing & Computing Applications (C2SPCA), 2013, 1-5
- [39] Liu Y., Chen Z., Voltage Sensitivity Based Reactive Power Control on VSC-HVDC in A Wind Farm Connected Hybrid MultiInfeed HVDC System, IEEE PowerTech, 2013, 1-6
- [40] Guo C., Zhao C., Supply of an Entirely Passive AC Network Through a Double-Infeed HVDC System, IEEE Transactions on Power Electronics, 25 (2010), n. 11, 2835-2841
- [41] Chunyi G., Zhang Y., Gole A., Zhao C., Analysis of Dual-Infeed HVDC With LCC–HVDC and VSC–HVDC, IEEE Transactions on Power Delivery, 27 (2012), n. 3, 1529-1537
- [42] Chunyi G., Analysis of dual-infeed HVDC with LCC inverter and VSC rectifier, IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, 2014, 1-4
- [43] Koth O., Sood V.K., A Hybrid HVDC Transmission System Supplying a Passive Load, IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010, 1-5
- [44] Mossadegh N., Aggarwal R.K., Management and Viability of Multi-Terminal HVDC for Offshore Renewable Energy Networking, 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010, 1-6
- [45] Padiyar K. R., HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions, New Age International, 1990
- [46] HVDC VSC (HVDC light) transmission – operating experiences, www.abb.com
- [47] VSC-HVDC Control and Application in Meshed AC Networks, www.abb.com
- [48] Arrillaga J, High Voltage Direct Current Transmission, The institution of Electrical Engineering, 1998
- [49] Zhu J., et al., Inertia Emulation Control Strategy for VSC-HVDC Transmission Systems, IEEE Trans on Power Systems, 28 (2012), n. 2, 1277–1287
- [50] Yang X, et al., The Effect of HVDC Inverter on Subsynchronous Oscillation and Damping Controller Design, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 1-6
- [51] Changchun Z., Zheng X., Damping Analysis of Subsynchronous Oscillation Caused by HVDC, 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 30-34
- [52] Fischer de Toledo P., Angquist L. Nee H.-P., Frequency-domain modelling of sub-synchronous torsional interaction of synchronous machines and a high voltage direct current transmission link with line-commutated converters, IET Generation, Transmission & Distribution, 4 (2010), n. 3, 418-431
- [53] Ki-Kim C, et al., HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems, Wiley-IEEE Press, 2009
- [54] Ying Jiang H., et al. Improvement of Subsynchronous Torsional Damping Using VSC HVDC, 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings, PowerCon 2002, 4 (2002), 2617-2621
- [55] AC/DC Backing up AC grids with DC technology, www.abb.com
- [56] Cigre HVDC Grid Feasibility Study Working Group B4.52, TB 533, 2013
- [57] Technical Guidelines for Radial HVDC Networks, PD CLC/TR 50609, 2014
- [58] <http://www.iec.ch/>
- [59] ENTSO-E Draft Network Code on High Voltage Direct Current Connections and DC-connected Power Park Modules, www.entsoe.eu
- [60] Requirements for Offshore Grid Connections in the Grid of TenneT TSO GmbH, www.tennet.eu
- [61] Review of Transmission System Security and Planning Standards - Appendix 1 SQSS (NI), www.soni.ltd.uk/
- [62] National Electricity Transmission System Security and Quality of Supply Standard, www2.nationalgrid.com
- [63] Appendix 1 Technical Requirements For Undersea Cable System Hawaiian Electric Company, Inc. Revised Draft September 28, 2012, www.mauielectric.com