

STACJA PRZEKSZTAŁTNIKOWA ŁĄCZA PRĄDU STAŁEGO JAKO ELEMENT REGULACJI MOCY BIERNEJ W SYSTEMIE ZASILANIA

Michał BRODZICKI¹, Robert KOWALAK²

1. Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; Studium doktoranckie, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 261 262 684 e-mail: m.brodzicki@amw.gdynia.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 18 27 e-mail: robert.kowalak@pg.edu.pl

Streszczenie: Przeprowadzone analizy wykazały możliwość wykorzystania stacji przekształtnikowej łącza prądu stałego do regulacji rozprywu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym. Odpowiednieysterowanie przekształtnika pozwala zarówno na ograniczenie, jak i zwiększenie pobieranej przez niego mocy biernej. Istotnym elementem procesu regulacji są też towarzyszące przekształtnikowi urządzenia kompensacyjne, które oddziałują na całość stacji jako węzeł systemu elektroenergetycznego. Wykorzystanieysterowania przekształtnika wraz z odpowiednią konfiguracją urządzeń kompensacyjnych daje zadowalające możliwości regulacji mocy biernej, co stwarza możliwość wykorzystania stacji przekształtnikowych w procesach regulacyjnych.

Słowa kluczowe: elektrotechnika, elektroenergetyka, moc bierna, stacja przekształtnikowa HVDC

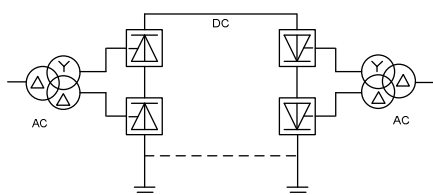
1. UKŁADY HVDC W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

1.1. Struktury układów HVDC

Wykorzystanie układów HVDC jest swoistym powrotem do korzeni elektrotechniki, kiedy Thomas Edison stosował prąd stały w pierwszych układach zasilania. Ostatecznie technologia ta ustąpiła rozwiązaniom opartym na prądzie przemiennym, proponowanym przez Nikołę Teslę. Obecnie układy prądu stałego stają się jednak interesującą alternatywą dla układów prądu przemiennego [1].

Wśród pracujących na świecie układów HVDC wyróżnić można kilka zasadniczych ich typów, różniących się właściwościami oraz obszarami ich zastosowań.

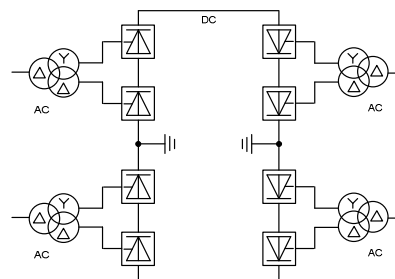
Podstawową strukturą HVDC jest układ monopolarny, inaczej jednobiegunowy jednaprzewodowy, którego strukturę obrazuje rysunek 1.



Rys. 1. Łącze HVDC w układzie monopolarnym [2]

Struktura monopolarna stosowana jest w przypadku łączy o znacznej długości i przekraczających obszary morskie. Przewodem głównym prądu stałego jest pojedyncza linia napowietrzna lub kablowa, natomiast przewodem powrotnym jest ziemia lub woda. Układ ten charakteryzuje się niskim kosztem, jednak brak przewodu powrotnego skutkuje znacznym stopniem elektrokorozji elementów umieszczonych w ziemi lub w wodzie. Jego modyfikacją jest układ dwuprzewodowy, w którym występuje również typowy przewód powrotny.

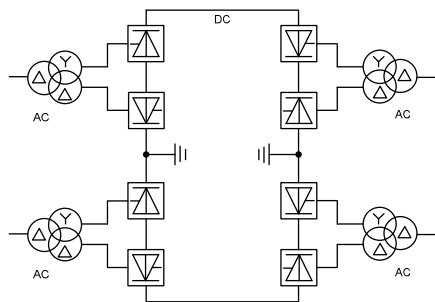
Kolejną odmianą łącza prądu stałego jest układ bipolarny, czyli dwubiegunowy. Strukturę układu bipolarnego przedstawia rysunek 2 [2].



Rys. 2. Łącze HVDC w układzie bipolarnym [2]

Struktura bipolarna charakteryzuje się obecnie najszerszym wykorzystaniem. Przekształtniki pracują szeregowo, natomiast punkty łączące je są uziemione. W stanie pracy normalnej przewody mają różne biegunowości, co skutkuje zerowym prądem powrotnym w przypadku symetrycznego obciążenia obu linii. W przypadku uszkodzenia jednego z torów, następuje przepływ prądu powrotnego poprzez ziemię. Ograniczenie prądów płynących ziemią uzyskuje się poprzez przewodowe łączenie punktów o potencjale ziemi [3].

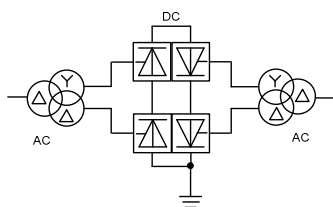
Swoistą modyfikacją układu bipolarnego jest układ homopolarny, inaczej zwany jednakobiegunowym dwuprzewodowym (rys. 3).



Rys. 3. Łącze HVDC w układzie homopolarnym [2]

W układzie homopolarnym oba przewody mają jednakową polaryzację. W stanie pracy normalnej przewodem powrotnym jest ziemia, dlatego też układ można stosować tylko w przypadkach, gdy przepływ prądu przez ziemię jest dozwolony [3].

Specyficznym rodzajem łącza prądu stałego jest tzw. układ Back-To-Back, przedstawiony schematycznie na rysunku 4.



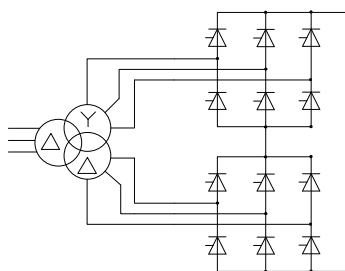
Rys. 4. Układ typu Back-To-Back [2]

Strukturalnie układ ten jest jedną stacją przekształtnikową, w obrębie której znajduje się zarówno prostownik, jak i falownik. W praktyce więc układ Back-To-Back jest łączem HVDC o zerowej długości. Stosowane są najczęściej do łączenia systemów elektroenergetycznych pracujących w sposób asynchroniczny. Ich oddziaływanie na system jest korzystne, z uwagi na tłumienie kołysań mocy i poprawę stabilności słabych ciągów przesyłowych. Możliwe jest stosowanie w nich niższego napięcia, ponieważ nie występuje potrzeba kompensacji strat przesyłowych [2].

1.2. Przekształtniki stosowane w układach HVDC

W obrębie przekształtników stosowanych we współcześnie pracujących łączach prądu stałego wyróżnić można trzy zasadnicze typy: przekształtniki o komutacji naturalnej (sieciorowej), przekształtniki o komutacji wymuszonej i komutujące kondensatorowo.

Jako konwencjonalne rozwiązanie przyjęto przekształtnik o komutacji sieciorowej (LCC), którego strukturę przedstawia rysunek 5.

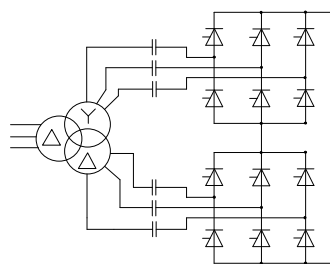


Rys. 5. Przekształtnik typu LCC [2]

Przekształtniki typu LCC umożliwiają przesył największych mocy i stosowane są w łączach przekraczających ciśniny morskie i wyprowadzających moc z elektrowni wodnych. Wykorzystuje się je również w przypadku łączy pomiędzy systemami pracującymi asynchronicznie. Technologia ta jest najstarszą spośród stosowanych, ale jednocześnie również najtańszą.

Przekształtniki te zasilane są z dwóch źródeł napięcia przesuniętych o 60 stopni, co realizuje się stosując dwa transformatory trójzwojieniowe o uzwojeniach połączonych w gwiazdę i w trójkąt. Przekształtniki zbudowane są w oparciu o tyrystory, które łączy się szeregowo w stopy. Poprawna praca przekształtnika wymaga opóźnienia prądu względem napięcia, co skutkuje poborem mocy biernej przez przekształtnik [2,4,5].

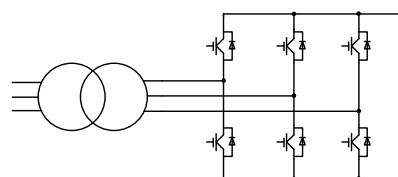
Modyfikacją przekształtnika typu LCC jest technologia CCC, bazująca na komutacji kondensatorowej (rys. 6).



Rys. 6. Przekształtnik typu CCC [2]

Struktura przekształtnika jest niemal identyczna, jak przekształtnika typu LCC, jednak w ich przypadku pomiędzy uzwojenia transformatora, a mostek przekształtnika, szeregowo włącza się kondensatory. Rozwiązanie to zapewnia ograniczenie poboru mocy biernej z sieci i ułatwia proces komutacji w sieciach słabych, co umożliwia łączenie węzłów systemu o niewielkiej mocy zwarciorowej.

Najnowocześniejszą technologią przekształtników są układy przekształtnikowe typu VSC, których strukturę przedstawia rysunek 7.



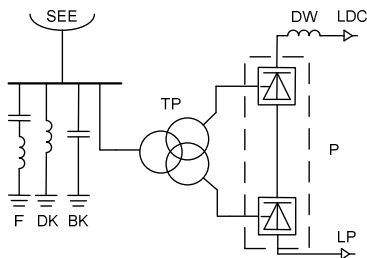
Rys. 7. Przekształtnik typu VSC [2]

Ideą technologii VSC jest stosowanie zamiast tyrystorów przyrządów w pełni sterowalnych, takich jak np. tranzystory IGBT. Ich właściwością jest niezależne sterowanie mocą czynną i bierną w bardzo krótkim czasie. Duża liczba przełączeń powoduje też poprawę jakości energii w stosunku do rozwiązań klasycznych. Oznacza to ponadto, iż układy te nie pracują z częstotliwością sieciorową, lecz na ogół znacznie wyższą [2,4].

Przekształtniki te nie wykazują zapotrzebowania na moc bierną, a wręcz mają możliwość jej generacji do sieci AC w przypadku takiej konieczności. Dzięki sterowaniu PWM regulacja może odbywać się po obu stronach łącza, niezależnie od napięcia w torze prądu stałego [2].

2. MODEL DO BADAŃ SYMULACYJNYCH

Model do badań symulacyjnych łącza prądu stałego wykonano w programie DIgSILENT PowerFactory, a jego strukturę przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Schemat modelu łącza prądu stałego opracowanego w programie DIgSILENT PowerFactory

SEE – system elektroenergetyczny, F – filtr wyższych harmonicznych, DK – dławik kompensacyjny, BK – bateria kondensatorów, TP – transformator przekształtnikowy, P – przekształtnik 12-pulsowy, DW – dławik wygładzający DC, LDC – linia główna DC, LP – linia powrotna

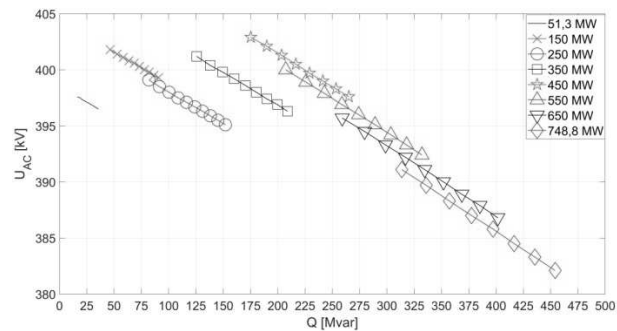
Opracowany model odwzorowuje układ monopolarny, oparty na strukturze istniejącego łącza SwePol Link pomiędzy Polską i Szwecją. W modelu układu monopolarnego przewidziano więc typową linię powrotną. W skład zamodelowanych stacji przekształtnikowych wchodzi transformatory trójzwojowe, przekształtniki 12-pulsowe oraz urządzenia kompensacyjne w postaci baterii kondensatorów, dławików i filtrów wyższych harmonicznych. Stacje po obu stronach łącza zamodelowano jako strukturalnie identyczne. Systemy elektroenergetyczne Polski i Szwecji zostały zamodelowane jako pojedyncze źródła napięciowe 400 kV o parametrach wynikających z przyjętych wartości mocy zwarciovych w węzłach.

W toku badań symulacyjnych analizowano zarówno pracę prostownikową, jak i falownikową stacji przekształtnikowej. Regulacja pobieranej mocy biernej prowadzona była poprzez zmianę kąta załączenia tyrystorów (w przypadku pracy falownikowej kąta wygaszania). W aspekcie każdego z trybów pracy badano możliwości regulacyjne stacji przy różnych poziomach przesyłanej łączem mocy czynnej, od wartości wynikającej z minimalnego prądu przekształtnika do wartości wynikającej z maksymalnego dopuszczalnego prądu przekształtnika. Analizie poddana została zarówno typowa praca stacji, podczas której poszczególne urządzenia kompensacyjne załączane były zgodnie z harmonogramem pracy stacji rzeczywistej oraz praca przy ciągłym załączeniu poszczególnych urządzeń kompensacyjnych w całym zakresie dostępnych mocy czynnych.

3. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

3.1. Wyniki symulacji pracy prostownikowej

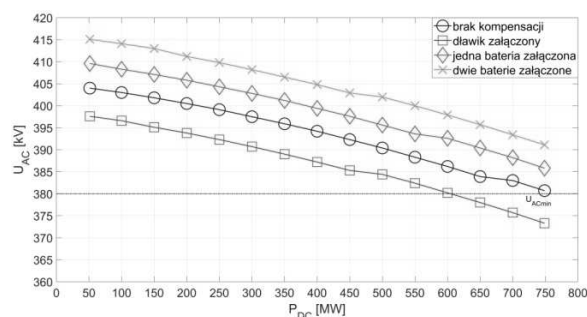
Wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono w postaci graficznej. Na rysunku 9 przedstawiono charakterystyki $U_{AC}=f(Q)$ dla typowej pracy prostownikowej, obrazujące poziom napięcia na szynach stacji w funkcji pobieranej mocy biernej dla różnych wartości przesyłanej mocy czynnej.



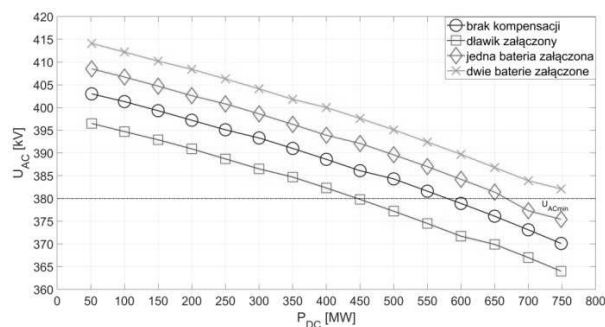
Rys. 9. Charakterystyki $U_{AC}=f(Q)$ dla typowej pracy prostownikowej

Uzyskane wyniki wykazały możliwość regulacji napięcia na szynach stacji dla każdej dostępnej wartości mocy czynnej przesyłanej łączem. Zakres ten ulegał poszerzeniu w miarę zwiększania mocy czynnej w łączu. Dla najwyższych wartości mocy czynnych zakres regulacji napięcia wyniósł ok. 10 kV. Dla wartości najmniejszej zakres ten wyniósł ok. 3 kV.

Rysunek 10 przedstawia charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ przy wysterowaniu przekształtnika na minimalny, natomiast rysunek 11 te same charakterystyki przy wysterowaniu przekształtnika na maksymalny pobór mocy biernej.



Rys. 10. Charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ przy wysterowaniu przekształtnika na minimalny pobór mocy biernej



Rys. 11. Charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ przy wysterowaniu przekształtnika na maksymalny pobór mocy biernej

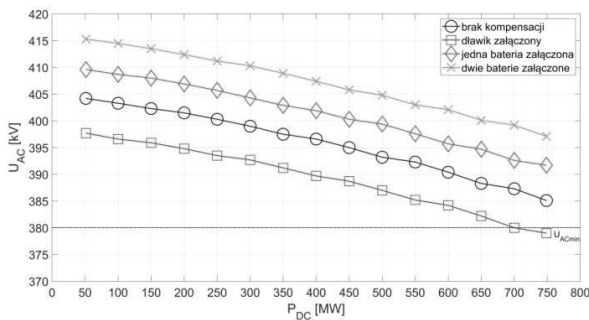
Charakterystyki te wskazują, że przy pracy prostownikowej stacji przekształtnikowej możliwa jest regulacja napięcia w węzle jej przyłączenia w szerokim zakresie. Wynika z nich, że przekształtnik jest w stanie pobierać znaczną wartość mocy biernej. Dla wysokich wartości przesyłanej mocy czynnej przy wysterowaniu na maksymalny pobór mocy biernej wartość napięcia na szynach stacji była zbliżona do minimalnej wartości dopuszczalnej długotrwale. Natomiast przy wysterowaniu na minimalny pobór mocy biernej teoretycznie możliwa byłaby praca bez udziału urządzeń kompensacyjnych w całym zakresie przesyłanych mocy czynnych, choć wartość

napięcia na szynach stacji dla maksymalnego przesyłu mocy czynnej była bliska dolnemu ograniczeniu.

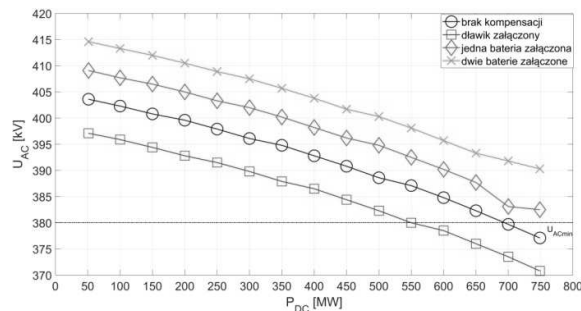
3.2. Wyniki symulacji pracy falownikowej

Uzyskane charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ były zbliżone do charakterystyk przedstawionych na rysunku 9. Podobnie, jak w przypadku pracy prostownikowej, stacja pracująca falownikowo również wykazuje możliwości regulacyjne dla każdej dostępnej wartości przesyłanej mocy czynnej. Zakres regulacji napięcia ponownie poszerzał się wraz ze wzrostem mocy czynnej. Istotną obserwacją był fakt występowania wyższej wartości napięcia na szynach stacji, niż przy pracy prostownikowej.

Rysunki 12 i 13 przedstawiają charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ przy wysterowaniu przekształtnika na minimalny i maksymalny pobór mocy biernej.



Rys. 12. Charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ przy wysterowaniu przekształtnika na minimalny pobór mocy biernej



Rys. 13. Charakterystyki $U_{AC}=f(P_{DC})$ przy wysterowaniu przekształtnika na maksymalny pobór mocy biernej

Wpływ wysterowania przekształtnika i pracy urządzeń kompensacyjnych przy pracy falownikowej jest identyczny, jak przy pracy prostownikowej. Dostępny zakres zmian napięcia jest szeroki, a fakt utrzymywania się wyższego napięcia, niż przy pracy prostownikowej sprawia, że regulacja może być prowadzona dla szerszego zakresu przesyłanych mocy czynnych. W przypadku wysterowania przekształtnika na minimalny pobór mocy biernej, możliwa

jest regulacja w całym zakresie mocy czynnych bez udziału urządzeń kompensacyjnych.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania były oparte o wcześniej przeprowadzone analizy zawarte w [6] i nieco względem nich poszerzone. Wykazały one, że stacja przekształtnikowa łączy prądu stałego może stanowić istotny element procesu regulacji rozptywu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym. Regulacja zapewniająca szeroki zakres zmian napięcia możliwa jest zarówno przy pracy prostownikowej, jak i falownikowej i nie wpływa na wartość mocy czynnej przesyłanej łączem, co jest niezmiernie istotne. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż najszersze możliwości regulacyjne zapewnia stacja przekształtnikowa pracująca falownikowo.

W toku badań przeanalizowano jedynie układ HVDC oparty na przekształtnikach typu LCC, tak więc w celu uzyskania pełnego przeglądu możliwości regulacyjnych stacji należałoby badania uzupełnić o analizy pracy stacji z przekształtnikami typu VSC, których możliwości regulacyjne w zakresie rozptywu mocy biernej powinny być jeszcze szersze. Badania te pozwoliłyby także na jednoznaczną ocenę, który z typów przekształtników zapewnia najefektywniejszą regulację mocy biernej w pracującym łączu HVDC.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Bobrowski W.: Perspektywy rozwoju linii wysokiego napięcia prądu stałego, Elektro Info, Rok 2013, nr 5.
2. Polewaczyk M., Robak S.: Układy HVDC we współczesnych systemach elektroenergetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, Rok 2016, R. 92, nr 7.
3. Zajczyk R.: Regulacja napięć i rozptywu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, WEiA, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2014.
4. Nogal Ł., Kacprowicz P.: HVDC jutro, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok 2012, R. 80, nr 7.
5. Przytuła K., Zieliński D.: Układy przekształtnikowe w sieciach Smart Grids – systemy HVDC, Problemy współczesnej inżynierii. Wybrane zagadnienia z elektrotechniki i robotyki, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2015.
6. Kowalak R., Szczerba Z.: Ocena możliwości wykorzystania stacji przekształtnikowej HVDC do kompensacji mocy biernej, Acta Energetica, Rok 2010, nr 2.

DC LINK CONVERTER STATION AS VAR CONTROL ELEMENT IN POWER NETWORK

The simulation study's results show, that HVDC link's converter station can be considered as a reactive power regulator in the power supply system. There is a possibility of specific activation of the converter to both limit and increase the amount of consumed reactive power. The compensators which cooperate with the converter are also important elements of the regulation process. Although they don't influence the converter's operation significantly, they affect the whole converter station as a reactive power supply. Using the specific converter's activation along with changing the compensators' configuration provides satisfying reactive power distribution regulation capabilities. As a consequence, converters operating within electrical power engineering can be considered as significant elements of reactive power distribution and voltage regulation process in the power supply systems.

Keywords: electrical engineering, power electrical engineering, reactive power, HVDC converter station.