

INTERAKCJE POMIĘDZY UKŁADAMI PRZESYŁOWYMI PRĄDU STAŁEGO W WARUNKACH OBNIŻONEJ MOCY ZWARCIOWEJ

Michał KOSMECKI¹, Krzysztof MADAJEWSKI²

1. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
tel.: 58 349 8185, e-mail: m.kosmecki@ien.gda.pl
2. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
tel.: 58 349 8200, e-mail: k.madajewski@ien.gda.pl

Streszczenie: Analiza wybranych zagadnień równoległej pracy dwóch układów przesyłowych prądu stałego (HVDC) o odmiennych technologiach, tj. układu tyrystorowego (LCC – *Line Commutated Converter*) i tranzystorowego (VSC – *Voltage Source Converter*) jest przedmiotem niniejszego referatu. Pokazano, że równoległa praca układów jest możliwa w warunkach niskiej mocy zwarciowej tam, gdzie sam układ LCC o równoważnej mocy nie mógłby pracować stabilnie w trybie regulacji mocy. Warunkiem jest praca falownika łącza VSC HVDC w trybie regulacji napięcia AC. Z drugiej strony w określonych okolicznościach to właśnie ten tryb może być przyczyną pogorszenia warunków pracy układu LCC, co wskazuje na potrzebę dokładnej analizy takich przypadków celem właściwego doboru nastaw odpowiednich układów regulacji.

Słowa kluczowe: HVDC, stabilność napięciowa, interakcje, przewroty komutacyjne.

1. WPROWADZENIE

Wobec rosnącej liczby układów przesyłowych prądu stałego dystans elektryczny pomiędzy kolejnymi układami zmniejsza się. Wzajemna bliskość układów LCC HVDC może być powodem powstawania niekorzystnego oddziaływania jednego układu na drugi przejawiającego się m.in. propagacją przepięć dorywczych i przewrotów komutacyjnych czy interakcją układów sterowania [1]. Od niedawna w bliskim sąsiedztwie układów LCC HVDC uruchamiane są układy VSC HVDC. Przykładem są układy EstLink 1 i 2 [2] pomiędzy Estonią i Finlandią (odpowiednio 350 MW VSC i 650 MW LCC) oraz Skagerrak 3 i 4 pomiędzy Danią a Norwegią (odpowiednio 500 MW LCC i 715 MW VSC) [3], jak i uruchamiane i planowane do uruchomienia połączenia morskich farm wiatrowych do systemu lądowego, w tym połączenia do KSE.

O ile przypadek wzajemnego oddziaływania układów LCC można rozpatrywać jedynie w kategorii problemów w ich współpracy, o tyle sąsiedztwo układów VSC HVDC dla układów LCC powinno być korzystne z uwagi na możliwość płynnej i szybkiej zmiany mocy biernej oferowaną przez technologię VSC HVDC, szczególnie przydatną dla wsparcia systemu AC podczas zakłóceń w sieci. Niniejszy referat ma na celu przedstawienie wpływu (interakcji) na pracę układu LCC blisko zlokalizowanego układu VSC dla wybranych zakłóceń w pracy systemu.

2. PRACA UKŁADÓW PRĄDU STAŁEGO W WARUNKACH OBNIŻONEJ MOCY ZWARCIOWEJ

Praca falownika łącza HVDC LCC w warunkach obniżonej mocy zwarciowej wiąże się przede wszystkim z problemami z występowaniem przewrotów komutacyjnych. Są to problemy natury dynamicznej, których analiza wymaga symulacji możliwie dokładnego modelu trójfazowego w programie klasy EMTP (program do analiz zjawisk elektromagnetycznych). Zagadnienie to szerzej omówiono w dalszej części referatu.

Niska moc zwarciowa sprzyja również uwidocznieniu interakcji do jakich dochodzi pomiędzy układem HVDC a systemem AC. Podłożem interakcji jest wpływ pracy układu LCC HVDC na warunki napięciowe w stacjach przekształtnikowych łącza. Ponieważ układ VSC HVDC ma możliwość regulacji napięcia w systemie AC a tym samym będzie brał udział w omawianej interakcji, temat ten przybliżono poniżej.

Interakcję pomiędzy systemem DC i AC w stanach ustalonych można analizować przy wykorzystaniu krzywych maksymalnych mocy (MPC) [4]. Krzywa MPC obrazuje jak bardzo może wzrosnąć prąd DC do momentu, w którym dalszy wzrost prądu nie pociąga za sobą zwiększenia mocy przesyłanej łączem. Taki punkt pracy systemu określany jest mianem maksymalnej osiągalnej mocy (MAP), a jego przekroczenie oznacza pracę w obszarze niestabilnym. Mechanizm utraty stabilności jest następujący - obniżenie napięcia AC po stronie falownika spowoduje zmniejszenie napięcia DC w obwodzie prądu stałego. Podstawowy tryb pracy prostownika w stanach normalnych to regulacja przesyłanej mocy czynnej P_{dc} , zatem sposobem na przywrócenie mocy P_{dc} będzie zwiększenie prądu DC w łączu. Większy prąd DC to zwiększony pobór mocy biernej przez przekształtnik, co prowadzi do dalszego obniżania napięcia po stronie AC. Jeżeli ta zmiana nie zostanie skompensowana lub łącze nie zmieni trybu pracy, to cykl będzie się powtarzał do momentu całkowitego zatrzymania układu.

Powyżej opisany mechanizm interakcji pomiędzy układem LCC HVDC a systemem AC można przerwać. Gdy dochodzi do obniżenia napięcia w obwodzie DC (typowe wartości to $U_{dc} < 0,75 \div 0,85$ pu) prostownik powinien przejść z regulacji mocy do regulacji prądu I_{dc} . Takie warunki pracy ($I_{dc} = \text{const}$) są korzystniejsze z punktu widzenia zmniejszenia zagrożeń utraty stabilności napięciowej w porównaniu z pracą

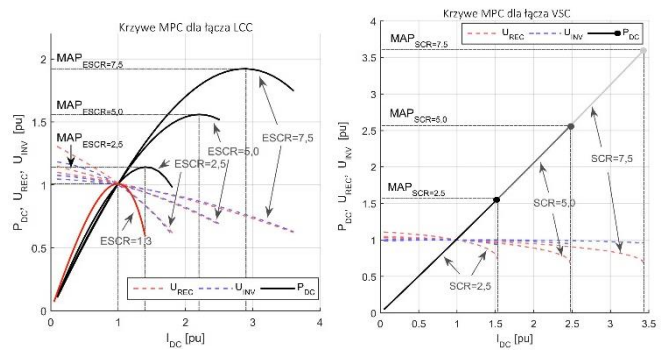
$P_{dc} = \text{const}$. Falownik w stanach normalnych i wysokiej wartości ESCR¹ zazwyczaj pracuje z kryterium minimum kąta wyprzedzenia wyłączania falownika (min. γ). W warunkach niskiej wartości ESCR po stronie falownika regulacja według kryterium min. γ nie zapewnia stabilnej pracy układu po zaburzeniu. W takich warunkach pracy, lepsze właściwości uzyskuje się gdy regulacja odbywa się według kryterium stałego napięcia w obwodzie prądu stałego ($U_{dc} = \text{const}$).

Należy zaznaczyć, że osiągnięcie poziomu MAP w realnych warunkach pracy może nie być możliwe, gdyż odpowiadający mu prąd DC może być zbyt duży lub napięcie AC będzie tak niskie, że zadziałają odpowiednie zabezpieczenia. Niemniej krzywe MPC znajdują zastosowanie jako narzędzie planistyczne lub teoretyczno-analityczne.

Krzywe MPC dla łącza HVDC LCC pracującego w trybie regulacji mocy (prostownik) i kąta gamma (falownik) dla trzech wielkości mocy zwarciowej zmienianej po obu stronach łącza przedstawiono na rysunku 1. Pokazano również zmiany napięć na zaciskach prostownika i falownika (linie przerywane). W warunkach niskiej mocy zwarciowej (ESCR = 2,5) wartość MAP jest niewiele większa niż moc znamionowa (MAP = 1,14 pu, $I_{MAP} = 1,4$ pu). Blisko dwukrotny wzrost mocy zwarciowej powoduje wzrost MAP zaledwie o 0,42 pu. Dodatkowo pokazano, że spadek mocy zwarciowej do poziomu odpowiadającemu ESCR = 1,3 spowoduje, że moc znamionowa będzie odpowiadała poziomowi MAP. Praca układu w takich warunkach i przy jeszcze niższej mocy zwarciowej wymaga zmian trybu regulacji zgodnie z opisem powyżej.

Uwarunkowania dla pracy układów VSC HVDC w warunkach obniżonej mocy zwarciowej są co do zasady podobne [5], tj. wartość MAP również zależy od współczynnika ESCR i kąta impedancji sieci w miejscu przyłączenia oraz od trybu pracy przekształtnika. Na rysunku 1 przedstawiono krzywe MPC dla układu VSC, w którym w celu miarodajnego porównania z układem LCC założono, że przekształtniki pracują w trybie regulacji mocy biernej w PCC z zadaną wartością równą zero. Z porównania wynika, że w tych samych warunkach systemowych łączem klasy VSC można bezpiecznie przesyłać moc na większym poziomie, a różnica jest tym większa, im większa jest moc zwarciowa. W praktyce przekształtniki rzadko kiedy pracują ze stałą mocą bierną, gdyż wykorzystywany jest tryb regulacji napięcia w PCC oferowany przez przekształtniki napięciowe, co istotnie zwiększa możliwości przesyłu mocy. Regulacja napięcia w węźle sprawia, że ma on charakter zbliżony do idealnego źródła napięciowego. Wówczas liniowa charakterystyka MPC dla układu VSC będzie ograniczona przede wszystkim parametrami znamionowymi obwodów pierwotnych, które mają swoje odbicie w charakterystyce PQ przekształtnika i maksymalnym poziomie napięcia AC po stronie przekształtnika. Zapasy stabilności są tak duże w porównaniu z układami LCC HVDC pracującymi w takich samych warunkach, że zazwyczaj przyjęło się pomijać wielkość mocy zwarciowej jako kryterium pracy tych układów.

Jednak również w tym przypadku jakość regulacji zależy od mocy zwarciowej.

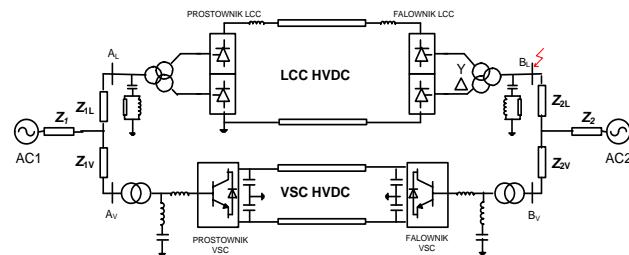


Rys. 1. Porównanie krzywych MPC dla łącza LCC HVDC i VSC HVDC dla tych samych poziomów mocy zwarciowej

3. RÓWNOLEGLA PRACA UKŁADÓW LCC HVDC I VSC HVDC

3.1. Analizy statyczne

Równoległą pracę układów przebadano w oparciu o model przedstawiony na rysunku 2, w którym moc zwarciową oraz odległość pomiędzy falownikami kształtowano poprzez zmianę opisanych impedancji. Przebadano warianty sztywności sieci odpowiadające współczynnikowi ESCR równemu 2,5, 5 i 7,5 oraz trzy warianty dystansu dzielącego stacje falownikowe: 2 km, 100 km i 200 km. Założono pracę obu przekształtników łącza VSC HVDC w trybie regulacji napięcia. Prostownik VSC regulował moc czynną, falownik VSC napięcie DC.



Rys. 2. Schemat równoległe pracujących układów LCC HVDC oraz VSC HVDC

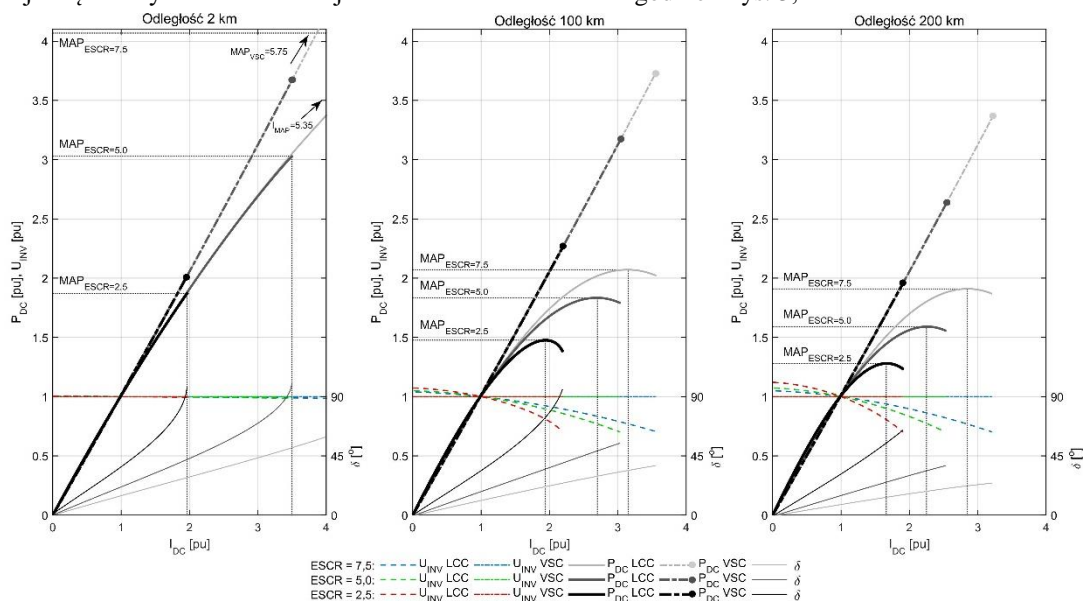
Poniżej przedstawiono wyniki analiz statycznych w postaci krzywych MPC. Konstruowano je przy założeniu równomiernego wzrostu prądu DC w obu układach. Po stronie systemu AC1 zamodelowano dużą moc zwarciową odpowiadającą ESCR = 15 przy wykorzystaniu impedancji Z_{IL} i Z_{IV} ; impedancję Z_I pozostawiono zerową, co praktycznie eliminuje wzajemny wpływ przekształtników po stronie prostowników. Dokonane analizy wykazały poprawę warunków funkcjonowania łącza LCC HVDC w stanach ustalonych, w szczególności:

- Poprawa jest tym większa im bliżej układ VSC jest zlokalizowany względem układu LCC.
- W wariantcie tej samej lokalizacji powstaje możliwość wprowadzenia do systemu dużo większej mocy; poziom MAP układu LCC HVDC jest zdecydowanie wyżej (por. rys. 1) i to przy równoległej pracy w tej samej lokalizacji układu VSC. Dokładna analiza krzywych dla tego wariantu (rys. 3) wskazuje na zmianę ich charakteru, bowiem poziom MAP osiągany jest nie poprzez kryterium stabilności napięciowej, a kątowej

¹ ESCR - Effective Short Circuit Ratio - stosunek mocy zwarciowej w miejscu przyłączenia układu HVDC pomniejszony o moc znamionową filtrów i baterii kondensatorów do mocy znamionowej układu

(charakter i wielkość zmian kąta mocy zobrazowanego w dolnej części wykresów wskazuje na możliwość

utruty równowagi statycznej). Należy zauważyć, że zgodnie z rys. 3, niezależnie



Rys. 3. Krzywe MPC dla pracy równoległej układu LCC HVDC i VSC HVDC

od odległości, punkt odpowiadający mocy znamionowej obu układów pracujących równolegle jest stabilny. Gdyby założyć pracę dwóch układów LCC HVDC, to wówczas ESCR takiego układu równoległego wynosiłoby 1,0, co zgodnie z rysunkiem 1 byłoby wariantem niestabilnym pracy w trybie regulacji mocy (krytyczne $ESCR = 1,3$).

- Podobny charakter zmian obserwuje się w przypadku oddalenia obu układów. W wariantcie 100 km wciąż odczuwalne jest wsparcie systemu poprzez regulację napięcia przez przekształtnik VSC, choć na mniejszym poziomie. Przy niskiej mocy zwarciowej widoczny jest wpływ obu kryteriów na załamanie krzywej MPC. Dla wyższych mocy zwarciowych krzywe MPC dla układu LCC HVDC mają charakterystyczny kształt, co świadczy o mniejszym korzystnym wpływie układu VSC.
- Nawet w przypadku dużego oddalenia układów (200 km) widoczna jest poprawa warunków pracy układu LCC HVDC.

3.2. Praca w stanach zakłóceń

Modele i parametry układów sterowania łączem LCC HVDC przyjęte w niniejszej pracy korzystają z danych o połączeniu Polska-Szwecja (SwePol) zawartych między innymi w [6],[7]. Moc znamionowa układu to 600 MW, długość połączenia kablowego to około 250 km na napięciu 450 kV. Dla układu VSC HVDC opracowano model o identycznej mocy znamionowej (600 MW) i długości połączenia kablowego (250 km) ale na napięciu ± 320 kV. Odwzorowano łącze oparte o dwupoziomowy przekształtnik napięcia z modulacją PWM i regulacją prądu w wirującym układzie odniesienia dq wykorzystującą regulatory PI.

Dostosowanie parametrów i trybu sterowania łączem LCC HVDC pozwoliło na stabilną pracę w warunkach znamionowych przy mocy zwarciowej na szynach równej 1800 MVA, co odpowiada wartości ESCR 2,5. Wymagana była analiza i dostosowanie nastaw układu regulatorów PI, w tym regulatorów pętli fazowej PLL (*Phase Locked Loop*). Jako kryterium stabilnej dla łącza LCC HVDC pracy przyjęto brak wielokrotnych przewrotów komutacyjnych i płynny

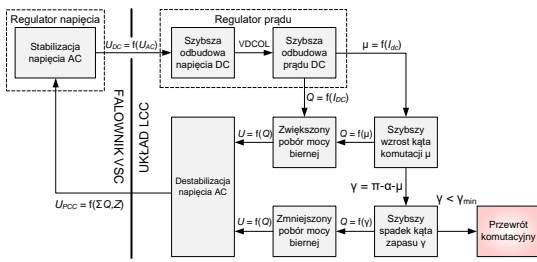
powrót do stanu sprzed zaburzenia po wystąpieniu zwarcia jednofazowego w sieci 400 kV po stronie falownika na szynach B_L (rys.1). Odpowiednie przebiegi dla pracy samodzielnej układów przedstawiono w [11], praca równoległa układów LCC HVDC i VSC HVDC została opisana poniżej.

W wariantcie niskiej mocy zwarciowej ($ESCR=2,5$) najbardziej istotne znaczenie dla poprawnej pracy układów, w szczególności gdy przekształtniki zlokalizowane są blisko siebie, posiadają następujące elementy:

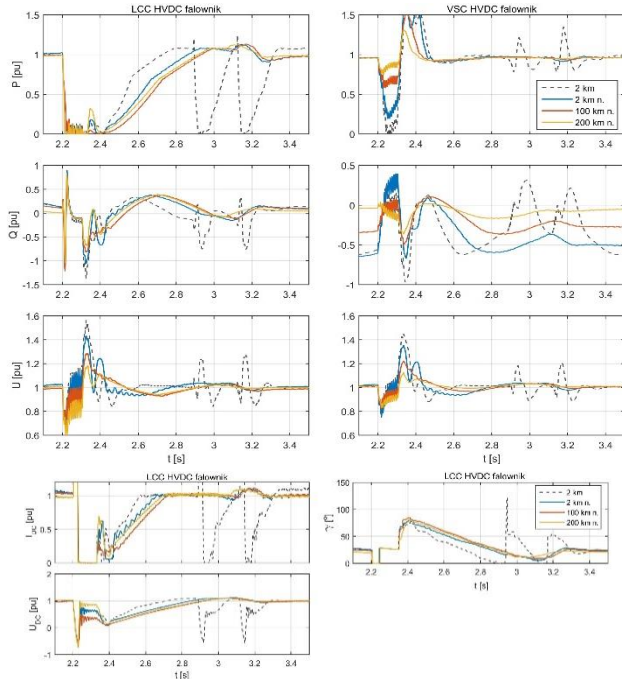
- a) Pętla fazowa - podobnie jak dla pracy indywidualnej układów, w pracy równoległej przy niskiej mocy zwarciowej należy dostosować parametry układu PLL do warunków sieciowych [10]. Zbyt szybki układ (duże wzmocnienie, mała stała czasowa) może prowadzić do niestabilności i negatywnej interakcji układów.
- b) Układ regulacji napięcia falownika łącza VSC HVDC - analogiczny problem dotyczy układu regulacji napięcia. Przyjęte kryterium pojedynczego przewrotu komutacyjnego w założonych warunkach sieciowych możliwe było do spełnienia dopiero po zmianie nastaw regulatora napięcia falownika łącza VSC HVDC.

Z porównania przebiegów dla dwóch zestawów nastaw przedstawionych na rysunku 5 wynika, że zbyt szybka regulacja napięcia przez falownik łącza VDC HVDC może utrudnić proces powrotu układu LCC HVDC do warunków znamionowych po zakłóceniu. Dochodzi do niekorzystnej interakcji pomiędzy regulatorem prądu łącza LCC HVDC, a regulatorem napięcia układu VSC. Charakterystyka interakcji jest następująca. Regulator napięcia poprzez stabilizację napięcia przemiennego przyczynia się do szybszej odbudowy napięcia DC w układzie LCC. Dzięki temu układ VDCOL warunkujący wartość zadaną prądu DC wcześniej dopuszcza wyższe wartości zadane prądu, co zwiększa pobór mocy biernej przez przekształtnik tyrystorowy. Na skutek tego oraz przy napięciu DC wciąż poniżej wartości znamionowej ulega zwiększeniu kąt komutacji μ i zmniejszeniu kąt zapasu γ . Oba te kąty mają wpływ na wartość mocy biernej pobieranej przez przekształtnik, a zatem i na przebieg napięcia na szynach stacji falownika układu LCC. Jak pokazano na poniższych symulacjach, w skrajnym

przypadku może dojść do takiego zaniżenia kąta zapasu, że wystąpi kolejny przewrót komutacyjny. Schematycznie proces ten przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Mechanizm interakcji pomiędzy układami HVDC



Rys. 5. Praca równoległa układów: odpowiedź na zwarcie jednofazowe usunięte z czasem 100 ms dla ESCR = 2,5; P, Q, U: moc czynna i bierna oraz napięcie mierzone na szynach B_L i B_V (przyjęto dodatni znak mocy bierniej pojemnościowej); linią przerywaną oznaczono przebiegi dla nastaw regulatora falownika układu VSC HVDC dla wysokiego ESCR; symbolem „n” oznaczono przebiegi dla nastaw dla niskiego ESCR

4. PODSUMOWANIE

Interakcja pomiędzy układem LCC HVDC, który podczas procesu powrotu do znamionowych warunków pracy po wystąpieniu przewrotu komutacyjnego zwiększa pobór

mocy bierniej, a systemem AC (wraz z filtrami i bateriami kondensatorów w stacji przekształtnikowej), z którego ta moc jest dosyłana, jest przez przekształtnik VSC zmieniana.

Im bliżej siebie zlokalizowane są oba przekształtniki, tym udział przekształtnika VSC w omawianej interakcji jest większy. W przypadku niskich mocy zwarciowych intensywność udziału może być na tyle duża, że ponowna analiza i dobór parametrów układu regulacji napięcia przekształtnika VSC mogą okazać się niezbędne. W warunkach normalnej mocy zwarciowej falownik VSC potrafi usprawnić proces powrotu do pracy układu LCC HVDC po zakłóceniach, natomiast w warunkach obniżonej mocy zwarciowej może ten proces utrudniać.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Praca zbiorowa: Systems With Multiple DC Infeed, CIGRE, Raport 364, WG B4-41, 2008.
2. Rauhala T., Laasonen M., Kilter J.: Coordination and management of impact of EstLink 2 transmission testing on electricity markets, power system operations and system technical performance, Konferencja CIGRE, Paryż 2016.
3. Midsund T., et al.: Experience from a bipolar HVDC system with a Voltage Source Converter and a Line Commutating Converter, Konferencja CIGRE, Paryż 2016.
4. Praca zbiorowa: Guide for planning DC links terminating at AC systems locations having low short-circuit capacities. PART I: AC/DC interaction phenomena, CIGRE, Raport 68, CIGRE WG 14.07.
5. Zhou J.Z., Gole A.M.: Rationalisation and validation of DC power transfer limits for voltage sourced converter based high voltage DC transmission, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, nr 6, s. 1327–1335, 2016.
6. Kosmecki M.: Praca układu przesyłowego prądu stałego (HVDC) w warunkach obniżonej mocy zwarciowej, Konferencja APE'09, Jurata 2009.
7. Madajewski K.: Modele dynamiczne systemu elektroenergetycznego do badania układów przesyłowych prądu stałego, Prace Instytutu Energetyki, zeszyt 25, Warszawa 2003.
8. Vardikar M., et al.: AC-DC Interaction Study for Upcoming ±800kV, 3000MW Champa Kurukshetra HVD Link, referat nr B4-110, CIGRE 2016, Paryż.
9. De Simone M., et al.: Commutation failures mitigation in multi-infeed network with high renewable, referat nr B4-125, CIGRE 2016, Paryż.
10. Zhou J. Z., Ding H., Fan S., Zhang Y., Gole A. M.: Impact of Short-Circuit Ratio and Phase-Locked-Loop Parameters on the Small-Signal Behavior of a VSC-HVDC Converter, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, s. 2287–2296, Oct. 2014.
11. Kosmecki M., Madajewski K.: Wybrane aspekty interakcji układów przesyłowych prądu stałego w technologii tyrystorowej (LCC HVDC) i tranzystorowej (VSC HVDC), Acta Energetica, Konferencja APE'17, w druku.

INTERACTION BETWEEN HVDC LINKS IN LOW SHORT CIRCUIT POWER CONDITIONS

This paper describes the results of an analysis of selected problems in the parallel operation of two HVDC systems based on different technologies, namely Line Commutated Converter (LCC HVDC) and Voltage Source Converter (VSC HVDC). Using Maximum Power Curves (MPC) technique it is shown that the parallel operation of the two systems in low short circuit power conditions is possible where a single LCC HVDC scheme of equivalent rated power would fail to operate stably in constant power mode. However, the prerequisite for such operation is active AC voltage control offered by the VSC inverter. It is also shown that the positive influence of the VSC converter is noticeable if the two inverters are a considerable distance apart (e.g. 100 or 200 km). On the other hand, EMTF simulations reveal also adverse effects of the mutual influence, particularly apparent in low ESCR systems where the so-called voltage and power instability problem of the AC/DC systems is be more evident. This phenomenon is the basic cause of the undesirable interaction between the LCC HVDC and VSC HVDC resulting in more difficult return to nominal operating conditions after a commutation failure in the LCC system. The proposed and demonstrated solution is to tune down the PLL and voltage controller gains in order to make the overall system less stiff.

Keywords: HVDC, Maximum Power Curve, multi-infeed system, interaction.