

WARUNKI PRACY OTOCZENIA SIECIOWEGO A PRACA ŁĄCZA HVDC SWEPOL LINK

Maksymilian PRZYGRODZKI^{1,2}, Piotr RZEPKA^{1,2}, Mateusz SZABLICKI^{1,2}

1. PSE Innowacje sp. z o.o., ul. Warszawska 165, 05-520 Konstancin-Jeziorna,
e-mail: maksymilian.przygodzki@pse.pl
2. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Streszczenie: W pracy łącza HVDC SwePol Link rejestruje się zakłócenia związane z wyzwalaną sieciowo komutacją tyrystorów (przewroty komutacyjne) powstające w trakcie importu energii elektrycznej do Polski. Przewrót komutacyjny może prowadzić do wyłączenia łącza i w efekcie do ograniczeń w realizacji wymiany mocy między Polską i Szwecją. Dodatkowym skutkiem wyłączenia łącza mogą być defekty techniczne. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy przyczynowo-skutkowej wpływu funkcjonowania sieci zamkniętej w północnym rejonie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego na zakłócenia w pracy łącza HVDC SwePol Link.

Słowa kluczowe: łącze HVDC, technologia LCC, przewrót komutacyjny.

1. WSTĘP

Stosowanym powszechnie rozwiązaniem w krajowej i światowej elektroenergetyce jest wytwarzanie, przesył i użytkowanie energii elektrycznej w postaci zmiennoprądowej. Jednakże w niektórych przypadkach uzasadnione staje się skorzystanie z układów stałoprądowych. Wśród elektroenergetycznych układów przesyłowych prądu stałego (HVDC – *High Voltage Direct Current*) powszechnie znanym i wykorzystywanym rozwiązaniem jest technologia *Line Commutated Converters* (LCC). Takie rozwiązanie zastosowano m.in. w łączu HVDC SwePol Link.

Łącze HVDC SwePol Link to układ sprzęgający systemy elektroenergetyczne Polski i Szwecji. Łącze oddano do użytku w 2000 r. Zrealizowano je jako bipolarne połączenie HVDC obejmujące linię kablową (o łącznej długości 254 km, w tym odcinek podmorski 239 km) oraz stację przekształtnikową w Słupsku (po stronie polskiej) i stację przekształtnikową w Stårnö (po stronie szwedzkiej). Łącze umożliwia przesył energii elektrycznej z Polski do Szwecji (eksport) oraz ze Szwecji do Polski (import). Znamionowa wartość przesyłanej mocy wynosi 600 MW.

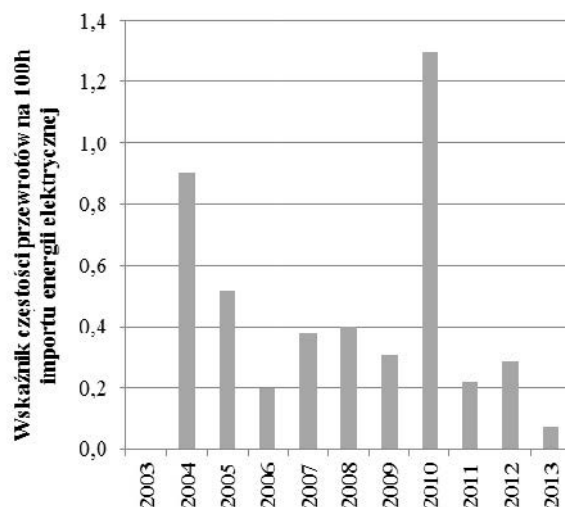
Łącze HVDC SwePol Link jest częścią tzw. Pierścienia Bałtyckiego [1], którego celem jest integracja systemów energetycznych krajów nadbałtyckich oraz poszerzenie współpracy zarówno na płaszczyźnie handlu energią elektryczną jak i technicznej pomiędzy tymi krajami.

Aktualnie możliwości przesyłowe łącza HVDC SwePol Link są udostępniane na zasadach rynkowych. W 2012 roku alokacja odbywała się poprzez mechanizm *market coupling* na rynku dnia następnego, organizowanym przez Towarową Giełdę Energii i Nord Pool Spot AS.

2. STATYSTYKA ZJAWISKA PRZEWROTÓW KOMUTACYJNYCH

Poprawna praca łącza HVDC wykorzystującego technologię LCC wymaga odpowiedniego obszaru napięciowo-czasowego procesu komutacji tyrystorów łącza. Gdy obszar ten jest niewystarczający do prawidłowego przebiegu komutacji, może dojść do tzw. przewrotów komutacyjnych. W konsekwencji może to prowadzić do krótkotrwałego blokowania przesyłu energii elektrycznej łączem bądź nawet wyłączenia łącza.

W okresie od 2000 roku do 2013 roku zanotowano 204 zakłócenia w pracy łącza HVDC SwePol Link, którym towarzyszyły przewroty komutacyjne [2]. Przewroty komutacyjne występują wyłącznie przy imporcie energii elektrycznej do KSE. Zatem poprawne wnioskowanie wymaga zestawienia liczby przewrotów komutacyjnych w danym roku z procentowym udziałem czasu importu. Na rysunku 1 przedstawiono roczne wskaźniki przeciętnej liczby przewrotów komutacyjnych przypadających na 100 godzin importu. Uśredniony wskaźnik dla całego rozpatrywanego okresu eksploatacji łącza wynosi 0,39. Oznacza to, że jeden przewrót komutacyjny przypada na 256 h importu. Odpowiada to 10,7 dniom importowym.



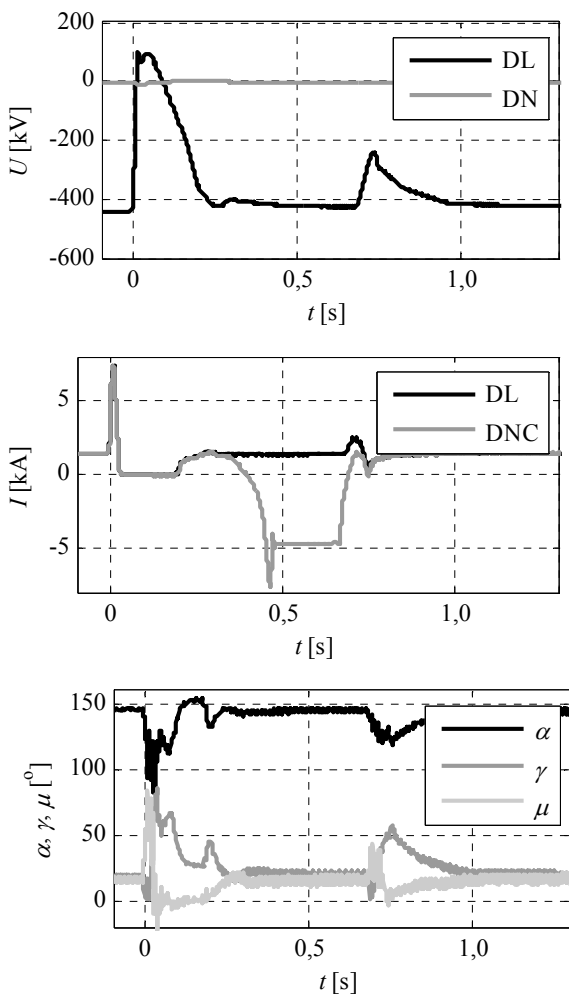
Rys. 1. Ocena wskaźnikowa przeciętnej liczby przewrotów komutacyjnych przypadających na 100 h importu energii elektrycznej do KSE

3. STUDIUM PRZYPADKU

Analiza retrospektywna warunków występowania zakłóceń w północnym rejonie KSE, prowadzących do powstania problemów w pracy łącza HVDC SwePol Link, wymagała wyselekcjonowania w materiałach historycznych [3] zbioru zdarzeń związanych z przewrotami komutacyjnymi zaistniałymi w łączu. Jest to niezbędne do przeprowadzenia rozważań i analiz ukazujących mechanizmy przyczyn i rozwoju ciągu sytuacji sieciowych skutkujących wystąpieniem przewrotów komutacyjnych.

Wybrany zbiór zdarzeń to przypadki problemów komutacyjnych w pracy łącza wywołane bliskimi i odległymi zakłóceniami zwarciovymi oraz operacjami łączeniowymi podczas importu mocy do KSE (praca stacji przekształtnikowej po stronie polskiej w trybie falownikowym).

Jednym z analizowanych przypadków było zdarzenie z lipca 2012 roku. W stanie przedzakłóceniamiw łączu HVDC SwePol Link pracowało w trybie importu energii elektrycznej z mocą na poziomie 600 MW. Zaistniałe problemy komutacyjne miały miejsce w okresie burzowym. Przyczyną było odległe zakłócenie zwarciovie zlokalizowane na linii WN. Towarzyszył temu cykl SPZ WZ (wyłączaląc linię). Wybrane przebiegi czasowe wielkości elektrycznych zarejestrowane podczas rozpatrywanego zdarzenia sieciowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przebiegi czasowe napięcia (U_{DL}) i prądu (I_{DL}) kabla głównego, napięcia (U_{DN}) i prądu (I_{DNC}) kabla powrotnego oraz kąta zapłonu tyrystorów (α), kąta zapasu (γ) i kąta komutacji (μ) zarejestrowane w części stałoprądowej łącza

4. ANALIZA PRZYCZYNOWO-SKUTKOWA

Wyselekcjonowany zbiór zdarzeń sieciowych poddano szczegółowej analizie. W wyniku analizy można wskazać następujące wnioski dotyczące (przedstawiono wybrane):

Kierunku przesyłu energii elektrycznej łączem

Zarejestrowane przewroty komutacyjne występowały podczas importu energii elektrycznej do KSE. Wówczas układ przekształtnikowy łącza zlokalizowany po stronie polskiej wykazuje dużą wrażliwość na zakłócenia zaistniałe w KSE. Jest to determinowane wysoką wartością kąta zapłonu tyrystorów pracujących w trybie falownikowym, co oznacza zmniejszenie bezpiecznego marginesu komutacji.

Częstości występowania zjawiska przewrotów komutacyjnych w pracy łącza

Częstość występowania problemów komutacyjnych w pracy łącza HVDC SwePol Link jest niejednakowa w poszczególnych latach eksploatacji łącza. Z zestawienia liczebności zdarzeń zaistniałych w poszczególnych latach z czasem pracy łącza HVDC w trybie importu energii elektrycznej wynika, że jeden przewrót komutacyjny przypada na 256 h pracy łącza w trybie importu.

Typu zakłóceń w otoczeniu sieciowym łącza powodujących przewroty komutacyjne

Najczęstszą przyczyną przewrotów komutacyjnych w pracy łącza HVDC SwePol Link były zwarcia zaistniałe zarówno w sieci NN, jak i w sieci WN. Dotyczy to zakłóceń zlokalizowanych na rozległym obszarze sieci. Podkreśla się, że zakłóceniom zwarciovym występującym na liniach towarzyszy zadziałanie automatyki samoczynnego ponownego załączenia linii (SPZ). Szczególnie niekorzystny dla warunków pracy łącza jest SPZ 1f. Realizacji SPZ 1f towarzyszy duża niesymetria napięciowa, której następstwem mogą być przewroty komutacyjne w łączu.

Stopnia obciążenia łącza

Zdecydowana większość rozpatrywanych zdarzeń sieciowych związanych z przewrotami komutacyjnymi występowała przy dużej wartości mocy przesyłanej łączem HVDC SwePol Link, bliskiej znamionowej (600 MW). Wysoki poziom obciążenia łącza oznacza dużą wartość kąta komutacji, co przy dużej wartości kąta zapłonu skutkuje zmniejszeniem bezpiecznego marginesu poprawnej komutacji w postaci tzw. kąta zapasu.

Pory roku/sezonu

W badanym okresie eksploatacji łącza HVDC SwePol Link największą liczbę zdarzeń związanych z przewrotami komutacyjnymi zarejestrowano w sezonie wiosenno-letnim, w szczególności w okresie od maja do sierpnia. Można to powiązać ze zwiększeniem częstości występowania burz. Wzrasta również ryzyko zaistnienia zwarć. Ich następstwem mogą być odkształcenia przebiegu czasowego napięcia w stacji Słupsk, które warunkuje przebieg procesu komutacyjnego w łączu. Może to prowadzić do zakłóceń w pracy łącza. Z kolei w sezonie jesienno-zimowym zwiększoną liczebność przewrotów komutacyjnych notuje się w styczniu i lutym. Prawdopodobnie jest to podyktowane wzrostem częstości występowania niekorzystnych warunków atmosferycznych, np. opadów śniegu, sadzi, zwiększenia wietrzności.

Mocy zwarciowej w stacji falownikowej łącza

Wyłączenia obiektów elektroenergetycznych (np. linii), na skutek zakłóceń zwarciowych lub działań remontowych, zmniejszają „sztywność” parametrów napięciowych sieci. Przyczynia się to do zwiększania prawdopodobieństwa wystąpienia problemów komutacyjnych w pracy łącza HVDC SwePol Link podczas zdarzeń sieciowych. Dodatkowo brak stabilnie pracujących źródeł wytwórczych w pobliżu stacji Słupsk oznacza mniejszą sztywność sieci i większą propagację zakłóceń.

Warunków napięciowych w otoczeniu łącza.

Parametry napięcia w stacji Słupsk są jednym z determinantów poprawności przebiegu procesu komutacyjnego łącza HVDC SwePol Link. Dla rozpatrywanych zdarzeń sieciowych, którym towarzyszyły problemy komutacyjne w pracy łącza, zaobserwowano obniżenie (zapad) wartości napięcia w stacji Słupsk. Minimalny zarejestrowany poziom obniżenia wartości skutecznej napięcia podczas przewrotów komutacyjnych wynosił niecałe 75% (w odniesieniu do wartości napięcia w stanie przedzakłóceniami). Poprawność procesu komutacyjnego łącza jest również zależna od poziomu odkształceń napięcia.

5. PODSUMOWANIE

Technologia LCC wykorzystana w łączu HVDC SwePol Link silnie wiąże poprawność pracy łącza z parametrami funkcjonowania otoczenia sieciowego. Zakłócenia zaistniałe w otoczeniu sieciowym łącza mogą spowodować, że wymagany dla właściwej pracy tyrystorów łącza obszar napięciowo-czasowy będzie niewystarczający do prawidłowego przebiegu procesu komutacji. Wówczas może dojść do tzw. przewrotów komutacyjnych. Zaznacza się, że wystąpienie wielokrotnych przewrotów komutacyjnych znacznie bardziej negatywnie oddziałuje na stabilność pracy całego układu sieciowego niż wystąpienie pojedynczego przewrotu. Ponadto wielokrotne przewroty komutacyjne mają negatywny wpływ na trwałość pracy łącza i w praktyce utrzymanie takiego stanu jest niedopuszczalne. W konsekwencji wystąpienie wielokrotnych przewrotów komutacyjnych wymusza wyłączenie łącza. Wynikiem wyłączenia łącza jest przerwa w przesyłaniu energii elektrycznej.

Warunki pracy łącza HVDC SwePol Link są determinowane m.in. poziomem mocy zwarciowej, wartością, kątem fazowym i kształtem przebiegu czasowego napięcia w stacji falownikowej, poziomem przesyłanej mocy oraz wystero-

waniem części prostownikowej i falownikowej łącza. Przeprowadzone analizy dowodzą, że warunki sprzyjające zaistnieniu przewrotów komutacyjnych występują podczas importu energii elektrycznej do KSE. Warty podkreślenia jest również fakt, iż większość dotychczasowych przypadków zaistnienia przewrotów komutacyjnych była poprzedzona losowymi zdarzeniami sieciowymi (bliskie i odległe zwarcia oraz operacje łączeniowe). W szczególności do niestabilnych warunków pracy łącza mogą prowadzić zakłócenia zwarciowe zaistniałe na liniach elektroenergetycznych stanowiących silne „podparcie mocowe” stacji Słupsk. Szczególnym parametrem decydującym o dużej czułości pracy łącza na warunki pracy otoczenia sieciowego jest napięcie.

Miejsce przyłączenia łącza HVDC SwePol Link do struktur KSE nie gwarantuje stabilnych parametrów sieciowych podczas zakłóceń – nawet odległych – występujących w otoczeniu sieciowym łącza. W związku z tym zasadne wydaje się przeprowadzenie badań ukierunkowanych m.in. na wskazanie inwestycji sieciowych (w tym optymalnego rozwoju sieci), które zwiększą „sztywność” sieci (przede wszystkim parametrów napięciowych) i tym samym przyczynią się do zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia przewrotów komutacyjnych w łączu towarzyszących zakłóceniom zaistniałym w otoczeniu sieciowym łącza.

Warto również zauważyć, że źródła wiatrowe planowane do przyłączania w bliskim sąsiedztwie łącza HVDC SwePol Link mogą wpływać na prawidłowość pracy łącza. Dotyczy to stanów pracy źródeł wiatrowych, które w znaczącym stopniu prowadzą do chwilowego pogorszenia parametrów jakościowych napięcia, np. w wyniku: operacji łączeniowych elementów składowych źródła, zakłóceń występujących w sieci wewnętrznej źródła itp. W skrajnym przypadku może to skutkować problemami komutacyjnymi w pracy łącza.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Majchrzak H.: Integracja europejskiego rynku energii elektrycznej – jak pokonać braki w infrastrukturze? VI Forum Energetyczne, Sopot, 28–30 listopada 2011.
2. Ivarsson J.: Improvement of Commutation Failure Prediction in HVDC Classic Links, Praca licencjacka, Electric Power Technology Department of Engineering Science, University West, 2011.
3. Ocena stanu technicznego za lata 2000-2012 stacji przekształtnikowej SŁUPSK DC oraz części kabla morskiego, będącej w przyszości własnością PSE Operator S.A. Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A., Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Północ S.A., Bydgoszcz, 2012.

POWER NETWORK OPERATING CONDITIONS VS HVDC SWEPOL LINK OPERATION

The HVDC SwePol Link allows the power and energy exchange between Poland and Sweden. Disturbances of HVDC SwePol Link operation occur during energy import to Poland. The connection between Poland and Sweden was established in 2000 and consist of a bipolar HVDC cable line and two AC/DC converter stations, one in Slupsk (the Polish power system side) and the second one in Stårnõ (the Swedish power system side). The reason of identified disturbances was events in polish power network, which can cause commutation failure. That commutation failure could lead to switching off the HVDC SwePol Link and additionally resulting in unexpected limitation of power exchange between Poland and Sweden.

The paper will present results of cause-and-effect analysis of Polish power system in terms of interference with the HVDC SwePol Link. Events leading to the occurrence of commutation failure will be described as well as impact assessment of different AC power system operation states in network-area of Slupsk substation. Commutation failure phenomenon in some cases caused some damages. According to that facts an important element of the paper will be a quantitative description of the commutation failure that occur during the lifetime of the HVDC SwePol link.

Keywords: HVDC cable line, Line Commutated Converters, commutation failure

