

Influence of Power System on Operation of an HVDC Link. A Case Study

Authors

Maksymilian Przygodzki
Piotr Rzepka
Mateusz Szablicki

Keywords

HVDC link, converter substation, LCC technology, commutation failure

Abstract

An HVDC link enables power and energy exchange between unsynchronised power grids. Large possibilities of controlling active power flows through such systems enable commercial transfers, as well as emergency power balancing operations. During operation of an HVDC SwePol Link disturbances related to thyristor commutation triggered by the grid (commutation failures) are observed; these occur during power import (inverting operation) to Poland. A commutation failure may lead to an outage of the HVDC link and therefore restrict power exchange with Sweden.

An outage may additionally cause some technical defects (e.g. damage of return cable insulation). This damage may lead to long outages of the link, and repairing it may be quite expensive. The paper presents results of the cause-effect analyses of the closed grid operation in the northern area of the National Power System, in the context of disturbances in operation of the HVDC SwePol Link. Events related to commutation failures have been analysed; the influence of operating conditions in the grid near an HVDC link on such occurrences has been evaluated. So far, during the operation of the link such a phenomenon has occurred more than 200 times, and some of the events led to the system shut-down. In a few cases some link components were damaged in the process.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016110

Introduction

In the domestic and international power industry the alternating current form of electricity is generally used. However, in some cases the use of direct current becomes economically justified. It is particularly justified in electricity transmission over long distances and/or in submarine applications. One of the technical solutions commonly known and applied in High Voltage Direct Current (HVDC) power transmission systems is Line Commutated Converters (LCC) technology. This solution has been implemented in HVDC SwePol Link. HVDC SwePol Link is a system of submarine interconnection of the Polish and Swedish power systems. The link was put into service in 2000. It is a collection of multi-component clusters of DC and AC components. It includes a cable line (incl. submarine section) and converter stations in Słupsk (in Poland) and in Stjärnö (in Sweden).

HVDC SwePol Link is part of the so-called Baltic Ring (Fig. 1) aimed at the integration of the Baltic countries' power systems, and the extension of their technical and commercial cooperation.

HVDC SwePol Link's technical solutions enable two modes of its converter station's operation. These modes differ in the direction

of electricity conversion. In rectifier mode a station converts AC to DC, and in inverter mode converts DC to AC. This allows for electricity transmission both ways (i.e. export from Poland to Sweden, import from Sweden to Poland). Rated level of transmitted power is 600 MW. Fig. 2 shows the distribution of hourly average power transfers. Import and export directions are highlighted. The results were related to the total number of HVDC operating hours in the link's service period in question (no power transfer also included).

Commutation failure in HVDC SwePol Link operation

HVDC SwePol Link utilizes the Line Commutated Converters (LCC) technology. The link's proper operation depends on the commutation process, i.e. taking over current conduction by individual thyristors. One of the most significant disruptions in the link operation is called commutation failure. In this situation, the next (according to thyristors control sequence) thyristor is switched on although the commutation is not yet completed and the switched off thyristor has not yet recovered its barrier

properties. In a critical case, this leads to protection tripping and switching the link off. Commutation failure's immediate cause is an AC voltage waveform distortion at the output of the link's

inverter element, which results in reduction of the commutation process' voltage-time area.

Over more than 13 years of HVDC SwePol Link's service 204 disruptions in its operation were noted that coincided with commutation failure. Year by year (cumulatively) the number of recorded commutation failures has varied between 41 (2001), 31 (2010) and 2 (2006, 2013) and 0 (2003). The largest number of commutation failures occurred in the first full year of HVDC SwePol Link service. Presumably, it was associated with the process of fine-tuning the link's operating parameters and adaptation of the control algorithms to the actual grid conditions. In subsequent years the number of commutation failures declined. Fig. 3 shows the numbers of commutation failures identified from the beginning of the link service to the end of 2013, on a monthly basis.

In spring and summer particularly numerous commutation failures in HVDC SwePol Link operation were noted in the May – August period. This effect can be directly linked with the increased incidence of storms. Storm lightning can cause short-circuit disturbances leading to problems in the operation of the link. The largest number of commutation failures is recorded in July. Besides the aforementioned increased frequency of storms, it can be also associated with the concurrent largest share of time when electricity in HVDC SwePol Link was imported to Poland (62%).

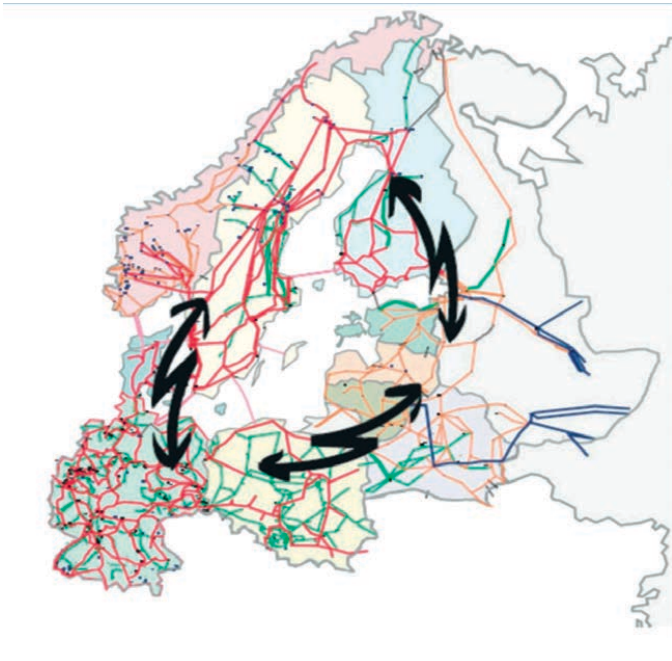


Fig. 1. The Baltic Ring concept [1]

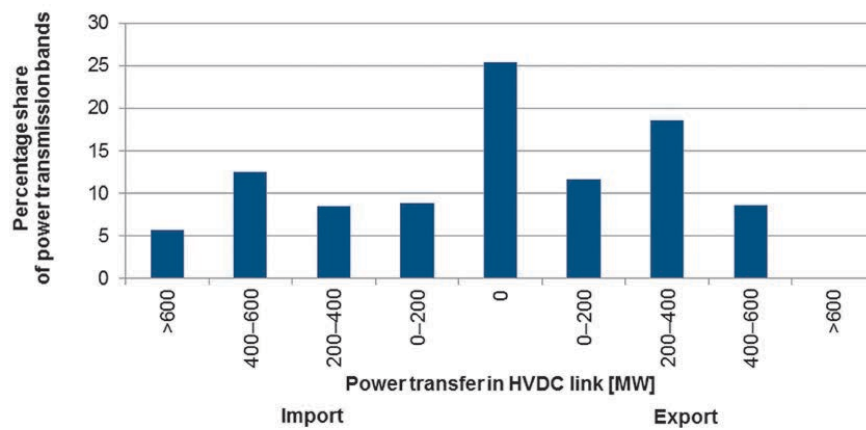


Fig. 2. Power transfers in HVDC SwePol Link in 2003–2013

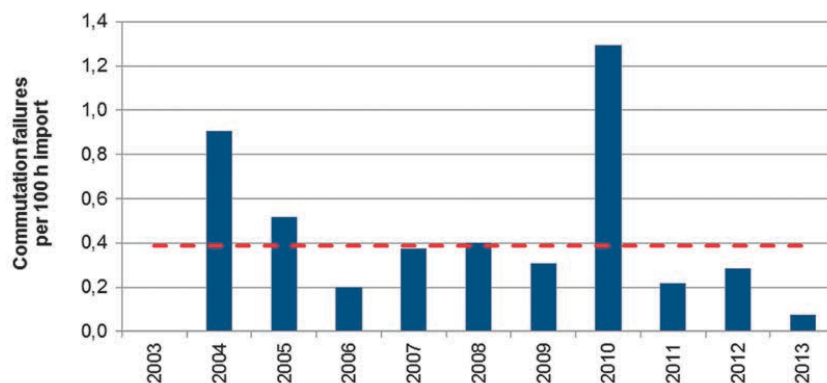


Fig. 3. Monthly statistics of commutation failures

In the autumn-winter season particularly numerous commutation failures in HVDC SwePol Link operation were noted in January and February. This is probably due to the increase in the incidence of adverse weather conditions, e.g. snow, rime and increased wind. This may result in disturbance in operating conditions of the link's grid environment and subsequent problems in the link's operation.

It is emphasised that commutation failures occur exclusively at electricity import to the Polish system. Hence, correct inference requires referring the number of commutation failures in a given year to the percentage of time when electricity is imported to Poland in the year. Fig. 4 shows the indicators of the average number of commutation failures per 100 hours of import. Against this background, the dotted line illustrates the average number of commutation failures in the period. The indicator of average number of commutation failures in the reported 11-year period is 0.39 failures / 100 h. This means one commutation failure per 256 hours of import (equivalent to 10.7 import days).

Case study

For retrospective analysis of the disturbance occurrence conditions in the Polish power system's northern region, leading to problems in HVDC SwePol Link operation, a set had to be recognised in historical materials [3] of events related to commutation failures in the link. Discussion and analysis became

necessary that would discover the mechanisms of causes and development of the series of grid situation implying commutation failure occurrence.

Grid events were selected for the retrospective analysis after the following criteria:

- grid event at the time of electricity import to Poland (the Polish converter station in inverter mode)
- commutation failure on the Polish side of the HVDC link
- commutation failure following a disturbance in the link's grid environment (LV and HV AC grids)
- commutation failure not following a functional disturbance of the link's internal structural elements (switch failures, control system failures, etc.) and the link's automatic control.

The selected set of events includes cases of switching problems in the link's operation due to close and distant short-circuit disturbances and switching operations, at different levels of power transmitted in the link's pre-disturbance condition.

One of the analysed cases was an event in June 2012. HVDC SwePol Link was carrying ca. 500 MW to Poland. The commutation problems were caused by a far short-circuit fault located on the HV line. This was accompanied by an auto-reconnection cycle (line off-on). Selected electrical parameter waveforms recorded during the grid event in question are shown in Fig. 5–6.

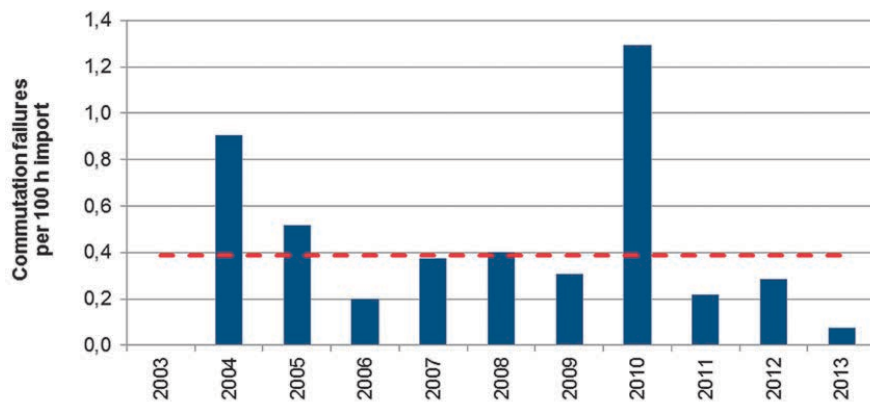


Fig. 4. Indication evaluation of average numbers of commutation failures per 100 hours of import in 2003–2013

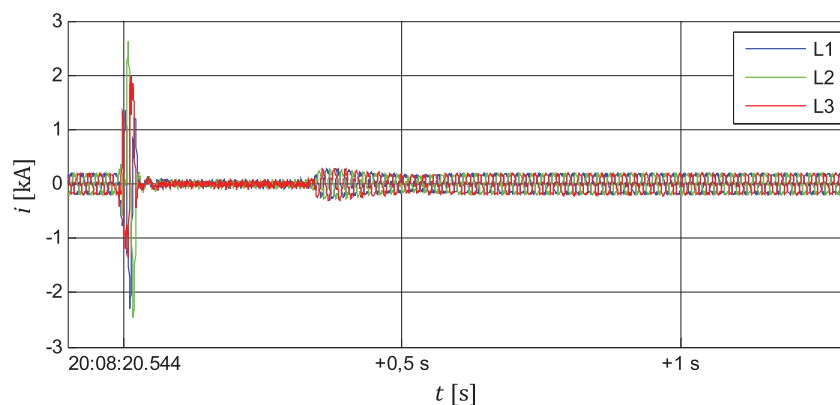


Fig. 5. Three-phase instantaneous current waveforms recorded in Słupsk substation's HVDC link bay at event in June 2012

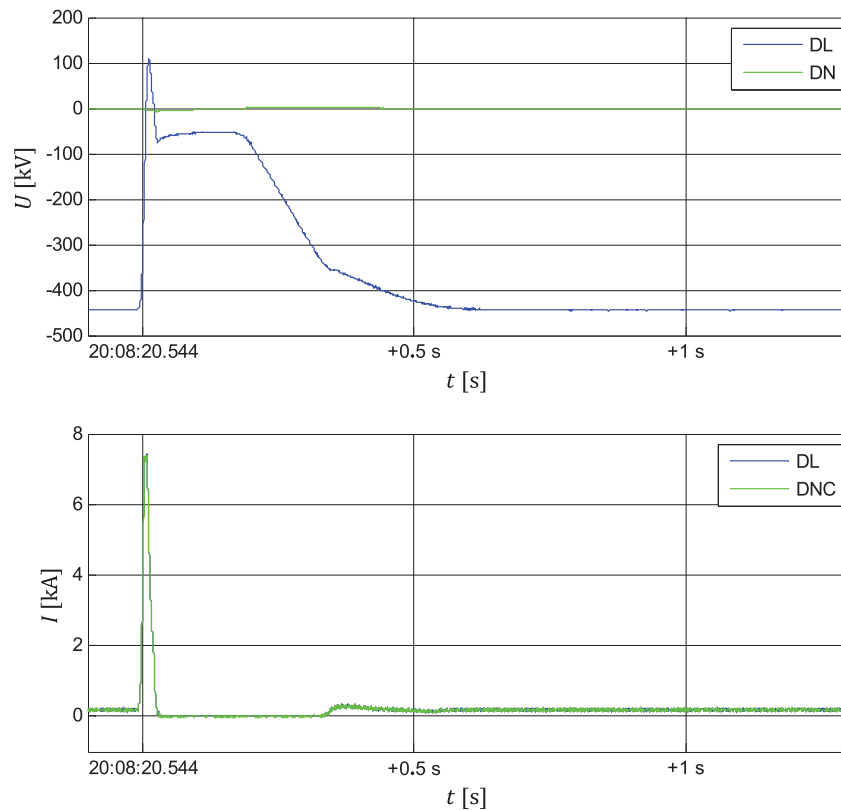


Fig. 6. Waveforms of voltage (U_{DL}) and current (I_{DL}) in main cable, and voltage (U_{DN}) and current (I_{DNC}) in return cable, as recorded in the link's DC element at event in June 2012

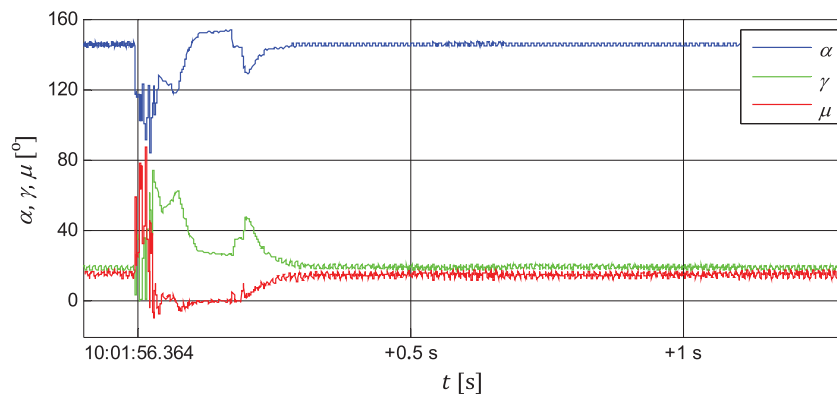


Fig. 7. Waveforms of thyristor ignition angle (α), overlap angle (γ) and commutation angle (μ) as recorded in the link's DC element at event in February 2013

Fig. 7 shows selected waveforms of electrical parameters recorded during a grid event in February 2013. Problems in the HVDC SwePol Link performance followed a close switching operation (capacitor bank on). The resulting commutation failures led to the link's shut-down for approx. 200 ms and a break in power transmission. Prior to the event the link was importing 600 MW to Poland.

Cause and effect analysis

The selected set of grid events leading to disruptions in the HVDC SwePol Link operation were subjected to detailed analysis. The analysis produced the following conclusions with regard to:

- direction of power transfer in the link
The recorded commutation failures occurred when power was imported to Poland. Then the converters at the Polish link's end are very sensitive to disturbances in the Polish power system. This is determined by the large ignition angle of the thyristors in inverter mode, which means reduction of the safety margin of proper commutation in the form of a so-called overlap angle.
- prevalence of commutation failures in the link
It should be emphasized that the incidence of problems in the HVDC SwePol Link's switching operations varied by years of the link's service. Proper evaluation requires referring the

numbers of events in each year to the durations of the HVDC link's operation in import mode. The resulting ratio of the average number of commutation failures in the period indicates one commutation failure per 256 hours of the link's operation in import mode

- types of disturbances in the link's power system environment that cause commutation failures

HVDC SwePol Link is LCC technology enabled. The process of thyristor switching occurs under the influence of AC voltage at the link's inverter output. Thus, grid events that result in the voltage waveform's deformation may lead to the link's disturbed operation. The retrospective analysis indicates that commutation failures caused primarily short-circuit disturbances, both transient and permanent, which occurred in the areas of LV and HV grids. It is emphasized that short-circuit disturbances in power lines trigger their automatic reconnection. Particularly harmful to the HVDC link's operating conditions is the single-phase automatic reconnection (in LV lines). This automation brings about large voltage imbalance, which may result with commutation failures in the HVDC link

- fault's distance to the link

The grid area, in which a disturbance occurrence can potentially result in commutation problems in HVDC SwePol Link, is relatively large. The disturbances likely leading to the recorded commutation failures were located in an area covering power facilities connected to Słupsk substation and subsequent substations (even relatively distanced from Słupsk substation)

- the link's load level

The vast majority of the grid events related to commutation failures occurred at high power transmissions in the HVDC SwePol Link, close to the rated transfer. The high level of the link's load carrying capacity means a large commutation angle, which at a large ignition angle results in reduction in the proper commutation safety margin in the form of a so-called overlap angle. This means that the large power transmitted in the link requires an appropriate protection of the proper commutation conditions

- time of year/season

In the analysed period of the HVDC SwePol Link service the largest number of events related to commutation failures were recorded in the spring-summer season, from May to August especially. This effect can be associated with the storm intensity. This increases the risk of short-circuit disturbances. They may result in distortion of the AC voltage at the output of the link's inverter element, conditioning the course of the commutation process in the link. This may lead to disturbance in the link's performance. In the autumn-winter season particularly numerous commutation failures were noted in January and February. This is probably due to the increase in the incidence of adverse weather conditions, e.g. snow, rime and increased wind

- transiency of disturbances in the link's grid environment

The grid events leading to problems in the link's switching operation were caused by both permanent and transient disturbances. The commutation process' correctness is related to the grid voltage waveform. Therefore this is not a function

of time, because the phenomenon itself applies to individual periods (in the order of tens of milliseconds)

- short-circuit power of the link's inverter station

Shut-downs of power facilities (e.g. lines) as a result of short-circuit disturbances or repair activities, reduce the grid's voltage parameter "stiffness" and thus contribute to increasing the likelihood of commutation failure occurrence in the HVDC SwePol Link, associated with grid events. In addition, there are no stable generation sources close to Słupsk substation, which means less grid stiffness, and disturbance propagation. It is expected that the planned development of the grid in the link's vicinity will increase the grid's "density", which can increase the short-circuit power and the grid's resistance to disturbance carrying-over

- voltage conditions in the link's grid environment

Voltage parameters in Słupsk substation are among factors that determine the HVDC SwePol Link's switching performance. For the analysed grid events, associated with switching problems in the link performance, a voltage dip was noted in Słupsk substation. The minimum recorded decrease in the RMS voltage at a commutation failure was less than 75% (of the pre-fault voltage). It should be noted that the RMS voltage waveform does not reflect short-term rapid voltage changes, and thus does not allow for evaluation of the voltage variation dynamics, associated with grid disturbances resulting in the link's switching performance problems. Also voltage distortions affect the link's switching performance.

Summary

In HVDC SwePol Link's LCC technology the link's performance is strongly affected by its grid (power system) environment's operation parameters. Disturbances in the power system can make the voltage-time area required for the link thyristors' proper operation insufficient for proper commutation performance. Then, following the switching problems, a commutation failure may occur. It is noted that repeated commutation failure occurrences are by far more harmful to the entire grid system's stability than a single occurrence. In addition, multiple commutation failures adversely affect link components' durability, and in practice maintaining such a condition is unacceptable. Therefore, a multiple commutation failure occurrence enforces the link's shut-down. The shut-down interrupts power transmission. SwePol HVDC Link's operating conditions are determined by the short-circuit power; voltage value, phase angle and waveform shape in the inverter substation; transmitted power; and settings of the link's rectifier and inverter elements. These analyses show that the favourable conditions for commutation failure occur when electricity is imported to Poland. It is also worth noting that most of the commutation failure cases so far were preceded by random grid events (near and distant short-circuit disturbances and switching operations). In particular, conducive to the link's unstable working conditions may be short-circuit disturbances in the power lines which provide strong "power support" for Słupsk substation. Voltage is especially important for the link performance's high sensitivity to its grid environment operating conditions.

It is worth noting that the wind sources planned for connection in HVDC SwePol Link's close vicinity may affect its performance. This applies to wind sources' operating conditions, which lead to significant momentary voltage quality deterioration, e.g. switching operations of source components, disturbances in the source's internal grid, etc. In an extreme case, this can lead to problems in the link's switching performance. The location of HVDC SwePol Link's connection to the Polish power system does not guarantee stable grid parameters at disturbances, even distant, in the link's grid environment. Therefore, it seems reasonable to advance research aimed at identification of the grid investments projects (including grid's optimal development), which will increase the grid (primarily voltage) "stiffness" and thus contribute to reducing the likelihood of commutation failures in the link occurring, associated with disturbances in its power system environment.

REFERENCES

1. H. Majchrzak, "Integracja europejskiego rynku energii elektrycznej: jak pokonać braki w infrastrukturze?" [Integration of the European electricity market: how to overcome gaps in infrastructure?], VI Energy Forum, Sopot, 28–30 Nov. 2011.
2. Ivarsson J., "Improvement of Commutation Failure Prediction in HVDC Classic Links, bachelor thesis", 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 przyszłości własnością PSE Operator SA" [Evaluation of technical condition for the years 2000–2012 of SŁUPSK DC converter station and the portion of submarine cable, which will be owned by PSE Operator SA], Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator SA, Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Północ S.A., Bydgoszcz, 2012.

Maksymilian Przygodzki

PSE Innowacje sp. z o.o. | Silesian University of Technology

e-mail: maksymilian.przygodzki@pse.pl

Assistant Professor at the Institute of Power Engineering and Control Systems of the Silesian University of Technology, an expert in PSE Innovations sp. z o.o. His research interests include issues of power grid operation, particularly in the long-term horizon, and issues related to distributed generation.

Piotr Rzepka

PSE Innowacje sp. z o.o. | Silesian University of Technology

e-mail: piotr.rzepka@pse.pl

Assistant Professor at the Institute of Power Engineering and Control Systems of the Silesian University of Technology, chief consultant in PSE Innovations sp. z o.o. His research interests include issues related to a power system's fault condition modelling, power system automation (incl. system and protection automation), and impact of distributed sources on automatic devices' performance in power system.

Mateusz Szabliski

PSE Innowacje sp. z o.o. | Silesian University of Technology

e-mail: mateusz.szabliski@pse.pl

Research assistant at the Institute of Power Engineering and Control Systems of the Silesian University of Technology, chief consultant in PSE Innovations sp. z o.o. His research interests include issues related to automation of power grids with complex functionality and configuration (incl. multi-agent systems, synchronous measurements, smart grids), as well as modelling and simulation of power facilities' operating conditions (especially of electromagnetic transients).

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 114–119. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Wpływ otoczenia sieciowego na pracę łącza HVDC. Studium przypadku

Autorzy

Maksymilian Przygodzki
Piotr Rzepka
Mateusz Szablicki

Słowa kluczowe

łącze HVDC, stacja przekształtnikowa, technologia LCC, przewrót komutacyjny

Streszczenie

Połączenie HVDC umożliwia wymianę mocy i energii pomiędzy systemami elektroenergetycznymi, które pracują niesynchronicznie. Duże możliwości kontroli przepływów mocy czynnej w tego typu układzie pozwalają zarówno na wymianę handlową, jak i korektę bilansu mocy w sytuacjach awaryjnych. W pracy łącza HVDC SwePol Link rejestruje się zakłócenia związane z wyzwalaną sieciowo komutacją tyrystorów (w charakterze tzw. przewrotów komutacyjnych), powstające w trakcie importu mocy (praca falownikowa) do Polski. Przewrót komutacyjny może prowadzić do wyłączenia łącza HVDC i w efekcie ograniczeń w realizacji wymiany mocy ze Szwecją. Dodatkowym skutkiem wyłączenia łącza mogą być defekty techniczne (przykładowo: uszkodzenia izolacji kabla powrotnego). Uszkodzenia te są przyczyną długich przerw w pracy łącza, a ich usunięcie wymaga niejednokrotnie znacznych nakładów finansowych.

W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy przyczynowo-skutkowej funkcjonowania sieci zamkniętej w północnym rejonie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) w aspekcie zakłóceń pracy łącza HVDC SwePol Link. Przeanalizowano zdarzenia związane z występowaniem przewrotów komutacyjnych i przeprowadzono ocenę wpływu warunków pracy otoczenia sieciowego łącza HVDC na występowanie tego zjawiska. W dotychczasowej pracy łącza zjawisko to wystąpiło ponad 200 razy, w tym część zakłóceń zakończyła się wyłączeniem układu, a w kilku przypadkach zdarzeniem towarzyszącym było uszkodzenie elementów składowych łącza.

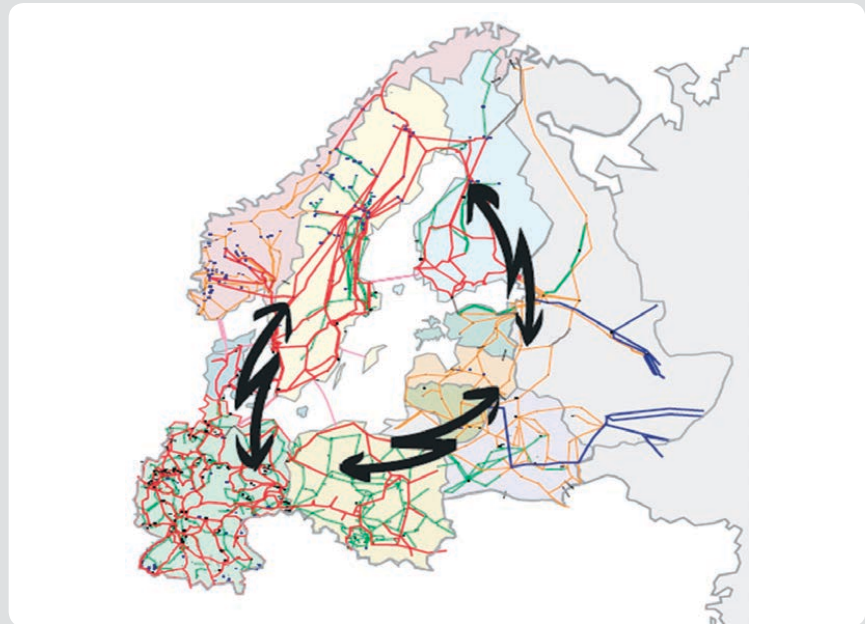
Wstęp

W krajowej i światowej elektroenergetyce zwykle wykorzystuje się zmiennoprądową postać energii elektrycznej. Niemniej w niektórych przypadkach uzasadnione ekonomicznie staje się skorzystanie z układów stałoprądowych. Stosowanie tych układów jest szczególnie uzasadnione przy przesyłaniu energii elektrycznej na znaczne odległości i/lub w połączeniach podmorskich. Wśród elektroenergetycznych układów przesyłowych prądu stałego (ang. *High Voltage Direct Current* – HVDC) 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 podmorskiego połączenia systemów elektroenergetycznych polskiego i szwedzkiego. Łącze oddano do użytku w 2000 roku. Stanowi wieloelementowy zbiór układów stało- i zmiennoprądowych. Obejmuje linię kablową (w tym odcinek podmorski) oraz stację przekształtnikową w Słupsku (po stronie polskiej) i stację przekształtnikową w Starnö (po stronie szwedzkiej).

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

Zastosowane rozwiązania techniczne umożliwiają pracę stacji przekształtnikowych łącza HVDC SwePol Link w dwóch trybach. Tryby te różnią się kierunkiem przekształcania postaci energii elektrycznej. Praca stacji w trybie prostownikowym



Rys. 1. Koncepcja Pierścienia Bałtyckiego [1]

polega na transformacji prądu zmiennego na prąd stały, natomiast praca stacji w trybie falownikowym polega na transformacji prądu stałego na prąd zmienny. Pozwala to na przesył energii elektrycznej w obie strony (tj. z Polski do Szwecji, eksport, oraz ze Szwecji do Polski, import). Znamionowy poziom przesyłanej mocy wynosi 600 MW. Na rys. 2 przedstawiono rozkład poziomów przesyłu mocy średniej godzinowej. Wyróżniono kierunek importowy oraz eksportowy. Uzyskane wyniki odniesiono do łącznej liczby godzin pracy

łącza HVDC w rozpatrywanym okresie eksploatacji łącza (uwzględniono również brak przesyłu mocy).

Zjawisko przewrotu komutacyjnego w pracy łącza HVDC SwePol Link

Łącze HVDC SwePol Link wykorzystuje technologię tyrystorów komutowanych sieciowo. Prawdopodobna praca łącza jest warunkowana m.in. przebiegiem procesu komutacji, tj. przejmowania przewodzenia prądu przez poszczególne tyrystory. Jednym z najbardziej istotnych zakłóceń

w pracy łącza jest tzw. przewrót komutacyjny. W tej sytuacji następuje załączenie kolejnego tyrystora (wg sekwencji sterowania tyrystorami), mimo iż nie zakończyła się jeszcze komutacja i odzyskanie własności zaporowych przez tyrystor kończący przewodzenie. W krytycznym przypadku prowadzi to do zadziałania zabezpieczeń i wyłączenia łącza. Bezpośrednią przyczyną przewrotu komutacyjnego (przy wyeliminowaniu kwestii błędnego sterowania) jest odkształcenie przebiegu napięcia zmiennego na wyjściu strony falownikowej łącza, co skutkuje ograniczeniem obszaru

napięciowo-czasowego procesu komutacji. Na przestrzeni ponad 13 lat eksploatacji łącza HVDC SwePol Link zanotowano 204 zakłócenia w pracy łącza, którym towarzyszyły przewroty komutacyjne. W ujęciu rocznym (zdarzenia skumulowane dla poszczególnych lat) liczba zarejestrowanych przewrotów komutacyjnych waha się pomiędzy 41 (2001), 31 (2010) a 2 (2006, 2013) i 0 (2003). Największa liczba przewrotów komutacyjnych wystąpiła w pierwszym pełnym roku eksploatacji łącza HVDC SwePol Link. Przypuszczalnie było to związane z procesem dostrajania parametrów

pracy łącza i dostosowywaniem algorytmów sterowania do rzeczywistych warunków sieciowych. W kolejnych latach liczba przewrotów komutacyjnych się zmniejszała. Na rys. 3 przedstawiono liczbę zidentyfikowanych przewrotów komutacyjnych w okresie od początku funkcjonowania łącza do końca 2013 roku, w ujęciu miesięcznym.

W sezonie wiosenno-letnim dużą liczbę przewrotów komutacyjnych w pracy łącza HVDC SwePol Link notuje się w szczególności w okresie maj – sierpień. Efekt ten można bezpośrednio powiązać ze zwiększoną częstością występowania burz. Towarzyszące im wyładowania atmosferyczne mogą być przyczyną zakłóceń zwarciovych prowadzących do problemów w pracy łącza. Największą liczbę przewrotów komutacyjnych rejestruje się w lipcu. Poza wzmiankowaną zwiększoną częstością burz można to również powiązać z występującym w tym okresie największym udziałem godzin, w których łączem HVDC SwePol Link importowano energię elektryczną do Polski (62%).

W sezonie jesienno-zimowym zwiększoną liczebność przewrotów komutacyjnych w pracy łącza notuje się w styczniu i lutym. Prawdopodobnie jest to podyktowane wzrostem częstości występowania niekorzystnych warunków atmosferycznych, np. opadami śniegu, szadzią i zwiększoną wietrznością. Może to prowadzić do powstania zakłóceń w warunkach pracy otoczenia sieciowego łącza i w następstwie do problemów w pracy łącza.

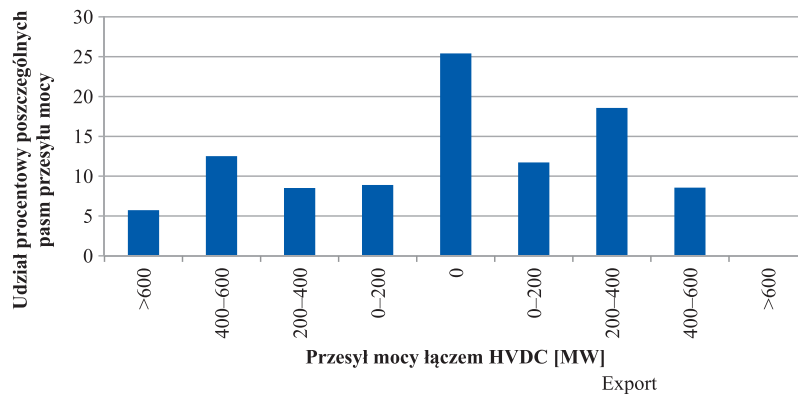
Podkreśla się, że przewroty komutacyjne występują wyłącznie przy imporcie energii elektrycznej do KSE. Stąd poprawne wnioskowanie wymaga zestawienia liczby przewrotów komutacyjnych w danym roku z procentowym udziałem czasu importu energii elektrycznej do KSE w danym roku. Na rys. 4 przedstawiono wskaźniki przeciętnej liczby przewrotów komutacyjnych przypadających na 100 godzin importu. Na tym tle linią przerywaną zobrażowano średnią liczbę przewrotów komutacyjnych w tym okresie. Wskaźnik przeciętnej liczby przewrotów komutacyjnych w obserwowanym 11-letnim okresie wynosi 0,39 przewrotów/100 h. Oznacza to, że jeden przewrót komutacyjny przypada na 256 godzin importu (co odpowiada 10,7 dniom importowym).

Studium przypadku

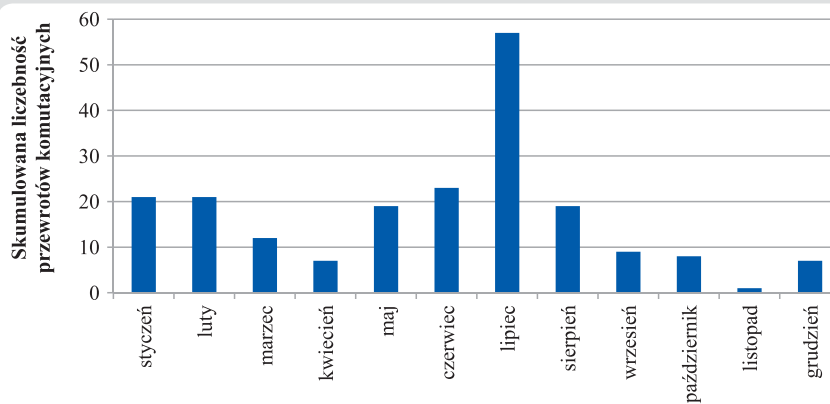
Analiza retrospektywna warunków występowania zakłóceń w północnym rejonie KSE, prowadzących do powstania problemów w pracy łącza HVDC SwePol Link, wymagała wyselekcjonowania w materiałach historycznych [3] zbioru zdarzeń związanych z przewrotami komutacyjnymi zaistniałymi na tym łączu. Stało się to niezbędne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

Do wyselekcjonowania zdarzeń sieciowych w celu analizy retrospektywnej wykorzystano następujące kryteria:

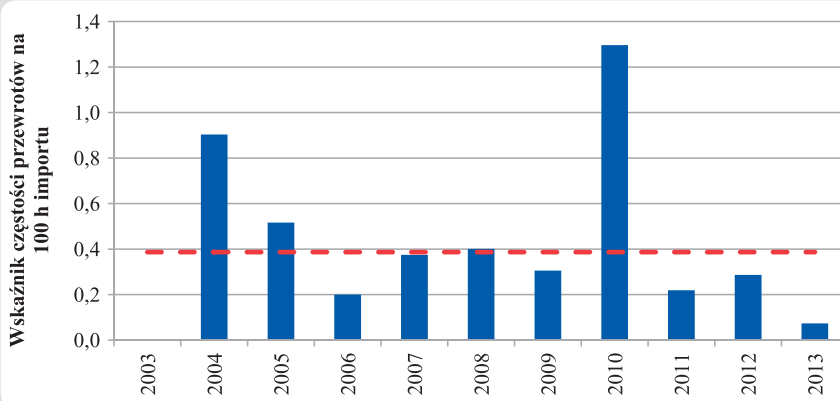
- zdarzenie sieciowe powinno występować podczas importu mocy do KSE (praca stacji przekształtnikowej po stronie polskiej w trybie falownikowym)



Rys. 2. Poziom przesyłu mocy łączem HVDC SwePol Link w okresie 2003–2013



Rys. 3. Statystyka przewrotów komutacyjnych w ujęciu miesięcznym



Rys. 4. Ocena wskaźnikowa przeciętnej liczby przewrotów komutacyjnych przypadających na 100 h importu w okresie 2003–2013

- przewrót komutacyjny powinien występować po stronie polskiej łącza HVDC
 - przewrót komutacyjny powinien być następstwem zakłóceń zaistniałych w otoczeniu sieciowym łącza (dotyczy sieci zmiennoprądowej NN oraz WN)
 - przewrót komutacyjny nie powinien być następstwem zakłóceń funkcjonalnych elementów wewnętrznej struktury łącza (awarie łączników, awarie układów sterowania itp.) oraz działań automatyki łącza.
- Wybrany zbiór zdarzeń to przypadki problemów komutacyjnych w pracy łącza wywołane bliskimi i odległymi zakłóceniami zwarciowymi oraz operacjami łączeniowymi, przy różnych poziomach mocy przesyłanej łączem w przedzakłóceniovym stanie pracy łącza.

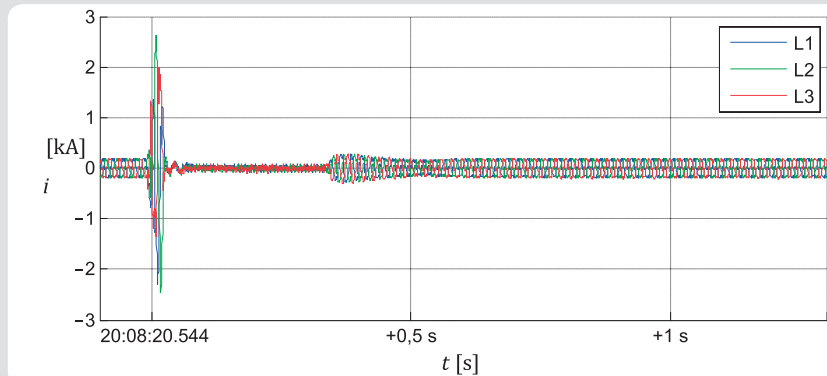
Jednym z analizowanych przypadków było zdarzenie z czerwca 2012 roku. Łącze HVDC SwePol Link pracowało w trybie importu z mocą obciążenia na poziomie 500 MW. Przyczyną zaistniałych problemów komutacyjnych było odległe zakłócenie zwarciove zlokalizowane na linii WN. Towarzyszył temu cykl SPZ WZ (wyłącz-załącz linię). Wybrane przebiegi czasowe wielkości elektrycznych zarejestrowane podczas rozpatrywanego zdarzenia sieciowego przedstawiono na rys. 5–6.

Na rys. 7 zamieszczono wybrane przebiegi czasowe wielkości elektrycznych zarejestrowane podczas zdarzenia sieciowego w lutym 2013 roku. W następstwie bliskiej operacji łączeniowej (załączenie baterii kondensatorów) wystąpiły problemy w pracy łącza HVDC SwePol Link. Zaistniałe przewroty komutacyjne doprowadziły do zablokowania łącza na ok. 200 ms i przerwy w przesyłaniu mocy. W stanie przedzakłóceniovym łącze pracowało w trybie importu z mocą obciążenia na poziomie 600 MW.

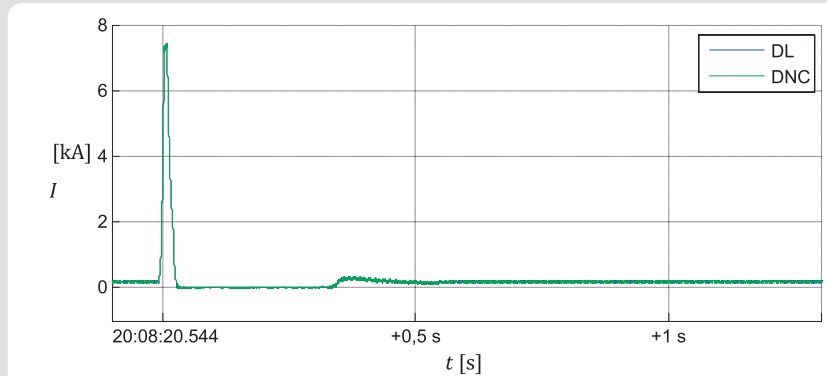
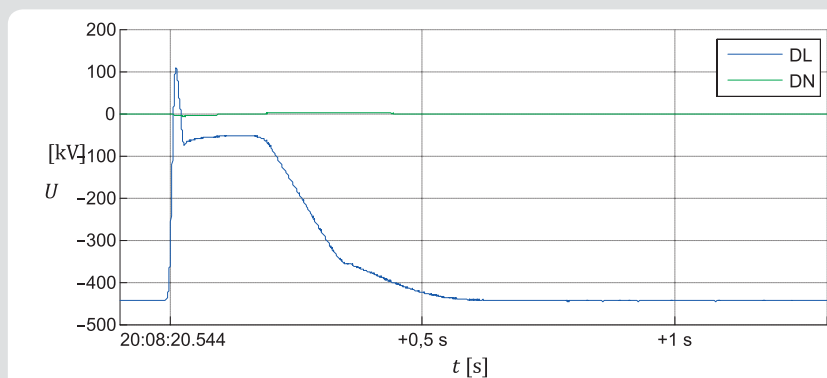
Analiza przyczynowo-skutkowa

Wyselekcjonowany zbiór zdarzeń sieciowych prowadzących do zakłóceń w pracy łącza HVDC SwePol Link poddano szczegółowej analizie. W wyniku przeprowadzonych rozpatrywań można wskazać następujące wnioski dotyczące:

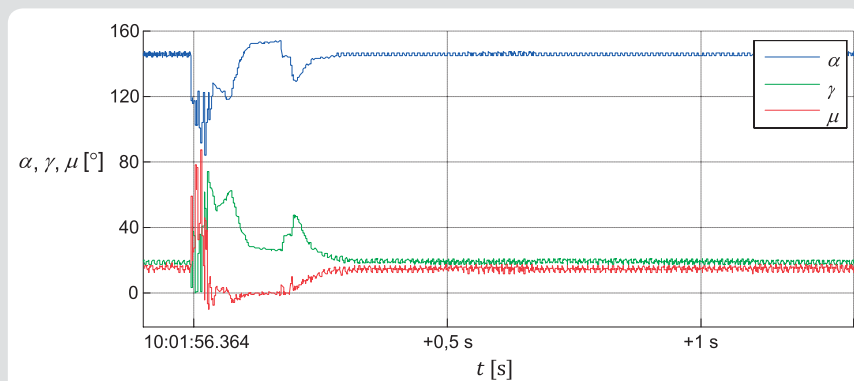
- kierunku przesyłu energii elektrycznej łączem
Zarejestrowane przewroty komutacyjne występowały podczas importu energii elektrycznej do KSE. Wówczas układ przekształtnikowy łącza zlokalizowany po polskiej stronie wykazuje dużą wrażliwość na zakłócenia zaistniałe w KSE. Jest to determinowane wysoką wartością kąta zapłonu tyrystorów pracujących w trybie falownikowym, co oznacza zmniejszenie bezpiecznego marginesu poprawnej komutacji w postaci tzw. kąta zapasu.
- częstości występowania zjawiska przewrotów komutacyjnych w pracy łącza
Należy podkreślić, że częstość występowania problemów komutacyjnych w pracy łącza HVDC SwePol Link była różna w poszczególnych latach eksploatacji łącza. Poprawna ocena wymaga zestawienia liczby zdarzeń zaistniałych w poszczególnych latach z czasem pracy łącza HVDC w trybie importu energii elektrycznej. Uzyskany w ten sposób wskaźnik przeciętnej liczby przewrotów komutacyjnych w obserwowanym okresie wskazuje, że jeden przewrót komutacyjny



Rys. 5. Przebiegi czasowe wartości chwilowych prądów 3-fazowych zarejestrowane w stacji Słupsk w polu łącza HVDC podczas zdarzenia w czerwcu 2012 roku



Rys. 6. Przebiegi czasowe napięcia (U_{DL}) i prądu (I_{DL}) kabla głównego, napięcia (U_{DN}) i prądu (I_{DNC}) kabla powrotnego zarejestrowane w części stałoprądowej łącza podczas zdarzenia w czerwcu 2012 roku



Rys. 7. Przebiegi czasowe kąta zapłonu tyrystorów (α), kąta zapasu (γ) i kąta komutacji (μ) zarejestrowane w części stałoprądowej łącza podczas zdarzenia w lutym 2013 roku

przypada na 256 h pracy łącza w trybie importu energii elektrycznej.

- typu zakłóceń w otoczeniu sieciowym łącza powodujących przewroty komutacyjne
Łącze HVDC SwePol Link bazuje na technologii LCC. Proces komutacji tyrystorów łącza zachodzi m.in. pod wpływem napięcia zmiennego na wyjściu strony falownikowej łącza. Tym samym zdarzenia sieciowe, które skutkują odkształceniem przebiegu czasowego tego napięcia, mogą prowadzić do zakłóceń w pracy łącza. Przeprowadzona analiza retrospektywna wskazuje, że przewroty komutacyjne powodowały przede wszystkim zakłócenia zwarciove zarówno przemijające, jak i trwałe, które występowały w obszarze sieci NN i w obszarze sieci WN. Podkreśla się, że podczas zakłóceń zwarciowych zaistniałych na liniach elektroenergetycznych następuje zadziałanie automatyki samoczynnego ponownego załączenia linii (SPZ). Szczególnie niekorzystny dla warunków pracy łącza HVDC jest SPZ 1f (stosowany w liniach NN). Realizacji SPZ 1f towarzyszy duża niesymetria napięciowa, której następstwem mogą być przewroty komutacyjne w łączu HVDC.
- odległości zakłóceń od łącza
Obszar sieci, w którym wystąpienie zakłóceń może potencjalnie skutkować problemami komutacyjnymi w pracy łącza HVDC SwePol Link, jest stosunkowo rozległy. Zakłócenia prowadzące prawdopodobnie do zarejestrowanych przewrotów komutacyjnych były zlokalizowane w obszarze obejmującym obiekty elektroenergetyczne przyłączone do stacji Słupsk, jak i kolejnych stacji elektroenergetycznych (zlokalizowanych nawet w stosunkowo dużej odległości od stacji Słupsk).
- stopnia obciążenia łącza
Zdecydowana większość rozpatrywanych zdarzeń sieciowych związanych z przewrotami komutacyjnymi występowała przy dużej wartości mocy przesyłanej łączem HVDC SwePol Link, bliskiej wartości znamionowej przesyłu. 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. Oznacza to, że duża moc przesyłana łączem wymaga odpowiedniego zabezpieczenia warunków prawidłowej komutacji.
- pory roku/sezonu
W analizowanym 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. Efekt ten można powiązać z intensyfikacją burz. Zwiększa to ryzyko występowania zakłóceń zwarciowych. Ich następstwem mogą być odkształcenia przebiegu czasowego napięcia zmiennego na wyjściu strony falownikowej łącza, warunkującego przebieg procesu komutacyjnego w łączu.

Może to prowadzić do zakłóceń w pracy łącza. W sezonie jesienno-zimowym zwiększoną liczbę przewrotów komutacyjnych notuje się w styczniu i lutym. Prawdopodobnie jest to podyktowane wzrostem częstości występowania niekorzystnych warunków atmosferycznych, np. opadami śniegu, szadzią i zwiększoną wietrznością.

- przemijalności zakłóceń występujących w otoczeniu sieciowym łącza
Przyczyną rozpatrywanych zdarzeń sieciowych prowadzących do problemów komutacyjnych w pracy łącza były zarówno zakłócenia trwałe, jak i przemijające. Poprawność procesu komutacji jest powiązana z kształtem przebiegu czasowego napięcia sieci. Nie jest to zatem funkcją czasu, ponieważ samo zjawisko dotyczy pojedynczych okresów (jest rzędu kilkudziesięciu milisekund).
- mocy zwarciovej w stacji falownikowej łącza
Wyłączenia obiektów elektroenergetycznych (np. linii), na skutek zakłóceń zwarciowych lub działań remontowych, zmniejszają sztywność parametrów napięciowych sieci i tym samym przyczyniają się do zwiększania prawdopodobieństwa wystąpienia przewrotów komutacyjnych w łączu HVDC SwePol Link, towarzyszących zdarzeniom sieciowym. Dodatkowo brak stabilnie pracujących źródeł wytwórczych w pobliżu stacji Słupsk oznacza mniejszą sztywność sieci i większą propagację zakłóceń. Przewiduje się, że planowany rozwój sieci w otoczeniu łącza zwiększy „gęstość” sieci, co może zwiększyć poziom mocy zwarciovej i odporność sieci na przeniesienie zakłóceń.
- warunków napięciowych w otoczeniu sieciowym łącza
Parametry napięcia w stacji Słupsk są jedną z determinant 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 przedzakłóceniovym). Należy przy tym zauważyć, że przebieg czasowy wartości skutecznej napięcia nie odzwierciedla krótkotrwałych gwałtownych zmian napięcia, a tym samym nie pozwala na ocenę dynamiki zmienności wartości napięcia, towarzyszącej zakłóceniom w sieci skutkującym problemami komutacyjnymi w pracy łącza. Poprawność procesu komutacyjnego łącza jest również zależna od poziomu odkształceń napięcia.

Podsumowanie

Technologia LCC, wykorzystana w łączu HVDC SwePol Link, silnie wiąże poprawność pracy łącza z parametrami pracy otoczenia sieciowego. Zakłócenia zaistniałe

w otoczeniu sieciowym łącza mogą spowodować, że wymagany dla właściwej pracy tyrystorów łącza obszar napięciowo-czasowy będzie niewystarczający dla prawidłowego przebiegu procesu komutacji. Wówczas w następstwie problemów komutacyjnych może dojść do tzw. przewrotu komutacyjnego. Zaznacza się, że wystąpienie wielokrotnych przewrotów komutacyjnych znacznie bardziej negatywnie oddziałuje na stabilność pracy całego układu sieciowego niż wystąpienie pojedynczego przewrotu komutacyjnego. Ponadto wielokrotne przewroty komutacyjne mają negatywny wpływ na trwałość pracy poszczególnych elementów 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 zwarciovej, wartością, kątem fazowym i kształtem przebiegu czasowego napięcia w stacji falownikowej, poziomem przesyłanej mocy oraz występowaniem części prostokątnej i falownikowej łącza. Przeprowadzone analizy dowodzą, że warunki sprzyjające zaistnieniu przewrotów komutacyjnych występują podczas importu energii elektrycznej do KSE. Warto również zauważyć, że większość dotychczasowych przypadków wystąpienia przewrotów komutacyjnych była poprzedzona losowymi zdarzeniami sieciowymi (bliskie i odległe zakłócenia zwarciove oraz operacje łączeniowe). W szczególności do niestabilnych warunków pracy łącza mogą prowadzić zakłócenia zwarciove, 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.

Warto zwrócić uwagę, że źródła wiatrowe, planowane do przyłączenia 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.: operacje łączeniowe elementów składowych źródła, zakłócenia występujące w sieci wewnętrznej źródła itp. W skrajnym przypadku może to skutkować problemami komutacyjnymi w pracy łącza.

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.

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 przyszłości własnością PSE Operator SA, Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator SA, Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Północ S.A., Bydgoszcz, 2012.

Maksymilian Przygodzki

dr hab. inż.

PSE Innowacje sp. z o.o. | Politechnika Śląska

e-mail: maksymilian.przygodzki@pse.pl

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, ekspert w firmie PSE Innowacje sp. z o.o. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z funkcjonowaniem sieci elektroenergetycznej, w szczególności w horyzoncie długoterminowym, oraz zagadnieniami związanymi z energetyką rozproszoną.

Piotr Rzepka

dr inż.

PSE Innowacje sp. z o.o. | Politechnika Śląska

e-mail: piotr.rzepka@pse.pl

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, główny konsultant w firmie PSE Innowacje sp. z o.o. Zajmuje się zagadnieniami związanymi m.in. z modelowaniem stanów zakłóceń w SEE, działaniem automatyki elektroenergetycznej (w tym automatyki systemowej i zabezpieczeniowej) oraz określeniem wpływu źródeł rozproszonych na funkcjonowanie automatyki elektroenergetycznej.

Mateusz Szablicki

dr inż.

PSE Innowacje sp. z o.o. | Politechnika Śląska

e-mail: mateusz.szablicki@pse.pl

Asystent w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, główny konsultant w firmie PSE Innowacje sp. z o.o. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z systemami automatyki elektroenergetycznej układów sieciowych złożonych funkcjonalnie i konfiguracyjnie (w tym systemami wieloagentowymi, pomiarami synchronicznymi, sieciami typu smart) oraz modelowaniem i symulacją warunków pracy obiektów elektroenergetycznych (zwłaszcza elektromagnetycznych stanów przejściowych).