

## Proposals for Protection of Return Cables on SwePol Link

### Author

Tadeusz Szczepański

### Keywords

return cable, surge arrester, electrode

### Abstract

The return cable on the SwePol Link has been introduced as an alternative forced by environmentalists due to lack of social acceptance of other solutions. This is why in the proposed solution water and earth have been replaced by two return cables, although from a technical point of view such a solution is less effective. The last, eleventh fault of the return cable took place on 15 October 2012. In eight earlier cases the faults were caused by electrical failures in the cable in the sea and were located between ten and twenty kilometers from the Polish shore and triggered by disturbances in the northern part of the Polish power grid.

In this situation it has been suggested to analyze and introduce one or two solutions shown below which may significantly limit the effects and lower the costs caused by return cable faults:

- a) assembly of additional surge arresters
- b) return to electrodes – lack of return cables
- c) "partial" electrodes working with one return cable
- d) operation of the link only with earthings on converter stations.

To sum up it needs to be stated that:

- a relatively cheap way of protecting return cables against electrical failures is installing surge arresters in the cabinet located next to the cable container on the Polish shore
- from the suggested preventive measures it seems reasonable to introduce the above mentioned solutions a) and d) simultaneously, as both of them are simple solutions which require neither considerable financial expenditure nor authorizations and may quickly show the expected results.

**DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013113**

### 1. Reasons for introducing return cables

The return cable on the Sweden-Poland link appeared as an alternative forced by ecologists. The decision on laying the return cables was made only at the stage of laying the main cable. In the original projects the construction of an anode and cathode was assumed, and the electrical circuit was supposed to be closed through the earth. In the proposed solution water and earth were replaced by the return cable; however, from a technical point of view, this solution is worse as the efficiency of the whole connection is lower (it is sufficient to build electrodes of proper low resistance values when closing the circuit through the ground, and the ground resistance practically equals zero). At the time of making the decision to lay the return cable there was no cable with a cross section of at least 1100 mm<sup>2</sup> and insulation strength of 20 kV on the market that would be suitable for laying at the bottom of the Baltic Sea. It was decided to lay two cables at the marine section with a cross section of 630 mm<sup>2</sup> each, and to lay one cable at the Polish land section with a cross section of 1100 mm<sup>2</sup>, all with an insulation strength of 20 kV. The

first failure of the return cable showed the relevance of the decision to lay two return cables; in a failure scenario the damaged cable is disconnected and the other operates with the load of 473 MW [1, 2, 3, 4].

### 2. Damage to return cables

The damage to the return cable connecting Sweden and Poland that happened on 15.10.2012 was the eleventh in the history of cable operation (almost ten years had passed since the earlier tenth damage). Previous instances of damage occurred in 2001–2003 (that is, during the guarantee period). The cause of the last damage has not been clearly established yet; however, the final insulation breakdown was certainly of an electrical nature.

The damage repair procedure for the return cable of the Sweden-Poland link is always pretty much the same. First, it must be established which of the two cables is damaged, then the damaged cable is disconnected from the terminals and using mobile Murray bridges the approximate damage spot is located, which

No.	Date	Type of damage	Location of damage	Repair time
Failure 1	27.02.2001	electrical damage to cable XL5-S8	Internally in pipe 245 m from the Polish seashore	692.9 hours
Failure 2	12.04.2001	electrical damage to cable XL5-S6	Internally in pipe 370 m from the Polish seashore	299.4 hours
Failure 3	16.07.2001	electrical damage to cable XL5-S8	Internally in pipe 583 m from the Polish seashore	297.9 hours
Failure 4	17.08.2001	electrical damage to cable XL5-S8	Internally in pipe 646 m from the Polish seashore	652.3 hours
Failure 5	11.11.2001	mechanical damage to cable XL5-S6 by fishermen	60160 m from the Polish seashore within the area of Stupsk Sandbank	628.1 hours
Failure 6	05.12.2001	mechanical damage to cable XL5-S6 by ship's anchor	8410 m from the Polish seashore	7.2 hours
Failure 7	16.07.2002	electrical damage to cable XL5-S6	7900 m from the Polish seashore	487.3 hours
Failure 8	10.08.2002	electrical damage to cable XL5-S6	8550 m from the Polish seashore	168.6 hours
Failure 9	06.09.2002	electrical damage to cable XL5-S6	10000 m from the Polish seashore	356.5 hours
Failure 10	17.01.2003	electrical damage to cable XL5-S6	7460 m from the Polish seashore	2887.2 hours
Failure 11	15.10.2012	unexplained damage to cable XL5-S8	8007 m from the Polish seashore	876.6 hours

Tab. 1. Damage to MCRC return cables [8]

sometimes may require additional burning with a special generator. Sub-water damage requires using a small boat to locate the damaged spot, which is then marked with a buoy. Next, a special ship arrives at the marked spot and a diver precisely determines the damaged spot. Further procedures are applied depending on the type of sea bottom. Cables must be cleared of mud, while with a rocky bottom the cable can be cut and pulled out from the water. Once pulled out from the water, after cutting the damaged spot, a cable end is connected through the cable joint closure to a new cable segment at least 100–300 m long and then with another cable joint closure to the other end of the cable [2, 3, 5, 6, 7].

The repair time depends on the type of failure and availability of material required to carry out the repair. A repair can take from several days up to several months.

### 3. Return cable damage analysis

In eight cases the failure was due to electrical damage in the area of Polish coastline, caused by disturbances in the northern part of the Polish Power System (400 kV and 110 kV).

The surges in the Polish Power System and sudden disconnections causing current reduction to zero in a very short time were a direct cause of the damage. The direction of transmitted energy played a significant role and only when the energy was transmitted to Poland (converter operates as the inverter) was the return cable damaged. However, when transmitting energy from Poland (converter operates as the rectifier), such a disturbance was also sensed in the link (registered at the DC station) to some degree, but never caused damage to the cable [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] The case described above corresponds to a typical

open ended long line, as shown in the form of a simplified electrical diagram in Fig. 1. The phenomenon reflects the energy conservation law; before the damage the return cable's static voltage is low and reaches a maximum of 2.52 kV (at the current of 1330 A).

After the converter is locked all magnetic energy stored in the return cable changes into electrical power forming a surge wave (impulse) at the cable end. The surge wave travels along the cable and at the point of the changed wave resistance (connection point of return cables) springs back causing its enlargement propagated in the marine part near the seashore. Voltage of such a magnitude causes damage to the cable insulation.

The return cables at the Swedish side were completely protected against the effects of electrical hazards, thanks to the earthing of the cable conductor at that end.

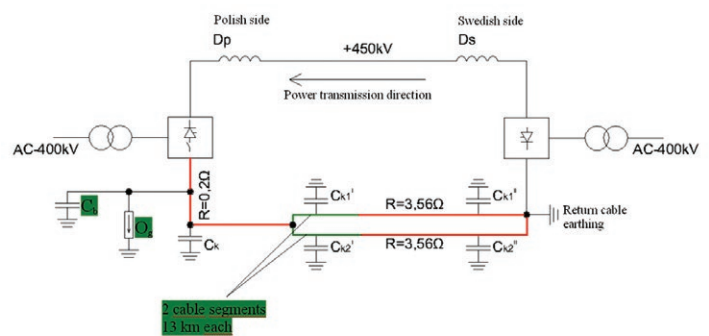


Fig. 1. Electrical diagram of Sweden-Poland transmission system explaining the return cable overvoltage mechanism, own study

After 2003 problems related to damage of return cables completely disappeared when:

- both 13 km segments of the cable at the Polish side were replaced with new ones, (marked green in the drawing) having a different electric field grading of the working conductor (electric field grading shield of the working conductor is made of material 5 times thicker to achieve better electric field grading and better switching overvoltage resistance)
- surge arresters at the Polish side were extended (initiation voltage was reduced from 22 kV to 11 kV) marked in the drawing as Ob, and the capacity of the capacitor bank was enlarged, marked as Cg, reducing the slope of surge increases
- the influence of harmful disturbances to the connection in the external system at the Polish side was minimised through slope attenuation of growing impulses that switch off the thyristors
- protective concrete slabs were laid onto the cable in selected locations where the cable is laid on the bottom rocks (to protect against fishing nets)
- as a preventive measure once again the authorities responsible for marine safety at the Baltic Sea were reminded of the Sweden-Poland cable route (to prevent cable damage caused by vessel anchors).

#### 4. Protection of return cables against effects of damage

For the Sweden-Poland link an analysis and possible implementation of one or two technical solutions presented below was proposed in order to minimise negative effects and lower the costs of damage to return cables.

##### a) assembly of additional surge arresters

Practical preventive measures reducing the damage to return cables can concern almost exclusively electrically caused failures. Mechanically caused damage occurs rarely, (i.e. only every fifth instance of damage) and the damage spot may involve every kilometre of the line, especially the sections of cable where it is laid directly on the rock. The simplest solution to limit future electrical damage to the return cables is to install surge arresters at the Polish seashore where the return cable coming from Wierzbęcino DC station is connected with two return cables entering the sea and connecting Sterno station (the point of

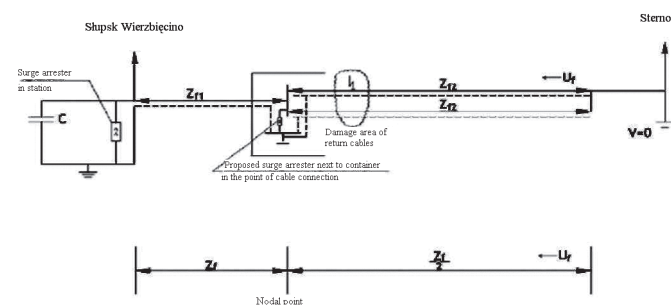


Fig. 2. Return cables of Sweden-Poland link, own study

wave resistance change, i.e. a nodal point in the cable box next to the container at the Polish side). Surge arresters should be carefully selected for impact loading of approximately 30 kA (i.e.  $3 \times 10$  kA) at a working voltage of 11 kV (similar to Wierzbęcino station) and equipped with an event counter. Earthing of surge arresters and all shields of return cables should be connected to a new earthing system with a resistance of less than 5  $\Omega$ . The most exposed damage area for return cables is shown in Fig. 2.

##### b) return to electrodes – lack of return cables

Constructing the anode and cathode to close the electrical circuit through the ground may be and should be reconsidered as the only or an additional way of minimizing the negative effects of damage to return cables. A possible lack of return cables in the link would automatically eliminate problems related to failure frequency; however, the decision may initiate repeated protests from ecologists.

Among the nine links that operate within the Baltic Sea region only the Sweden-Poland link utilises return cables, while this solution is not used worldwide.

It is suggested to consider revisiting the proposal of substituting return cables with water and earth by introducing electrodes according to the original project. It was first assumed that both earthing electrodes would be located in the sea within a distance of approximately 12 km from the shore. The earthing electrode location is the result of discussions and arrangements between authorities and users of the coastal strip. The proposed location of the electrode is presented in Fig. 3 [1]

The main problem related to the impact of an earthing electrode on the sea environment is the current flow in the water around and nearby the electrode itself. For this reason the electrode through which current enters the water must be of a sufficiently large surface [1].

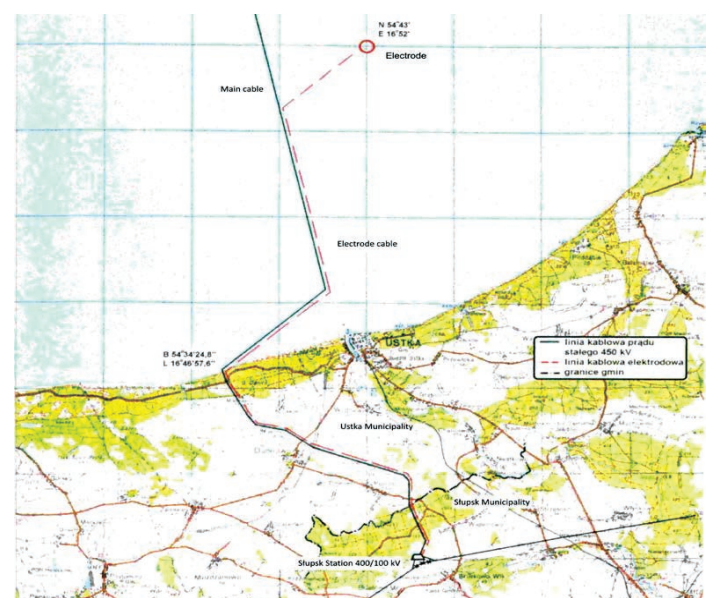


Fig. 3. The route of cable line at the Polish seashore [1]

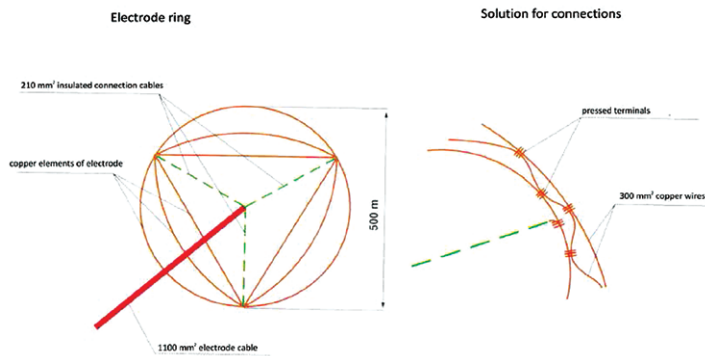


Fig. 4. Proposed technical solution for earthing electrode, cathode [1]

Using a return cable in the Sweden-Poland link to close the electrical circuit causes total losses of approximately 3%. If the return cable is removed and the electrical circuit closed only through the ground then losses in energy transmission could be reduced up to 2% – that is, with a full transmission equal to 600 MW losses could be limited by 6 MW.

According to the original project, the anode (that is an electrode accepting electrons) was to be built at the Swedish side. At the anode in the water some minor amounts of chloride would have been released [1]. The original project assumed building at the Polish side a cathode, that is an electrode returning electrons towards the anode. At the cathode in the water small amounts of hydrogen would have been emitted. The envisaged technical solution for sea electrode (cathode) is shown in Fig. 4. The diameter of the cathode of approximately 500 m ensures that the current density on the electrode surface is not greater than 0.5 mA/cm<sup>2</sup>, which is harmless to the sea environment. The separated connections and six internal intersecting arms provide safe electrode operation even in the event of its partial damage. The electrode described above should be laid on the sea bottom and secured against floating with loading elements on its circumference (every 20 m) and at the internal connections. Significant construction differences between both electrodes make it impossible to interchange their functions, i.e. the cathode cannot operate as the anode.

#### c) “partial” electrodes working with one return cable

A half-way solution that would ensure full power transmission through the Sweden-Poland link if one return cable is damaged, would be to build “partial” electrodes. The current of 1330 A must flow through the electrodes to ensure a full power transmission of 600 MW. If one of the two cables is damaged, it has been established that the power in this case would be only 473 MW, which means a current of 1048 A. If the electrodes (anode and cathode) are built only to transmit the current which is the difference between the above-mentioned current (i.e. 1330 A and 1048 A) then, with the electrodes rated nearly 290 A, a full power transmission would be possible with one operating cable. The operating circuit would need to have the resistor connected in series with “partial” electrodes which would limit the current to the value mentioned above (resistor parameters:

$R = \text{approx. } 12.5 \Omega$ ,  $P = \text{approx. } 1 \text{ MW}$  and  $I_{\text{max}} = 290 \text{ A}$ ). In practice, this means building electrodes (anode and cathode) taking up an area of 22% of the original “full” electrode. The link would normally operate with the return cables (as previously) and in the event of failure of one of the cables (after identifying the damage spot and disconnecting the cable for no longer than 3 hours) the new “partial” electrodes could be immediately connected in series to the resistor and a full power transmission would be possible. The link operation with one return cable (without the proposed solution) generates daily losses for each of the co-owners.

#### d) operation of the link only with earthings at converter stations

The Sweden-Poland link with a limited transmission can also operate with own station earthings which according to construction law have a resistance of at least 0.5  $\Omega$ .

This means that in the event of a failure of one return cable full power transmission would be possible over the other return cable and permanent station earthing (i.e. earthing grids). The Swedish side of the link with a permanently earthed return cable is virtually ready for that operation. The Polish side of the link requires connection of the earthing grid with a special resistor limiting the current to a maximum of 290 A and the disconnecting switch to be closed in the event of a failure of one of the return cables. Resistor parameters:  $R = \text{approx. } 13 \Omega$ ,  $P = \text{approx. } 1 \text{ MW}$  and  $I_{\text{max}} = 290 \text{ A}$ .

Possible operation of the Sweden-Poland link solely with own earthings and two damaged return cables would be possible with a power of 127 MW only, as presented above.

### 5. Environmental impact of the transmission system

In the DC transmission system between Sweden and Poland the following aspects of environmental impact should be considered [1]:

- In the vicinity of cable
  - Magnetic field:
- In the vicinity of converter station:
  - Electric field
  - Noise
  - Radio and television electric interference.

The cable line is the source of the magnetic field in the transmission system between Sweden and Poland. The magnetic field in terms of environmental impact is comparable with the Earth’s natural magnetic field.

With a rated current of 1330 A in the cable vicinity within the distance of 6 m the magnetic field does not exceed 50  $\mu\text{T}$ , while in direct contact with a copper conductor it is slightly more than 250  $\mu\text{T}$ . This means that when compared to the permissible level of 40 000  $\mu\text{T}$ , recommended by the World Health Organisation, it is negligibly small; this phenomenon has no impact on living organisms. The distribution of the above-mentioned field over the high-voltage DC cable passing a 1330 A current is shown in Fig. 5 [1].

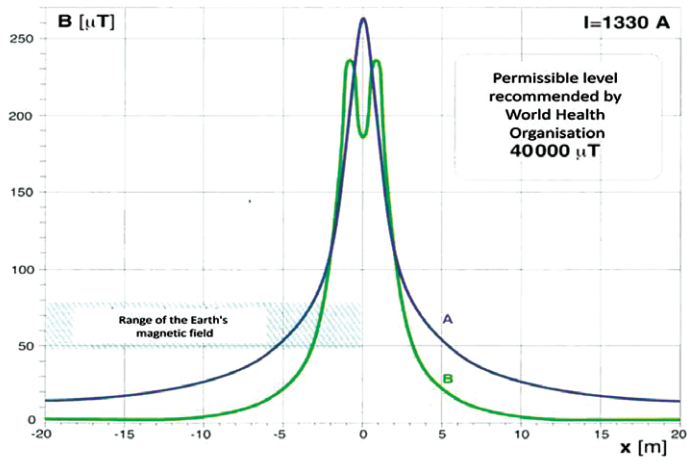


Fig. 5. Magnetic field in the vicinity of DC cable line A, B – magnetic field distribution over one and two high-voltage cable lines [1]

Fig. 6 shows changes to the field magnetic induction corresponding to the distance from the cable. Even at the distance of 0.5 m from the cable the magnetic field does not reach values which would raise concerns.

In the surroundings of the DC station a constant magnetic field is generated. Its source is the electric charge appearing on the live wires (conductors) and the spatial charge located around these wires. The constant electric field generated by the DC system will be practically present within a distance no more than several metres from the station fencing, and the field strength will be comparable with the strength of the natural electric field amounting on average to 0.13 kV/m. This phenomenon has no negative impact on living organisms [1].

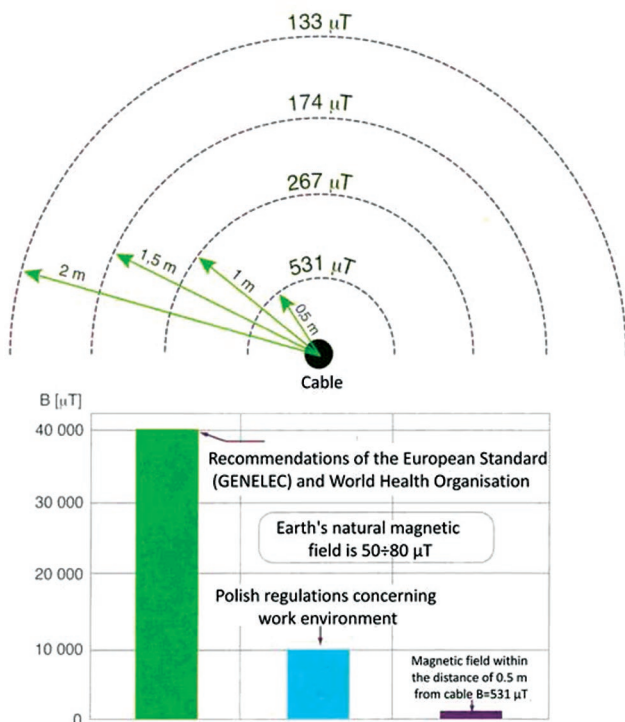


Fig. 6. Magnetic field around the cable with current  $I = 1330 \text{ A}$  [1]

The noise generated in the converter station by converter transformers is audible within a distance of not more than 200 m from the fencing. The noise level at the fencing does not exceed 50 dB. Fig. 7 presents the noise level occurring in the natural human environment. Considering that there is no residential housing in the direct vicinity of Wierzbęcino station the impact of the station is negligibly small [1].

Electrical discharges on the DC transmission system conductors might be a source of radio and television interference in the surroundings of the station. The range of interference is small, virtually imperceptible within a distance of over a dozen kilometres from the station [1].

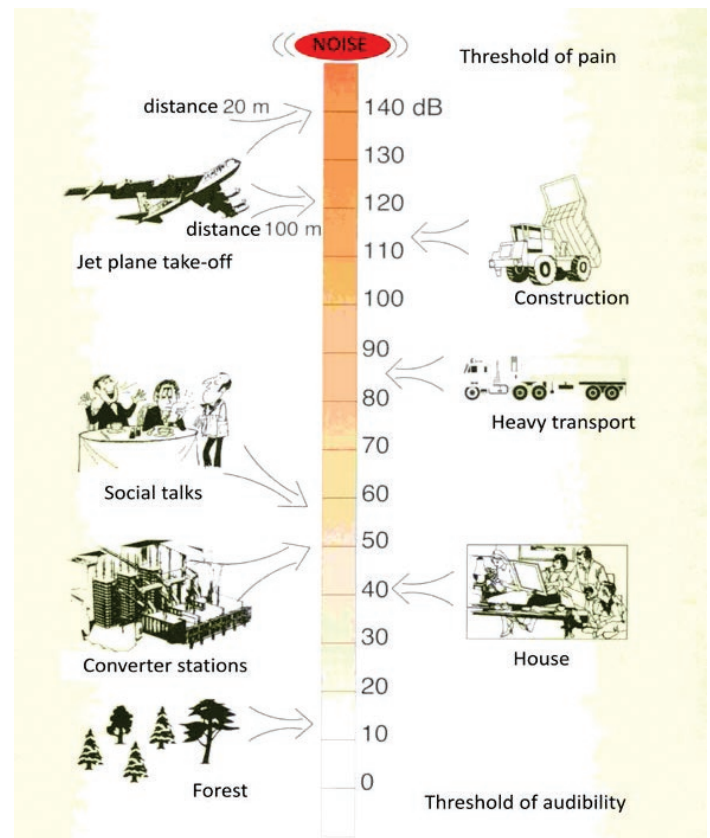


Fig. 7. Comparison of noise levels in the environment [1]

## 6. Summary

To sum up: it should be stated that:

- the damage to the return cables of the Sweden-Poland link is mostly caused by electrical failures in the cable in the sea located between ten and twenty kilometres from the Polish shore
- past works involving partial replacements of return cable segments, expansion of surge arresters and correction of thyristors electric field grading significantly increased – at low cost – the protection of the return cables
- a relatively cheap way of protecting return cables against electrical failures is installing surge arresters in the cabinet located next to the cable container on the Polish shore

- the proposal for resigning from return cables in the Sweden-Poland connection requires recognition and a feasibility study
  - in the case of lack of approval or protest of ecologists against resigning from the return cables it seems reasonable to consider the proposal of building so called “partial” electrodes
  - the adverse impact of the connection, fitted with return cables or not, to the natural environment cannot be confirmed
  - the given figures of particular parameters at items a), b), c) and d) were estimated values; possible application of particular methods requires their precise determination by the designer; however, the estimated values don't significantly differ from precise figures of proposed remedial measures
  - from the suggested preventive measures it seems reasonable to introduce the above mentioned solutions a) and d) simultaneously, as both of them are simple solutions which require neither considerable financial expenditure nor authorizations and may quickly show the expected results.
3. Kamrat W., Szczepański T., Wybrane zagadnienia budowy i eksploatacji sieci przesyłowych najwyższych napięć, Kongres Elektryki Polskiej [The selected issues concerning construction and operation of the highest voltage transmission systems, Congress of the Polish Electrical Engineering] Warsaw, 2–4 September 2009 [in:] *Przegląd Elektrotechniczny [Electrical Engineering Review]* 2009, No. 11.
  4. Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym [Wind power turbines in the power grid] Warsaw 2009.
  5. Szczepański T., Analiza niezawodności wysokonapięciowych łączy prądu stałego, referat wygłoszony podczas seminarium na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej [Analysis of high-voltage DC links reliability, paper presented at seminarium at the Electrical Engineering and Control Engineering of the Technical University in Gdańsk], Gdańsk, 30 March 2010.
  6. Szczepański T., O eksploatacji połączenia stałoprądowego Polska – Szwecja w latach 2001–2006, [Operation of the Poland-Sweden DC link in the years 2001–2006], *Wokół Energetyki [Power Industry Magazine]* 2007, No. 3.
  7. Szczepański T., Wysokonapięciowe połączenie prądu stałego Szwecja – Polska, Materiały VIII Sympozjum „Energoelektronika w nauce i dydaktyce” [High-voltage connection of DC between Sweden and Poland, Materials from the 8<sup>th</sup> Symposium “Power Engineering Electronics in the Science and Didactics”] Bydgoszcz, 26–28 September 2002.
  8. Source materials for assessment of reliability of the DC link, Bydgoszcz 2000–2012 (unpublished).

## REFERENCES

1. Argasińska H. et al., Układ przesyłowy 450 kV prądu stałego Szwecja – Polska a środowisko [Sweden-Poland Transmission System 450 kV DC], Warsaw, October 1997.
2. Kamrat W., Szczepański T., Sieci przesyłowe najwyższych napięć Gdańskie dni elektryki – SEP Oddział Gdańsk [The highest voltage transmission systems; Days of Electrical Engineering in Gdańsk – SEP Branch Office in Gdańsk] Published by DOM TECHNIKA, Gdańsk 2009.

## Tadeusz Szczepański

Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Północ Spółka Akcyjna

e-mail: tadeusz.szczepanski@pse-operator.pl

Graduate of the Electrical Engineering and Telecommunication Department of the Technical and Agricultural Academy in Bydgoszcz – Bachelor's degree studies (1976), Electrical Department of Technical University in Poznań – Master's degree studies (1980) Electrical Engineering and Control Engineering of Gdańsk Technical University – post graduate doctoral studies (2012). He also completed specialist training nuclear power engineering at the Mechanical Engineering, Power Engineering and Aviation Department of Technical University in Warsaw (1984), graduated from the Management Program in the Management and Finance College of the Warsaw School of Economics (1998) and completed post-graduate studies in the program of Company Management on the EU market at the Economics College of the Warsaw School of Economics (2003). He is an active member and expert of the Association of Polish Electrical Engineers (SEP) and since 2006 has held the position of Management Chairman of the SEB Branch in Bydgoszcz. He is the author of 20 publications on power energy systems.

Since 2001 he has worked as President of the Management Board of PSE-Północ SA.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 147–152. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Propozycje ochrony kabli powrotnych w łączu Szwecja – Polska

### Autor

Tadeusz Szczepański

### Słowa kluczowe

kabel powrotny, ogranicznik przepięć, elektroda

### Streszczenie

Kabel powrotny w łączu Szwecja – Polska pojawił się jako alternatywa wymuszona przez ekologów. Dlatego w wykonanym rozwiązaniu zastąpiono wodę i ziemię dwoma kablami powrotnymi, chociaż z punktu widzenia technicznego wprowadzone rozwiązanie daje niższą sprawność. Ostatnio do jedenastego uszkodzenia kabla powrotnego doszło 15 października 2012 roku. W ośmiu wcześniejszych przypadkach przyczynami awarii były uszkodzenia elektryczne kabla w morzu, w odległości kilkunastu kilometrów od polskiego brzegu, spowodowane zakłóceniami w północnej części polskiego systemu elektroenergetycznego.

### 1. Przyczyny wprowadzenia kabli powrotnych

Kabel powrotny w łączu Szwecja – Polska pojawił się jako alternatywa wymuszona przez ekologów. Decyzja o układaniu kabli powrotnych podjęta została dopiero na etapie układania kabla głównego. W pierwotnych projektach zakładano budowę anody i katody, a obwód elektryczny miał się zamykać poprzez ziemię. W proponowanym rozwiązaniu zastąpiono wodę i ziemię kabel powrotny, chociaż z punktu widzenia technicznego to rozwiązanie jest gorsze, gdyż daje niższą sprawność całemu łączu (przy zamykaniu obwodu poprzez ziemię wystarczy tylko zbudować elektrody o odpowiednio niskich wartościach rezystancji, a oporność gruntu jest praktycznie równa zeru). W momencie podejmowania decyzji o układaniu kabla powrotnego na rynku nie było kabla o przekroju co najmniej 1100 mm<sup>2</sup> i izolacji 20 kV, nadającym się do położenia na dnie Bałtyku. Zdecydowano ułożyć na odcinku morskim dwa kable o przekroju 630 mm<sup>2</sup> każdy, a na polskim odcinku lądowym jeden kabel o przekroju 1100 mm<sup>2</sup>, wszystkie w izolacji 20 kV. Pierwsza awaria kabla powrotnego potwierdziła w praktyce trafność decyzji o dwóch kablach powrotnych, podczas awarii kabla wypina się uszkodzony, a drugi pracuje z mocą maksymalną łączy jedynie 473 MW [1, 2, 3, 4].

### 2. Uszkodzenia kabli powrotnych

Uszkodzenie kabla powrotnego w łączu Szwecja – Polska, które miało miejsce 15 października 2012 roku, było jedenastym w historii eksploatacji kabla (od dziesiątego uszkodzenia minęło prawie 10 lat). Do poprzednich awarii tych kabli dochodziło w latach 2001–2003, czyli w okresie gwarancyjnym. Przyczyny ostatniego uszkodzenia kabla powrotnego jeszcze jednoznacznie nie ustalono, chociaż końcowe przebicie izolacji miało z pewnością charakter elektryczny. Procedura postępowania przy usuwaniu awarii kabla powrotnego w łączu Szwecja – Polska jest zawsze podobna. Trzeba ustalić, który z dwóch kabli uległ uszkodzeniu, po czym wypina się go z zacisków,

a następnie za pomocą przenośnych lokalizatorów (mostków Murraya) ustala się przybliżone miejsce uszkodzenia, które niekiedy może wymagać tzw. dopalenia specjalnym generatorem. Gdy uszkodzenie znajduje się pod wodą, to przy użyciu małej łódki odnajduje się miejsce awarii, po czym oznacza się je boją. We wskazane miejsce przypluwa statek specjalistyczny, z jego pokładu schodzi nurek i precyzyjnie ustala miejsce uszkodzenia kabla. Dalsze procedury uzależnione są od rodzaju dna. Zamulone trzeba odmulić, na skalistym bez przeszkód kabel można przeciąć i wyciągnąć z wody. Wyciągnięty koniec kabla, po

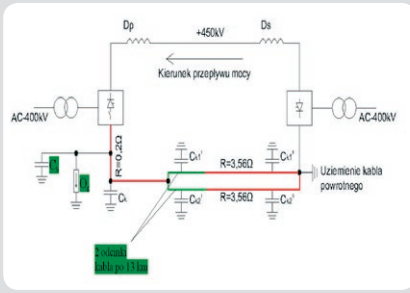
niezbędnym odcięciu miejsca uszkodzenia, łączy się poprzez mułę z nowym odcinkiem kabla o długości co najmniej 100–300 m, po czym scala się poprzez kolejną mułę z drugim końcem kabla [2, 3, 5, 6 i 7]. Czas naprawy uzależniony jest od rodzaju awarii oraz dostępności środków niezbędnych do wykonania naprawy. Może trwać od kilkunastu dni do kilku miesięcy.

### 3. Analiza przyczyn uszkodzeń kabli powrotnych

W ośmiu przypadkach przyczyną awarii były uszkodzenia elektryczne w okolicy polskiego brzegu, spowodowane przez

Lp.	Termin	Rodzaj uszkodzenia	Miejsce uszkodzenia	Czas naprawy
Awaria 1	27 lutego 2001	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S8	wewnątrz przepustu w odległości 245 m od polskiego brzegu morskiego	692,9 godz.
Awaria 2	12 kwietnia 2001	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S6	wewnątrz przepustu w odległości 370 m od polskiego brzegu morskiego	299,4 godz.
Awaria 3	15 lipca 2001	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S8	w odległości 583 m od polskiego brzegu morskiego	297,9 godz.
Awaria 4	17 sierpnia 2001	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S8	w odległości 646 m od polskiego brzegu morskiego	652,3 godz.
Awaria 5	11 listopada 2001	uszkodzenie mechaniczne kabla XL5-S6 przez rybaków	w odległości 60 160 m od polskiego brzegu morskiego w akwenu Ławicy Słupskiej	628,1 godz.
Awaria 6	5 grudnia 2001	uszkodzenie mechaniczne kabla XL5-S6 przez kotwicę statku	w odległości 8410 m od polskiego brzegu morskiego	7,2 godz.
Awaria 7	16 lipca 2002	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S6	w odległości 7900 m od polskiego brzegu morskiego	487,3 godz.
Awaria 8	10 sierpnia 2002	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S6	w odległości 8550 m od polskiego brzegu morskiego	168,6 godz.
Awaria 9	6 września 2002	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S6	w odległości 10 000 m od polskiego brzegu morskiego	356,5 godz.
Awaria 10	17 stycznia 2003	uszkodzenie elektryczne kabla XL5-S6	w odległości 7460 m od polskiego brzegu morskiego	2887,2 godz.
Awaria 11	15 października 2012	uszkodzenie niewyjaśnione kabla XL5-S8	w odległości 8007 m od polskiego brzegu morskiego	876,6 godz.

Tab. 1. Uszkodzenia kabli powrotnych MCRC [8]



Rys. 1. Schemat elektryczny układu przesyłowego Szwecja – Polska służący wyjaśnieniu mechanizmu przepięć w kablu powrotnym, opracowanie własne

zakłócenia w północnej części polskiego systemu elektroenergetycznego 400 kV i 110 kV.

Bezpośrednią przyczyną uszkodzeń kabli powrotnych były przepięcia w KSE, nagłe wyłączenia, powodujące zmniejszenie prądu w bardzo krótkim czasie do zera. Dominujące znaczenie miał tu kierunek przesyłanej energii elektrycznej i praktycznie tylko przy przesyśle w kierunku do Polski (przekształtnik pracuje wtedy jako falownik) dochodziło do uszkodzenia kabla powrotnego. Gdy kierunek przesyłanej energii wiódł z Polski (przekształtnik pracuje wtedy jako prostownik), takie zakłócenie było również w pewnym stopniu odczuwane przez łącze (rejestrowane na stacji DC), ale nigdy nie powodowało uszkodzeń kabla [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Opisany przypadek odpowiada klasycznej linii długiej otwartej na końcu, co pokazano w formie uproszczonego schematu elektrycznego na rys. 1. Zachodzące zjawisko wiąże się z prawem zachowania energii, przed uszkodzeniem napięcie statyczne na kablu powrotnym jest małe i wynosi maksymalnie 2,52 kV (przy znamionowym obciążeniu wynoszącym 1330 A).

Z chwilą zablokowania przekształtnika cała energia magnetyczna zgromadzona w kablu powrotnym zamienia się w energię elektryczną, co objawia się powstaniem fali przepięciowej na końcu kabla. Rozchodząca się fala przepięciowa wędruje wzdłuż kabla i w miejscu zmiany oporności falowej (w węźle łączącym kable powrotne) następuje jej odbicie, powodujące jej zwiększanie rozchodzące się w części morskiej w okolicy polskiego brzegu. Tak duże napięcie powoduje uszkodzenia izolacji kabla.

Strona szwedzka kabli powrotnych była w tym przypadku całkowicie bezpieczna od wpływu zagrożeń czynników elektrycznych, dzięki uziemieniu żyły kabla powrotnego umiejscowionemu po jej stronie.

Problemy z uszkodzeniami kabli powrotnych ustały całkowicie po 2003 roku, kiedy to:

- wymieniono po polskiej stronie morza na nowe oba odcinki kabli powrotnych na długości 13 km oznaczone na rysunku kolorem zielonym, ze zmienionym wystrojeniem żyły roboczej (umieszczony na żyłę kabla ekran sterujący wykonano z materiału prawie pięć razy grubszego, dzięki czemu uzyskano lepsze wystrojenie do pola elektrycznego kabla i większą jego odporność na pojawiające się w nim przepięcia łączeniowe)

- rozbudowano ograniczniki przepięć pracujących po polskiej stronie (dzięki czemu zmniejszono napięcia zapłonu z 22 kV do 11 kV), oznaczonych na rysunku jako  $O_b$ , oraz powiększono pojemności załączonej baterii kondensatorów, oznaczonej na rysunku jako  $C_g$ , zmniejszającej stromość narastania przepięć
- zmniejszono oddziaływania dolegliwych dla łącza zakłóceń w sieci zewnętrznej po polskiej stronie, poprzez złagodzenie stromości narastania impulsów wyłączających tyrystory
- w wybranych miejscach, w których kabel położony jest na skałach podmorskich, ułożono dodatkowo betonowe płyty ochronne, np. przed sieciami rybackimi
- profilaktycznie ponownie przypominano o przebiegu trasy kabla Szwecja – Polska instytucjom odpowiedzialnym za bezpieczeństwo na Bałtyku (w celu ochrony przed np. kotwicami okrętów).

#### 4. Ochrona kabli powrotnych od skutków uszkodzeń

Dla łącza Szwecja – Polska zaproponowano przeanalizowanie i ewentualne zrealizowanie jednego lub dwóch z niżej przedstawionych rozwiązań technicznych, które w sposób istotny mogą ograniczyć skutki i koszty uszkodzeń kabli powrotnych.

##### a) montaż dodatkowych ograniczników przepięć

Praktycznie środki zaradcze, ograniczające uszkodzenia kabli powrotnych, mogą dotyczyć prawie wyłącznie awarii spowodowanych przyczynami elektrycznymi. Uszkodzenia pochodzące od przyczyn mechanicznych występują rzadko, tzn. średnio tylko co piąte ma tę przyczynę, a ich miejsce może dotyczyć każdego kilometra linii, zwłaszcza odcinków, gdzie kabel ułożony jest bezpośrednio na skale. Najprostszym rozwiązaniem, aby ograniczyć kolejne uszkodzenia elektryczne kabli powrotnych, jest zainstalowanie ograniczników przepięciowych przy polskim brzegu morskim w miejscu, w którym połączono kabel powrotny, przychodzący ze stacji DC w Wierzbicinie, z dwoma kablami powrotnymi wchodzącymi do morza i łączącymi stację Sterno (tam, gdzie następuje zmiana oporności falowej, tj. w węźle elektrycznym znajdującym się w szafce kablowej przy

kontenerze po polskiej stronie). Ograniczniki przepięciowe powinny być dobrane na obciążalność udarową ok. 30 kA, tj.  $3 \times 10$  kA, i napięcie robocze 11 kV (podobnie jak w stacji Wierzbicino), obowiązkowo wyposażone w liczniki zadziałań. Uziemienie ograniczników przepięć oraz wszystkie ekrany kabli powrotnych powinny być połączone z nowo zbudowanym uziemieniem o rezystancji mniejszej niż 5  $\Omega$ . Szczególnie narazony obszar uszkodzeń kabli powrotnych pokazano na rys. 2.

##### b) powrót do elektrod – całkowity brak kabli powrotnych

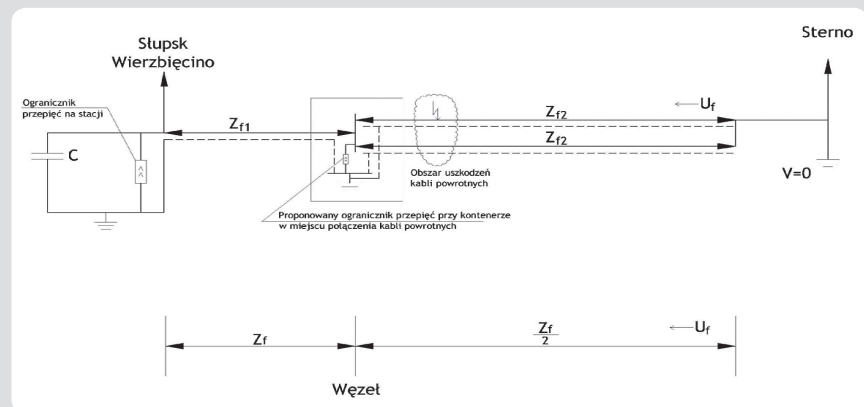
Sposobem złagodzenia skutków uszkodzeń kabli powrotnych może i powinno być ponowne rozważenie budowy katody i anody w celu zamykania obwodu elektrycznego przez ziemię, tylko lub dodatkowo. Ewentualny brak kabli powrotnych w rozwiązaniu łącza eliminowałby automatycznie problemy awaryjności, chociaż nie ma pewności, że nie spowoduje to kolejnych sprzeciwów ekologów.

Na dziewięć łączy obecnie pracujących w rejonie Morza Bałtyckiego tylko łącze Szwecja – Polska ma kable powrotne, a kabel powrotny w łączach na świecie nie jest powszechnie stosowany.

Proponuję rozważyć powrót do propozycji zastąpienia kabli powrotnych przez wodę i ziemię, poprzez zastosowanie elektrod, zgodnie z pierwotnym projektem. Pierwsze założenia zakładały, że obie elektrody uziemiające będą zlokalizowane na morzu w odległości około 12 km od brzegu. Lokalizacja elektrody uziemiającej to wynik dyskusji i uzgodnień z instytucjami związanymi z użytkownikami przybrzeżnego pasa morskiego. Zaproponowaną szczegółową lokalizację elektrody po polskiej stronie pokazano na rys. 3 [1].

Podstawowym problemem związanym z oddziaływaniem elektrody uziemiającej na środowisko morskie jest przepływ prądu w wodzie w pobliżu elektrody. Z tych względów elektrody, przez którą prąd jest wprowadzany do wody, musi mieć odpowiednio dużą powierzchnię [1].

Wykorzystanie w łączu Szwecja – Polska kabla powrotnego do zamknięcia obwodu elektrycznego powoduje łączne straty ok. 3%. Gdyby zrezygnować z kabla powrotnego, a obwód elektryczny zamykać jedynie poprzez ziemię, to straty w przesyśle energii

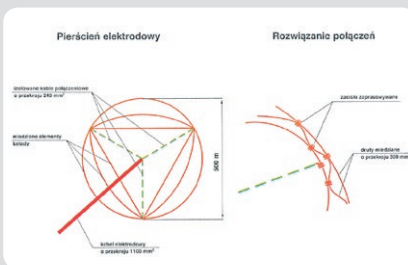


Rys. 2. Kable powrotne w łączu Szwecja – Polska, opracowanie własne





Rys. 3. Trasa linii kablowej przy polskim brzegu [1]



Rys. 4. Propozycja rozwiązania technicznego elektrody uziemiającej, katody [1]

elektrycznej można zmniejszyć do 2%, czyli ograniczyć straty o 6 MW przy pełnym przesyśle wynoszącym 600 MW.

Zgodnie z pierwotnym projektem po stronie szwedzkiej miała być zbudowana anoda, czyli elektroda przyjmująca elektrony. Przy anodzie w wodzie wydzielaliby się w niewielkich ilościach chlor [1]. Projekt pierwotny zakładał po stronie polskiej budowę katody, czyli elektrody oddającej elektrony wędrujące do anody. Przy katodzie w wodzie wydziela się w niewielkich ilościach wodór. Przewidywane rozwiązanie techniczne elektrody morskiej (katody) pokazano na rys. 4. Średnica katody rzędu 500 m spowoduje, że gęstość prądu na powierzchni elektrody nie będzie większa niż 0,5 mA/cm<sup>2</sup>, co zapewni jej nieszkodliwą pracę w środowisku morskim. Trzy odseparowane połączenia oraz sześć wewnętrznych, krzyżujących się ramion zapewnia bezpieczną pracę elektrody nawet w przypadku jej częściowego uszkodzenia. Wyżej opisana elektroda powinna być ułożona na dnie morskim i zabezpieczona przed unoszeniem poprzez elementy obciążające na jej obwodzie (co 20 m) i na połączeniach

wewnętrznych.

Zasadnicze różnice w budowie obu elektrod powodują, że nie można zamienić ich funkcji, czyli że katoda nie może pracować jako anoda.

#### c) elektrody „niepełne” pracujące z jednym kablem powrotnym

Rozwiązaniem kompromisowym, zapewniającym pełen przesył mocy łączem Szwecja – Polska przy uszkodzeniu jednego kabla powrotnego, mogłaby być budowa elektrod „niepełnych”. W celu zapewnienia pełnego przesyłu mocy w wysokości 600 MW przez elektrody musi płynąć prąd 1330 A. W przypadku uszkodzenia jednego z dwóch kabli powrotnych ustalono, że maksymalna moc, jaka może płynąć w takiej sytuacji, wynosi tylko 473 MW, co oznacza prąd w wysokości 1048 A. Gdyby zbudować elektrody (anodę i katodę) jedynie na wartość prądu będącego różnicą pomiędzy wyżej wymienionymi prądami, tzn. 1330 A i 1048 A, to przy elektrodach na wartość prądu niecałe 290 A można by przy awarii jednego kabla roboczego dalej pracować z pełną mocą. Załączony obwód elektryczny musiałby posiadać rezystor włączony szeregowo z „niepełnymi” elektrodami, który ograniczałby prąd do wartości podanej powyżej (parametry takiego rezystora to:  $R = \text{ok. } 12,5 \Omega$ ,  $P = \text{ok. } 1 \text{ MW}$  i  $I_{\text{max}} = 290 \text{ A}$ ). Praktycznie oznacza to potrzebę budowy elektrod (anody i katody) o powierzchni jedynie 22% pierwotnie projektowanej elektrody „pełnej”. Normalna praca łączy mogłaby być prowadzona tak jak dotychczas z kablami powrotnymi, a w przypadku awarii jednego z nich, po lokalizacji i wypięciu (trwającym nie dłużej niż 3 godz.), można by natychmiast łączyć nowo zbudowane elektrody „niepełne” z szeregowo załączonym rezystorem i pracować dalej z pełną mocą.

Praca łączy z jednym kablem powrotnym (bez wyżej proponowanego rozwiązania) powoduje stratę dzienną dla każdego ze współwłaścicieli.

d) praca łączy jedynie z uziemieniami własnymi na stacjach przekształtnikowych

Pracę łączy Szwecja – Polska, z ograniczonym przesyłem, można także prowadzić jedynie z uziemieniami własnymi stacji, które według przepisów budowy mają rezyserwację co najmniej 0,5 Ω.

Oznacza to, że w przypadku uszkodzenia jednego kabla powrotnego można realizować pełen przesył mocy poprzez drugi kabel powrotny oraz trwałe uziemienia stacji (tzn. ich siatki uziemiające). Szwedzka strona łączy, posiadająca trwałe uziemiony kabel powrotny, jest praktycznie gotowa do takiej pracy. Strona polska wymagałaby wykonania powiązania z siatką uziemiającą stacji poprzez specjalny rezystor ograniczający prąd do maksymalnie 290 A i odłącznik zamykany w przypadku uszkodzenia jednego z kabli powrotnych. Parametry takiego rezystora to:  $R = \text{ok. } 13 \Omega$ ,  $P = \text{ok. } 1 \text{ MW}$  i  $I_{\text{max}} = 290 \text{ A}$ .

Ewentualna praca łączy Szwecja – Polska jedynie z uziemieniami własnymi, z dwoma uszkodzonymi kablami powrotnymi, byłaby możliwa jedynie z mocą 127 MW, w układzie przedstawionym powyżej.

#### 5. Oddziaływanie układu przesyłowego na środowisko

W układzie przesyłowym prądu stałego Szwecja – Polska pod uwagę należy brać następujące rodzaje oddziaływań [1]:

W otoczeniu kabla

- pole magnetyczne

W otoczeniu stacji przekształtnikowej:

- pole elektryczne

- hałas

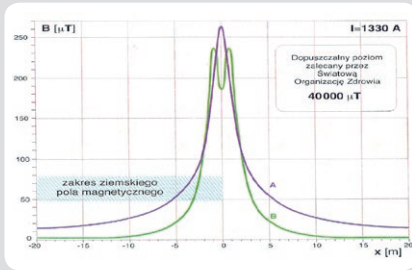
- zakłócenia radioelektryczne i telewizyjne.

W układzie przesyłowym Szwecja – Polska źródłem pola magnetycznego jest linia kablowa. Pole to pod względem oddziaływania na otoczenie jest porównywalne z naturalnym polem magnetycznym Ziemi.

W otoczeniu kabla, przy prądzie znamionowym 1330 A, pole magnetyczne powstające w odległości 6 metrów nie przekracza 50 μT, a przy bezpośrednim kontakcie z żyłą miedzianą niewiele ponad 250 μT. Oznacza to, że w zestawieniu z dopuszczalnym poziomem zalecanym przez Światową Organizację Zdrowia, wynoszącą 40 000 μT, jest to wielkość pomijalnie mała, zjawisko to nie ma wpływu na organizmy żywe. Rozkład wyżej opisanego pola magnetycznego nad wysokonapięciowym kablem prądu stałego z przepływającym prądem 1330 A pokazano na rys. 5 [1].

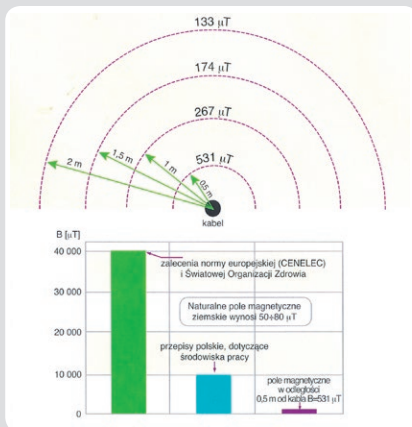
Zmianę wartości indukcji magnetycznej pola ze zmianą odległości od kabla pokazano na rys. 6. Nawet w odległości 0,5 m od kabla pole magnetyczne nie osiąga wartości, które mogłyby budzić obawy.

W otoczeniu stacji prądu stałego wytwarza się pole elektryczne stałe, którego źródłem jest ładunek znajdujący się na przewodach pod napięciem oraz ładunek przestrzenny w otoczeniu tych przewodów. Pole elektryczne stałe, wytwarzane przez układ prądu stałego, będzie występowało praktycznie



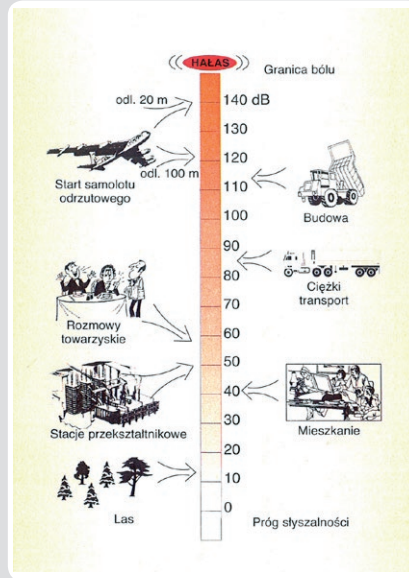
Rys. 5. Pole magnetyczne w otoczeniu linii kablowej prądu stałego A, B – rozkład pola magnetycznego nad jedną i dwiema wysokonapięciowymi liniami kablowymi [1]

tylko w odległości nie większej niż kilkanaście metrów od ogrodzenia stacji, przy czym natężenie tego pola będzie porównywalne z naturalnym polem elektrycznym, wynoszącym przeciętnie 0,13 kV/m. Zjawisko to nie ma wpływu na organizmy żywe [1]. Hałas na stacji przekształtnikowej pochodzi przede wszystkim od transformatorów przekształtnikowych i jest słyszalny w praktyce tylko w odległości nie większej niż 200 m od ogrodzenia. Przy ogrodzeniu poziom



Rys. 6. Pole magnetyczne w otoczeniu kabla z prądem  $I = 1330 \text{ A}$  [1]

hałasu nie przekracza 50 dB. Na rys. 7 pokazano porównanie hałasów występujących w środowisku naturalnym człowieka. Mając na uwadze fakt, że w bezpośrednim otoczeniu stacji Wierzbęcino nie ma zabudowań mieszkalnych, oddziaływanie stacji jest pomijalnie małe [1].



Rys. 7. Porównanie poziomów hałasu w środowisku [1]

Wyładowania na przewodach układu przesyłowego prądu stałego mogą być źródłem zakłóceń radiowych i telewizyjnych w otoczeniu stacji. Zasięg tych zakłóceń jest niewielki, praktycznie nieodczuwalny w odległości kilkudziesięciu metrów od stacji [1].

## 6. Podsumowanie

W podsumowaniu dokonanych rozważań należy stwierdzić:

- w łączu Szwecja – Polska uszkodzenia kabli powrotnych najczęściej spowodowane są przyczynami elektrycznymi, a miejscem ich powstawania jest morze w odległości kilkunastu kilometrów od polskiego brzegu
- prace wykonane w przeszłości, polegające na częściowej wymianie kabli powrotnych, rozbudowie ograniczników przepięć i korekcji wysterowania tyrystorów, znacząco uodporniły kable powrotne na uszkodzenia
- stosunkowo tanim sposobem dalszego uodpornienia kabli powrotnych na uszkodzenia elektryczne jest zabudowa ograniczników przepięć w szafce przy kontenerze na polskim brzegu
- rozpoznania i analizy opłacalności wymaga propozycja rezygnacji z kabli powrotnych w łączu Szwecja – Polska
- przy braku akceptacji lub sprzeciwie ekologów na rezygnację z kabli powrotnych zasadne wydaje się rozważenie

propozycji budowy tzw. elektrod „niepełnych”

- szkodliwe oddziaływanie na środowisko naturalne łącza wyposażonego zarówno w kable powrotne, jak i przy ich braku nie potwierdza się
- podane wielkości poszczególnych parametrów w punktach: a), b), c) i d) określono szacunkowo; ewentualne zastosowanie wyszczególnionych sposobów wymaga dokładnych ich określenia przez projektanta, jednak podane szacunkowe wartości nie odbiegają znacząco od dokładnych wielkości
- z proponowanych środków zaradczych zaleca się wykorzystać przede wszystkim rozwiązanie a) i d) jednocześnie, gdyż są to proste sposoby, niewymagające dużych nakładów finansowych ani żadnych zgód, a mogą zapewnić szybko oczekiwany efekt.

## Bibliografia

1. Argasińska H. i in., Układ przesyłowy 450 kV prądu stałego Szwecja – Polska a środowisko, Warszawa, październik 1997.
2. Kamrat W., Szczepański T., Sieci przesyłowe najwyższych napięć. Gdańskie dni elektryki – SEP Oddział Gdańsk, Wydawca DOM TECHNIKA, Gdańsk 2009.
3. Kamrat W., Szczepański T., Wybrane zagadnienia budowy i eksploatacji sieci przesyłowych najwyższych napięć, Kongres Elektryki Polskiej, Warszawa, 2–4 września 2009 [w:] *Przegląd Elektrotechniczny* 2009, nr 11.
4. Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, Warszawa 2009.
5. Szczepański T., Analiza niezawodności wysokonapięciowych łączy prądu stałego, referat wygłoszony podczas seminarium na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 30 marca 2010.
6. Szczepański T., O eksploatacji połączenia stałoprądowego Polska – Szwecja w latach 2001–2006, *Wokół Energetyki* 2007, nr 3.
7. Szczepański T., Wysokonapięciowe połączenie prądu stałego Szwecja – Polska, Materiały VIII Sympozjum „Energoelektronika w nauce i dydaktyce”, Bydgoszcz, 26–28 września 2002.
8. Źródłowe materiały do oceny niezawodności łącza prądu stałego, Bydgoszcz 2000–2012 (niepublikowane).

## Tadeusz Szczepański

dr inż.

Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Północ Spółka Akcyjna

e-mail: tadeusz.szczepanski@pse-operator.pl

Absolwent: Wydziału Telekomunikacji i Elektrotechniki Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy – studia inżynierskie (1976), Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej – studia magisterskie (1980), Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej – doktor nauk technicznych (2012). Zdobył także specjalność energetyka jądrowa na Wydziale Mechanicznym, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej (1984), ukończył kierunek menedżerski w Kolegium Zarządzania i Finansów Szkoły Głównej Handlowej w Warszawie (1998) oraz studia podyplomowe z zakresu zarządzania spółką na rynku Unii Europejskiej w Kolegium Gospodarki Światowej SGH (2003). Jest działaczem i rzeczoznawcą SEP, a od 2006 roku pełni funkcję prezesa zarządu Oddziału Bydgoskiego SEP. Jest autorem 20 publikacji z zakresu sieci elektroenergetycznych. Od 2001 roku pracuje na stanowisku prezesa zarządu PSE-Północ SA.