



mgr inż. Łukasz Tomaszewski

lukasz.tomaszewski.hvse@gmail.com

+48 791 177 038



dr inż. Andrzej Cichy

andrzej.cichy@acconsulting.info.pl

+48 510 852 605

OBCIĄŻALNOŚĆ DŁUGOTRWAŁA KABLI HVDC

WPROWADZENIE

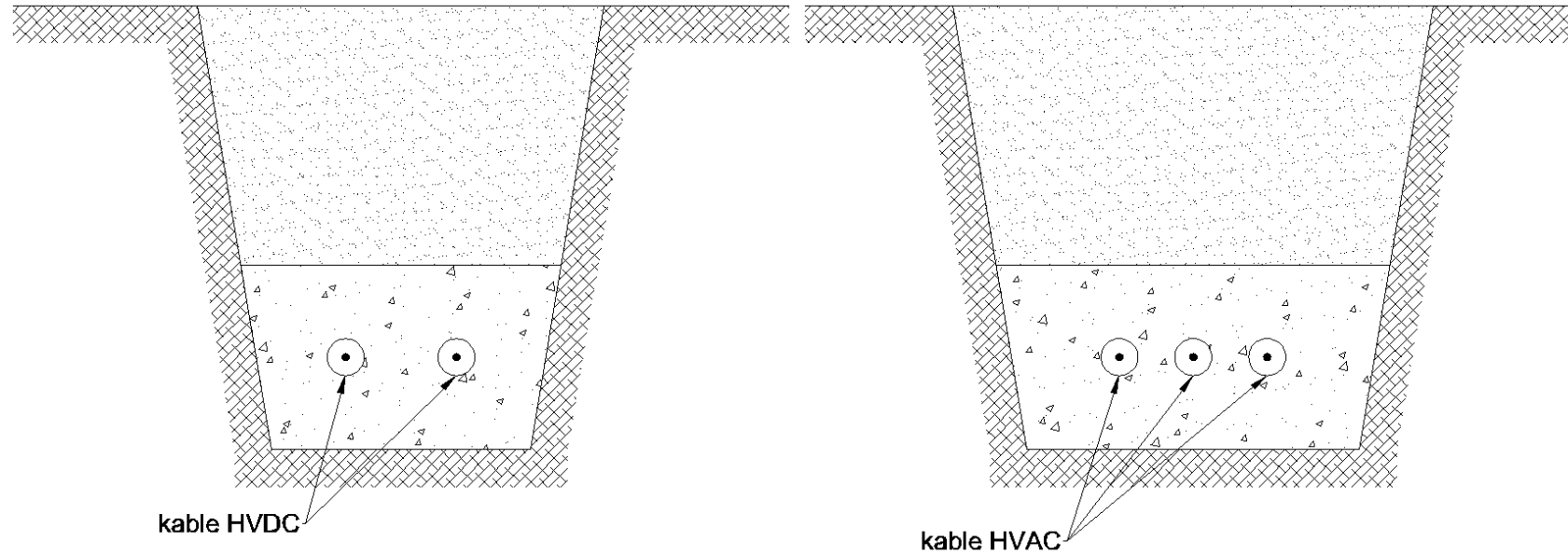
Ostatnimi laty prężny rozwój energetyki odnawialnej oraz połączeń międzysystemowych wymusił budowę dużej liczby linii elektroenergetycznych wysokich mocy. W związku z tym obserwuje się znaczący wzrost zastosowania linii kablowych wysokich napięć, w technologii HVDC. Proces projektowy rozwiązań tego typu obejmuje dobór kabli HVDC do mocy znamionowej planowanego połączenia, którego jednym z elementów jest określenie dopuszczalnej długotrwałej obciążalności prądowej. Nowością w obliczeniach dopuszczalnego prądu obciążenia dla kabli tego typu jest to, że nie zależy już on tylko od konwencjonalnej analizy cieplnej, ale także zostaje ograniczony przez natężenie pola elektrycznego w izolacji, które zmienia się w funkcji temperatury kabla.

ZALETY I WADY HVDC

Powodem rosnącej popularności linii kablowych typu HVDC jest szereg zalet tego rozwiązania (względem technologii HVAC), takich jak:

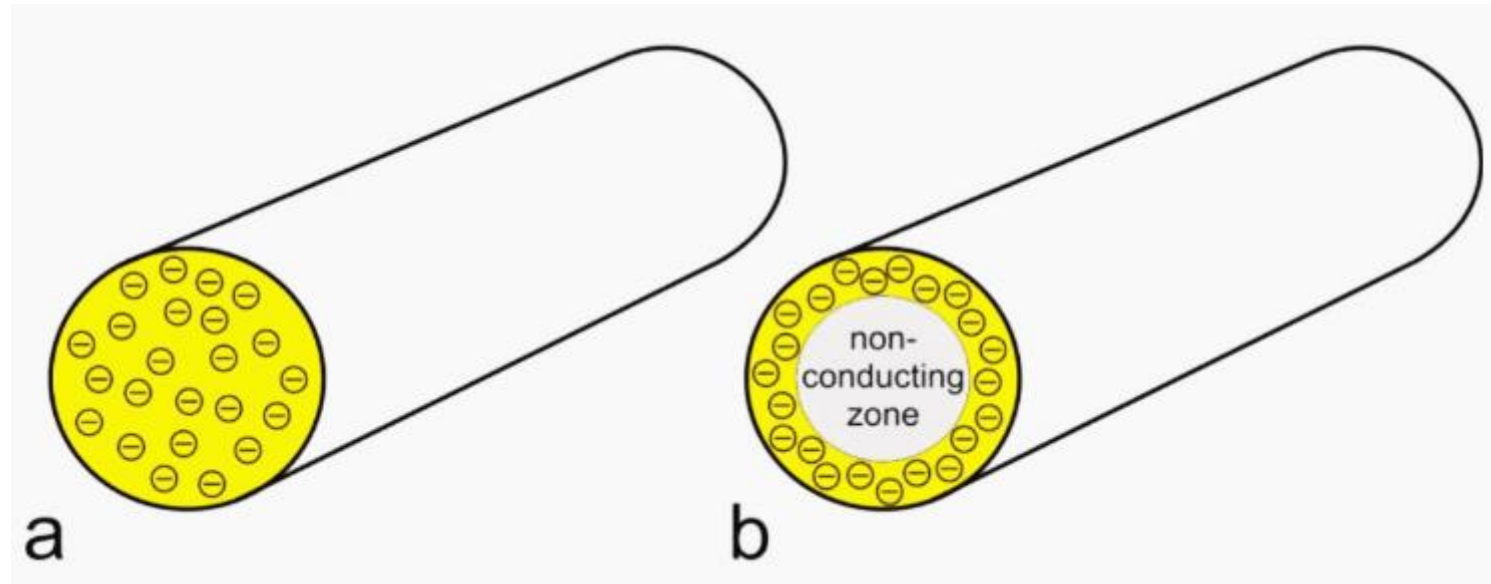
- mniejsza liczba kabli,
- niższe straty mocy czynnej,
- brak limitu długości linii kablowej.

Mniejsza liczba kabli w systemie (jeden lub dwa zamiast trzech)



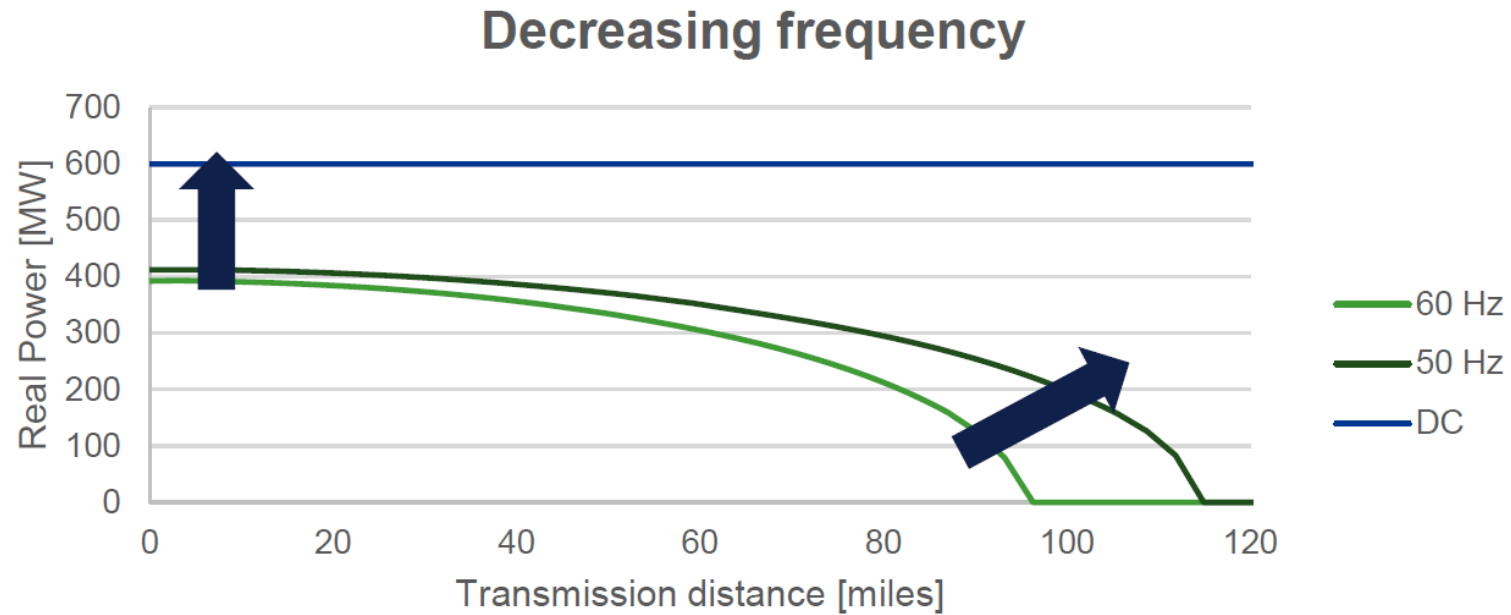
Rys. 1. Przekroje typowych rowów kablowych linii kablowych DC oraz AC

Niższe straty mocy czynnej



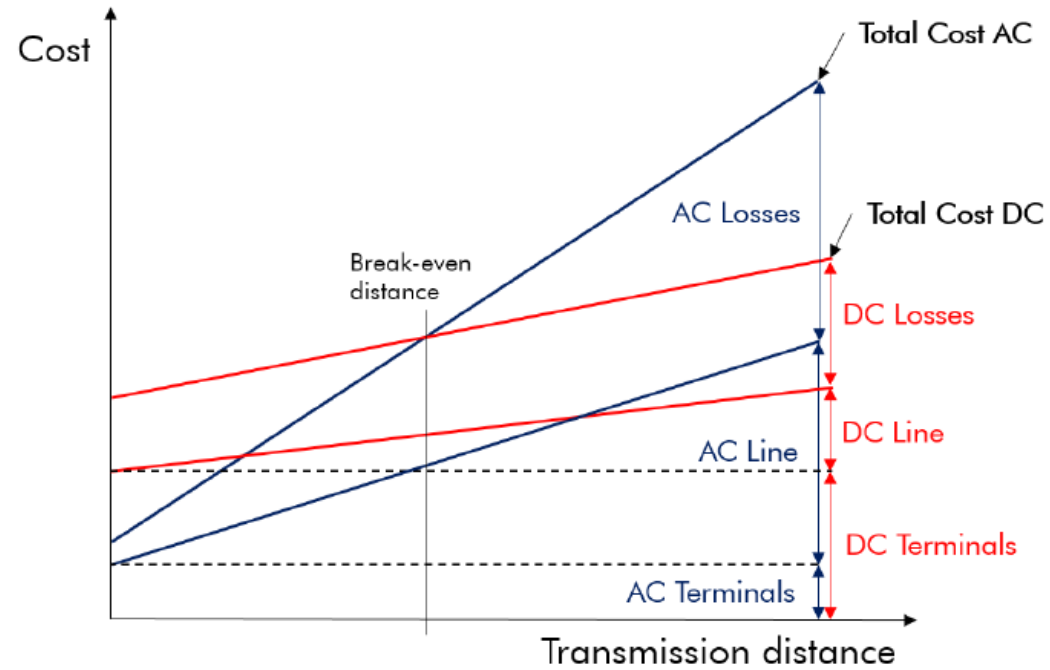
Rys. 2. Rozkład gęstości prądu w żyły roboczej a) kabla HVDC b) kabla HVAC [1]

Brak limitu długości linii kablowej



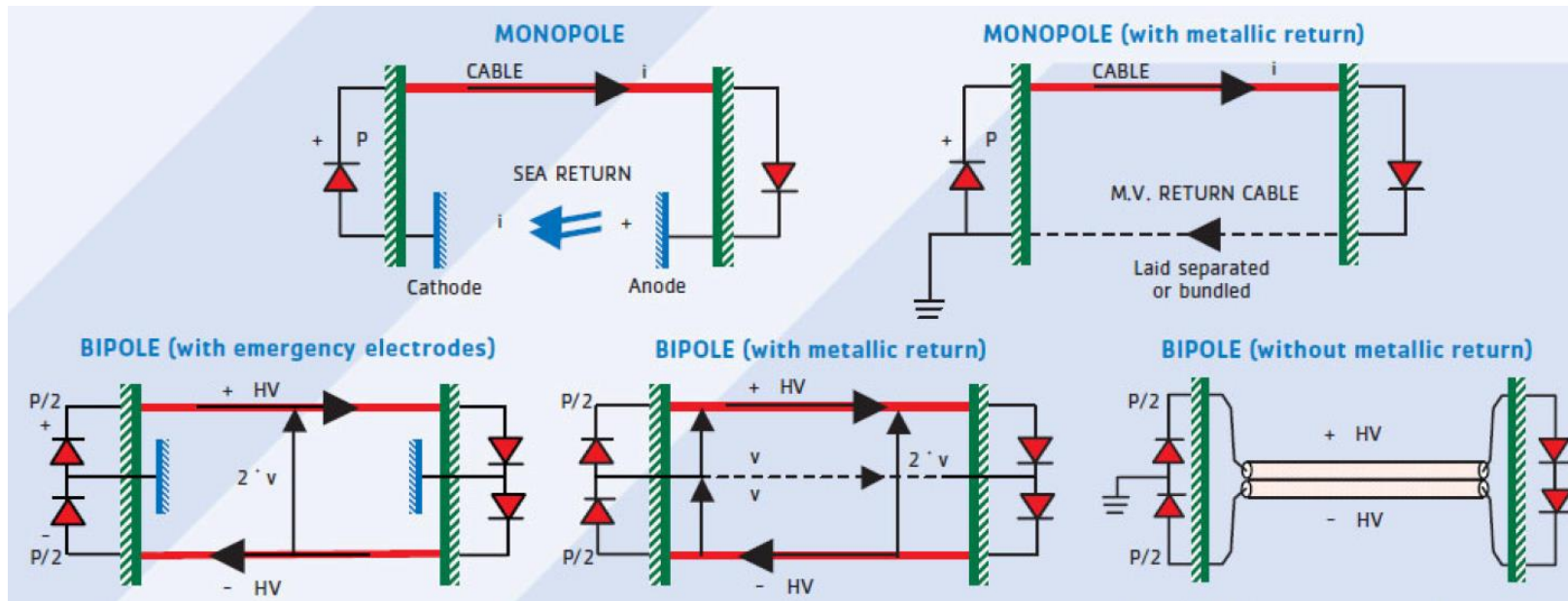
Rys. 3. Przykładowa długość linii kablowej w zależności od częstotliwości napięcia [2]

HVAC vs HVDC



Rys. 4. Zależność kosztu systemu od długości połączenia [3]

Typy systemów kablowych HVDC



Rys. 5. Przykładowe konfiguracje systemów HVDC [4]

KABLE HVDC XLPE

Zalety:

- napięcie pracy do 640 kV,
- neutralność dla środowiska,
- mniejszy rozmiar kabla,
- wysoka temperatura pracy (do 90°C).

Wady:

- wrażliwość na zmianę polaryzacji napięcia.



Rys. 9. Przykłady konstrukcji kabli HVDC w aplikacji morskiej oraz lądowej [4, 5]

OBCIĄŻALNOŚĆ DŁUGOTRWAŁA

Dopuszczalny prąd, który może długotrwale przepływać w żyłce roboczej kabla bez spowodowania przekroczenia dopuszczalnej temperatury pracy izolacji. Metodę jego otrzymywania opisano w serii norm międzynarodowych IEC 60287.

W przypadku kabli HVDC o izolacji XLPE należy równolegle podczas wyznaczania dopuszczalnej obciążalności wziąć pod uwagę zjawisko odwrócenia się pola elektrycznego w izolacji kabla na skutek wzrostu jego temperatury.



IEC 60287-1-1

Edition 3.0 2023-05
COMMENTED VERSION

INTERNATIONAL STANDARD



Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –
General

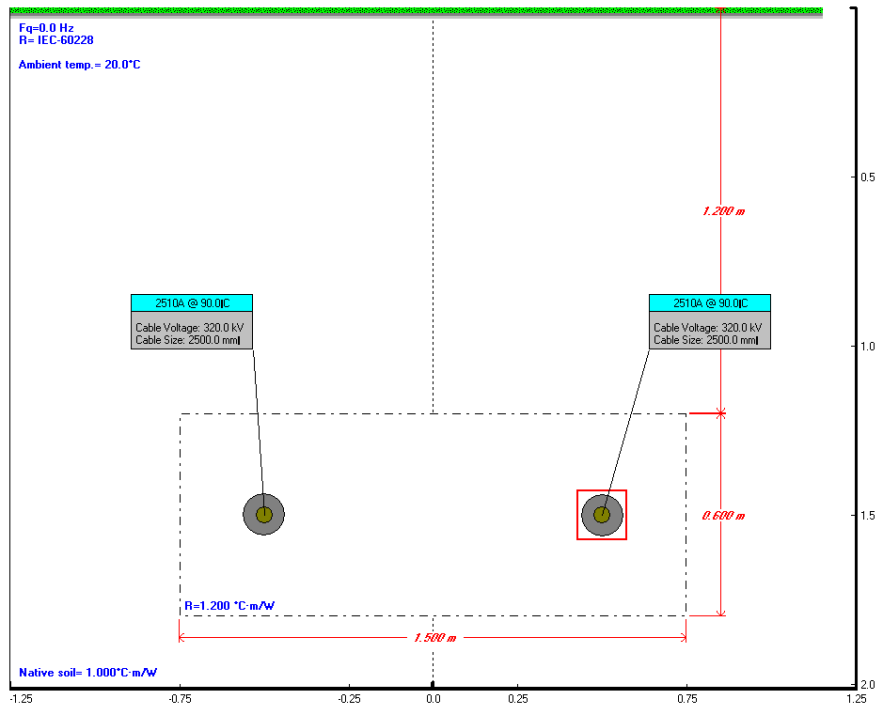
INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

ICS 29.060.20

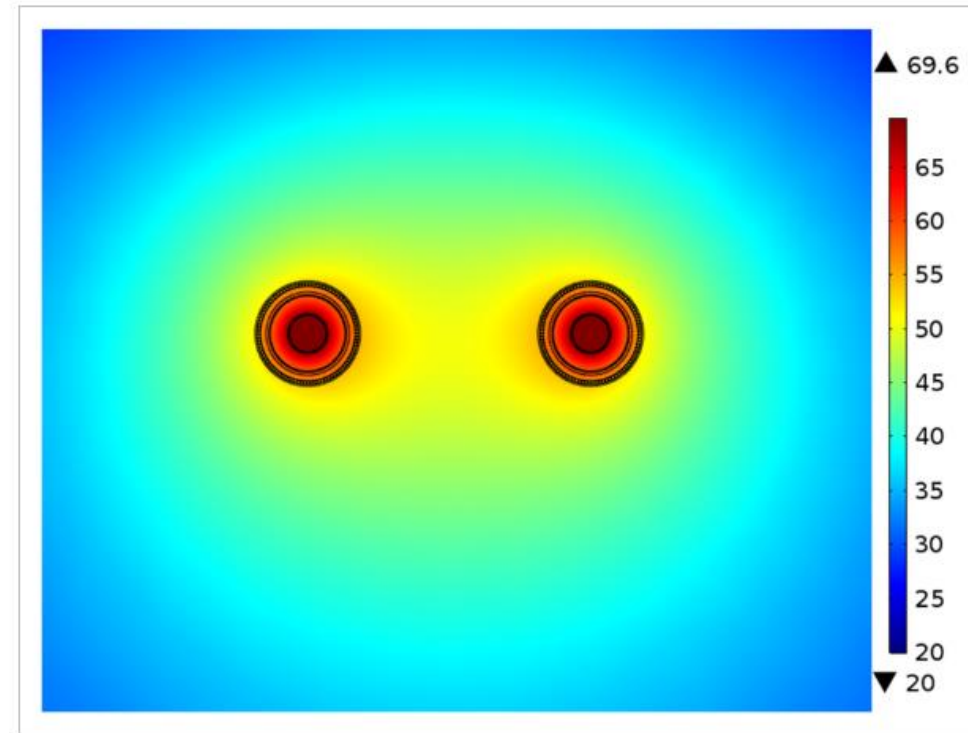
ISBN 978-2-6322-7099-2

© Registered trademark of the International Electrotechnical Commission

Rys. 10. Norma IEC 60287-1-1[6]

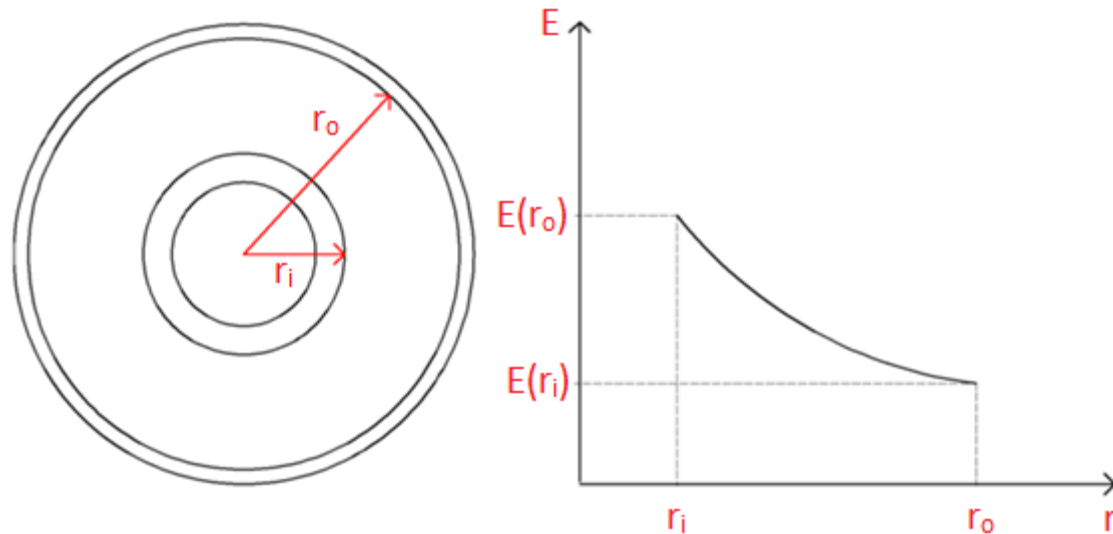


Rys. 11. Przykład analizy wartości dopuszczalnego obciążenia dla linii kablowej HVDC przy wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania (zgodnie z IEC 60287)



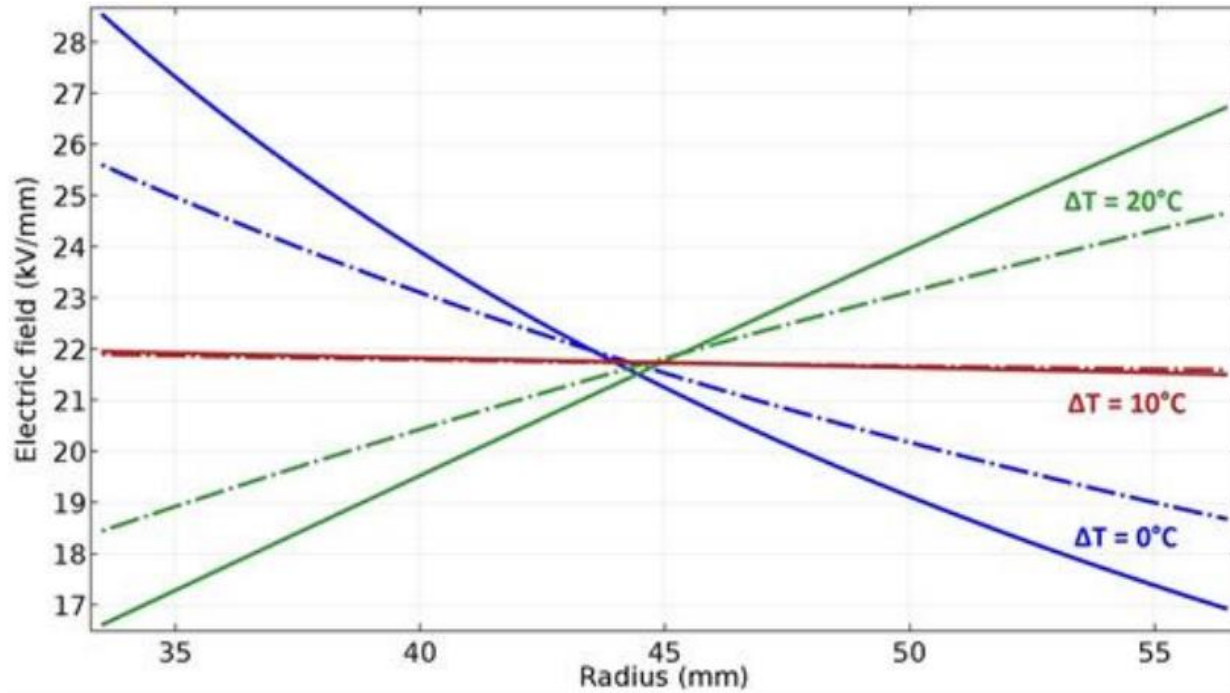
Rys. 12. Przykład analizy wartości dopuszczalnego obciążenia dla linii kablowej HVDC przy wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania (metoda FEM)

INWERSJA POLA ELEKTRYCZNEGO



$$E_{AC}(r) = \frac{U_0}{r \cdot \ln(r_o/r_i)} \quad (1)$$

Rys. 13. Rozkład pola elektrycznego w izolacji kabla HVAC



Rys. 14. Rozkład pola elektrycznego w izolacji kabla HVDC [7]

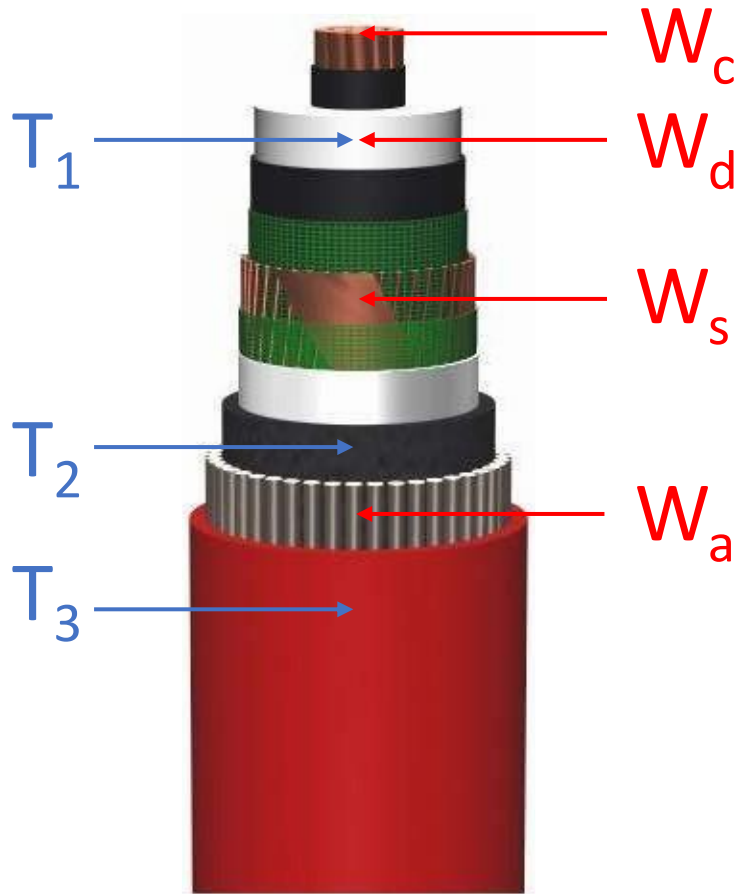
$$\rho = \rho_0 \exp(-a \cdot \theta) \exp(-b \cdot E) \quad (2)$$

$$E_{DC}(r) = \frac{\delta \cdot U_0 \cdot (r/r_0)^{\delta-1}}{r_0 \cdot (1 - (r_i/r_0)^\delta)} \quad (3)$$

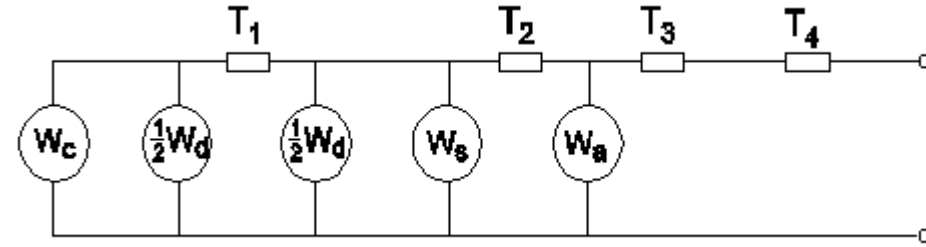
$$\delta = \frac{A+B}{1+B} \quad (4)$$

$$A = \frac{a \cdot \Delta\theta_i}{\ln(r_o/r_i)} \quad (5)$$

$$B = \frac{b \cdot U_0}{r_o - r_i} \quad (6)$$

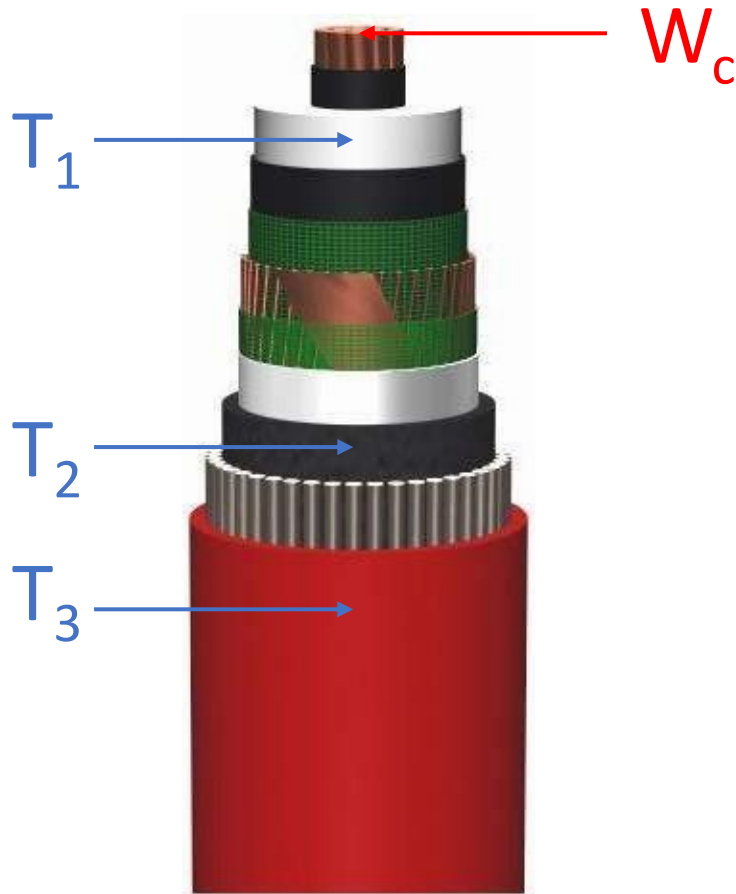


Rys. 15. Źródła strat ciepła i opory cieplne kabla HVAC [8]

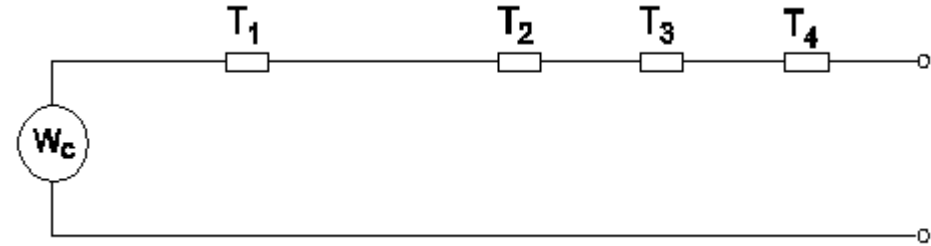


Rys. 16. Reprezentacja konstrukcji kabla HVAC w formie obwodu cieplnego

$$I_{AC} = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot (0,5 \cdot T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4))}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}} \quad (7)$$



Rys. 17. Źródła strat ciepła i opory cieplne kabla HVDC



Rys. 18. Reprezentacja konstrukcji kabla HVDC w formie obwodu cieplnego

$$I_{DC} = \sqrt{\frac{\Delta\theta - \Delta\theta_p}{R' \cdot T_1 + n \cdot R' \cdot T_2 + n \cdot R' \cdot (T_3 + T_4)}} \quad (8)$$

$$\Delta\theta_i = W_c \cdot T_{1i} \quad (9)$$

Kryteria poprawności doboru kabla HVDC

$$I_{DC} \geq I \quad (10)$$

$$\Delta\theta_i \leq \Delta\theta_{max} \quad (11)$$

Wymagany prąd I określa się na bazie wymaganej mocy, napięcia znamionowego połączenia oraz typu systemu HVDC.

Dopuszczalny spadek temperatury na izolacji $\Delta\theta_{max}$ określa producent systemu kablowego na bazie przeprowadzonych badań typu oraz badań prekwalityfikacyjnych (według IEC 62895 [9] lub CIGRE TB 496 [10])

Parametry kabla HVDC

$$R' = R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (\theta - 20)) \quad (12)$$

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_c} \right) \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{\rho_2}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_2}{D_s} \right) \quad (14)$$

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_3}{D_a} \right) \quad (15)$$

Wpływ otoczenia

$$T_4 = \frac{\rho_4}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(u_1 + \sqrt{u_1^2 - 1} \right) \quad (16)$$

$$u_1 = \frac{2 \cdot L}{D_e} \quad (17)$$

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{p1} + \Delta\theta_{p2} + \dots + \Delta\theta_{pn} \quad (18)$$

$$\Delta\theta_{p1} = \frac{\rho_4}{2 \cdot \pi} \cdot W_k \cdot \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_k} \right) \quad (19)$$

Spadek temperatury na izolacji

$$T_{1i} = \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_i} \right) \quad (20)$$

$$W_c = I_{DC}^2 \cdot R' \quad (21)$$

HYSE



Dziękuję za uwagę

HIGH VOLTAGE SYSTEMS ENGINEERING
HIGH VOLTAGE SYSTEMS ENGINEERING

Źródła:

[1] M. Ardelean, P. Minnebo, HVDC Submarine power cables in the world, JRC, 2015.

[2] Materiały DNV.

[3] N. Frisk, R. Gaspari, E. Doedens, Qualification of 400 and 525 kV HVDC XLPE cable systems including a multitude of accessory configurations, JICABLE, 2019.

[4] Materiały PRYSMIAN.

[5] Materiały NKT.

[6] IEC 60287, Electric cables - Calculation of the current rating, 2023.

[7] F. Mauseth, H. Haugdal, Electric field simulations of high voltage DC extruded cable systems, Norwegian University of Science and Technology, 2017.

[8] Materiały TFK.

[9] IEC 62895, High voltage direct current (HVDC) power transmission - Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications - Test methods and requirements, 2017.

[10] CIGRE TB 496, Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV