

# 해상풍력단지용 해저케이블의 실시간 온도 모니터링 기술

유희석<sup>ID</sup>, 서진교

비전플러스

## Real-time Temperature Monitoring Technology for Offshore Wind Farm Submarine Cables

Hee-Suk Ryoo and Jin-Kyo Seo

Visionplus, Gyeonggi 13572, Korea

(Received May 30, 2025; Revised July 7, 2025; Accepted July 8, 2025)

**Abstract:** With the ongoing rise in renewable energy demand, offshore wind farms are rapidly expanding, increasing the need for advanced development and diagnostic techniques for submarine cables. These cables are essential for efficient and reliable power transmission. A critical issue with these submarine cables is the formation of internal hot spots, which can deteriorate the insulation's performance and negatively impact the overall reliability of offshore wind energy infrastructure. This research focuses on developing an innovative real-time monitoring system to detect hot spots within submarine cable insulation under varying electrical loads. Experimental tests were conducted on a 66 kV-grade wet-type submarine cable specifically designed for offshore wind applications, applying incremental current loads ranging from 200 A to 500 A. Temperature changes within the insulation due to the generated heat were continuously monitored using Distributed Temperature Sensing (DTS). Additionally, to evaluate the DTS system's precision, repeatability, and overall reliability, the measured temperatures were compared against values obtained from validated spot-type sensors. Experimental results showed a discrepancy of less than 1% between DTS and spot-type sensor measurements at a reference temperature of 60°C, demonstrating the high accuracy and reliability of the developed DTS-based monitoring system. The outcomes of this study suggest that the proposed monitoring system can significantly enhance the capability for early detection and continuous monitoring of hot spots, thereby improving the operational reliability of submarine cables employed in offshore wind energy installations.

**Keywords:** Offshore wind farm, Cable, DTS, Temperature, Precision

### 1. 서론

전 세계적으로 친환경 에너지에 대한 관심이 커지면서 해상풍력단지가 빠르게 확산되고 있다 [1]. 이에 따라 해상에서 생산된 전력을 안정적이고 효율적으로 육상으로 이송하기 위한 해저케이블 기술의 중요성도 더욱 부각되고

있으며, 이와 관련된 진단 기술 개발 또한 활발히 진행 중이다.

케이블의 핵심 이슈 중 하나는 절연체 내부에 발생하는 국부적 과열 현상인 핫스팟(hot spot)이다 [2]. 이러한 핫스팟은 과전류에 의한 열적 스트레스나 절연체의 불균일성 등으로 인해 발생하며, 절연 성능을 저하시켜 케이블 전체의 신뢰성을 위협할 수 있다. 따라서 케이블의 온도를 실시간으로 모니터링할 수 있는 기술은 케이블의 열화 방지와 장기적 신뢰성 확보 측면에서 필수적이다 [3-5].

이에 본 연구에서는 해상풍력용 해저케이블을 대상으로, 전류 부하 조건에 따라 절연체 내에서 발생하는 온도

✉ Hee-Suk Ryoo; [hsryoo20@gmail.com](mailto:hsryoo20@gmail.com)

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상승을 실시간으로 감지할 수 있는 OTDR (optical time domain reflectometry) 기반 온도 모니터링 시스템을 적용하였다. 실험 대상은 66 kV급 wet-type 해상풍력용 해저케이블이며, 200 A부터 500 A까지 단계적으로 전류를 인가하면서 절연체 내부의 온도 변화를 측정하였다. 또한 OTDR 측정값의 신뢰성 확보를 위해 기존의 집중소자 (spot-type 센서)를 사용한 결과와 비교하여 정밀도와 재현성을 검증하였다.

실험 결과, 기준 온도인 60°C에서 OTDR과 집중소자 간의 온도 측정값 차이는 0.15%로 나타났으며, 이를 통해 개발된 OTDR 기반 모니터링 시스템의 높은 정확도와 신뢰성을 확인할 수 있었다. 본 기술은 해상풍력단지에서 사용되는 해저케이블의 상태를 실시간으로 진단하고 핫스팟을 조기에 탐지하는 데 활용될 수 있으며, 장기적인 운영 안정성과 설비 신뢰성 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 해상풍력 해저케이블

해상풍력단지는 플랫폼의 고정 여부에 따라 고정식과 부유식으로 구분되며, 이에 따라 적용되는 케이블 종류도 달라진다. 본 논문에서는 고정식 해상풍력단지를 고려하였으며, 고정식 해상풍력단지에 적용되는 케이블은 내부망과 외부망으로 구성되며, 이들 케이블은 플랫폼에 입상하여 고정된다 [6-8].

고정된 해상풍력단지용 해저케이블은 운전 중 부하에 따른 열적 스트레스, 전압 인가에 따른 전기적 스트레스, 조류, 바람, 파도, 세굴(scouring) 등 외부 환경에 의한 기계적 스트레스를 복합적으로 받게 된다 [9-11].

고정식 해상풍력용 해저케이블은 제조 공장에서 생산된 후 항구로 운반되어 선적되고, 최종적으로 해상풍력단지에 포설되는 과정을 거친다. 이 과정에서 케이블의 무게는 포설 및 운송 효율성과 비용에 중요한 영향을 미친다. 이에 따라, 기존의 중성선 연피구조를 가진 Dry type 케이블 대신, 보다 가벼운 동선 또는 동테이프 구조를 갖는 Wet type 케이블로 전환이 진행되고 있다.

본 연구에서는 Wet type 해상풍력용 해저케이블을 대상으로 부하 운동에 따른 온도 변화를 측정하고, 이를 바탕으로 케이블 시스템의 신뢰성을 분석하였다.

### 2.2 케이블 절연체에서 핫스팟

전력케이블의 운전 중 절연체 내부에서는 국부적인 온도 상승 현상이 발생할 수 있으며, 이를 핫스팟이라 정의할 수 있다. 핫스팟은 케이블의 특정 국소 부위에서 비정상적으로 고온이 형성되는 현상으로, 케이블 시스템의 신뢰성에 중대한 영향을 미친다.

핫스팟은 다양한 전기적, 열적, 기계적 요인에 의해 발생한다. 표 1은 핫스팟의 발생원인을 나타낸다 [12,13].

핫스팟에 의해 절연체는 열화되며, 절연성능은 급격히 저하된다. 이로 케이블의 절연 파괴로 이어질 수 있다. 특히 고전압 및 대전류 환경에서는 국부적인 온도 상승이 전체 시스템의 장기 운전 신뢰성 및 수명에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

특히, 광섬유 기반 온도 감지 시스템은 케이블 내부 온도 분포를 실시간으로 모니터링할 수 있어 핫스팟 발생의 초기 징후를 효과적으로 파악할 수 있다.

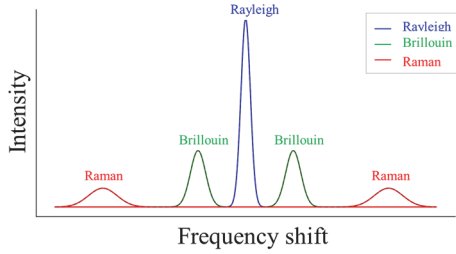
Table 1. Causes of hot spot formation inside power cable insulation.

| Cause                 | Specific causes   | Damage   |
|-----------------------|---|--|
| Electrical            | Defects, partial discharge, local electric field concentration              | Heat generation due to local electric field concentration      |
|                       | Overcurrent, cooling failure, external ambient temperature rise             | Increased thermal stress on insulation due to overheating      |
| Mechanical & Material | Mechanical damage, insulation material non-uniformity (voids, contaminants) | Local heat accumulation caused by reduced thermal conductivity |

### 2.3 OTDR 기술 및 원리

OTDR (optical time domain reflectometer)을 응용한 분산 센싱 기술은 광섬유 산란 현상을 이용하여 케이블 전체의 온도를 실시간으로 모니터링할 수 있는 장점을 지니고 있다. 일반적으로 온도 측정에는 Raman 산란이 활용되었으나 광손실로 인한 오차가 크고 접촉측의 영향을 많이 받아, 본 연구에서는 Brillouin 대역을 사용하여 측정하였다. 그림 1은 DTS 기반 광섬유 내 산란 특성을 나타낸다 [14].

DTS는 광섬유에 주입된 광펄스가 섬유 내부의 분자와 상호작용하면서 발생하는 산란광을 분석하여 온도를 측정한다. 또한 산란광의 시간 지연을 이용하여 온도 변화가 발생한 위치를 파악할 수 있다.



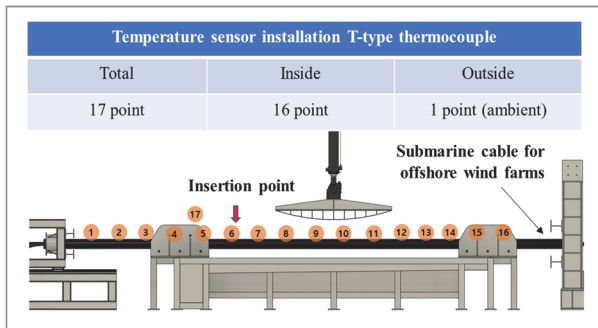
**Fig. 1.** DTS based analysis of scattering characteristics in optical fibers.

### 3. 연구 방법

#### 3.1 실험 설계

해상풍력용 Wet type 해저케이블의 온도 상승에 따른 OTDR 기반 온도 측정의 정밀도 평가를 위하여, 열 집중 소자인 T-type 열전대선을 케이블 내부에 설치하였다. 이후, 동일한 위치에 매립된 광케이블을 통해 온도를 측정하고, 두 센서 간의 온도 데이터를 비교·분석하였다.

그림 2는 시험 대상인 해상풍력용 Wet type 해저케이블



**Fig. 2.** Installation locations of T-type thermocouples in submarine cables.



**Fig. 3.** Temperature sensor insertion section after dismantling the submarine cable.

이며, 케이블 내부 16개 측정 포인트와 외기 온도 확인을 위한 외부 1개 포인트 등 총 17개의 T-type 열전대선 설치 위치이다.

그림 3은 케이블 내부에 집중소자 형태의 열전대선을 설치하기 위해, 케이블을 절개하고 내부에 삽입하는 과정을 보여준다. 이후, 케이블에 전류를 인가하여 저항 발열을 유도함으로써, 온도 상승을 발생시킨 뒤, 두 측정 방식 간의 온도 응답 특성과 정밀도를 비교 분석하였다.

#### 3.2 측정 조건

집중소자와 광케이블을 이용한 온도 측정을 위해, 케이블의 A상, B상, C상에 전류를 200 A에서 최대 500 A까지 단계적으로 인가하여 내부 온도를 25°C에서 60°C까지 상승시키는 가열 시험을 수행하였다. 온도를 25°C에서 60°C로 설정한 이유는 케이블의 운전 부하 조건인 경부하 및 중부하 상태를 고려했기 때문이다.

이 과정에서 각 온도 구간별로 T-type 열전대선과 광케이블 센서를 통해 측정된 온도 값을 기록하고, 두 센서 간의 편차를 비교·분석하였다.

표 2는 본 시험에서 적용된 해저케이블의 가열 조건을 정리한 것이다.

**Table 2.** Heating conditions for the cable.

| No. | Condition | Note  |
|-----|-----------|---|
| 1   | 25°C      |   |
| 2   | 40°C      | Comparing temperature measurements between thermocouple and optical fiber |
| 3   | 50°C      |   |
| 4   | 60°C      |   |

#### 3.3 데이터 수집

케이블 가열 이후의 데이터 수집은 서로 다른 두 개의 측정 프로그램을 이용하여 수행되었으며, 각각의 데이터를 기반으로 분석을 진행하였다. 집중소자를 통해 측정된 온도와 케이블에 인가된 전류 값은 고정된 GL 840 데이터 수집 장비를 이용하여 1초 간격으로 샘플링 하였다. 반면, 광케이블을 통한 온도 측정은 DTS 전용 소프트웨어를 통해 수행하였다. 그림 4는 해저케이블의 전류 및 온도 측정 시스템을 나타낸 것으로, 상단 이미지는 GL 840 장비의 데이터 수집 화면이며, 하단 이미지는 DTS 전용 프로그램의 측정 화면이다.

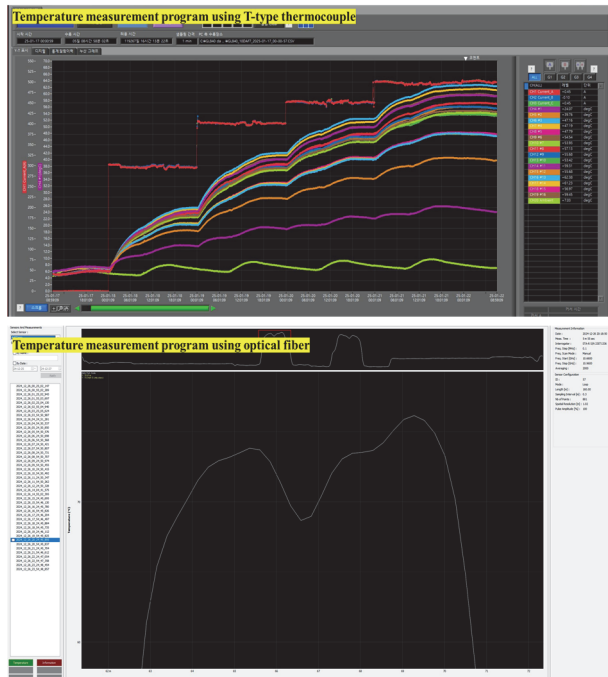


Fig. 4. Current and temperature monitoring program for submarine cable.

## 4. 실험 결과

### 4.1 전류에 따른 온도 측정

그림 2와 같이, 해상풍력용 해저케이블 내부에 설치된 16개의 측정 포인트 중 13번째 지점이 광케이블 최고온도 측정 위치와 일치하여, 해당 지점을 기준으로 온도 데이터를 비교하였다.

케이블의 A, B, C상에 유도 전류를 인가하여 가열을 진행하였으며, 초기 시험 조건은 25°C, 40°C, 50°C, 60°C의 목표 온도로 설정되었다. 그러나 전류를 수동으로 상승 및 하강시키는 방식은 목표 온도를 도달시키는 데에는 일정한 오차를 야기했다. 그 결과, 실제 포화 시점에서의 온도는 각각 약 42°C, 52°C, 62°C로 측정되었으며, 이 온도 구간을 기준으로 열전대선과 광케이블 간의 온도 편차를 계산하였으며, 1°C 이내로 나타났다. 표 3은 해저케이블의 A, B, C상에 인가된 전류에 따라, 열전대선과 광케이블을 통해 측정된 온도 결과를 정리한 것이다.

### 4.2 OTDR의 신뢰성 평가

OTDR 원리를 기반으로 한 DTS 시스템을 통해, 광케이

Table 3. Temperatures measured by thermocouples and optical fiber according to the current applied to phases of the submarine cable.

| Current of cables (A) |         |         | Temperature (°C)    |               |
|-----------------------|---------|---------|---------------------|---------------|
| Phase A               | Phase B | Phase C | Thermo couple (#13) | Optical cable |
| 296.40                | 297.55  | 297.55  | 25.40               | 25.50         |
| 295.45                | 296.75  | 296.75  | 25.37               | 25.61         |
| 295.75                | 297.00  | 296.85  | 25.43               | 25.57         |
| 402.65                | 401.95  | 402.75  | 42.06               | 42.17         |
| 400.70                | 400.15  | 400.50  | 42.06               | 42.18         |
| 400.50                | 400.25  | 400.70  | 42.04               | 42.23         |
| 450.95                | 450.30  | 450.90  | 52.41               | 52.31         |
| 452.40                | 452.50  | 453.55  | 52.44               | 52.57         |
| 450.80                | 451.15  | 451.20  | 52.54               | 52.84         |
| 502.50                | 502.55  | 503.85  | 62.80               | 63.02         |
| 503.90                | 503.45  | 504.35  | 62.79               | 62.85         |
| 502.60                | 501.30  | 503.50  | 62.77               | 62.77         |

Table 4. Temperature deviations, average and precision between the t-type sensor and optical cable under various cable temperature conditions.

| Condition (°C) | Thermo couple (°C) | Optical cable (°C) | Deviation                          |              | Precision (%) |
|----------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|--------------|---------------|
|                |                    |                    | Thermo couple - Optical cable (°C) | Average (°C) |               |
| 25             | 25.40              | 25.50              | 0.10                               | 0.16         | 0.64          |
|                | 25.37              | 25.61              | 0.24                               |              |               |
|                | 25.43              | 25.57              | 0.14                               |              |               |
| 42             | 42.06              | 42.17              | 0.11                               | 0.14         | 0.33          |
|                | 42.06              | 42.18              | 0.12                               |              |               |
|                | 42.04              | 42.23              | 0.19                               |              |               |
| 52             | 52.41              | 52.31              | 0.10                               | 0.18         | 0.34          |
|                | 52.44              | 52.57              | 0.13                               |              |               |
|                | 52.54              | 52.84              | 0.30                               |              |               |
| 62             | 62.80              | 63.02              | 0.22                               | 0.09         | 0.15          |
|                | 62.79              | 62.85              | 0.06                               |              |               |
|                | 62.77              | 62.77              | 0.00                               |              |               |

블로부터 측정된 온도와 집중소자로부터 측정된 온도를 비교 및 분석하였다. 분석은 기준 온도 25°C, 42°C, 52°C, 62°C에서 수행되었으며, 각 온도 조건에서 1분 간격으로 3회 반복 측정된 데이터를 바탕으로 편차, 평균 그리고 기준 온도 대비 평균 편차의 비율을 산출하여 시스템의 정확도를 평가하였다.

측정 결과, 25°C 기준에서는 평균 편차가 0.16°C, 정확도는 0.64%, 42°C 기준에서는 편차 0.14°C, 정확도 0.33%, 52°C 기준에서는 편차 0.18°C, 정확도 0.34%, 62°C 기준에서는 편차 0.09°C, 정확도 0.15%로 측정되었다. 이러한 결과는 모든 조건에서 기준 온도의 1% 이내 정밀도를 보

이며, 매우 높은 신뢰도를 나타낸다. 표 4는 케이블 온도 조건별로 집중소자와 광케이블 간의 온도 편차, 평균 온도, 그리고 정확도를 정리한 것이다.

## 5. 논의

본 연구에 적용된 DTS 시스템은 약 1 m 수준의 공간 분해능과 0.1°C 단위의 온도 감지 성능을 확보하고 있어, 케이블 절연체 내부에서 발생할 수 있는 핫스팟의 위치를 정밀하게 탐지하는 데 적합한 것으로 판단된다. 사용된 광케이블은 전력케이블 제조 공정 중 공장에서 삽입되어 일체화된 구조로 제작되었기 때문에, 기계적 안정성 및 내구성 측면에서도 현장 적용에 무리가 없는 것으로 평가된다.

DTS 시스템의 신뢰성을 검증하기 위해, T-type 열전대선을 이용한 집중소자 방식의 온도 측정 결과와 비교 실험을 수행하였다. 그 결과, 모든 온도 조건에서 두 측정 방식 간의 편차는 기준 온도의 1% 이내로 나타났으며, 이를 통해 DTS 시스템이 집중소자와 동등한 수준의 정밀도와 신뢰성을 갖추고 있음을 확인하였다.

일반적으로 Brillouin 산란 기반 DTS 시스템은 고온 영역에서 산란광 강도가 증가하여 상대적으로 고온일수록 온도 감지 정확도가 높아지는 경향이 있다. 이는 본 실험에서도 확인된 바와 같이 온도 상승에 따라 편차가 작아진 결과와 부합한다. 향후에는 저온 해수 조건을 모사한 실험 환경에서의 검증을 통해 DTS 시스템의 적용성을 보다 정밀하게 평가할 예정이다.

DTS는 광케이블 기반의 분포형 온도 측정 방식으로, 케이블 전체 구간에 걸쳐 연속적인 온도 모니터링이 가능하다는 강점을 지닌다. 이는 해상풍력용 해저케이블에서 핫스팟 발생을 조기에 탐지하고 열적 이상을 실시간으로 감지할 수 있는 효과적인 솔루션으로 작용한다. 특히, 본 연구는 66 kV급 해상풍력용 Wet type 해저케이블을 실험 대상으로 설정하여 DTS 시스템의 성능을 검증하였다는 점에서 기존 연구와 차별화되는 기술적 의의를 가진다. Wet-type 케이블은 절연체가 수분에 직접 노출될 수 있는 구조적 특성상 열적 스트레스에 더욱 민감하므로, 이를 고려한 온도 모니터링 기술의 개발은 현장 적용성을 높이고 케이블의 열화 예방에 실질적인 기여를 할 수 있다.

따라서 본 연구에서 적용한 DTS 기반 온도 감시 기술은 해상풍력단지의 해저케이블 상태를 정밀하고 실시간으로 모니터링할 수 있는 유효한 수단으로, 향후 장기적 신뢰성 확보와 예방 유지보수 전략 수립에 핵심적인 역할을 수행할 것으로 기대된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 해상풍력용 66 kV Wet-type 해저케이블에 DTS (distributed temperature sensing) 시스템을 적용하여 실시간 온도 모니터링의 정밀도와 신뢰성을 평가하였다. T-type 열전대선과의 비교 결과, 기준 온도의 1% 이내의 편차를 보이며 DTS 시스템의 정확도를 입증하였다.

DTS는 케이블 전 구간의 온도 분포를 연속적으로 측정할 수 있어, 핫스팟 조기 감지 및 열화 예방에 효과적이며, 특히 Wet-type 해저케이블과 같이 열적 스트레스에 민감한 구조에 적합한 기술이다. 본 연구는 DTS의 현장 적용 가능성을 실증적으로 확인하였으며, 향후 해저케이블의 운전 신뢰성 향상과 예방 정비 체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20213000000020, 해상풍력단지 해저 전력망 구축을 위한 핵심기자재 및 평가 기술 개발).

## ORCID

Hee-Suk Ryoo

<https://orcid.org/0009-0006-8414-8388>

## REFERENCES

- [1] B. S. Kim, *Green Energy Technol. Insight*, **12**, 10 (2021).
- [2] B. Perović, D. Klimenta, D. Tasić, N. Raičević, M. Milovanović, M. Tomović, and J. Vukašinović, *IET Gener. Transm. Distrib.*, **16**, 2309 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12448>
- [3] Z. P. Zhang, S. X. Meng, J. K. Zhao, and W. B. Rao, *Appl. Mech. Mater.*, **543**, 621 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.621>
- [4] E. Rochat, S. Chin, and F. Ravet, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1102**, 012038 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1102/1/012038>
- [5] G. Bolognini, J. Park, M. A. Soto, and N. Park, *Meas. Sci. Technol.*, **18**, 3211 (2007).  
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/10/S24>
- [6] J. A. Pérez-Rúa and N. A. Cutululis, *Wind Energy Sci.*, **7**, 925

- (2022).  
doi: <https://doi.org/10.5194/wes-7-925-2022>
- [7] X. Ding, Y. Du, X. Shen, Q. Wu, X. Zhang, and N. D. Hatziargyriou, *arXiv preprint*, arXiv:2409.12873 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.12873>
- [8] S. Li, Y. Ke, L. Xie, Z. Zhao, X. Huang, Y. Wang, and Z. Wang, *J. e-Polym.*, **23**, (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-8089>
- [9] S. W. Lee, J. W. Choe, and H. J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 570 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.5>
- [10] DNV, *Recommended Practice DNV-RP-J301: Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications* (2014).
- [11] DNV GL, *Recommended Practice DNVGL-RP-0360: Subsea Power Cables in Shallow Water* (2016).
- [12] X. Ge, F. Fan, M. J. Given, and B. G. Stewart, *Energies*, **17**, 1062 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.3390/en17051062>
- [13] D. Klimenta, D. Tasić, B. Perović, J. Klimenta, M. Milovanović, and L. Anđelković, *Electr. Eng.*, **101** 1295 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00867-w>
- [14] A. Pieracci, J. Nanni, G. Tartarini, and M. Lanzoni, *Sensors*, **24**, 2669 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.3390/s24092669>