

해상풍력단지 J-Tube 내부 해저케이블의 절연 특성 평가

이승원, 최진욱, 김해종 

한국전기연구원 전력케이블연구센터

Insulation Characteristics Evaluation of Submarine Cables Inside the J-Tube of Offshore Wind Farms

Seung-Won Lee, Jin-Wook Choe, and Hae-Jong Kim

Power Cable Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 51543, Korea

(Received July 28, 2023; Revised August 11, 2023; Accepted August 11, 2023)

Abstract: Demand and necessity for eco-friendly offshore wind farms have been increasing. Research on submarine cables is constantly being considered for a reliable and stable power transmission. This study aimed to evaluate the thermal aging characteristic of submarine cables inside the J-tube of offshore wind farms. In this study, a submarine cable was set in three sections: The first is the part exposed to the air above the sea level at high temperature. The second is the section exposed to repeated temperature fluctuation as the sea level rises and falls. The third is the part submerged at low temperature below the sea level. Aged samples were tested by using the method of electrical evaluation to obtain insulation characteristics. The experimental results show that the dielectric breakdown of the sample with temperature fluctuation was 7% lower than the sample with a constant temperature; thereby, demonstrating that the section where the temperature fluctuation occurred in the submarine cables was weaker than the other. The sections of submarine cable with temperature fluctuations are believed as a weak point during operation; therefore, this part should be monitored preferentially.

Keywords: Offshore wind farm, Submarine cable, J-tube, Dielectric breakdown, Temperature fluctuation

1. 서론

파리기후변화협약 이후 온실가스 감축을 위해 태양광, 풍력 등 신재생에너지에 대한 투자가 확대되고 있다. 세계 풍력발전 시장은 지난 10년간 197 GW (2010년)에서 743 GW (2020년)로 증가했고 해상풍력 시장은 3 GW (2010년)에서 34 GW (2020년)로 연평균 30% 이상의 성장세를 보였다 [1].

현재 설치되는 대부분의 해상풍력은 모노파일, 자켓 등의 하부 구조물에 설치되는 고정식이고, 해저케이블은 하

부 구조물에 고정되어 있는 J-tube 내부로 설치되어 플랫폼에 hang-off clamp로 고정된다. 해상풍력단지용 해저케이블은 해상풍력 발전기와 해상변전소를 연결하는 내부 전력망(inter array cable), 해상변전소와 육상변전소를 연결하는 외부 전력망(export cable)으로 구분되며, 모두 J-tube를 통해 인입되어 설치된다 [2].

J-tube 내부에 설치된 해저케이블은 항상 공기 중에 노출되는 구간, 조수간만의 차에 의해 침수와 공기 중 노출을 반복하는 구간, 완전히 해수에 침수되는 구간으로 나뉘어진다. 공기 중에 노출된 구간은 높은 온도로 일정하게 유지되며, 해수의 상승 및 하강에 의한 침수 및 공기 중 노출을 반복하는 구간은 주기적으로 온도 변화가 발생하며, 해수에 침수되는 구간은 해저환경으로 낮은 온도로 일정하게

✉ Hae-Jong Kim; hjkim@keri.re.kr

Copyright ©2023 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.

유지된다 [3,4].

J-tube 내부 해저케이블의 상이한 온도영역은 운전 중 절연체의 성능을 저하할 수 있어, 해상풍력단지 운영 및 관리 신뢰성에 영향을 미친다. 이러한 이유로 J-tube 내부 해저케이블 절연체의 온도 조건에 따른 절연 특성평가가 필요하다. 본 논문에서는 J-tube 내부 해저케이블의 절연체를 열적 열화하고 절연 파괴 강도 시험 수행, 체적저항률 및 $\tan\delta$ 를 측정하여 절연 특성을 평가하였다.

2. 이론

2.1 J-tube 내부 해저케이블

해상풍력단지 내부 전력망은 풍력발전기로부터 생산된 전력을 해상변전소로 전송하기 위함이다. 내부 전력망은 풍력발전기 및 해상변전소를 연결하기 위하여 해저에 포설된 부분과 J-tube에 인입되어 플랫폼에 고정되는 부분으로 구분된다.

J-tube 내부의 해저케이블은 그림 1과 같이 위치에 따른 상이한 온도 영역을 갖는다.

- SEC. 1: 공기 중에 노출되어 높은 온도 구간
- SEC. 2: 해수의 상승 및 하강으로 인한 온도 변화 구간
- SEC. 3: 해수에 침수되어 낮은 온도 구간

2.2 절연재료 특성 평가 방법

케이블 절연재료의 성능을 평가하는 방법으로는 절연 파

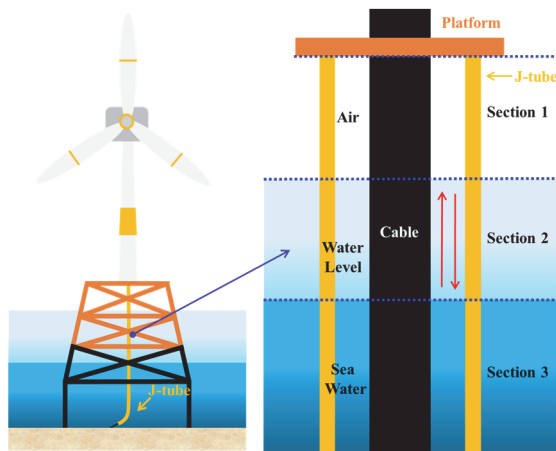


Fig. 1. Submarine cable inside J-tube of offshore wind farm.

괴 강도 시험과 체적저항률 및 $\tan\delta$ 측정 등이 있다 [5]. 표 1은 케이블 절연재료의 특성 평가 방법 및 관련 규격이다.

절연 파괴 강도 시험은 절연재료의 특성 변화 또는 편차를 검출하는 데 유용한 방법이다. 시험 방법은 절연재료를 고전압 전극과 접지 전극 사이에 위치시키고 일정 속도로 전압을 상승시켜 절연 파괴한다 [6,7].

체적저항률은 절연재료에 직류전압을 인가하여 접지 전극에 흐르는 저항성 전류 I_R 를 측정하며, 이로부터 계산된 전류밀도와 인가 전계의 관계로 나타낼 수 있다. 수식 1은 체적저항률 산출 수식이다 [7-9]. 수식 (1)에서 체적저항률 ρ 는 전도도 σ 의 역수로 나타낼 수 있으며, 단면적 A 에 따른 저항성 전류 I_R 를 나타내는 전류밀도 J 와 단위 길이 d 에 따른 직류전압 V 인 전계 E 의 관계로 나타낼 수 있다.

$\tan\delta$ 은 절연재료에 교류전압을 인가하여 측정되는 저항성 전류 I_R 와 용량성 전류 I_C 의 관계로 나타낼 수 있다. 수식 2 및 그림 2는 $\tan\delta$ 수식과 회로 및 벡터도이다 [10,11]. 수식 (2)에서 V 는 교류전압, R 은 저항, C 는 정전용량, ω 는 각속도를 나타낸다.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{E}{J} = \frac{AV}{I_R d} \quad (1)$$

$$DF = \tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V/R}{V/(1/\omega C)} = \frac{1}{RC\omega} \quad (2)$$

Table 1. Methods of insulation characteristics evaluation and test standards.

Method	Standard
Dielectric breakdown	ASTM D149, IEC 60243
Tan δ	IEC 62631-2-1
Volume resistivity	IEC 62631-3-1, ASTM D257

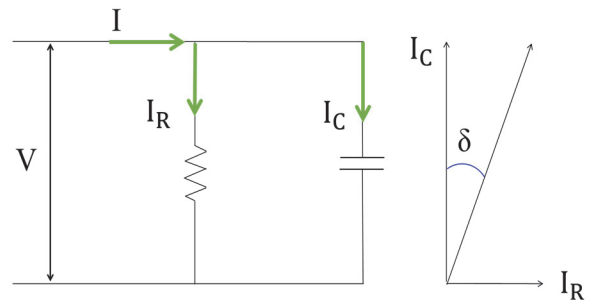


Fig. 2. Circuit and vector diagram for $\tan\delta$.

3. 실험

3.1 시험 대상

그림 3은 실제 해상풍력단지에 적용되는 66 kV dry type 3심 해저케이블의 개략도로 도체 크기는 600 mm², 절연체는 XLPE로서 두께 11 mm, 금속시스(metallic sheath)는 연피가 적용되었다. 또한, 케이블 3심이 연합되어 있고 외부에 아연도금 강선으로 아머층(steel wire armouring)이 있는 구조이다.

3.2 시험 샘플 제작

절연재료의 특성평가를 위해서는 IEC, ASTM 규격에서 요구하는 시험 샘플의 권장 치수를 만족해야 하며, 이는 얇은 시트 형태로서 가로, 세로 및 두께의 형식으로 나타낸다. 본 연구에서는 66 kV dry type 3심 해저케이블에서 XLPE 절연체만 채취하여 필링 후 시트 형태로 제작하였다.

그림 4는 절연 특성 평가를 위해 케이블로부터 시트 형태의 시험 샘플을 제작하기 위한 순서도이다. 온도에 따른 케이블 절연체의 열적 열화 특성을 이른 시일 내에 확인하

기 위하여 케이블이 아닌 샘플을 이용하였으며, 열적 열화 시험은 3번 과정에서 오븐을 사용하여 진행하였다. 열화 후 4번 과정을 통해 시트 형태의 시험 샘플로 제작하였다. 아래는 시험 샘플 제작을 위한 순서이다.

- 1) 66 kV dry type 해저케이블 케이블 절단
- 2) 케이블의 도체 및 시스 등을 제거
- 3) XLPE 절연체 채취 및 열적 열화
- 4) XLPE 절연체 필링
- 5) 시트 형태의 시험 샘플 제작

그림 5는 도체가 제거된 해저케이블 및 시트 형태의 시험 샘플의 사진을 나타낸다. 시험 샘플의 폭은 100 mm, 두께는 0.2~0.24 mm이다.

3.3 열적 열화 시험

J-tube 내부 해저케이블은 그림 1과 같이 상이한 3가지 온도 영역을 가지며, 이를 고려하여 XLPE 절연체의 열적 열화 온도 조건을 설정하였다.

그림 6은 케이블 절연체의 열적 열화 시험을 위한 1주기 동안의 온도 조건이며, 그림 7은 항온챔버를 이용한 케이

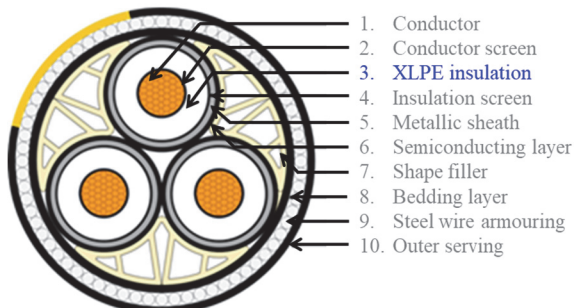


Fig. 3. Cross section of 66 kV three-core submarine cable.

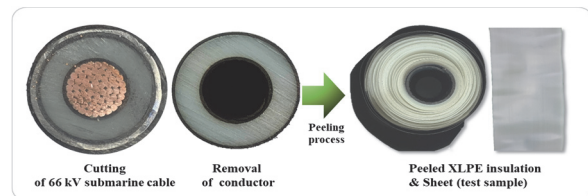


Fig. 5. Test samples in sheet form.

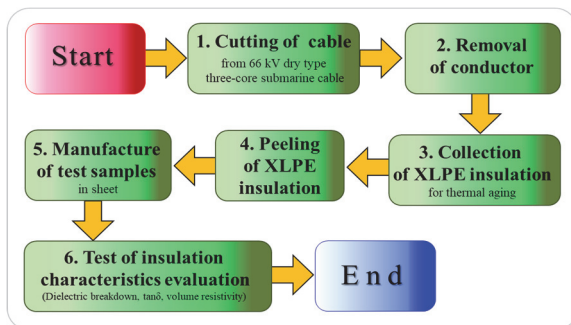


Fig. 4. Flow chart for manufacturing test samples in sheet form.

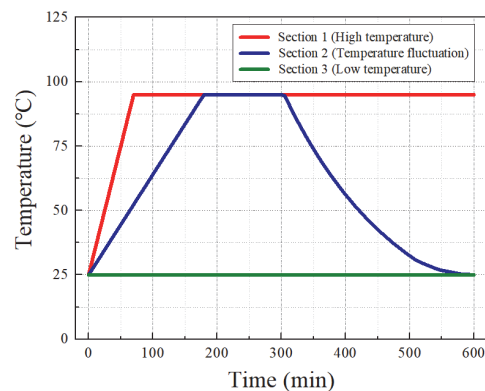


Fig. 6. Thermal aging conditions for 1 cycle.

블 절연체의 열적 열화 시험 구성이다. 온도 센서를 절연체 내부 및 외부에 설치하여 실시간으로 열적 열화 온도를 기록하였다. 표 2는 J-tube 내부 해저케이블의 위치에 따른 열적 열화의 온도 조건 및 세부 사항을 나타낸다. SEC. 1은 J-tube와 해저케이블 사이에 공기층의 단열 효과로 전체 구간에서 온도가 높은 구간으로 IEC 63026 heating cycle의 도체 최고 온도를 참조하여 열화 온도를 95°C로 설정하였다 [12]. SEC. 2는 주기적으로 해저케이블의 온도 변화가 발생하는 구간으로 해수의 상승과 하강을 고려하여 3시간 동안 95°C로 온도 상승, 2시간 95°C 온도 유지, 5시간 온도 하강의 열화조건을 설정하였다. SEC. 3은 해저구간의 해저케이블로서 저온상태 영역이므로 상온 25°C로 설정하였다.

3.4 절연 특성 측정 조건

그림 7과 같이 항온챔버를 이용하여 XLPE 절연체를 열적 열화하였고, 절연 특성 평가를 위하여 시트 형태의 시험 샘플로 제작하였다. 표 3은 절연 특성 평가 방법에 따른 측정 조건을 나타낸다.

시험 샘플의 절연 파괴 강도 시험은 IEC 60243 및

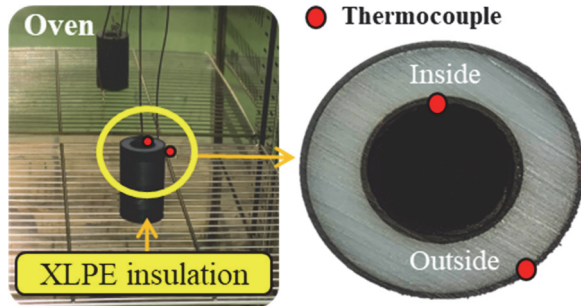


Fig. 7. Thermal aging test using oven.

Table 2. Aging conditions of the test sample according to the area of submarine cable inside J-tube.

Area	Condition of thermal aging	Period
SEC. 1	High temperature, 95°C	410 hours
SEC. 2	Temperature fluctuation 1 cycle = 10 hours (95°C temperature rise for 3 hours, hold for 2 hours, cooling for 5 hours)	82 cycles
SEC. 3	Low temperature, 25°C	-

ASTM D149를 준수하여 수행하였으며, 전극 표면의 방전을 방지하기 위하여 실리콘 오일에 전극을 담그고 수행하였다. 2 kV/s로 전압을 상승시켜 XLPE 시험 샘플의 절연 파괴 강도를 측정하였다. 절연 파괴 강도 시험을 위하여 시험전극은 금속 실린더 형태로 제작하였으며, 고전압 인가 전극의 지름은 25 mm, 접지 전극 75 mm로 설계하였다. 또한, 테프론 재질의 지지대를 제작하여 시험전극을 고정하였다. 그림 8은 IEC 60243 규격에서 제시하는 절연 파괴 강도 시험을 위한 전극을 나타낸다 [7].

Tanδ 측정은 IEC 62631-2-1을 참조하여 주파수 60 Hz의 100 V 교류전압을 인가하여 측정하였으며, 그림 9는 XLPE 절연체의 tanδ 측정 사진이다. 해당 장비는 프랑스 VETTER사의 SPC-DIGITAL LOSS FACTOR ANALYSIS이다.

Table 3. Measurement conditions according to methods of insulation characteristics evaluation.

Method	Measurement condition
Volume resistivity	Applied with 10 kV (DC) Measuring time of 1 min
Tanδ	Applied with AC 100 V (60 Hz)
Dielectric breakdown	Ramping test 2 kV/s (AC 60 Hz)

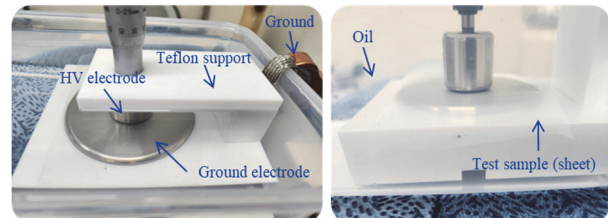


Fig. 8. Electrode for dielectric breakdown test.



Fig. 9. Measuring tanδ of XLPE insulation.

체적저항률은 IEC 62631-3-1 규격을 참조하여 10 kV 직류전압을 시험 샘플에 인가하고 1분 후의 저항성 전류를 취득하여 산출하였다. 그림 10은 체적저항률 측정 시스템이며, 고전압 및 접지 전극은 FRP 지지대를 통해서 고정하였다.

체적저항률 및 $\tan\delta$ 측정을 위한 시험전극은 고전압 인가 전극, 접지 전극 및 가드 전극으로 구성되는 3단자 방법을 적용하였다. 고전압 인가 전극의 지름은 100 mm, 접지 전극 76 mm, 가드 전극의 두께 6 mm, 가드 전극과 접지 전극 사이 간격은 6 mm로 설계하였다.

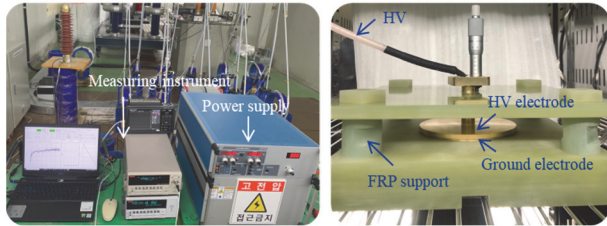


Fig. 10. Measuring system of volume resistivity.

Table 4. Insulation characteristics by aging conditions.

Method	SEC. 1	SEC. 2	SEC. 3
Volume resistivity (Ωm)	1.2×10^{15}	5.2×10^{14}	1.8×10^{15}
Tan δ (%)	0.049	0.061	0.037
Dielectric breakdown (kV/mm)	129.6	121.9	130.5

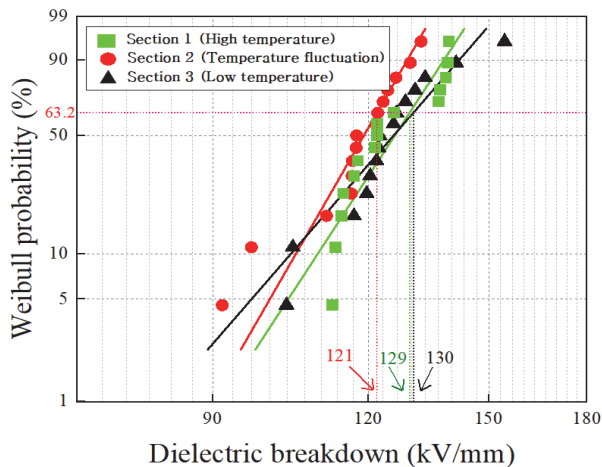


Fig. 11. Dielectric breakdown according to section.

4. 결과 및 토론

4.1 절연 특성 평가

그림 1과 같이 J-tube 내부 해저케이블의 영역에 따라서 XLPE 절연체의 열적 열화 온도를 설정하였고, 열화 후 절연 특성 평가를 수행하였다. 표 4는 XLPE 절연체의 열적 열화에 따른 절연 파괴 강도, $\tan\delta$ 및 체적저항률을 나타낸다. 절연 파괴 강도 데이터는 와이블 분포 함수의 척도 모수 63.2% 값으로 나타내었다.

그림 11은 J-tube 내부 해저케이블의 구역별 절연 파괴 강도 값을 나타낸다. J-tube 내부 해저케이블이 해수의 상승 및 하강으로 온도 변화가 지속적으로 발생하는 SEC. 2의 절연 파괴 강도는 121.9 kV/mm, 공기 중에 노출되어 고온을 유지하는 SEC. 1의 절연 파괴 강도는 129.6 kV/mm, 해수에 침수된 저온 영역의 SEC. 3의 절연 파괴 강도는 130.5 kV/mm이다. SEC. 2가 SEC.1 및 SEC. 3보다 절연 특성 값이 7% 감소함을 보였다. SEC. 2의 체적저항률은 $5.2 \times 10^{14} \Omega\text{m}$ 로 SEC. 1의 $1.2 \times 10^{15} \Omega\text{m}$ 및 SEC. 2의 $1.8 \times 10^{15} \Omega\text{m}$ 보다 2배 이상 감소하였다. SEC. 2의 $\tan\delta$ 는 0.061%로 SEC. 1의 0.049% 및 SEC. 2의 0.037%보다 20% 이상 증가하였다.

4.2 열적 열화 분석

표 4의 결과를 바탕으로 J-tube 내부 해저케이블의 해수의 상승 및 하강에 의한 온도 변화를 갖는 SEC. 2의 절연체가 공기 또는 해저 영역의 일정한 온도 분포를 갖는 SEC. 1 및 SEC. 3보다 열화에 취약함을 알 수 있었다. SEC 2의 지속적인 온도 변화는 XLPE 절연체의 분자 구조를 변형시켜 절연체 내부에 흐르는 저항성 전류가 증가하였고, 이른 시간에 절연 파괴가 발생한 것으로 사료된다. 또한, 수식 1과 2에서 저항성 전류의 증가로 인하여 체적저항률은 감소하고, $\tan\delta$ 은 증가한 것으로 분석된다.

일반적으로, 절연재료의 온도 변화는 분자 사슬의 수축 및 팽창을 야기하며, 이러한 지속적인 과정은 분자 사슬을 파괴하여 일정한 온도의 열화보다 XLPE를 더 변형시키며, 이로 인하여 절연 특성이 저하되는 것으로 판단된다 [12].

4.3 토론

기 발표된 논문의 열적 열화는 전력케이블의 상태 진단 및 평가를 위해서 절연 능력을 하락시키는 과정으로 실제 운전 조건보다 더 가혹한 조건을 적용한다 [14,15]. 하지만 본 논문에서는 실제 J-tube 내부 해저케이블에서 발생할 수 있는 온도 변화를 모의하여 열적 열화 조건을 설정했다

는 점에서 기존 연구와 차이가 있다. 또한, 일반적인 지중 및 해저케이블이 아닌 해상풍력단지 J-tube 내부 해저케이블을 대상으로 열적 열화 시험을 수행했다는 것이 새롭다.

본 연구에서는 절연체의 열적 열화 특성을 이른 시일 내에 확인하기 위하여 케이블이 아닌 시트 형태의 시험 샘플을 이용하였다. 또한, 전력케이블은 도체에 흐르는 전류에 의해서 절연체가 가열되며, 절연체 내부와 외부에는 온도 편차가 발생한다. 하지만 본 논문에서는 항온챔버를 사용하여 열적 스트레스를 인가하였고 절연체 내부 및 외부가 등온인 상태에서 열적 열화가 수행되었다.

향후에는 전력케이블을 대상으로 전류를 흘려 절연체를 가열하는 동시에 전압과 수위를 조절하여 실제 해상풍력단지 J-tube 내부 해저케이블의 환경과 유사하도록 시험을 진행할 예정이다. 추가된 수위 및 전기적 스트레스는 기존 열적 열화에 의한 J-tube 내부 해저케이블의 영역별 절연 특성 차이를 심화시킬 것으로 사료된다.

5. 결론

해상풍력단지 J-tube 내부 해저케이블의 상이한 3가지 온도 영역을 모의하여 절연체를 열화하고 절연 특성을 평가하였다. 본 논문의 주요 시사점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

SEC. 2의 절연 파괴 강도가 SEC. 1 및 SEC. 3보다 7% 하락하였으며, 체적저항률은 2배 이상 감소하였다. 또한, 손실 특성을 나타내는 $\tan\delta$ 는 20% 이상 증가함을 알 수 있었다. 이를 통해서 J-tube 내부 해저케이블에서 해수의 상승 및 하강에 의한 온도 변화를 겪는 절연체가 공기 및 해저의 일정한 온도 영역보다 절연 특성이 더 저하될 수 있다는 것을 추론할 수 있다. 따라서 해상풍력단지 J-tube 내부 해저케이블에서 SEC. 2가 SEC. 1 및 SEC. 3보다 취약점으로 간주하며, 해상풍력단지의 안정적 운전 및 신뢰성을 위해서 온도 변화가 주기적으로 발생하는 SEC. 2에 관하여 우선적인 모니터링 및 관리가 필요하다.

ORCID

Hae-Jong Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5963-1016>

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021300000020, 해상풍력단지 해저 전력망 구축을 위한 핵심기자재 및 평가 기술 개발).

REFERENCES

- [1] B. S. Kim, *Green Energy Technol. Insight*, **12**, 10 (2021).
- [2] M. Lerch, M. De-Prada-Gil, and C. Molins, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, **131**, 107128 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107128>
- [3] R. D. Chippendale, J. A. Pilgrim, K. F. Goddard and P. Cangy, *IEEE Trans. Power Del.*, **32**, 1721 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2571844>
- [4] L. You, J. Wang, G. Liu, H. Ma, and M. Zheng, *Energies*, **11**, 545 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/en11030545>
- [5] Diagnostics and Accelerated Life Endurance Testing of Polymeric Materials for HVDC Application, Brochure CIGRE, CIGRE Working Group D1.23, Paris, France, Nov. 2015.
- [6] ASTM D149-20 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.
- [7] IEC 60243-1:2013 Electric Strength of Insulating Materials - Test Methods - Part 1: Tests at Power Frequencies.
- [8] IEC 62631-3-1:2016 Dielectric and Resistive Properties of Solid Insulating Materials - Part 3-1: Determination of Resistive Properties (DC Methods) - Volume Resistance and Volume Resistivity - General Method.
- [9] ASTM D257-14, Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials (2021).
- [10] IEEE Std 43-2000 IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.
- [11] IEC 62631-2-1:2018 Dielectric and Resistive Properties of Solid Insulating Materials - Part 2-1: Relative Permittivity and Dissipation Factor - Technical Frequencies (0,1 Hz - 10 MHz) - AC Methods.
- [12] IEC 63026:2019 Submarine Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72,5$ kV) - Test Methods and Requirements.
- [13] 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>
- [14] C. C. Zhang, Y. F. Li, M. Y. Hu, F. L. Ma, H. Zhao, and B. Z. Han, *Proc. 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* (IEEE, Xi'an, China, 2018) p. 500.
doi: <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2018.8401037>
- [15] J. Cenes, G. Teyssedre, S. L. Roy, L. Berquez, C. Moreau, P. Hondaã, V. Eriksson, and W. Loyens, *Proc. 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)* (IEEE, Budapest, Hungary, 2018) p. 1.
doi: <https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514774>