Regular paper
Journal of the KIECS. pp. 815-824, vol. 17, no. 5, Oct. 31. 2022, t. 115, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2022.17.5.815

HVDC 해저케이블의 연속허용전류 계산에 관한 연구

임충환* · 박홍석** · 문채주***

A Study on the Calculation of Allowable Continuous Current for HVDC Submarine Power Cables

Chung-Hwan Lim* · Hung-Sok Park** · Chae-Joo Moon***

요 약

해상풍력발전과 같은 간헐성 재생에너지원의 급격한 성장은 바다를 횡단하는 장거리의 전기에너지의 변환 필요성을 증가시키고 있다. 넓고 깊은 바다에 걸쳐서 장거리 대용량 전력송전을 위한 해법중의 하나는 HVDC 해저 전력케이블을 사용하는 것이다. 그러나 교류자계가 없는 직류전력 케이블의 다양한 해양조건을 갖는 연속허용전류와 관련한 표준이나 연구가 없다. 본 연구에서는 대표적인 두 종류의 해저케이블 모델과 남해안과 서해안 두 지역의 해양 요건을 가정하여 직류케이블의 연속허용전류를 모의하였다. 모의 결과를 보면 직류케이블의 연속허용전류는 해저 지반 깊이에 기반한 감소 구배 특성을 갖고 있는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

The growing integration of intermittent renewable sources like offshore wind energy increases the need for transferring electric energy over long distances, which may include sea crossings. One of the solutions available for bulk electric power transmission across large distances encompassing wide and deep sea is using HVDC submarine power cables. However, there are no standards or research related to the calculation of the continuous allowable current with various ocean conditions of a DC power cable that does not have an alternating magnetic field. In this study, assuming the typical two types of subsea cable models and two areas of the south coast and the west coast marine conditions, a continuous allowable current simulation of DC cables was performed. As a simulation result, the DC cable continuous allowable current find out the gradient reduction characteristics based on subsea base depth.

키워드
Submarine Power Cable, HVDC, Power Line, Offshore Wind, Continuous Allowable Current
해저 전력 케이블, 고압 직류, 전력선, 해상 풍력, 연속 허용 전류

Ⅰ. 서 론

전 세계적으로 전력에너지 수요는 2050년까지 지속적으로 증가 추세이며, 이러한 전력 수요 증가는 대규모 전력계통 송전과 계통 간 송전망 연계가 확대되어야 가능할 것이다. 최근 ESG(Environment,

* 국립목포대학교 대학원(limchwan@kepco.co.kr)
** 한전 전력연구원 (waterbear77@kepco.co.kr)
*** 교신저자 : 국립목포대학교 스마트그리드연구소
· 접 수 일 : 2022. 07. 01
· 수정완료일 : 2022. 08. 21
· 게재확정일 : 2022. 10. 17
· Received : Jul. 01, 2022, Revised : Aug. 21, 2022, Accepted : Oct. 17, 2022
· Corresponding Author : Chae-Joo Moon
Smart Grid Institute, Mokpo National University,
Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

Social & Governance)와 탄소중립이라는 과제를 수행하기 위해서는 재생에너지의 보급이 필수적으로 요구되고 있다. 용량이 작은 풍력발전기의 경우 배전단에 연결하여 사용하면 계통에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 상대적으로 작은 계통에 대규모 풍력발전단지를 건설하면, 그 영향은 무시할 수 없다. 풍력발전의 기술이 아무리 발달하여도, 바람의 간헐성에 의해 출력이 일정하지 않으며 인위적인 제어가 힘들기 때문이다. 신안 8.2GW 해상풍력단지가 조성되면 전력제어도 어려운 문제지만 육지까지 송전하는 것도 대단한 과제가 된다[1-3].

우리나라 서남해에 운전중인 60MW 해상풍력단지의 송전선로는 대용량이 아니기 때문에 교류 154kV로 연결하고 내부망은 23kV로 구성되어 있다. 대용량의 해상풍력단지가 북해에 산재한 영국의 경우 프랑스와 5.8GW, 아일랜드와 3.7GW 및 독일과 2.7GW의 HVDC(: High Voltage Direct Current) 연계를 추진하고 있다. 또한 일본의 경우는 홋가이도섬의 전력공급을 위해 홋가이도와 아오모리 사이에 기존의 1회선 HVDC 선로는 해저케이블 43km로 구성되어 있다. 해저케이블의 고장에 대비한 안전성 확보를 위해 반대 방향으로 해저터널을 이용하여 24km HVDC 1회선을 추가하여 건설하고 있다. HVDC 해저케이블은 사고시 유지보수가 쉽지 않고 그 여파가 매우 크다. 2017년 기준 내부 해저케이블 고장은 12%, 외부 인출 해저케이블 고장은 88%로 나타나고 전기적인 고장은 47%, 제작 및 설치결함은 37%, 외부환경요인은 13%, 교체는 3%로 조사되었으며, 전기적인 고장이 많이 발생한 것으로 보아 해저케이블 설계의 중요성을 확인할 수 있다. 또한 설치된 해저케이블의 신뢰성 확보를 위하여 장기간에 걸친 기계적인 스트레스를 견디도록 재포설과 신중한 매설심도를 유지하여야 한다. 또한 지중케이블 광통신 분산형 음향 계측시스템을 도입하여 케이블 설치 전체 길이에서 외부에서 발생 가능한 기계적 손상을 사전 감시하여 케이블 고장을 진단하는 방식을 적용하기도 한다. [4]~[7].

교류계통에서는 송전선로의 경과지 선정, 토지보상 등 각종 사회적인 문제로 교류설비의 확충 대신에 HVDC, FACTS 등의 직류설비 검토가 증가하고 있다. 밀양 송전탑 구축과 관련한 사회적인 문제대두 이후 동해안의 대규모 발전기를 연계한 송전선로도 직류를 선정할 수 밖에 없었고 특히 대규모 해상풍력단지나 섬이 많은 지역은 장거리 해저케이블 송전이 가능한 HVDC 구축이 필연적이다. 이러한 대용량 특수설비가 계통에 다수 도입되면서 인근지역 선로 고장 등에 의한 특수설비 상호간의 영향을 분석하기 위하여 고정밀 HVDC 모델을 개발하고 있다. HVDC 지중송전의 경우 연속허용전류를 계산하기 위하여 교번자계가 존재하는 교류 기본 공식을 교번자계가 존재하지 않는 직류 기본 공식으로 변경하고, 케이블 내부 구조인 체, 내부반도전층, 절연체, 외부반도전층, 수밀 Tape, 공극, 금속시스, 외피 등을 반영하여 케이블 내부 열 저항을 계산하였으며, 케이블 포설 깊이, 토양 조건 및 온도, 케이블 상호간 위치, 부하에 의한 열 중첩 등을 고려하여 토양 상호간 직접 영향에 의한 케이블 외부 열 저항을 계산방법은 직매식 HVDC 지중선로에 대한 설계시 연속허용전류 값을 계산하여 반영하는 방법이다[8-11]

본 연구에서는 해저케이블 포설이 예상되는 남해와 서해 지역의 표본값을 설정하고 해저케이블의 연속허용 전류값을 계산한다. 기존 연구에서 제시된 직류 전류방정식[9]을 사용하고 해양특성을 반영하여 해석한다. 해저지반 포설 깊이 변화에 따른 허용전류 분석하고 케이블 상간 이격거리에 따른 허용전류의 분석, 대표적으로 $1200mm^2$와 $2000mm^2$ 두 종류의 케이블을 대상으로 분석하고자 한다.

II. HVDC 송전케이블 허용전류 기본공식

2.1 DC 허용전류 기본식

교류와 같이 교번자계가 있는 케이블에서의 허용전류 산출을 위해서는 다양한 변수를 적용해야 한다. 도체에서는 이러한 교번자계에 의하여 근접효과 및 표피효과가 발생하게 되며 이러한 영향으로 인하여 도체 자체의 저항이 증가하게 된다. 도체 및 절연체에 대해서도 이러한 영향이 지속적으로 발생하게 되며 주파수에 따른 극성 변화로 인하여 발생하게 되는 유전체 손실과 더불어 금속시스에서는 순환전류가 발생하게 된다. 주파수 성분이 없을 경우에는 열 발생 요소가 도체에서만 존재하지만, 교류에서는 이러한 교번

자계로 인하여 금속시스에 전류가 발생하게 되며 추가적인 열 발생 요소로 적용하게 된다. 교류주파수에 의하여 발생하는 요소를 제거하게 되면 식(1)과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{\triangle_\theta}{R_{dc}T_1 + R_{dc}(T_3 + T_4)}}\,[A] \qquad (1)$$

여기서

I : 허용전류 $[A]$
$\triangle_\theta$: 케이블 최대허용온도 - 주변온도
R_{dc} : 직류도체 실효저항 $[ohm/m]$
T_1 : 절연체 열저항 $[K \cdot m/W]$
T_3 : 방식층 열저항 $[K \cdot m/W]$
T_4 : 주변 환경 열저항 $[K \cdot m/W]$

주파수에 의한 요소를 소거하여 정리한 공식으로 해당 공식은 IEC 60287-1-1 30kV 이하 DC 및 참고문헌 [12]에서 공통적으로 제시하고 있는 공식이다. 그러나 해당 공식에서의 수밀 Tape 및 공극 등에 대한 고려가 되어 있지 않아 정확한 연속허용 전류 산정을 위하여 수밀 Tape 및 케이블의 공극과 같은 값을 적용해야 한다. 따라서 해당 변수를 고려한 공식은 식(2)와 같다.

$$I = \sqrt{\frac{\triangle_\theta}{R_{dc}T_1 + R(T_2 + T_3 + T_4)}}\,[A] \qquad (2)$$

여기서

T_2 : 수밀 Tape 및 공극 열저항 $[K \cdot m/W]$

본 연구에서는 Major Factor만 고려한 식(1)와 Minor Factor까지 고려한 식(2)에 따라 분석을 진행하였으며 동일조건에서 허용전류에 대하여 비교 분석을 진행하였다.

2.2 DC 도체 최대 저항 계산

교류 케이블의 도체는 원형연선을 압축한 후 섹터연선을 구성하기 때문에 각각의 소선에 대한 연입율 및 섹터연선에 대한 집합 연입율, 가공경화계수를 고려하여 저항값을 식(3)과 같이 계산하지만 HVDC에서는 편각도체를 적용하기 때문에 단순히 단면적에 대한 도체 저항을 식(4)와 같이 적용한다.

$$R_{DC} = \rho_{20}\frac{L}{S}(1 + \alpha_{20}(\theta - 20)) \qquad (3)$$

여기서

ρ_{20} : 20℃에서의 저항률
a_{20} : 온도 보정계수
S : 도체의 단면적 $[mm^2]$
L : 도체의 길이 $[m]$
θ : 도체 최고허용 온도

$$R_{DC} = \frac{1.02 \times 10^6 \times \rho_{20}}{S}(1 + \alpha_{20}(\theta - 20)) \qquad (4)$$

식(3)은 도체의 단면적과 길이에 따른 직류저항 계산방식으로 일반적으로 많이 사용되는 공식이다. 그러나 해당 공식의 경우 도체 단면적의 구성이 이상적으로 구성되어야 적용 가능한 공식으로 실적용을 위해서는 IEC에서 권고한 2%의 온도보정계수를 적용한 식(4)를 사용한다. 도체의 저항률 및 온도보정계수는 DC 최대 허용저항에 가장 큰 요소로서 작용하며 IEC 60228 및 IEC 60287-1-1의 제시된 온도보정계수를 사용한다.

구리도체 및 알루미늄도체의 온도변화에 따른 보정계수로 20℃ 기준으로 변화량에 따라 온도보정계수가 차이가 발생하며, 구리도체의 재료 기준은 IEC 60028이며 알루미늄의 도체 재료 기준은 IEC 60889을 적용한다. 구리 및 알루미늄의 저항률을 식(3), 식(4)에 적용하여 단면적에 따라 구하면 표 1과 같다. 식(4)의 결과값은 식(3)에 비하여 2% 높은 값이며 실제 도체를 고려한 결과값에 근접하기 때문에 식(4)를 기준으로 DC 직류 도체 저항 계산 방법을 사용한다.

표 1. 도체재료에 따른 직류도체 저항(20℃ 기준)
Table 1. DC conductor resistance according to conductor material (at 20℃)

Cross Sectional Area [mm^2]	Copper(Ω/km)		Aluminum (Ω/km)	
	Eq.(3)	Eq.(4)	Eq.(3)	Eq.(4)
500	3.448E-02	3.517E-02	5.653E-02	5.766E-02
700	2.463E-02	2.512E-02	4.038E-02	4.118E-02
900	1.916E-02	1.954E-02	3.140E-02	3.203E-02
1100	1.567E-02	1.599E-02	2.569E-02	2.621E-02
1300	1.326E-02	1.353E-02	2.174E-02	2.218E-02
1500	1.149E-02	1.172E-02	1.884E-02	1.922E-02
1700	1.014E-02	1.034E-02	1.663E-02	1.696E-02
1900	9.074E-03	9.256E-03	1.488E-02	1.517E-02
2100	8.210E-03	8.374E-03	1.346E-02	1.373E-02
2300	7.496E-03	7.646E-03	1.229E-02	1.253E-02
2500	6.896E-03	7.034E-03	1.131E-02	1.153E-02

2.3 해저케이블 내부의 열저항 계산

해저케이블의 열저항은 내부는 T_1, T_2 및 T_3가 각각 계산되며, 외부 열저항 T_4를 고려해야 한다. 케이블의 각각의 부분에 따라 열을 저장하거나 차폐하는 물리적인 성질을 열저항이라 한다. 그림 1과 같이 케이블 열의 온도구배로 나타나며 열발생과 열손실로 표현할 수 있다. 열 발생은 또한 내부적인 열 발생 및 외부적인 열 발생으로 나누어지며 내부적인 열발생은 도체의 발열 금속시스의 와전류에 의한 발열이다. 또한 외부적인 열발생으로는 태양 빛에 노출된 케이블 자연적인 열 발생이다. 이러한 열 발생과 열 손실은 에너지 보존법칙에 의하여 성립한다. 절연 재료별 열저항 값으로 XLPE는 3.5 $K \cdot m/W$, MI-PPLP 절연재료는 6.0 $K \cdot m/W$ 의 열 저항값을 적용한다. 일반적으로 내·외부 반도전층은 폴리에틸렌 기반의 자재를 사용한다. 만약 케이블 절연체의 재료가 XLPE이면 내·외부 반도전층 및 절연체의 열저항은 동일하게 되며 하나의 구조로서 분석이 가능하다. 그러나 MI PPLP 와 같은 케이블의 경우 절연체의 고유 열저항과 내·외부 반도전층의 고유 열 저항이 다르기 때문에 각각의 구조적 특성에 맞게 계산하여 합산해야 하며, IEC 60287-2-1에 정의되어 있다.

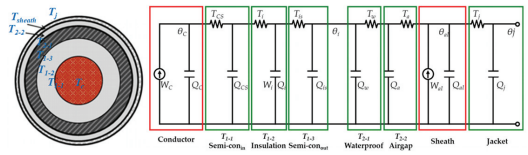

그림 1. HVDC 케이블의 온도구배
Fig. 1 Thermal gradient of HVDC cables

해저케이블의 경우 육상 케이블에 비하여 구조가 추가 되며 이러한 구조적 특징으로 인하여 케이블 내부 열저항 산정에 있어 공식적인 차이가 추가된다. 또한 해저케이블의 경우 단일 코어의 케이블 보다는 3코어 케이블을 포설하는 것이 일반적이며 또한 열저항 산정에 있어 더욱더 복잡해지게 된다. 따라서 이러한 요소들을 각각 고려하여 열저항을 계산한다. 저항 네트워크를 이용하여 병렬로 계산해야 하며 IEC 60853-2의 방식에 근거하여 구한다. 해저케이블의 내부 구조에서 웰딩 Tape 및 내장 재료에 대하여 이러한 구조적 특성 등을 어떻게 적용할 것인지 고려해야 한다.

① 절연체의 열저항(T_1) : 케이블 절연체의 재료 및 내·외부 반도전층의 재료에 따라 열저항이 결정된다. 케이블 내부에서의 전기적 특성은 다르지만 허용전류 측면에서 보면 단위 열저항 으로써 결정되기 때문으로 같은 고유 열저항을 가지고 있다면 하나의 구조로 볼 수 있다. 각 구조가 서로 다른 고유 열저항을 가지고 있다면 각각의 열저항을 계산해야 한다.

② 수밀 Tape 및 공극에 대한 열저항(T_2) : 실제 케이블의 경우 절연체와 금속시스 사이에는 반 도전 수밀 Tape와 제조상 발생하는 공극이 존재한다. 이러한 수밀 Tape와 공극은 두께가 다른 구조에 비하여 적어 허용전류에 미치는 영향이 적기 때문에 IEC 60287에서는 고려하지 않고 있다. 그러나 수밀 Tape(6 $K \cdot m/W$)와 공극(34 $K \cdot m/W$)의 단위 열저항이 상대적으로 절연체 및 외피에 비하여 크며 이러한 단위 열저항의 크기에 비례하는 열저항 또한 증가하게 된다. 이러한 열저항의 증가는 허용전류 산출에 있어 영향을 주게 되며 정확한 온도구배에 따른 열저항 분석과 허용전류 산정을 위해서는 고려해야 한다.[5] 또한 국내 한전 초고압용 케이블로 사용되어지고 있는 평활형 금속시스의 경우 이상적인 조건에서

는 수밀 Tape와 금속시스가 완벽히 밀착되어 있기 때문에 공극이 차지하는 공간이 거의 없으나 파부형 금속시스 케이블의 경우 금속시스와 반도전 수밀 Tape 사이의 공간이 크며 공극으로 구성되어 있어 평활형 금속시스에 비하여 공극에 의한 영향이 상대적으로 더 증가하게 된다.

③ 방식층에 대한 열저항 산정(T_3) : 방식층의 열저항 산정을 위해서는 방식층의 구조적 특징에 따라 파부형과 평활형으로 구분하여 고려해야 한다. 파부형 금속시스의 경우 방식층이 금속시스 곡면을 따라 도포되어 제조되기 때문에 케이블 위치에 따라 방식층의 두께가 상이하게 달라진다. 이러한 요소로 인하여 방식층 열저항 산정은 IEC 60287-2-1 요건에 따라 평활형과 파부형으로 나누어 공식을 적용한다.

2.4 해저케이블 외부의 열저항 계산

토양 속에 매설되는 케이블의 경우 고려해야 될 변수가 많이 존재한다. 특히 토양 깊이에 따른 고려를 반드시 진행하여야 하며 이에 따른 열저항을 산정해야 한다. 각각의 토양에 대한 함수율에 따른 고려도 반드시 진행되어야 하며 이를 분석하기 위해서는 다양한 기법이 적용 발전되었다. 이러한 주변 환경에 대한 열저항은 케이블 포설환경에 직접적으로 영향을 받게 된다. 케이블 포설환경에서 중요한 요소로서 적용되는 것은 직매식, 관로식, 전력구 포설 방식이며 이에 따라 케이블의 방식층이 토양과 직접적으로 접촉한지 여부와 전력구와 같이 공기 중에 노출이 되어 있을 경우를 구분한다.

단심 코어 케이블 내부 열 저항 계산 : 단심 코어 케이블은 케이블 내부에 도체가 1개가 존재하는 케이블로 이에 따른 열 저항 해석 방법은 동심원통을 기반으로 한 식(5)와 같은 방식을 적용해야 한다. 이때의 단심 코어 케이블의 구조는 진도-제주간 케이블의 구조를 기반으로 구성한다.

$$R = \frac{p_T}{2\pi} ln(\frac{2h}{a}) \; [K \cdot m/W] \qquad (5)$$

3상 코어 케이블 내부 열저항 계산 : 도체와 케이블 내부의 온도 상승은 리드 시스는 도체에서 생성된 총 와트의 곱과 같다. 단일 도체 케이블의 경우, 열저항은 p가 인슐 라틴 재료의 열 저항, R은 절연에 대한 반경, r은 도체 반경의 표준 공식에 의해 케이블의 단위 길이 당 열 저항으로 얻을 수 있다. 3 도체 케이블의 경우 다음과 같은 여러 가지 공식이 있다. 여기서 F1은 케이블 치수이며 각기 다른 사용자에 의해 상당히 다른 형태로 제안된다. IEC 60287은 부하 100%로 운전하기 때문에 부하 시간 변화에 대한 온도 상승분 고려가 되어 있지 않다.

$$R_{th} = \frac{\rho \log_e F_1}{6\pi} \qquad (6)$$

여기서

ρ : 도체의 저항률

$$\log_e F_1 = \log_e \frac{1-\alpha\beta+\sqrt{(1-\alpha^2)(1-\beta^2)}}{\alpha-\beta}$$

① 단일 직매 케이블 (Single Buried Cable)의 열저항 (T_4) : 평평한 해저 바닥으로부터, 깊이 L 위치에 묻힌 단일 직매 케이블의 열 저항 T_4는, 케이블 표면과 해저 사이의 열 저항을 말한다. T_4는 식 (7)과 같다.

$$T_4 = \frac{p_T}{2\pi} \times \ln(2u) [K \cdot m/W] \qquad (7)$$

여기서, $u = \frac{2L}{D_e}$이며, L은 해저 지반에 파묻힌 깊이, D_e는, 케이블의 직경을 나타낸다.

파묻힌 깊이 L은 해저로부터 케이블의 수직선상의 거리로 정의 된다. u>10 인 조건에서 파묻힌 케이블이 가장 좋은 조건이다. 얕게 묻힌 케이블의 경우, IEC 60827에서 제시된 다양한 요소를 고려한 공식을 적용해야 한다. 열 저항률 p_T의 경우, 자갈, 모래, 점토에 따라 다른 값을 나타낸다.

② 2 배열로 구성된 직매 케이블의 열 저항(T_4) : 평평한 해저 지반으로부터, 깊이 L 위치에 묻힌 한 쌍의 직매 케이블의 열 저항 T_4는, 케이블 표면과 해저 사이의 열 저항을 말하며, 식(8)로 표시한다.

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi}\left(\ln\left(u+\sqrt{u^2-1}\right)+\frac{1}{2}\left(1+\left(\frac{2L}{s_1}\right)^2\right)\right)[K \cdot m/W] \quad (8)$$

u>10 인 조건에서 설치하는 것이, 해저케이블에서 가장 일반적인 경우이다. $\left(u+\sqrt{u^2-1}\right)$은 2u 값으로 대체되는 것이 가능하다. 여기서, 각 parameter에 대한 정의를 다음과 같이 한다.

D_e : 케이블의 외부 직경
L : 해저로부터 케이블의 수직간의 거리
s_1 : 케이블 간의 거리
ρ_t : Soil material 에서의 열 저항률

2개로 구성된 직매 케이블의 열 저항 T_4는 거의 대부분 식(9) 공식을 기반으로 계산된다. 따라서, 해저케이블의 경우 지중케이블과 동일하게 T_1, T_2, T_3를 고려하여 허용전류를 도출한다. T_4에 대한 고려 시, 외부 환경 (포설 깊이, 주변 material, 케이블 간 거리 등등)을 명확히 파악하여 적용하는 것이 신뢰성을 높일 수 있다.

$$I = \left[\frac{\triangle\theta}{R(T_1+T_2+T_3+T_4)}\right]^{0.5} \quad (9)$$

III. 해저케이블의 연속허용전류 계산 조건

3.1 모델 케이블 구조 Data

해저케이블의 연속허용전류를 구하기 위하여 열 저항 T_4와 케이블 구조에 해당하는 열 저항 T_1 ~ T_3을 구하여 케이블 포설 환경에 따라 연속허용전류를 계산하였다. 케이블을 모의하기 위한 구조 데이터는 2가지로 해당 케이블의 구조는 표 2와 같다.

표 2. 1200mm^2 해저케이블 데이터
Table 2. 1200mm^2 Subsea cable data

1200mm^2 Subsea Cable Data				
Div.	Outside Dia. [mm]	Thick. [mm]	Unit Thermal Resistance [K·m/W]	Thermal Resistance [K·m/W]
Conductor	39.9	19.95	-	-
Watertight Tape	40.9	0.5	6	0.023
Internal Sem. Layer	43.3	1.2	3.5	0.031
MI PPLP)	67.3	12.0	6.0	0.421
External Sem. Layer	69.7	1.2	3.5	0.019
Watertight Tape	70.9	0.6	6.0	0.016
Lead Sheath	75.9	2.5	-	-
PE	80.9	2.5	3.5	0.035
Armour	90.9	5.0	-	-
PVC	98.9	4.0	6.0	0.080

아모어-방식층이 각각 1개씩(1층 구조) 존재하는 형태의 해저케이블이다. 각각의 외경과 고유 열 저항을 통하여 열 저항으로 계산하였다. 케이블 내부의 온도구배에 해당하는 열 저항을 바탕으로 T_4(주변 열 저항)를 계산하여 적용함으로써 각각의 허용전류를 Case별로 비교 하였다.

3.2 해저케이블 포설조건 및 온도조건

해저케이블의 포설조건 및 온도조건을 모의하기 위해서 해당 해역에 대한 자료를 기반으로 구성하였으며 각각 서해, 남해에 대하여 조건을 모의 하였다. 국립수산과학원의 2009년 ~ 2019년까지의 데이터 중 여름과 겨울의 계절별 최고온도와 최저온도를 기준으로 사용한다. 남해안은 서해안에 비하여 수심이 깊어 계절별 온도 편차가 비교적 적으며 여름 최고 수온은 18.9℃, 겨울 최저 수온은 11.1℃ 이다. 서해안의 경우 유입되는 강의 수량이 많고 수심이 얇으며 조수간만에 의한 해류이동이 활발한 해역으로 계절별 온도 변화가 매우 심하다. 여름 최고 수온은 22.4℃, 겨울 최저 수온은 1.3℃이며 해당 온도 데이터를 허용전류 산출에 있어 주변온도로 적용한다.

IV. 해저케이블의 연속허용전류 사례 해석

국내 환경에 적합한 조건에 대하여 조사를 진행하여 표 3과 같이 포설위치(서해,남해), 계절별 영향, 해저지반 깊이, 상간 이격거리, 케이블 구조별 기준에 따라 해석한다.

표 3. 연속허용전류의 사례연구 요건
Table 3. Case study requirements of allowable continuous currents

Position	Season	Subsea Base Depth	Phase Distance	Cable Type
West Sea (53m)	Summer (22.4℃)	$1200mm^2$ Case (50cm ~ 200cm)	10cm ~ 500cm	$1200mm^2$ (Armour Anti-corrosion 1 Layer)
	Winter (1.3℃)			
South Sea (75m)	Summer (18.9℃)	$2000mm^2$ Case (100cm ~ 250cm)		$2000mm^2$ (Armour Anti-corrosion 2 Layer)
	Winter (11.1℃)			

표 3에서 해저지반 깊이가 케이블 단면적 크기에 따라 다르게 적용된 것은 다중 케이블 포설시 토양 깊이에 따른 열 저항 계산에서 적용하기 위한 것이다. 지표에서 케이블간 거리의 2배 값을 케이블 외경으로 나누어주는 값인 U는 $U>10$을 만족하기 위한 것으로 케이블 외경의 변화에 따라 이 값이 변화된다. 해저지반 최소 깊이는 U 값을 만족하는 기준으로 모의한다.

4.1 해저케이블 $1200mm^2$ 해석

그림 2는 아모어-방식층 1층 구조를 가지고 있는 $1200mm^2$ 해저케이블의 연속허용전류를 해저 지반 깊이에 따라 허용전류의 값을 계산한 것이다. 해저지반의 경우, 물에 비하여 열 영향 및 열 발산을 제한하는 차폐효과가 물(해수)에 비하여 크며 이러한 열 영향의 크기로 인하여 2배열 케이블에서는 지반 깊이 포설될수록 허용전류의 상호 영향이 직매식 케이블과 유사해지는 경향을 보이게 된다. 최대 온도가 서해에 비하여 낮은 남해에서의 허용전류가 더 높은 것을 확인할 수 있다.

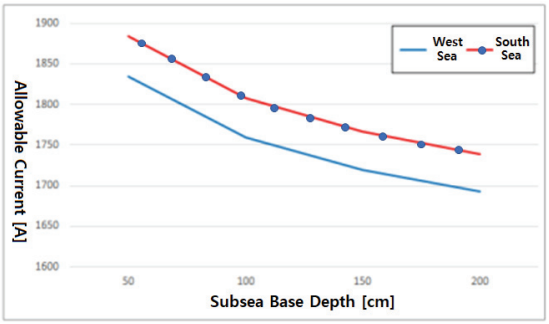

그림 2. 해저지반 깊이에 따른 전류변화(단일포설)
Fig. 2 Current variation based on subsea base depth(single line installation)

$1200mm^2$ 케이블 모델을 바탕으로 해저 지반 깊이는 일정하게 유지시킨 상태에서 케이블 간 이격거리를 변화시켰을 경우의 허용전류 비교 결과는 그림 3과 같다. 케이블 이격거리를 100cm ~ 500cm 까지 변화시킨 결과 300cm 이상 이격시켰을 경우 허용전류의 감소가 상대적으로 적어지는 것을 볼 수 있다.

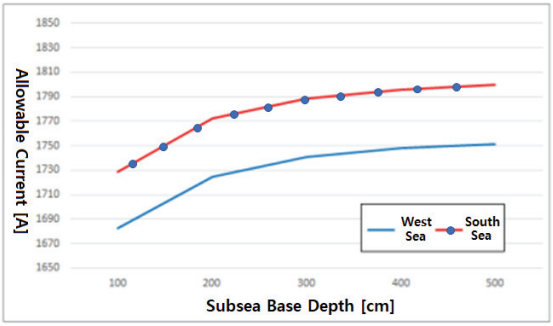

그림 3. 케이블 이격거리에 따른 전류변화(2배열포설)
Fig. 3 Current variation based on cable distance (double line installation)

4.2 해저케이블 $2000mm^2$ 해석

그림 4는 아모어-방식층 2층 구조를 가지고 있는 $2000mm^2$ 해저케이블의 연속허용전류를 해저 지반 깊이에 따라 허용전류의 값을 계산한 것이다. 해저지반의 경우 물에 비하여 열 영향 및 열 발산을 제한하는 차폐효과가 물(해수)에 비하여 크며 이러한 열 영향의 크기로 인하여 2배열 케이블에서는 지반 깊이 포설될수록 허용전류의 상호 영향이 직매식 케이블과

유사해지는 경향을 보이게 된다. 저 지반 깊이에 따른 허용전류 변화를 서해와 남해의 최고온도에서 비교하면 최대 온도가 서해에 비하여 낮은 남해에서의 허용전류가 더 높은 것을 확인할 수 있다.

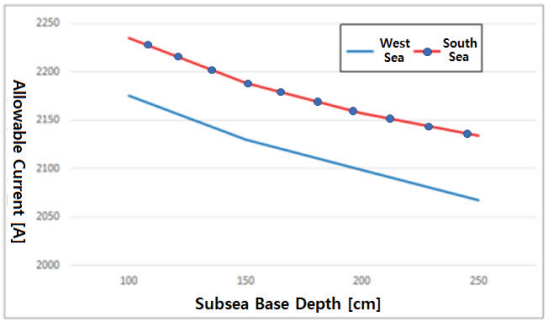

그림 4. 해저지반 깊이에 따른 전류변화(단일포설)
Fig. 4 Current variation based on subsea base depth(single line installation)

그림 5는 동일한 $2000mm^2$ 케이블 모델을 바탕으로 해저 지반 깊이는 일정하게 유지시킨 상태에서 케이블 간 이격거리를 변화시켰을 경우의 허용전류 비교 결과이다. 케이블 이격거리를 100cm ~ 500cm 까지 변화시킨 결과 300cm 이상 이격시켰을 경우 허용전류의 감소가 상대적으로 적어지는 것을 볼 수 있다.

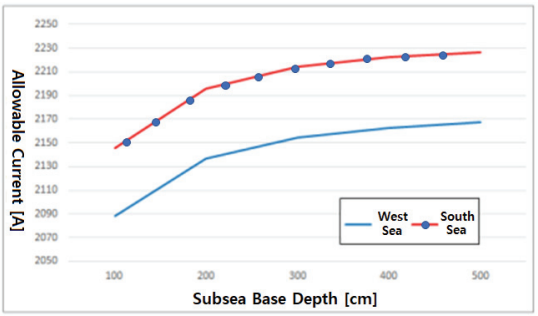

그림 5. 케이블 이격거리에 따른 전류변화 (2배열포설)
Fig. 5 Current variation based on cable distance (double line installation)

Ⅴ. 결론

HVDC 해저케이블의 허용전류 산정을 위하여 2가지 Type의 케이블을 모의하였다. 해당 모의 케이블은 $1200mm^2$(아모어-방식층 1층 구조), $2000mm^2$(아모어-방식층 2층 구조)이며 서로 다른 구조를 보이는 케이블을 동일 조건에서 비교하였다.

해저지반 포설 깊이 변화에 따른 허용전류 분석 결과 해저지반 포설 깊이가 깊어질수록 해저케이블의 허용전류는 감소하였다. $U>10$ 권고값에 따라 두 케이블의 최소 포설 깊이는 $1200mm^2$(아모어-방식층 1층 구조) 해저케이블은 50cm 이며 $2000mm^2$(아모어-방식층 2층 구조)은 100cm이다. 해당 포설 깊이는 케이블 외경과 밀접한 연관이 있기 때문에 향후 제조될 해저케이블에 따라 최소 포설 깊이를 검토해야 한다.

케이블 상간 이격거리에 따른 허용전류 분석 결과 2배열 포설시 케이블간 이격거리에 따라 허용전류 변화가 발생하며 본 보고서에서는 해저지반 포설 깊이를 1m로 고정한 후 이격거리를 10cm~ 500cm로 변화시켜 비교하였다. 비교 결과 2가지 Type의 케이블 모두 300cm 이상 이격거리를 두었을 경우 허용전류의 감소가 상대적으로 적어지는 것을 확인하였다.

HVDC 지중송전 및 해저케이블의 허용전류 비교 분석을 진행하였으며 최대한 국내 환경에 적합하도록 주변 환경을 모의하였다. 그러나 해당 케이블의 구조 및 다양한 변수에 있어 국내의 기준이 마련되지 않았기 때문에 향후 검토가 필요하다.

References

[1] D. Kim, S. Oh, and G. Jang, “Study on the Grid Interconnection of Offshore Wind Farm with VSC HVDC and CSC HVDC,” In *Proc. The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference,* Kangwon, Korea, 2008, pp. 1176-1177.

[2] E. Kwak and C. Moon, “Analysis of Power System Stability by Deployment of Renewable Energy Resources,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 633-642.

[3] E. Kwak, J. Min, H. Jung, and C. Moon, "A Study on HVDC and BESS Application for High Penetration of Renewable Energy Sources," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 6, 2021, pp. 1339-1348.
[4] H. Son, D. Kim, and C. Moon, "Design of Submarine Cable for Capacity Extension of Power Line," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 1, 2022, pp. 77-84.
[5] B. Mitra, B. Chowdhury, and M. Manjreker, "HVDC Transmission for Access to Off-shore Renewable Energy: a Review of Technology and Fault Detection Techniques," *Electronics, IET Renewable Power Generation*, vol. 12, issue 13, pp. 1563-1571, 2018.
[6] S. Nishikawa, T. Shimizu, N. Nakajima, O. Saito, and S. Tomioka, "Expansion of HVDC Cable Application in Response to Growing Demand for Renewable Energy Transmission," *Sumimoto Electric Review*, no. 94, 2022, pp. 34-39.
[7] B. Min, J. Kim, and S. Song, "The Verification Test Research of DAS System for Cable Monitoring and Detecting," *Proc. of the Korean Society for Railway Conference*, Jeju, Korea, 2016, pp. 1-7.
[8] B. Ko, S. Jung, J. Song, J. Lee, Y. Kim, and D. Jeon, "Development of HVDC Model for Electromagnetic Transient Analysis," *The Trans. of the Korea Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, no. 3, 2019, pp. 383-392.
[9] K. Park, I. Kwon, and B. Lee, "Calculation Method of Allowable Continuous Current for Direct Burial Laying HVDC Underground Cable," *Energies*, vol. 14, issue 6431, 2021, pp. 1-16.
[10] H. Brakelmann and G. Anders, "Rating Considerations in Designing HVDC Cable Installations," *IEEE Trans. on Power Delivery,* vol. 33, issue 5. 2018, pp. 2315-2323.
[11] G. Chen, M. Hao, Z. Xu, A. Vaughan, J. Cao, and H. Wang, "Review of High Voltage Direct Current Cables," *J. of Power and Energy Systems,* Chinese Society for Electrical Engineering, vol. 1, no. 2, 2015, pp. 9-21.
[12] J. Kumar and R. Vijayakumar, "A Bezier Curve Based Path Planning in a Multi-agent Robot Soccer System without Violating the Acceleration Limits," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57, no. 1, 2009, pp. 23-33.

저자 소개

임충환(Chung-Hwan Lim)

1992년 전남대 공학사, 2005년 핀란드 알토대 경영학석사, 1993년 한국전력공사에 입사하여 2021년 ~현재 광주전남건설지사장, 2021년~현재 국립목포대학교 대학원 전기공학과
스마트그리드협회 표준관리위원장, 신사업추진실장, 해외사업처 송배전사업부장, 신사업개발부장, 광주전남건설지사 변전건설부장 등을 역임
※ 관심분야 : 에너지신사업, HVDC, ESS 시스템

박흥석(Hung-Sok Park)

2003년, 2005년 및 2011년 충남대 공학사, 공학석사, 공학박사. 2004년 한국전력공사 입사, 2022년 현재 전력연구원 차세대송변전연구소 선임연구원 근무중
2004년 ~2008년 송변전 미얀마/리비아 해외사업
2008년 ~ 현재 케이블시스템 운영/시험분야 연구
AC/DC 케이블 국제공인/비공인 시험 수행 (총 35건)
※ 관심분야 : HVDC 케이블 시스템 및 시험평가

문채주(Chae-Joo Moon)

1981년, 1983년 및 1994년 전남대학교 공학사, 공학석사, 공학박사
1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기 및 제어공학과 교수
2017년~현재 에너지밸리산학융합원장
한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼니스트, 전력전자학회 부회장, 이투뉴스 및 한국전기신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장 역임
※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 전력시스템