

180kV HVDC 해저케이블 기계적/전기적 특성 평가

김남열*, 이태호*, 지봉기*, 이상진*, 김정년*, 전승익*, 윤희석**, 정수길**, 강채훈**, 안용호[□]
 *LS전선(주) 중앙연구소, **LS전선(주) 전력사업부, [□]한전 전력연구원

Mechanical and Electrical Performance of 180kV HVDC Submarine Cable System

N. Y. Kim*, T. H. Lee*, S. J. LEE*, B. K. Ji*, J. N. Kim*, S. I. Jeon*, H. S. Yun**, S. K. Joung**, C. H. Kang**, Y. H. An[□]
 *Advanced R&D Center, LS Cable Ltd. **Power cable division, LS Cable Ltd. [□]KEPRI

Abstract - This paper describes the mechanical and electrical test on HVDC submarine cable, Flexible Repair Joint and termination for 180kV. This HVDC submarine cable was manufactured using LS cable's unique skill and would be applied the HVDC submarine cable system in Korea. The performance test consist of mechanical test and electrical test. The tensile bending test and tensile test was done as the mechanical test and Electrical test is DC voltage and Impulse test. The tensile bending test carried out 6 times(double of specified times) for maximum reliability. The DC test voltage is ±400kV/1hr. We estimate the lower limit of DC breakdown voltage is 600kV. The impulse test voltage is ±800kV/10shots. The type of developed cables is the MI type. Its insulation consist of paper tapes impregnated with a high viscosity oil. The development of new HVDC cable is available for HVDC underground or submarine power transmission. The developed HVDC cable, FRJ and termination have passed the mechanical and electrical test successfully and showed excellent performance.

구조는 표 1과 같다.

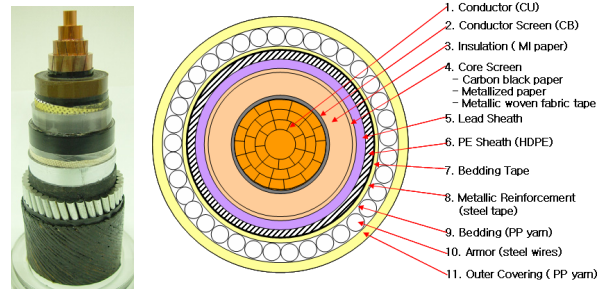


그림 1. HVDC 해저케이블 샘플 및 구조

<표 1> 케이블 구조

구분	두께(mm)	외경(mm)
1. Cable Conductor	-	32.6
2. Conductor Screen	0.6	33.8
3. Insulation	9.5	52.8
4. Core Screen	0.15	53.5
5. Lead Alloy Sheath	2.7	58.9
6. HDPE Sheath	3.2	65.3
7. Polyester Tapes	0.35	66.0
8. Metallic Reinforcement	2 × 0.3	67.2
9. Bedding	1.2	69.6
10. Armour	6.15	81.9
11. Bedding	4.2	90.3

1. 서 론

국내의 전력시스템은 가공 및 지중송전선로의 경과지 확보의 어려움으로 인하여 추가적인 증설이 극히 어려운 상황이며 가공선로의 경우 생활환경적인 문제에 대한 민원으로 인하여 많은 문제를 가지고 있다. 전력송전에서의 HVDC(High Voltage DC)송전방식은 교류케이블에서 발생하는 유전체 손실이 없고 충전전류에 대한 무효성 보상용 shunt reactor가 불필요하며 송전거리가 길고 대용량 송전이 될수록 장점이 커진다. 또한 직류송전용량이 도체온도상승에만 영향을 받기 때문에 도체 규격에 비례하여 송전용량을 증가시킬 수 있다. 그리고 건설비용면에서 교류송전 건설에 비해 경제적이기 때문에 현재 발생하는 민원에 대한 대안으로서 적용가능하다. 국내에서는 이미 제주-해남간에 180kV HVDC 해저케이블을 건설하여 운전중에 있으며 현재 제주지역 전력의 50%를 담당하고 있으므로 발생할 수 있는 고장상황에 상당히 민감하다. 그러나 국내에는 HVDC 해저케이블의 제조기술이 없으며 국외업체의 기술력에 의존하여 건설되었기 때문에 그동안 운전중 발생하는 사고에 신속한 대응이 불가하여 복구비용면에서 큰 부담을 안고 있었으며(일일 평균 발전연료비 손실 6천만원) 장기간의 복구기간이 소요되므로 고장시 제주지역의 전력공급에도 큰 어려움이 따르는 실정이다. 따라서 LS전선에서는 육상케이블의 우수한 설계/제조기술을 바탕으로 HVDC 해저케이블 접속기술의 국산화를 위해 한국전력 용역과제를 수행하였으며 현재 180kV급 HVDC 해저케이블의 제조기술 및 접속기술을 국산화 하는데 성공하였다. 개발된 해저케이블 및 접속합의 평가를 목적으로 시험 기준으로 제안된 CIGRE의 Electra 171과 Electra 189에 의거하여 HVDC 해저케이블 자체와 중간접속을 포함한 기계적인 평가와 해저케이블, 중간접속합과 중단접속합을 포함하는 전체 시스템에 대한 전기적인 평가를 수행하고 그 결과를 보고한다.

2. 본 론

2.1 HVDC 해저케이블 개발

2.1.1 해저케이블 구조

HVDC 해저케이블의 핵심은 도체와 절연체로서 도체는 송전용량을 증가시키기 위해 평각도체로 설계되었다. 절연방식으로는 세계적으로 검증된 MI(Mass Impregnated) type의 절연구조를 채택하여 최적 절연설계를 위한 DC용 절연지와 함침용 절연유의 선정 및 케이블 제조시 절연지의 함침 공정에 대한 연구를 수행하여 최적의 조건을 설정하였다. 그림 1은 LS전선이 개발한 케이블 사진과 구조도이며 개발된 케이블의

2.1.2 DC 내전압 목표성능

DC 내전압 목표성능은 케이블과 단말의 수명을 30년으로 산정하여 설정한 값으로서 수명감쇠계수(K1)는 식 (1)과 같이 계산되며 최종적으로 요구되는 DC내전압 목표성능은 식 (2)로 계산된다. 또한 목표성능 설정시 사용한 계수는 표 2와 같다.

$$K_1 = \sqrt[n]{\frac{30 \text{ years} \times 365 \text{ days} \times 24 \text{ hrs}}{\text{test hrs (1hr)}}} \quad \text{식(1)}$$

$$V_{DC} = U_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \quad \text{식(2)}$$

<표 2> 설계 계수

계수	설명	설정값
U ₀	DC operating voltage[kV]	180
K ₁	Degradation coefficient for 30 years	1.97
n	Life exponent of V-t characteristics	15
K ₂	Temperature coefficient	1.0
K ₃	safety factor	1.1

위 식에 의해 계산된 전압값은 390kV이며 이를 올림처리하여 최종 목표성능은 400kV로 설정하였다.

2.1.3 Impulse 내전압 목표성능

Impulse 내전압 목표성능 또한 식 (3)과 같이 계산되며 계산에 활용된 계수는 표 3과 같다.

$$V_{imp} = (BIL + K \times U_0) \times k_1 \times k_2 \times k_3 \quad \text{식(3)}$$

<표 3> 설계 계수

계수	설명	설정값
BIL	Basic impulse Insulation level [kV]	540
k ₁	Repeated deterioration coefficient	1.0
k ₂	Temperature coefficient	1.1
k ₃	safety factor	1.1
K	Bahder's coefficient	0.5

위 식에 의해 계산된 전압값은 762kV이며 이를 올림처리하여 최종 목표 성능은 800kV로 설정하였다.

2.2 HVDC FRJ(Flexible Repair Joint) 개발

해저케이블용 중간접속함의 국산화에 대한 검증을 위해 자체 기술로 제작된 해저케이블을 대상으로 중간접속을 실시하였다. 중간접속시 활용되는 모든 접속자재를 국산화한 것과 접속작업 또한 LS전선의 전문 접속원에 의해 수행되었다는 것에 큰 의미가 있다. 중간접속부의 구조는 그림 2와 같으며 케이블 외경은 90.3mm이며 접속부의 최종 외경은 101.7mm로서 외경차이는 12.6%정도인 준 동경접속함을 개발하였다.

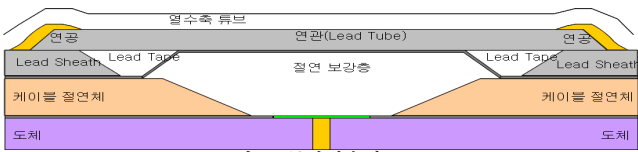


그림 2. 중간접속함 구조

2.3 HVDC 종단접속함 개발

LS전선은 HVDC 해저케이블용 종단접속함 설계/제작에 대해 2회의 제작 경험을 갖고 있다. 즉 2006년도에 발생한 제주-해남 HVDC 해저케이블 복구공사시에 해저케이블에 대한 내전압 시험과 TDR(Time Domain Reflectometer)을 LS전선(주)에서 수행하였으며 이때 자체 제작한 종단접속함(DC내전압성능 : 1.4U₀)을 사용하여 성공적으로 시험을 완료하였다. 이 경험을 바탕으로 2007년도에는 30년 수명을 가지는 종단접속함을 개발하였으며 개발과정은 그림 3과 같다.

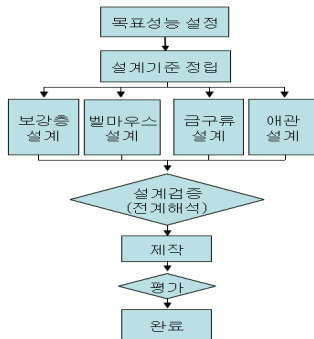


그림 3. 종단접속함 개발과정

또한, 종단접속함의 주 절연층인 유침지 절연설계는 목표 내전압성능에 대해 일정여유를 갖도록 설계하였으며 벨마우스를 포함한 전체적인 절연설계에 대한 검증을 그림 4와 같이 전계해석을 통하여 수행하였다.

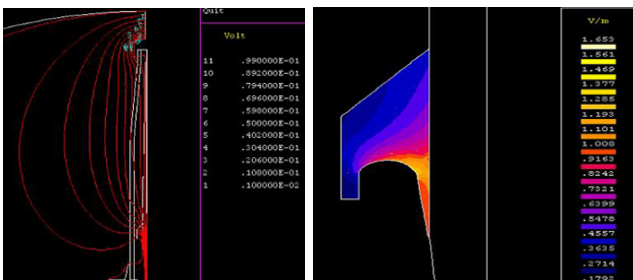


그림 4. 전계해석 결과

해석결과 보강유침지층에서 최대 전계가 걸리는 부분은 slope 개시점 부근으로 1.74kV/mm의 전계가 걸리며 벨마우스에서의 최대 전계값은 1.34kV/mm로서 연면전계에 대한 설계기준이 DC(2kV/mm),

Imp(3.5kV/mm)인 것과 비교하였을 때 안정한 설계가 된 것을 확인하였다.

2.4 HVDC 해저케이블시스템 평가

2.4.1 평가절차 및 항목

개발된 HVDC 해저케이블과 종단접속함에 대해 Electra 171/189에 의거하여 기계적/전기적인 평가를 수행하였으며, 평가는 그림 5과 같은 순서로 진행하였다.

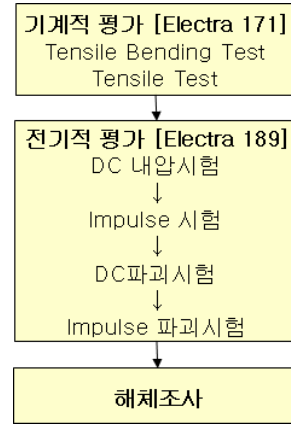


그림 5. 평가절차

2.4.2 기계적 특성평가

기계적 평가는 개발된 HVDC 해저케이블과 종단접속함을 대상으로 실시하였으며 종단접속함에 대해 기계적 평가로 Tensile-Bending Test를 실시함으로써 해저케이블 고장복구를 위한 케이블 및 접속함의 기계적 강도 및 Tensile Test에 대한 검증이 되도록 하였다. 기계적 평가에 대한 특성시험 기준은 표 4와 같다.

<표 4> 기계적 특성시험 기준

시험종류	시험기준하중
Tensile-Bending Test	수심 0~500m : T=1.3×w×d+H (H=0.2×w×d) 수심 500m 초과 : T=w×d+H+1.2× D (H=0.2×w×d, D=±1/2×bh×m×d×ω2)
Tensile Test	L ₀ (T ₀ /15min) , L _{max} (T _{max} /15min) , L ₀ '(T ₀)

w:1m의 수중중량(N/m), d:포설최대수심(m), H:최대허용해저장력(N)
D:dynamic tension(N), bh:포설도르레 수직이동거리(m)
m:케이블질량(kg/m), ω:포설도르레 운동각주파수(1/s), t:운동주기(s)

위의 Tensile bending test는 신뢰성을 위해 시험기준의 두배인 6회를 실시하였다. Tensile Test는 별도의 케이블 시료로 실시하였으며 (L_{max}-L₀)/L₀ 와 (L₀'-L₀)/L₀의 상대신율을 계산하여 평가하였으나 신장 길이변화는 없었다.(T₀=50w)

Tensile Bending Test 및 Tensile Test의 시험구성은 그림 6, 7과 같다.

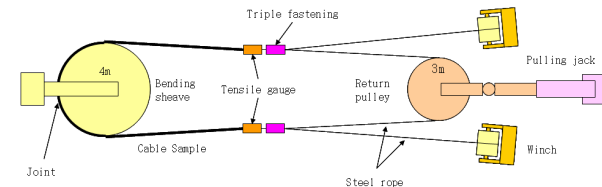


그림 6. HVDC 해저케이블Tensile Bending Test

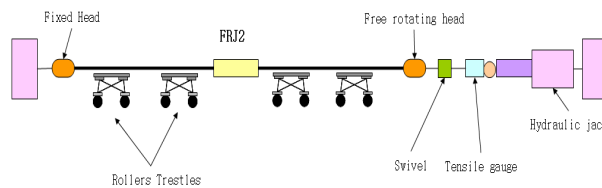


그림 7. HVDC 해저케이블 Tensile Test

2.4.3 전기적 특성평가

총 6회의 Tensile bending test 후 시료는 전기적 특성시험을 위해 케이블 양단에 종단접속함을 조립한다. 부품은 사전에 제조되어 평가를 거친 후 사용하였다.

180kV급 HVDC 해저케이블과 종단접속함에 대한 전기적 특성 평가를 목적으로 그림 8과 같이 시험선로를 구성하였으며 DC내압기와 임펄스 시험기는 LS전선에서 보유하고 있는 설비를 활용하여 평가를 수행하였다. 시험선로는 총 길이 20m이며 구성된 선로는 그림 9와 같다.

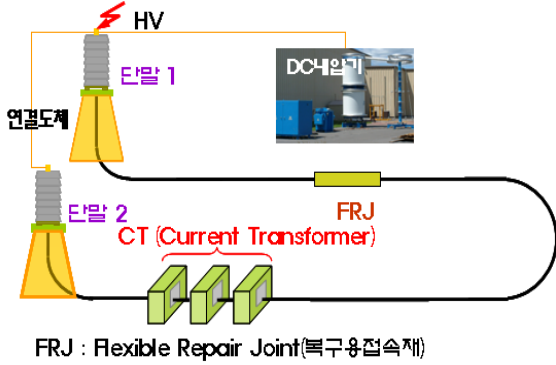


그림 8. DC내압 시험 선로 구성도

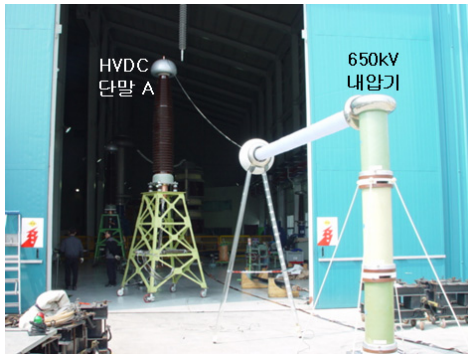


그림 9. 내압시험 구성

전기적 특성시험은 표 5와 같은 방법으로 실시하였다.

<표 5> 전기적 특성시험

시험종류	시험기준전압 및 인가방법
DC내압시험	±400kV/1hr
Impulse 시험	±800kV/10회
DC파괴시험	±400kV부터 25kV/10min 증압파괴 (600kV까지)
Impulse 파괴시험	-800kV/3회 후 50kV/3회 증압파괴

2.5 평가결과

국내 최초로 개발된 HVDC 해저케이블 및 종단접속함에 대한 기계적 평가와 종단접속함을 포함하는 전체 시스템에 대한 전기적 평가에 대한 결과는 표 6과 같다.

<표 6> 특성평가 결과

시험종류	평가방법	평가 결과
Tensile bending test	육안검사(절연지 찢어짐, 도체/Armour 영구변형)	PASS
Tensile test	상대신율 계산 및 비교	PASS
DC내압시험	No BD & 최종 해체조사	PASS
Impulse 시험		PASS
DC파괴시험		600kV이상
Impulse 파괴시험		-1400kV F.O.

전기적평가 이후 해체조사를 통하여 도체 및 Armour의 영구변형과 종단접속 및 종단접속함 변형에 대한 육안검사를 실시하였으나 변형은 발견되지 않았다.

3. 결 론

LS전선은 180kV급 HVDC 해저케이블에 대해 아래와 같은 연구를 수행하였다.

1. 180kV급 HVDC 해저케이블 개발
2. HVDC 해저케이블 사고복구를 위한 종단접속기술 국산화
3. HVDC 해저케이블 종단접속자재 국산화
4. HVDC 해저케이블용 종단접속함 개발

국내에서 최초로 개발된 180kV급 HVDC 해저케이블과 종단접속함에 대한 기계적/전기적 특성 평가를 수행하여 성공적으로 완료되었으며 순수 국내 기술로 개발되었다는 것에 큰 의미가 있다. 또한 국내 전력계통에 HVDC 송전방식 도입이 적극 추진되고 있는 상황에서 LS전선에서 보유한 기술의 활용도가 클 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.Bartnikas, K.D.Srivastava, "Power and Communication Cables Theory and Applications", IEEE, 2000
- [2] Working Group 21.02, "Recommendations for tests of Power Transmission DC Cables for a Rated Voltage Up to 800kV", Electra 189, 2000
- [3] Working Group 21.02, "Recommendations for Mechanical Tests on Sub-Marine Cables", Electra 171,1997
- [4] Roberto Rudervall, J.P.Charpentier, Raghuvveer Sharma, "High Voltage Direct Current Transmission Systems Technology Review Paper"
- [5] Denis Lee Hau Aik, Goran Andersson, "Voltage and Power Stability of HVDC Systems-Emerging Issues and New Analytical Methodologies", Invited paper to VII SEPOPE, Brazil, May 2000
- [6] Makoto Hara, Kazuo Watanabe, "Research and Development of ±250kV DC XLPE Cables", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.13, No.1, pp7-16, January 1998
- [7] O.Hauge, J.Normann Johnsen, T.A.Holte, K.Bjorlow-Larsen, "Performance of the ±250kV HVDC Skagerrak Cables Further Development of the HVDC Paper-Insulated, Mass-Impregnated (Solid type) Submarine Cable, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.3, No.1, pp.1-15 January 1988