

## HVDC 해저케이블 접속재 신뢰성 평가를 위한 인정시험

양병모\*, 박흥석\*, 박준우\*, 김종채\*, 강지원\*, 윤형희\*

한전 전력연구원\*, 한국전력공사\*\*

### Reliability Test for the Repairing Joint in HVDC Sea Submarine Cable

B.M Yang\*, H.S Park\*, J.W Park\*, J.C Kim\*, J.W Kang\*, H.H Yoon\*

KEPCO KEPRI\*, KEPCO\*\*

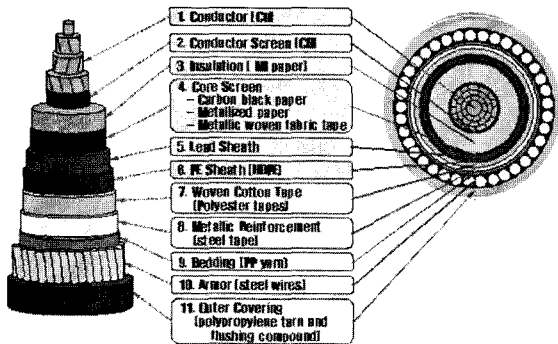
**Abstract** - HVDC 케이블은 장거리 전력전송, 국가간 계통연계, 비동기 전력계통연계, 전력의 시장화에 따른 전력공급 제어 필요에 따라 세계적으로 널리 사용되고 있다. 국내에서는 현재 유일하게 제주-해남간 HVDC 해저케이블이 운영 중에 있으며, 향후 제주도의 안정적인 전력공급을 위하여 2011년에 제주-육지간 HVDC 해저케이블이 추가로 건설될 예정이다. 그래서 HVDC 해저케이블의 안정적인고 신뢰성 있는 운영을 하기 위한 보수자재용 접속재 개발 및 신뢰성 평가가 필요하게 되었다. 본 논문에서는 제주-해남간 운영중인 HVDC 해저케이블 보수자재용으로 개발된 접속재에 대한 신뢰성 평가 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 Electra 179, 189의 기계적 및 전기적 평가에 대하여 기술하고자 한다.

### 1. 서 론

제주-해남 HVDC 시스템은 육지의 값 싼 전력을 제주에 공급하기 위해서 GEC-Alstom사에 의해서 1997년 완공되었으며 1998년부터 상업운전을 시작하였다. 최대용량 300MW 그리고 정격 운전 용량 150MW의 전력전송 능력을 가진 시스템으로 현재 육지에서 직류해저케이블을 통해 전력을 공급하고 있으며('04년 제주 전체발전량의 41.4%) 수전된 직류 전류를 교류로 변환하여 제주 계통에 공급하는 직류송전(HVDC) 방식으로 부하중독특성이 신축하여 제주 전력계통 안정에 크게 기여하고 있다.

특히, 제주-해남간 HVDC 해저케이블은 제주도 전력계통의 중요한 부분을 차지하고 있기 때문에 안정적인 전력공급이 중요하며 고장시 복구체제 확립을 통한 계통의 안정성 확보 또한 중요하다. HVDC 해저케이블에 대한 예방 대책 및 유사시 복구 시스템의 확립을 통한 고장발생시 신속한 복구가 이루어져야 하며, 고장복구를 위해 가장 선행되어야 하는 과정이 접속재 개발 및 신뢰성 평가라 할 수 있다.

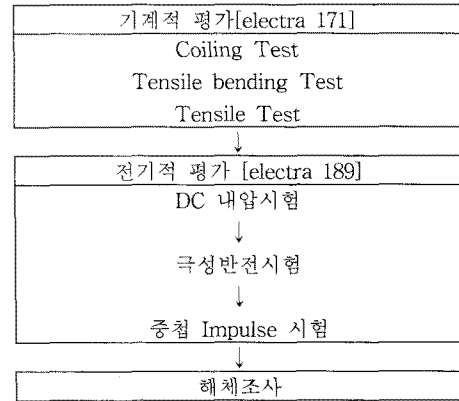
본 연구에서는 Electra 179, 189의 HVDC 해저케이블에 대한 기계적 및 전기적 평가에 의거하여 신뢰성 평가를 계획하고자 한다.



<그림 1> 제주-해남 HVDC 해저케이블 구조

### 2. 본 론

HVDC 해저케이블의 접속재 평가방법은 CIGRE의 권고안 (Electra No. 189, 171)에 따라 기계적 및 전기적 평가를 수행하도록 되어 있다. <그림 2>와 같은 방법으로 신뢰성 평가가 진행되어야 한다.



<그림 2> 제주-해남 HVDC 해저케이블 접속재 신뢰평가 절차

#### 2.1 HVDC 해저케이블 기계적 평가[Electra 171]

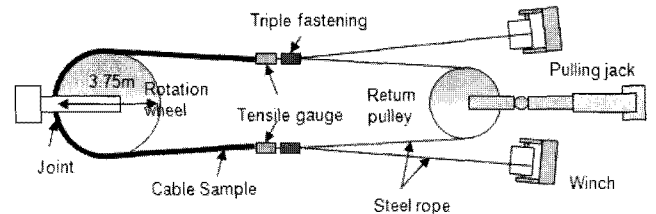
##### 2.1.1 Coiling Test

HVDC 해저케이블의 시료 총길이는 접속재를 포함하여 총 길이가 8 turn 이상으로 하며 Coiling carousel 직경은 7m로 한다.

##### 2.1.2 Tensile Bending Test

Coiling Test를 통과한 HVDC 해저케이블 접속재 시료에 대하여 Tensile Bending Test를 실시하며, 아래와 같은 방법으로 <그림 3>과 같은 시험장치를 구성하여 시험을 수행한다.

- 가. Tension : 5300 kgf 이상 ( $T=1.3 \cdot w \cdot d \cdot H$ )
  - w: 케이블 1m 중량[N/m], d:최대포설 수심[m], H=0.2\*w\*d (d=200m)
- 나. Rotation Wheel 직경 : 3750 mm ( 포설선의 pay-off wheel 직경보다 크지 않을 것, 일반적으로 포설선의 pay-off wheel 은 4m)
- 다. 시험 회수 : 3회



<그림 3> Tensile-Bending 시험장치 구성

#### 2.2 HVDC 해저케이블 전기적 평가안[Electra 189]

아래 <표 1>에 Electra 189의 전기적 평가에 대한 내용을 정리하였다. 특히, 그 중에서 고전압 임펄스 중첩시험의 목적은 직류 고전압으로 운전되고 있는 HVDC 케이블에 스위칭 썬지 (Switching Surge) 또는 뇌 임펄스(Lighting Impulse)가 침입시 케이블의 이상 유무를 시험하기 위한 것이다.

< 표 1>에서와 같이 부하주기시험(Load Cycle Test), 극성반전시험(Polarity Reversal Test), 중첩임펄스 시험시 필수적으로 정극성 및 부극성 출력을 낼 수 있는 내압기가 필요하며, 특히 극성반전시에는 2분안에 정극성에서 부극성으로 극성반전 시험을 수행해야 한다.

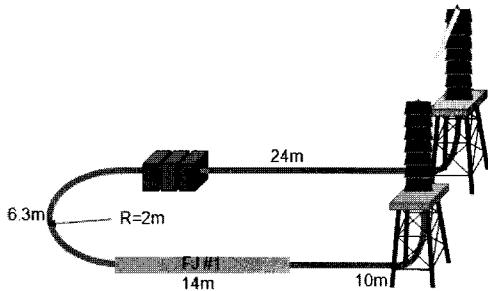
< 표 1 > HVDC 케이블의 전기적 평가권고안, Electra 189.

시험 항목	시험 방법
부하주기시험 (Loading Cycle Test)	도체와 쉬스(sheath)사이의 +DC(=1.8U0) 10주기, -DC (=1.8U0) 10주기의 과통전 시험을 실시, 이 때 1주기는 8시간의 도체가열과 16시간의 냉각으로 구성
극성반전시험 (Polarity Reversal Test)	부하주기시험 후 +DC(=1.4U0), -DC(=1.4U0)의 전압을 4시간 간격으로 극성 반전 시키는 과통전시험을 10주기 동안 실시, 이 때 1주기는 8시간의 도체가열과 16시간의 냉각으로 구성. 극성반전 시간은 2분에 수행함.
임펄스중첩시험 (Switching Surge*)	극성반전 시험후 -DC(U0)전압을 2시간 인가한 후, 전압이 인가된 상태에서 10회의 (+) 임펄스 전압(UP2 =1.15×SSL)을 2분 이상 간격으로 인가. 같은 방법으로 +전압에 대한 (-) 임펄스 전압(UP2 =1.15×SSL) 인가 시험 실시
임펄스중첩시험 (Lighting Impulse*)	극성반전 시험후 -DC(U0)전압을 2시간 인가한 후, 전압이 인가된 상태에서 10회의 (+) 임펄스 전압(UP1 =1.15×LIPL)을 2분 이상 간격으로 인가. 같은 방법으로 +전압에 대한 (-) 임펄스 전압(UP1 =1.15×LIPL) 인가 시험 실시

\* U0 : 케이블 운전전압 (180kV)  
 \* Switching Surge Test waveform : time to crest TCR=250μs ±20%, time to half value T2=2500μs±60% by IEC 60 & 230  
 \* Lighting Impulse Test waveform : time to crest T1=1-5μs, time to half value T2=50±10μs by IEC 60 & 230

2.2.1 부하주기 시험

부하주기 시험은 <그림 4>와 같이 회로를 구성하여 아래와 같은 시험방법을 통하여 시험을 실시한다.



<그림 4> 부하주기 및 극성반전시험 회로 구성도

- 가. 굴곡/인장시험이 끝난 시료에 대하여 실시  
 나. 최소 30m이상의 케이블과 요구되는 접속재 1개 이상을 포함해서 시험선로 구성, 인접 접속재와의 거리는 최소 8m 이상다. 시험선로에 대하여 아래조건으로 20일 부하주기 시험 실시  
 - 1주기는 가열전류를 도체에 인가하는 8시간 가열과 전류를 인가하지 않고 16시간 냉각 유지, 가열 중 최소 1시간은 도체온도가 50℃~55℃에서 유지  
 - 처음 10주기는 DC 1.8U0의 전압을 도체와 금속시스간에 인가 후, 최소 8시간은 전압과 전류를 인가하지 않고 도체의 시스를 연결한 채로 휴기 기간을 둠  
 - 두 번째 10주기는 DC +1.8U0의 전압을 도체와 금속시스간에 인가한 후, 최소 8시간은 전압과 전류를 인가하지 않고 도체와 시스를 연결한 채로 휴기 기간을 둠

2.2.2 극성반전 시험

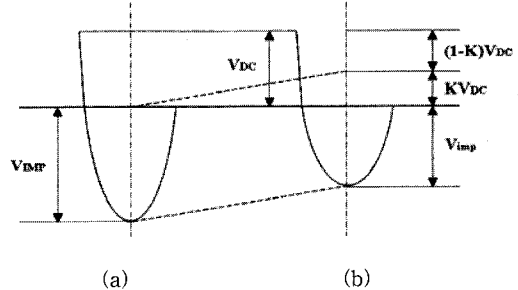
- 가. 부하주기시험이 끝난 시료에 대하여 실시한다.  
 나. 시험선로에 아래 조건으로 10일 부하주기시험을 실시한다.  
 - 1주기는 가열전류를 도체에 인가하는 8시간 가열과 전류를 인가하지 않고 16시간 냉각으로 유지한다. 가열 중 최소 1시간은 도체온도가 50℃~55℃에서 유지되어야 한다.  
 - 극성반전 10주기 시험은 DC 1.4U0의 전압을 도체와 금속시스간에 인가한다.  
 - 정극성으로 시작하여 매 4시간마다 극성을 변환한다.

극성반전은 대부분주기에서 전류의 휴지와 부합해야 하며, 추천 극성반전시간은 2분 이내이다.  
 - 그 후 최소 8시간은 전압과 전류를 인가하지 않고 도체와 시스를 연결한채로 휴기 기간을 둔다.

2.2.3 임펄스 중첩시험

HVDC 해저케이블 접속재에 인가되는 최대전위는 정극성 DC 전압(+Vdc)으로 운전시 반대극성의 임펄스(-VIMP)가 침입할 경우에 발생되며, 그 때 중첩의 영향을 고려해야 한다.

< 그림 5 >의 (b)는 중첩 임펄스에 대한 Bahder 계수 K의 정의를 도식화한 것으로서 HVDC 해저케이블 접속재내의 공간전하 영향을 고려할 경우 +Vdc에 반대극성의 임펄스 -VIMP가 침입하면 KVdc만큼 전위가 중첩되어 절연체에 인가되는데, 이 때 전위는 <그림 5>의 (a)보다는 감소함을 알 수 있다.



<그림 5> 임펄스 중첩 시 케이블에 인가되는 최대전위

즉, HVDC 해저케이블 접속재에 인가될 수 있는 최대 전위를 Vmax라 한다면, <그림 5>의 (a) 경우 Vmax는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max} = V_{dc} - (-V_{IMP})$$

Vdc : 정경전압(180kV), VIMP : 임펄스 최대전압(540kV)

따라서, HVDC 해저케이블 접속재에 가해지는 최대 전위는 720kV로 산정할 수 있다.

3. 결 론

< 표 2 >에서 보듯이, HVDC 해저케이블 고장점시 신속한 고장복구를 위하여 개발된 접속재에 대한 기계적/전기적 평가를 통한 신뢰성 평가를 실시한다.

< 표 2 > HVDC 해저케이블 접속재 신뢰성 평가 방법

	평가방법	평가 결과 (Pass or Fail)
Coiling test	육안검사 (케이블 축에 평행한 선을 표시하여 꼬이는 불균일 정도를 체크함) 파열이 없어야 함	
Tensile bending test	육안검사(절연지 찢어짐, 도체/Armour 영구변형)	
Tensile test	상대신을 계산 및 비교	
DC내압시험	No Break-Down & 최종 해체조사	
극성 반전 시험		
중첩 Impulse 시험		

[참 고 문 헌]

- [1] 지중송전 케이블 시스템, 한국전력공사
- [2] 한전 송변전처 구매규격 (180kV 직류 해저케이블 및 접속재 2008.05)
- [3] Electra 171 (Recommendations for mechanical tests on submarine cables,1997)
- [4] Electra 189 (Recommendations for tests of power transmission DC cables for a rated voltage up to 800kV, 2000)