

## HVDC 케이블 평가방법 연구

안용호, 장태인, 정길조, 유희영\*, 김정년\*\*, 전승익\*\*, 한병성\*\*\*  
한전전력연구원, 한국전력공사\*, LS전선(주)\*\*, 전북대학교\*\*\*

### Study on the Evaluation Method of HVDC Cable

Y.H.An, T.I.Jang, G.J.Jung, H.Y.Yu\*, J.N.Kim\*\*, S.I.Jeon\*\*, B.S.Han\*\*\*  
KEPRI, KEPCO\*, LS Cable. Ltd.\*\* , Cheonbuk National Univ.\*\*\*

**Abstract :** HVDC(High Voltage Direct Current) is an underwater cable between Jeju Island and Haenam in main land and supplies approximately 50% of electrical usage in Jeju Island. If there is any power failure due to HVDC, it will cost approximately 50,000 US dollars per day including Thermal Electrical Generation. Therefore it is absolutely necessary to recover the problem in rapid timely basis.

In conclusion, evaluation method of HVDC cable is needed urgently to upgrade current HVDC underwater cable repair technique in Korea to minimize the cost and time factors.

**Key Words :** HVDC Cable Evaluation, Repair Joint, DC Paper Insulation Cable, Mechanical Tests

### 1. 서 론

HVDC 해저케이블은 제주지역 전력의 50%를 담당하고 있는 설비로서 고장시 신속한 복구가 요구되나(일일평균 발전연료비 손실 6천만원), 접속기술 미확보 및 접속재의 국내제작이 불가하여 고장복구를 해외 제작사에 의존함으로써 복구에 장기간(7개월)이 소요되고 있는 실정이다.

해저케이블 설비를 보유하고 있는 유럽 및 일본 등의 국가들은 대부분 해저케이블 생산 및 고장복구 능력을 보유하고 있는 반면 우리나라는 해저케이블 생산이 전무하고, 유지보수 경험이 부족한 상태이다. 국내 케이블 업체의 경우에 육상케이블의 생산능력은 세계적 수준이므로 국내 최초로 도입된 직류 지절연 케이블(HVDC 케이블)에 대한 접속재 개발을 통하여 HVDC 해저케이블 고장 발생 시 신속한 복구를 위한 접속재 및 접속기술을 확보하고 국내 HVDC케이블 고장시 신속한 대응 및 국내 기술수준의 향상을 도모하고자 HVDC 해저케이블에 대한 접속재 및 접속기술을 개발 중에 있다.

본 논문에서는 국내 HVDC 해저케이블 복구용 접속재 개발시 이를 평가할 수 있는 방법들 중 기계적 평가 방법들을 제시를 하였다.

### 2. HVDC 케이블 평가방법 및 조건

#### 2.1 HVDC 케이블 평가방법

800kV까지의 DC케이블에 대한 평가방법은 Electra No. 189 (2004)의 "Recommendations For Tests Of Power Transmission DC Cables For Rated Voltage Up To 800 kV"에 규정되어 있다.

#### 2.2 평가시험 조건

DC전압은 Test 전압의 리플이 3%이하이어야 하며, AC 전압의 주파수 및 파형은 41-61Hz & Sinusoidal(정현파, 사인파)이어야 한다. 임펄스는 IEC 230 규정에 따른다.

#### 2.3 평가시험시 알아야 할 Cable 특성

$U_0$ ,  $U_T$ ,  $U_{P1}$ ,  $U_{P2}$ , 20°C에서 DC저항( $\Omega/km$ ), 도체의 최고 운전온도, 전부하에서 도체의 최저운전온도, 주변의 최대 및 최소온도, 절연층의 최고 온도 강하(drop), 도체와 주변사이의 최고온도 강하(drop), 도체와 스크린사이 커패시턴스( $\mu F/km$ ), 안정상태 최소 오일압력 (kPa or

bar), 최소 가스압력(kPa or bar), 최대 AC 2kV/mm에 상응하는 AC 전압(power factor측정시), 최대 설계전계(kV/mm) 값을 알아야 한다.

### 3. Mechanical Tests

Land cable and joints, submarine cables and joint 에 대해 electra No.171에 "Recommendations For Mechanical Tests On Sub-Marine Cables"에 의해 시험을 수행한다. 여기서는 해저케이블 케이블의 기계적인 시험에 대한 일반적인 가이드라인을 제시하고 있으며 응용 범위는 단심 또는 3심 AC와 DC 해저케이블에 적용하며 적용 전압등급은  $U_0$ 가 AC 36kV이상, DC 100kV이상의 케이블 평가에 적용된다.

시험전 준비조건으로 케이블의 관련 요소(도체, 금속시스, Armouring)들이 케이블 끝부분에서 적절한 도구를 사용해서로 체결이 되어야 한다.

#### 3.1 권취시험

드럼이나 턴 테이블(Turn-Table)상태의 케이블에는 적용되지 않으며 제조 또는 포설시 권취(coiling) 되는 케이블에만 적용한다. 일반적으로 케이블은 권취하는 동안에 비틀림을 겪는다는 것을 고려한 시험으로 생산 및 포설 과정에서 권취(coiling)되는 케이블에 대한 내변형 시험으로 적어도 8turns 이상의 적절한 길이로 시험한다. 또한, 시험할 시료의 중간부에 적어도 2개 이상의 FJ(Factory Joint)가 포함되어야 한다.

조인트 끝 간의 최소 거리가 완전한 2회 turns과 동등해야 한다. 권취는 제조나 운반 중에 사용되었던 형태를 그대로 유지해야하고 제조자는 권취되는 최소반지름과 방향을 공지해야 하며 시험은 반경을 상정해서 시험을 수행한다.

권취시험을 시작하기 전에 케이블축과 나란하게 선을 케이블에 표시해야하며 권취동작 동안 케이블에 있어서 꼬임의 균일성을 체크할 수 있어야 한다. 또한, 권취(coiling)된 케이블의 최고 및 층에 있는 자키의 높이는 coiling 동작(제조, 운반, 포설)동안 사용되었던 것을 넘어서는 안된다.

양 끝부분이 회전하는 것을 방지하기위해 케이블은 제조자가 제공한 값과 동일한 최소 굴곡 반경로 감아야 하며 권취 후 케이블은 드럼에 다시 감아야 한다. 이 시험은 제조, 운반, 포설동안 케이블에 예상되는 횟 수 만큼

수행한다.

시험후 평가는 코일링 동작동안 케이블의 꼬임의 균일성을 검사하고 케이블의 중간부에서 취한 FJ(Factory Joint)중의 하나를 샘플로 취해 육안검사를 수행하며 다음과 같은 현상이 없어야 한다.

- 강화테잎에서 갈라짐
- 절연지의 찢어짐
- 도체와 armour의 영구적인 변형

만약, 인장 굴곡시험(tensile bending test)을 수행할 예정이면 평가시 필요한 조인트 수를 줄이기 위해 tensile bending test후 육안검사해도 무방하다.

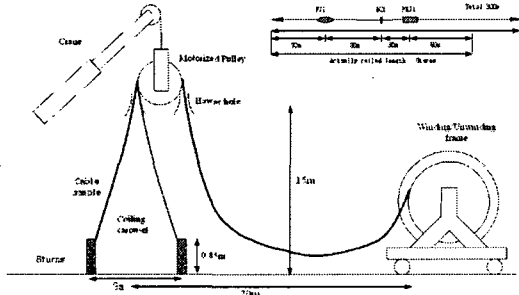


그림 1. 권취시험(Coiling test) 구성

### 3.2 인장굴곡시험

포설 및 Normal Recovery 동작동안 발생하는 인장과 굴곡 시험으로 Normal Recovery는 바다 바닥에 노출되거나 케이블의 직경이상 굵이지 않았던 케이블의 복구를 말한다.

이 시험에서는 적어도 하나의 FJ포함해야 하며 권취 시험한 샘플로 이 시험을 수행한다. 만약, 포설 중에 기계적인 스트레스를 줄이기 위해 특별한 장비(예: floats)를 사용하였다면 제조자와 소비자간의 협의에 의해 test tension을 줄여서 시험할 수 있다.

시험시 케이블 헤드는 시료 끝부분에서 멀리 떨어진 부분에 있어서 다른 케이블 요소에 나타나는 힘이 포설과정 중에 발생하는 힘의 분포와 동일해야 제작되어야 한다. 또한, 시료는 적어도 30m이상으로 케이블 끝단과 FJ사이의 거리가 적어도 10m이상 또는 armour가 묻혀지는 길이의 5배 이상이 되어야 하며 시험드럼의 직경은 케이블 포설선에 장착되는 pay-off wheel보다 작은 직경을 갖는 드럼에 감겨져야 한다. 또한, 시험드럼과 접촉하는 케이블의 길이는 적어도 armour의 포설길이의 2배가 되어야 하며 드럼의 원주의 반보다 적어서는 안된다.

여러개의 조인트가 샘플에 포함되어 있다면 조인트간의 거리가 적어도 test드럼의 원주와 같아야한다. 적절한 장비를 사용하여 조인트를 포함하는 케이블샘플은 드럼에 감기와 풀기를 3회씩 감는 방향을 바꾸지 않고 차례대로 수행한다.

시험시 사용되는 힘은 수심이 0~500m이하인 경우에는  $T=1.3 \cdot w \cdot d + H$  [N]으로 한다.

이때, w=케이블 1m의 무게(N)-동일한 물부피의 무게(N/m)

d=최대 포설길이(m)

H=최대 허용되는 바닥 tension(N)

$H=0.2 \cdot w \cdot d$  (d의 최소값은 200m)

여기서 1.3은 포설 및 복구과정에서 발생하는 dynamic forces와 recovery situation에 의해 발생하는 부가적인 tension을 고려하는 것으로 포설 angle에 적절한 안전여유를 주기 위함이다.

수심이 500m를 초과하는 경우에는  $T \approx w \cdot d + H + 1.2 | D |$  [N]으로 시험을 수행한다.

이때, w=케이블 1m의 무게(N)-동일한 물부피의 무게(N/m)

d=최대 포설길이(m)

H=최대 허용되는 바닥 tension(N)

1.2= dynamic forces of safety factor

D=dynamic tension(N)

$H=0.2 \cdot w \cdot d$  로 동일

dynamic tension :  $D = \pm 1/2 \cdot b_n \cdot m \cdot d \cdot \omega^2$

$b_n$ =수직운동, 포설 도르래의 최고점에서 최고점까지(m)

m=케이블의 질량(kg/m)

$\omega = 2 \cdot \pi / t$ , 포설도르래의 운동 각주파수 (1/sec)

t=운동주기(s)

특수한 날씨에 대해서는  $b_n$ ,  $\omega$ 를 계산하는 일반적인 규칙은 현재까지는 없다. 배의 움직임이 상세하게 주어지지 않는다면 실제의 파도높이와 주기가 D계산에 이용되어야 한다. 이러한 파라미터들은 특정 프로젝트와 포설선, 동작중 최악의 날씨에 근거하여 추측되어야만 한다.

이 시험 후 적절한 전기적인 시험이 행해져야 하며 그 후 FJ를 포함하는 샘플에 대해서 육안 검사를 통해 다음 항목을 검사한다.

- 강화테잎에서 갈라짐
- 절연지의 찢어짐
- 도체와 armour의 영구적인 변형

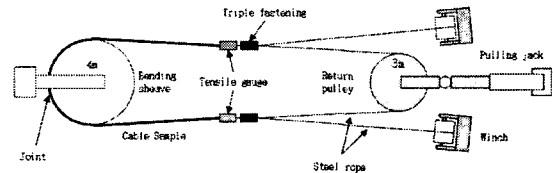
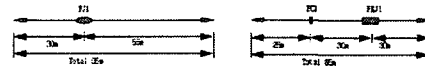


그림 2. 인장굴곡시험(Tensile-Bending Test) 구성

### 3.3 인장시험(Tensile Test)

케이블 기본 특성을 파악하기 위한 시험으로 약 50m길이의 케이블이 필요하며 권취시험을 수행한 시료를 사용해서는 안되며, FJ를 포함해야만 한다.

케이블 끝과 Joint사이의 거리가 적어도 10m이상 또는 armour가 묻히는 길이의 5배 이상이 필요하다. 이때, 케이블 헤드는 케이블 끝에서부터 멀리 떨어진 부분에서의 서로 다른 케이블 요소에 나타나는 힘이 포설 동작과정 중의 힘의 분포와 동일하게 취부되어야 하며 케이블 헤드의 한쪽은 고정되고 한쪽은 자유롭게 회전할 수 있는 구조로 시험을 수행한다.

시험시 케이블에 tension을 다음 값까지 증가시킨다.

$$T_0 = 50w$$

여기서, w=케이블 1m의 무게(N)

tension  $T_0$ 는 시험받는 전체 케이블길이의 무게와 동일하고 개략적으로는 케이블을 자연스럽게 늘어뜨리고 회전시킬만한 적절한 지지물의 도움으로 케이블을 직선을 유지시켜 주는데 필요한 tension이다.

힘을 가한 후 15분후 두개의 적절한 index line간의 길이를 측정한다. 이때 길이를  $L_0$ 라하고, tensile bending test에 사용되었던 값까지 tension을 증가시키고 15분 동안 유지. 이때 두개의 적절한 index line간의 길이를 측정하고 길이를  $L_{max}$ 라 하고 free head의 회전수를 기록한다. 그 후 tension을  $T_0$ 까지 감소시키고 그때의 길이를 측정하고  $L'_0$ 라 한다.

시험은 총 3회를 수행하며 각각의 사이클 동안 다음의 상대적인 길이가 계산된다.

$$(L_{max} - L_0) / L_0 \text{ and } (L'_0 - L_0) / L_0$$

여기서  $L_0$  :  $T_0$ 를 인가 했을때의 초기길이

$L_{max}$  : 최대 길이

$L'_0$  :  $T_0$ 를 인가했을때의 영구적인 길이

시험 후 육안 검사를 수행하여 아래의 항목을 검사한다.

- a. 강화테이프에서 갈라짐
- b. 절연지의 찢어짐
- c. 도체와 armour의 영구적인 변형

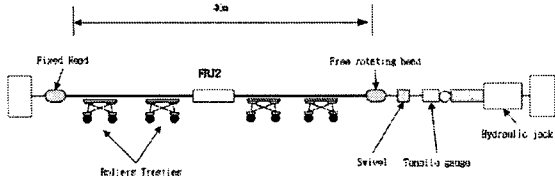


그림 3. 인장시험(Tensile Test) 구성

### 3.4 외수압 시험

포설되는 지점에서 최대외부수압을 모의한 외부수압 시험으로 샘플은 포설동안 명시된 최소 반지름과 동일한 반지름으로 bending test를 실시후 수행한다. 이 때 bending은 제조자와 구매자간의 합의에 의해 적절한 IEC 규정이나 tensile bending test에 따라서 실시한다.

이 시험은 XLPE 케이블에는 적용되지 않고 지절연과 금속 쉬스를 갖는 케이블을 시험하기 위한 시험으로 각각 다음과 같다.

#### 3.4.1 MI cable

5m 정도의 케이블의 끝을 캡을 사용해서 실링(sealing)하고 압력용기 내에 넣고 48시간 동안 외부압력하에 둔다. 이때 외부압력은 수심500m까지는 최대깊이+50m에 상당하는 외부수압을 수심500m이상은 최대깊이+100m에 상당하는 외부수압을 인가한다..

#### 3.4.2 Gas-filled cables

5m 정도의 케이블의 끝을 캡을 사용해서 실링(sealing)하고 압력용기 내에 넣고 48시간 동안 외부 압력하에 둔다. 이때 외부압력은 수심에 관계없이 최대 포설깊이에 추가 2 bars 인가하고 테스트하는 케이블내부는 가압하지 않는다.

#### 3.4.3 Oil-filled cables

5m 정도의 케이블의 끝을 캡을 사용해서 실링(sealing)하고 압력용기 내에 넣고 48시간 동안 외부 압력하에 둔다. 테스트하는 케이블은 절연유로 채우고 test동안 대기압으로 유지한다. 이때 금속쉬스에 가해지는 외부압력은 수심500m까지는 최대깊이+50m에 상당하는 외부수압을 수심 500m이상은 최대깊이+100m에 상당하는 외부수압을 인가한다.

### 3.5 해체 및 검사

외부수압시험 후 양끝에서 0.5m는 무시하고 샘플케이블을 조사하며 케이블을 해체하기 전에 gas and oil filled 케이블 샘플을 최소 운전압력으로 가압한다.

해체시 다음과 같은 현상이 없어야 한다.

- a. 금속쉬스에 적절한 모양의 불균일성
- b. 강화테이프에 파열
- c. 절연지에 찢어짐이나 손상
- d. 도전성접속(NJ?)에 물이 새어들어온 흔적

### 3.6 내수압 시험

GIL 및 OF 케이블에만 적용하며 약 10m의 샘플케이블 필요하다. 케이블 양 쪽 끝은 회전하지 않도록 고정하며 시험하고자 하는 샘플에는 적어도 하나의 FJ를 포함시켜야 한다. 샘플은 아래와 같은 압력하에서 24시간 노출시켜 특성을 검사한다.

$p' = 1.5 + p'_0 + 5 \times 10^5 \text{ (Pa)}$  여기서,  $p'_0$ 는 금속쉬스에 가해지는 최대압력차(Pa)

시험후 평가는 양끝에서 1m는 버리며 다음과 같은 현상이 없어야 한다.

- a. 강화테이프에 파열
- b. 금속쉬스에 적절한 모양의 불균일성
- c. 쉬스에서의 새어나간 흔적
- d. 도전성접속(NJ?)에 물이 새어들어온 흔적

### 3.7 수밀시험

금속쉬스와 armour 간에 도전성접속이 있는 경우 그 샘플은 도전성접속이 최대수압에 노출되었을 때 leak(새는 부분)가 없는지를 알기위한 시험으로 샘플은 앞절과 같은 방법으로 Tensile Bending Test를 실시하는데 도전성접속 부분의 최대 예상 포설깊이에 상응하는 tension으로 실시한다.

5m 정도의 케이블을 적절히 실링(sealing)하고 가압한 뒤 압력 tube 내에 넣고 48시간 동안 외부압력하에 둔다. 이때 외부압력은 수심500m까지는 최대깊이+50m에 상당하는 외부수압을 수심500m이상은 최대깊이+100m에 상당하는 외부수압을 인가한다

시험후 샘플케이블을 조사하며 방식층 아래부분에 물이 새 흔적이나 물이 흐른 흔적이 없어야 한다.

### 3.8 Sea-Trial Test

포설 조건이 일반적인 상황과 크게 틀릴 경우에만 수행하는 시험으로 시험 케이블은 프로젝트와 관계된 FJ와 RJ를 포함시켜야 한다. 시험 케이블은 실제 수심에서의 포설조건을 재현하기위해 충분히 길어야하고 조인트간도 충분히 길어야 한다. 또한 이 시험은 최대 포설깊이에 상응하는 깊이에서 수행되어야하며 케이블 recovery후 test 케이블은 After-Laying test에 규정된 레벨로 전기적인 시험을 수행해야 한다. 시험 후 케이블과 조인트에 대해 육안 검사를 실시하며 이 때 상기의 권취시험과 같은 검사항목을 적용하여 검사한다.

## 4. 결론

본 논문에서는 국내 HVDC 해저케이블 복구용 접속재 개발시 이를 평가할 수 있는 방법들 중 기계적 평가 방법들을 국제 규정에 준하여 제시를 하였다. 이에 필요한 권취시험, 인장굽곡시험, 인장시험, 외수압시험, 내수압시험, 수밀시험, Sea-Trial Test 등에 대하여 논 하였다. 향후 국내 제주-해남간 설치 운용 중인 HVDC 해저케이블 접속재 및 접속기술 개발에 본 논문에서 제시한 방법들을 토대로 성능을 평가하는 데 활용되리라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사 연구비 지원에 의한 것입니다.

## 참고 문헌

- [1] Electra No. 189 (2004), "Recommendations For Tests Of Power Transmission DC Cables For Rated Voltage Up To 800 kV"
- [2] electra No.171, "Recommendations For Mechanical Tests On Sub-Marine Cables"