

HVDC 해저케이블 유지보수에 관한 연구

권태원* 김우경* 정현웅* 유승환** 임현의***
 *한국전력공사 송변전처 **한국전력공사 전력계통건설처 ***한국전력공사 서울전력관리처

Study for Maintenance of HVDC Submarine Cable

*Kwon Tae Won *kim, Woo Kyom **Yoo Sung Hwan ***Lim Heon Eui *Jeong, Heon Woong
 *KEPCO T&S Department **Power System Construction Office ***Seoul Power Transmission District Office

Abstract - KEPCO has been operating since March, 1998 a HVDC link between Cheju Island and the mainland that it constructed to save high generation cost & ensure the system stability and the supply of electric power of Cheju island (approximately 100km from south of mainland). The purpose of this study is to consider the complete maintenance of the HVDC Submarine Cable after its construction in 1997 while proposing future direction for the stable operation of the HVDC Submarine Cable.

인한 케이블의 손상을 예방하기 위하여 1993년 겨울부터 안강망 양카 침투깊이 실증시험, 해저지질 상세조사를 수행하고, 보호공법에 대한 타당성 검토 등을 거쳐 전구간을 1.3 ~ 3.0m 깊이로 매설하거나 콘크리트 매트리스, Rock Berm 등으로 보호공사를 시행하였다. 이러한 보호공사를 1995년 8월부터 1997년 11월까지 시행하였고, HVDC 해저케이블의 상업운전은 1998년 3월부터 시작되었다. HVDC 해저케이블의 포설도 및 보호공법은 [그림1]과 같다.

1. 서 론

육지로부터 100km 거리에 있는 제주도는 전력계통이 육지와 떨어져 독립적으로 운용되고 있어, 전력공급 안정도가 낮으며 육지에 비해 발전단가가 비싸고 전력수요 또한 급격히 증가하였다. 이에 따라 한국전력은 제주도의 전력공급 능력확보, 적자 개선 및 신뢰도 향상을 위하여 제주-해남간 HVDC 해저케이블 공사계약을 1991년 10월 프랑스의 Alcatel 케이블사와 체결하였고 약 6년간의 공사 끝에 97. 11월 준공하게 되었다.

한국전력은 국내 최초로 HVDC 해저케이블을 보유함에 따라 설비의 최적운용을 도모하고자 별도의 HVDC 해저케이블 유지보수 기준을 제정하여 유지관리에 임하고 있다. HVDC 케이블과 같은 중요설비의 경우, 특히 고장의 사전예방에 각별한 노력이 필요하며, 또한 복구기간의 단축 및 복구비용의 절감을 위해 외국 제작사에 의존하지 않는 고장복구 기술을 확보가 절대적으로 중요함을 인식하게 되었다. 본연구에서는 HVDC 해저케이블의 건설과정, 유지보수 업무 및 복구절차, 보호대책 등에 관한 사항을 고찰하고 향후 발전방향을 제시함으로써 HVDC 해저케이블의 안정적 운영을 위한 토대를 구축하고자 한다.

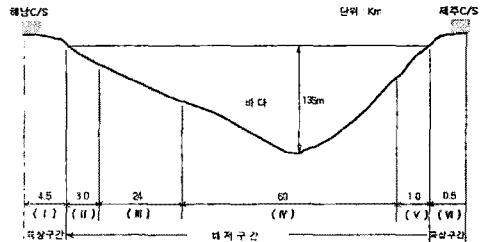
2. 본 론

2.1 HVDC 해저케이블 소개

2.1.1 건설개요

HVDC 해저케이블은 전남 해남에서 제주도 제주시까지의 해저구간 96km, 육상구간 5km인 전체길이 101km에 케이블 2조와 광통신 케이블(12코아) 2조가 설치되었다. 연계방법은 직류 Bipole 해수커로방식을 채택하였다.

건설공사는 91년 10월 해저케이블 설치를 위한 설계, 제작, 시공을 일괄하여 프랑스 Alcatel사와 계약을 체결, 92년 2월 착공하여 93년 6월 전력케이블 설치가 완료되었으나, 그해 10월 해저 케이블 보호에 대한 취약점이 발견되어 전면적인 케이블 보호공사를 추가적으로 시행하였다. 취약점은 세계적으로 우리나라 연근해에서만 집중적으로 행하여지는 안강망 어로작업용 닻과 해남, 완도 연안에서 성행하는 김양식어장의 투하식 앵카로부터 케이블 손상이 일어난다는 것이다. 닻과 앵카로

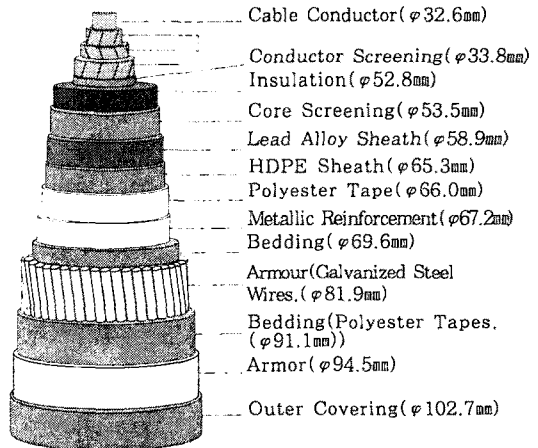


구 간	I	II	III	IV	V	VI
매설깊이	지중 1.5m	해저 2.0m	해저 0.5m	해저 1.3-3.0m	해저 0.5m	지중 1.5m
매설 및 보호방법	트로푸	주철판	매트리스	적매	주철판+콘크리트덮개	트로푸

[그림 1. 해저케이블 포설도 및 보호공법]

2.1.2 HVDC 해저케이블 사양

HVDC 해저케이블은 180kV HVDC 800SQ 동도체 유침지 절연 케이블로서 구조는 [그림2], 특성은 [표1]과 같다.



[그림 2. 해저케이블 구조]

【표 1. HVDC 해저케이블 특성】

정격용량	150MW	정격전압	± 180kV
정격전류	840A	기준절연전압	540kV
철선	단일외장	직경	102.7mm
중량(공기중)	31.0kg/m'	중량(수중)	22.7kg/m'

2.2 HVDC 해저케이블 유지보수

2.2.1 HVDC 해저케이블 순시

HVDC 해저케이블의 순시는 해저케이블 구간을 천해(淺海) 양식지역과 어로(漁撈)수역으로 구분하여 순시기간 및 선박운영 대수 등을 별도로 적용하고 있다.

천해양식지역(해남연안~해남양육점으로부터 27km지점)은 해저케이블 양측으로 1km 이내의 지역중 해조류, 패류, 어류 양식어업이 가능한 천해지역으로써 수산물의 양식을 위하여 어선, 어구를 사용하거나 시설물의 설치로 인하여 해저케이블에 손상을 일으킬 수 있는 구역을 말한다. 어로수역(해남양육점으로부터 27km지점~제주)이란 해저케이블 양측으로 1km 이내의 지역중 연안어업 또는 근해어업이 이루어지는 지역으로써 어망, 닻 등의 어구에 의하여 해저케이블에 손상을 일으킬 수 있는 구역을 말한다.

어로수역내 해저케이블에 대한 순시는 중형선박(길이 12m, 속도 20knot)을 이용한 해상 상주순시를 연 200일을 기준으로 시행하며 성어기에는 주·야간 연속으로 집중순시를 하고 있다.

【표 2. 어로수역의 선박순시】

구 분	기 간	순 시 방 법
성어기	6월~9월	해류를 이용한 주어로 작업기간중에는 주야간 연속순시
어한기	10월~5월	-

천해양식지역의 해저케이블에 대한 순시는 소형선박(5톤이상)을 이용한 주간순시를 하고 양식장 설치기간중에는 매일 해상 상주순시를 하며 양식장 설치기간외에는 1회/1주 이상 순시하고 있다.

【표 3. 천해지역의 선박순시】

구 분	기 간	선박운영
양식장 설치기간	8월 ~ 10월	소형선박 2척
양 식 기 간	11월 ~ 4월	소형선박 1척
미 양 식 기 간	5월 ~ 7월	소형선박 1척

순시주기는 어장의 형성, 양식장 등의 설치시기 등 어로작업현황과 기상여건 등을 고려하여 탄력적으로 운영하고 있다.

2.2.2 HVDC 해저케이블 점검

해저케이블에 대한 점검은 ROV 점검과 잠수점검으로 분류되며, ROV 점검은 해저케이블의 손상유무, 노출 및 이동, 보호설비의 파손 등 케이블의 상태를 정밀히 조사하기 위하여 ROV (Remotely Operated Vehicle)를 이용한 수중촬영으로 정밀조사를 시행하는 점검을 말한다. 잠수점검은 ROV 점검이 곤란한 해저케이블 구간 및 횡간수도와 제주연안구간에 대하여 잠수사가 직접 잠수하여 케이블의 손상유무, 노출 또는 이동, 보호설비의 파손 등 케이블의 상태를 정밀히 조사하기 위한 점검을 말한다. 점검시기 및 주기는 아래표와 같다.

【표 4. 해저케이블의 점검주기 및 점검시기】

점검종류	점검주기	점 검 시 기
ROV점검	1회/년	매년 10월이후 (태풍시기 이후)
잠수점검	1회/년	매년 6~9월(청수유입이후 부터)

ROV 점검은 크게 나누어 Bottom Towed(견인식)

ROV와, Free-Swimming(자유유영) ROV를 이용한 점검 방법이 있다. Bottom Towed(견인식) ROV를 이용한 방식은 점검비용이 저렴하고, 소형선박을 이용하여 가능한 장점이 있으나 매설깊이 및 해저면 퇴적상의 변화 등을 확인할 수 없는 단점이 있으며, Free-Swimming(자유유영) ROV를 이용한 점검방법은 ULTRA2(Innovatum사) 등의 케이블 탐지장비를 장착하여 해저면 퇴적상 분석 및 케이블의 매설깊이 변화등을 측정하여 취약개소 발견 및 고장탐지가 가능한 장점이 있으나, ROV 자체가 대형화되어 이를 운영할 수 있는 대형선박 등이 동원되어야 하며, 양측 변환소에 설치된 저주파 신호발생기(Tone Generator)의 설치가 수반되므로 변환설비가 휴전되어야 한다는 단점이 있다. 따라서 상기 2방식의 적용은 경제성과 유지보수의 효율성을 고려하여 검토되어야 할 것이다. 현재 한전은 Bottom Towed(견인식) ROV를 이용한 점검을 시행하고 있다.

2.2.3 레이더 운용

한전에서는 해저케이블 경과지상의 어선 조업상태를 감시할 수 있는 레이더를 설치하여 어로작업 및 양식장 설치작업으로부터 해저케이블을 보호하고 있다. 레이더의 감시장치는 해남변환소 및 제주변환소 배전반에 설치하여, 해남변환소 및 제주변환소의 배전반 근무자가 레이더 감시업무를 수행하고 있다.

레이더의 감시범위는 해저케이블을 중심으로 양측 2km와 (감시폭 4km), 96km의 해저 전구간, 레이더의 감시대상은 감시범위내의 정지 선박, 감시범위내에서 1노트 (1 knot : 1,852m/HR) 이하로 운항하는 선박을 대상으로 하고 있다.

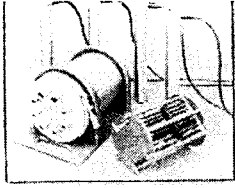
감시범위내에서 감시대상 선박이 포착될 경우에는 모니터 표시 및 경보음이 송출되어 근무자가 인지할 수 있으며, 선박의 진행향로 데이터 저장으로 항적의 추적 가능성이 있다. 해저케이블 보호구역으로 진입한 감시대상 선박이 포착되면 즉시 어업무선국에 통보하여 해당선박에 안내방송을 하도록 하고 있으며, 선박순시가 필요한 경우에는 순시선의 위치가 표시(자가TRS망을 이용하여 레이더상에 항시 순시선의 위치가 표시) 해당선박으로 신속히 출동을 지시할 수 있으며, 현장에 도착한 순시선은 해당선박에게 안내방송을 하고 보호구역 밖으로 유도하고 있다. 한편 TRS망을 이용한 해저케이블 보호를 위한 적극적인 방법으로는 김양식장의 말목설치선에 위성위치정보수신기를 장착하고 위치정보를 자가TRS망을 이용, 레이더로 전송할 경우 양식장 말목설치선의 실시간 위치 및 통신이 가능하여 말목설치선의 통제가 가능할 것으로 판단되나, 말목설치선의 협조가 수반되어야 할 것이다.

2.2.4 HVDC 해저케이블 고장복구

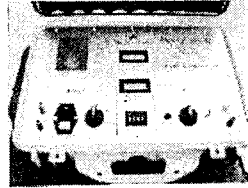
해저케이블 고장이 발생되면 고장점 탐지장비로 고장 지점까지의 거리를 확인하고 복구선박을 동원하여 해상 복구작업을 실시한다. 한편 케이블 복구작업은 고장 발생지점의 수심이나 케이블 매설여부에 따라 다음과 같은 절차에 의해 수행된다.

【고장발생 → 예비 고장점 탐지 → 복구선박 동원 → 케이블 고장점 탐지 → 케이블 보호설비 제거 → 케이블 절단 및 인양(HV Test 포함) → 수리 및 접속(HV Test 포함) → 재포설 → 보호설비 재설치】
 해저케이블의 주요 고장점 탐지방법으로는 머레이루프법(Murray Loop Method)과 펄스레이더법, 고장점 정밀탐지법(Search Coil), ROV를 이용한 방법 등이 있다. 우선 머레이루프, 펄스레이더법 등의 고장점탐지법으로 개략적인 고장점 거리를 측정한 후, 정확한 위치를 찾기 위한 방법으로 고장점 정밀탐지법(Search Coil)이 사용된다. 이 방법은 저주파(16Hz 또는 25Hz 등) 신호를 케이블에 인가함으로써 발생한 자계를 전압/전류로

환산하여 그 전압/전류의 변화상태에 따라 고장점을 정밀 탐지하는 장비로서 저주파를 발생시키는 Tone Generator와 감지기로 구성된다. Tone Generator는 변환소의 케이블 단말에 설치되며 감지기는 ROV, Sled(설매)에 장착되어 해저케이블 경과지를 횡단하며 자체의 변화를 감지한다. 이와 병행하여 ROV에 비디오 카메라, Side Scan Sonar 등을 장착하여 고장점 인근 지역을 조사함으로써 용이하게 고장점을 찾을 수 있다.



(그림 3. 감지기)

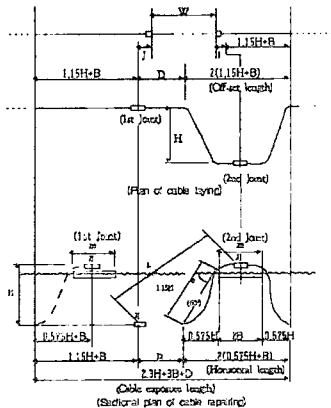


(그림 4. Tone Generator)

고장점 탐지후 해저케이블의 고장점에 매트리스, Rock Berm 등의 보호설비가 설치된 경우 보호설비는 제거되어야 한다. 복구계획 수립시 보호설비의 특성을 고려한 적절한 제거방법을 선정하여 보호설비 제거에 장시간이 소요되지 않도록 각별히 유의하여야 한다.

고장케이블의 절단, 회수 등은 잠수부에 의한 방법(수심 35m 이내), ROV를 사용하는 방법, 그라프넬(grapple) 등을 사용하는 방법이 있다. 케이블의 고장점을 회수한 후 고장점을 포함한 손상 부분 그리고 해수 침투부분을 제거하고 남아있는 재사용 가능한 케이블에 대한 내압시험(HV Test)이 완료되면 곧 이어서 케이블 접속작업과 보수작업이 가능하도록 케이블 복구에 사용될 예비 케이블 길이를 계산하여야 한다. 예비 케이블의 길이를 계산하기 위한 항목은 아래와 같다

- H = 케이블 고장점에서 보수용 선박의 상부감판까지 높이
- B = 보수용 선박 길이 / 2
- J = 케이블 접속작업에 필요한 접속 여유장
- D = 하부 접속에 영향을 주지 않는 최소 케이블 길이
- W = 제거된 케이블 길이(외부손상, 해수침투 및 시험길이)
- α = 접속작업시의 케이블 입수각



(그림 5. 복구용 케이블 길이 계산)

케이블 보수작업시 실제 입수각 α 는 약 60° 정도이고 이 조건에서 필요한 케이블의 길이를 계산(그림 5 참조) 케이블 보수에 필요한 최소 케이블 길이 L_{min} 는 $L_{min} = 1.15H + B + D + 2J$ 의 식으로 산출할 수 있으며, 이 경우 제거될 케이블 길이 W는 아래 식과 동등하거나 약간 작게 될 것이다 $W_{min} = (2.3H + 3B + D) - 2(1.15H + B + J) = B + D - 2J$ 따라서, 고장 상태에 따라 제거되는 케이블 길이 W는

- (i) $W \leq B + D - 2J$ 인 경우, 필요한 예비 케이블 길이 L_1 은 아래 식으로 계산되어 지며 $L_1 \geq 1.15H + B + D + 2J$
- (ii) $W > B + D + 2J$ 인 경우에는 필요한 예비 케이블 길이 L_2 는 아래와 같아진다 $L_2 > L_{min} + W - W_{min} = W + 1.15H + 4J$
 $\therefore L_2 > W + 1.15H + 4J$

케이블 접속절차서에 따라 고장점의 최종접속이 완료되면 케이블의 허용곡률반경의 확보를 위해 Ω 포설 방법 등을 적용하여 해저케이블을 포설하고 그후 최종적인 내압시험을 완료하면 케이블 자체의 복구는 종료된다. 추가로 보호설비가 설치되어야 할 개소는 매트리스, Rock Berm 등으로 케이블을 보호하여야 최종적인 복구작업이 끝난다.

HVDC 케이블의 고장복구 기술은 국내 기술력이 미흡하여 아직도 외국 제작사에 의존하고 있어, 고장점 탐지, 케이블 접속, 복구선박 운영을 중심으로 기술자립을 위한 노력을 기울이고 있다. 이를 위하여 2001. 12월 고장점 정밀탐지기(Search Coil)의 일종인 영국 Innovatum사의 탐지장비(Ultra 2)가 도입되어 운영중에 있으며, 복구선박(한국해저통신, 세계로호) 또한 HVDC 케이블 보수를 위한 장비보장을 완료하였다.

2.3. HVDC 해저케이블 보호대책

해저케이블의 보호대책은 해저케이블의 건설전에 이루어지는 루트선정 및 보호공법 선정, 사전홍보와 건설후의 홍보 및 선박감시 활동, 보호설비의 철저한 유지보수, 입법을 통한 활동 등이 있을 수 있다.

여기서는 건설 후의 보호대책만을 살펴본다. 우선 HVDC 해저케이블에 위협적인 양식어장의 말뚝설치선, 및 안강망어업에 종사하는 어민들에게는 연중 지속적으로 홍보물 배포, 교육 등을 통해 철저한 홍보를 시행하고 있으며 아울러 말뚝설치선, 안강망 어선의 등록현황, 선주의 성명 및 연락처 등을 사전에 파악하여 관리하고 있다. 상기와 같은 홍보대책 외에도 레이더를 이용한 선박감시, 해저케이블 위험 경고시스템(선박이 케이블 경과지에 진입할 경우 선박에 설치된 경보기가 경보발생) 등의 케이블 보호대책을 적용하고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 설치, 운영중인 해남-제주 간 HVDC 해저케이블의 건설과정, 유지보수 방법, 고장시 복구절차 및 보호대책 등에 관한 사항을 고찰하여 보았다. 이상과 같이 체계화된 HVDC 유지보수에 관한 사항은 현재 및 향후 건설, 유지보수 현장에 적용되어 설비의 안정적 운영을 가능하게 할 뿐만 아니라 유지보수 업무의 효율성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것이다.

마지막으로 아직까지 미흡한 HVDC 해저케이블의 복구기술 자립은 박차를 가해 추진함으로써 제주연계 송전선로의 최적운영을 도모해 나갈 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1]. 한국전력공사, 제주-육지간 전력계통연계사업 건설지, 1998.3
- [2]. 한국통신공사, 해저케이블 건설 및 유지보수에 관한 연구, 1996. 12
- [3]. NEXANS, Submarine Cable Repair Installation Manual, 2001. 3
- [4]. FURUKAWA, Power Cable News, 1983. 7
- [5]. 한국전력공사, HVDC #2 해저케이블 고장복구 자료집, 2001. 12
- [6]. 한국전력공사, 북제주 화력 구내 HVDC #2 케이블 고장 복구 발표자료, 1999. 10