

HVDC 해저케이블 고장점 탐지 사례 연구

문신용, 김정대, 장석한

한국전력공사 서울전력관리처 송변전운영실

A Study on the HVDC Submarine Cable Fault Location Searching Case

Moon shin-yong, Kim jeong-dae, Jang seok-han

KEPCO, Seoul Power Transmission District Office, Transmission line & substation management division

Abstract 한국전력공사(이하 한전)에서는 제주지역 전력공급의 안정을 위해 '98년부터 국내 최초로 육지전력 계통과 연계하여 장거리 해저케이블 송전선로를 건설하여 운영하고 있다.

해저케이블은 해저에 포설되고 외부적 환경에 견디기 위해 육상케이블과 다른 많은 보호층을 포함하고 있어 설비의 유지보수에 많은 제약사항을 안고 있다. 특히 해남~제주 연계선로는 기술적 장점 때문에 AC송전 대신 HVDC 송전을 하고 있어 한단계 Upgrade된 설비운영 기술이 필요하다. 본 고에서는 HVDC 해저 케이블의 설비운영에 있어 선로의 고장시 케이블의 고장점 위치를 탐지하는데 중점을 두어 실제 고장점 탐지 사례를 중심으로 HVDC 해저 케이블 고장점 탐지 방법 및 시험 결과를 검토하고 향후 유사 고장 발생에 효과적으로 대응하기 위한 절차를 제시하였다.

1. 서 론

현재, 제주 지역의 전력공급은 자체발전소의 발전력과 해저케이블을 연계한 육지전력이 수요부하를 분담하고 있다. 따라서 해남~제주 연계선의 고장은 2006년 4월 고장에서도 알 수 있는 바와 같이 즉각 제주지역 계통운영에 있어 심각한 상황을 초래할 수 밖에 없다. 이에 따라 한전에서는 발전비용 저감과 계통 운영의 안정을 기하기 위하여 제2의 해남~제주 연계선로 건설을 계획중에 있다.

제2의 제주연계선로가 계획과 같이 건설된다고 가정할 때 설비운영의 핵심인 고장예방 및 고장복구의 체계정립은 그 중요성이 더욱 부각될 수 밖에 없고 설비의 고장복구는 고장점 탐지로부터 시작되므로 고장점 탐지에 대한 신뢰성 있는 장비와 기술인력 확보가 필요하다.

육상 AC 지중송전 케이블에 대한 고장점 탐지는 여러 가지 실용화된 고장점 탐지 방법과 적합한 장비가 있어 비교적 쉽게 고장점을 찾을 수 있다. 그러나 해저 구간에 포설된 HVDC 송전 케이블의 고장점 탐지는 케이블 자체의 전기·기계적 보호층과 고장점 표정을 위한 릴레이 적용의 기술적 한계, 해상 작업의 제약 등으로 고도의 탐지 기술과 장비, 숙련된 기술자가 필요하다.

본 사례 연구는 향후 해남~제주간 해저케이블의 유사 고장 발생시 고장점을 국내 기술을 토대로 더욱 신속하고 정확하게 탐지하는데 크게 기여할 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 HVDC 해저케이블의 고장점 탐지 특징

제주연계 HVDC 해저케이블의 고장점 탐지는 DC케이블을 사용함에 따라 릴레이를 이용한 개략적인 고장점 표정이 불가능하고, 장거리(101b) 해저 구간(최대 심도 135m)에 포설되어 있어 개략적인 고장점 탐지(Pre location)후에도 해상 작업조건, 상세 탐지 장비의 사

용가능 여부에 따라 고장점 위치(Pinpointing)를 최종 확인하는 데는 장기간이 소요될 수 밖에 없다. 특히 잠수부의 활동 한계를 벗어난 심도에서는 유·무인잠수정 또는 ROV(Remotely Operated Vehicle)를 이용하는 등의 추가적인 대책이 필요하다.

2.2 HVDC 해저케이블의 고장점 탐지 기술

HVDC 해저 케이블의 고장점 탐지에 적용할 수 있는 방법으로 개략적인 고장점(Pre location) 탐지는 머레이루프법, Pulse Radar법 등이 있고, 고장점 상세 위치(Pinpointing)를 확인하는 방법으로는 씨칭코일법, 음향 탐지법 등이 있다. 먼저 머레이루프법은 Wheat stone Bridge 원리를 이용한 것으로 도체의 저항을 이용하기 때문에 정확도가 높고 조작과 측정기의 운반이 간단하다. 단, 단선시에는 사용이 불가능하고 병행 건전상이 있어야 측정 가능하다. Pulse Radar법은 케이블에 고장이 발생하면 케이블의 임피던스 변화가 일어난다. 이 고장 케이블에 고주파 펄스를 인가하면 임피던스 변화점(고장점)에서 펄스가 반사되고 반사파의 진행시간을 측정하여 고장점을 탐지한다. 씨칭코일법의 대표적인 방법은 고장선로에 일정 주파수의 수[A]의 전류를 주입하면 고장점에서 분류효과에 의한 전류의 변곡점이 발생하고 이 지점을 고감도센서(Searching Coil)를 이용하여 측정하는 방법이다. 이 방법은 본 사례에서는 고장점 탐지에 실패하여 HVDC 해저 케이블의 특성에 적합한 실증 연구가 필요한 것으로 확인되었다. 음향탐지법은 Surge를 고장 케이블에 보낸후 고장점에서 방전음을 탐지하는 방법으로 육상구간에서 특히 유용하다.

2.3 해남~제주 연계선로 고장점 탐지

해남 제주 연계선로의 고장점 탐지를 위한 한전의 기본절차는 본 사례 발생선로 2차례의 고장점 탐지 경험을 바탕으로 개략적인 고장점 탐지는 머레이루프 테스트법, Pulse Radar법을 사용하고 상세 고장점 위치는 유인잠수정통합시스템(씨칭코일법) 및 Pinpointing 장비를 이용하도록 준비하였다. 그러나 본 사례에서는 유인잠수정통합시스템이 현장 적용에 문제점이 발생됨에 따라 상세 위치탐지는 잠수부의 직접 확인으로 이루어 졌다.

가장 신속한 고장점 탐지 절차는 그림 1의 고장점 탐지 절차와 같이 고장선로(#1 Pole)을 휴전하여 머레이루프 시험을 통한 개략위치 확인후 상세 고장점을 탐지하여야 하나 제주지역 계통안정을 위해 휴전이 계속 지연 되었으므로 실제 현장에서의 고장점 탐지절차는 다르게 이루어졌다. 먼저 케이블 고장여부 확인후 Cable Test Van(독일, hagenuk KMT) 탐제 장비를 이용한 TDR(Time Domain Reflectometer)시험, ARM(Arc Reflection Method)시험, Decay시험 등 건전Pole 휴전전 가능한 시험을 모두 진행하는 순으로 진행되었다. 이번 사례분석을 통한 가장 효과적인 HVDC 해저 케이블 고장점 탐지 절차는 다음과 같다.

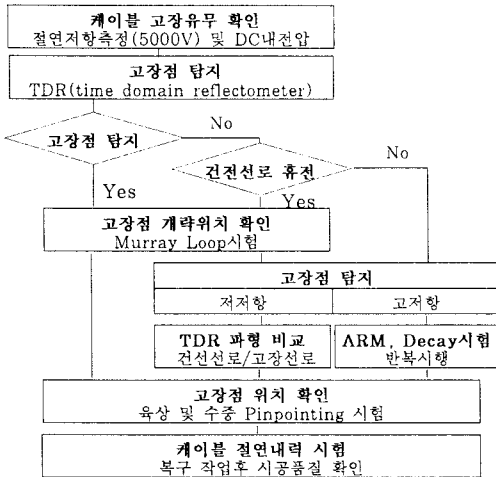
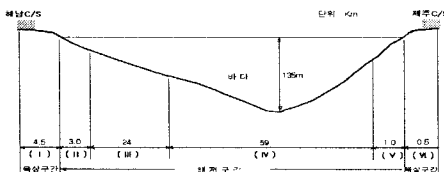


그림 1. HVDC 해저케이블 고장점 탐지 절차도

2.3.1 HVDC 해저 케이블 설치 현황

싸이리스터 밸브(Thyristor Valve)를 이용한 Bipole 방식을 채택하여 해남과 제주측에 각각 1개소씩의 직·교류 변환설비를 설치하고 양단을 HVDC 해저케이블로 연결하였으며, 별도의 귀로 케이블 포설 대신 해수 귀로 방식을 채택하였다.

- 구간 : 전남 해남-제주 제주시(복제주 화력발전소)
- 용량 및 전압 : 300W(150W × 2Pole), DC±180kV
- 직류전력 케이블 : CUMI 800㎕, 101㎎×2C (시공업체 : 프랑스 알카텔社)
- 변환용 변압기 : 188MVA×3대(예비용 1대 포함) (변환설비 : 영국 GEC-Alstom社)
- 광통신 케이블 : 12Core, 101㎎×2C



구 간	I	II	III	IV	V	VI
매설길이	지중 1.5m	해저 2.0m	해저 0.5m	해저 1.3~3.8m	해저 0.5m	지중 1.5m
매설 및 보호방법	트러후	주철관	매트리스	직대 또는 록 덤핑	주철관+ 콘크리트덮개	트러후

그림 2 해남~제주간 케이블 포설고저도 및 보호방법

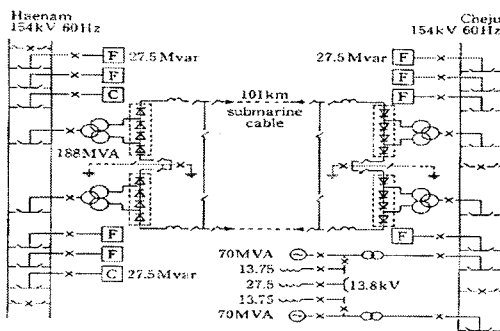


그림 3 해남~제주간 계통도

2.3.2 고장발생 현황

- 고장일시 : '06.4.01(토) 10:36:06
 고장설비 : 제주~육지간 연계선 #2Pole
 수전부하 : 155MW
 AC 계전기 동작사항
 - 해남변환소 : 86A,B, 94GA, 94GB(#2Pole)
 - 제주변환소 : 86A,B, 94GA, 94GB(#2Pole)
 DC 계전기 동작사항
 - 해남변환소 : #2Pole Control DC cable fault
 - 제주변환소 : #2Pole Control DC cable fault

2.3.3 케이블 고장 여부 확인

- 절연저항 측정
 - 시험일시 : '06.4.02(일) 02:57 ~ 03:10
 - 시험장소 : 해남변환소
 - 시험장비 : 5000V & 500V 메거
 - 시험결과 : 0.0Ω

케이블내압시험

- 시험일시 : '06.4.02(일) 03:45 ~ 04:03
 - 시험장소 : 해남변환소
 - 시험장비 : HV-TEST SET

표 1. DC절연내력 시험 결과

순서	시간	시험전압	비고
0차	03:45	50kV 상승	무부하 가압
1차	03:58	15kV 방전	
2차	04:00	2kV 방전	

케이블고장유무 : 절연저항 및 DC내압시험 분석 결과 케이블 자체고장으로 확인

2.3.4 고장점 개략위치 탐지

Murray loop 시험

- 시험일시 : '06.4.05(1차), '06.4.05(2차)
 시험장소 : 제주변환소

측정회로 구성 : 1차 측정은 해남변환소측 DS를 이용하여 루프를 구성하고 제주변환소 케이블헤드에서 머레이 루프 테스터(오스트리아, DMB5)를 이용하여 측정하였고 2차 측정은 회로를 반대로 구성하여 측정함

고장점까지의 거리 계산

$$\text{고장점까지의 거리 } (lx) = \frac{\alpha \times 2 \times l}{1000}$$

(lx: 고장점 거리, l: 선로길이, α: 전위차계 표시값)

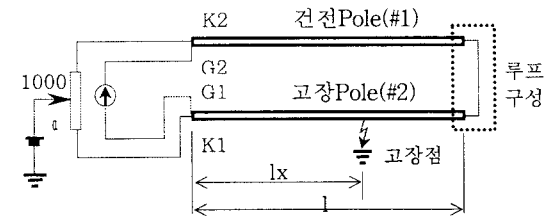


그림 4 머레이루프 시험 회로구성도

측정결과(1차)

- 10V 측정(9회) : 12.456k(3회), 12.052k(3회), 12.456k(3회) ⇒ 9회 평균 : 12.322k
- 30V 측정(9회) : 12.791k(3회), 12.658k(3회), 12.859k(3회) ⇒ 9회 평균 : 12.770k
- 고장점거리 : 해남변환소로부터 11.322k~13.80k

※ 변환설비 고장유무 확인을 위한 차단기 시험의 중복과 짧은 휴전시간으로 시험데이터 확보량이부족하고 측정 장비 자체의 측정오차(±1%)값을 감안하여 12.322k~1k~12.770k+1k 범위로 고장점 개략위치 추정

측정결과(2차)

- 10V 측정(30회) : 13.5b(27회), 13.7b(2회), 13.4b(1회)
- 6V 측정(10회) : 13.5b(4회), 13.4b(1회), 13.1b(1회), 14.1b(1회), 13.3b(1회)
- 고장점 거리 : 해남변환소로부터 13.5b로 추정

* 1,2차 측정결과를 종합 분석한 결과 고장점 근접개소에서 측정된 2차 측정 대표값인 13.5b를 고장점으로 추정

2.3.5 고장점 상세위치 탐지

HVDC #1,#2Pole 절연저항측정, TDR시험

시험일시 : '06.4.07(금) 04:37~04:47

시험장소 : 해남변환소

측정장비 : Teleflex T01/6, 5000V & 500V메거

표 2. 1차 시험결과

회수	시험시간	시험종류	시험결과
1	04:37	5000V 메거	3분50초후 97.5GΩ
2	14:45	500V 메거	20초후 70MΩ
3	14:47	#2Pole TDR시험	특이파형 검출 안됨

HVDC #2Pole 절연저항측정, TDR시험, Decav시험

시험일시 : '06.4.13(목) 21:50~4.15(토) 15:00

시험장소 : 해남변환소

측정장비 : Teleflex T01/6, HV TEST SET,

5000V & 5000V 메거, HV Surge generator

표 3. 2차 시험결과

회수	시험시간	시험종류	시험결과
1	4/13 21:50	5000V 메거 시험	0.0MΩ
2	21:52	500V 메거 시험	0.0MΩ
3	22:00	1차 TDR 시험 (3회 결과 동일)	고장파형 (13.5b~14.0b)검출 Velocity 71.0
4	22:20	ARM 50kV 20회	케이블 Decay
5	4/14 14:40	2차 TDR 시험 (10회 결과 동일)	고장파형(13.4b)검출 Velocity 70.5
6	4/15 04:45	5000V 메거 시험	0.0MΩ
7	04:48	500V 메거 시험	0.0MΩ
8	04:50	3차 TDR 시험 (6회 결과 동일)	고장파형(13.4b)검출 Velocity 70.5
9	15:00	4차 TDR 시험 (3회 결과 동일)	고장파형(13.44b)검출 Velocity 70.7

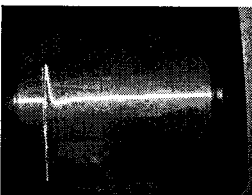


그림 5 TDR 정상 파형



그림 6 TDR 고장 파형

고장점 탐지점 : 해남변환소측 13.40b(Velocity 70.5)

실제 고장점 : 해남변환소로부터 13.44b

* 최초 선로 준공시 알카텔社에서 제시한 Velocity값인 70.5m/μs를 적용한 결과 2000년과 금회 고장의 실제 고장점과 탐지 결과의 오차는 각각 81m, 40m가 발생하였음

며 금회 측정시 Velocity 값을 70.7m/μs로 적용한 결과는 실제 고장점 위치와 거의 일치하므로 향후 해상구간에서 유사고장 발생시 Velocity 값은 70.7m/μs를 적용함이 타당할 것으로 사료됨



그림 7 고장 케이블 인양후



그림 8 케이블 고장 부위

고장원인 : 선박의 닻으로 추정되는 가해 물체에 의한 케이블 외부 손상으로 추정

□ OTDR 운영 자료 활용 : 해남~제주 연계선로와 병행하여 포설된 광통신 케이블은 HVDC 케이블의 고장발생시 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)을 통하여 파급영향이 감지되고, OTDR은 고장점을 쉽게 탐지할 수 있으므로, HVDC 케이블 고장점 개략 위치탐지시 OTDR 이상유무를 확인하여 참조한다.

□ 유인잠수정통합시스템의 탐지실패 이유 : 해남~제주간 연계선로의 경우 해저구간 약 4km마다 과도(개폐장치)시 케이블 보호용으로 Lead Sheath를 접지한 시스템으로 금번과 같은 도체~Lead Sheath간 절연파괴와 같은 외상 고장의 경우 접지점에서의 분류효과로 고장점의 전류 변화가 거의 없으므로 유인잠수정 고장점 탐지 시스템이 변곡점을 식별하지 못한 것으로 확인됨

3. 결 론

이상에서 해남~제주간 HVDC 해저 연계선로의 고장점 발생에 따른 고장점 탐지 방법 및 절차에 대하여 알아보았다. 해저 케이블은 설치방법과 케이블 자체 특성이 육상 지중케이블과 상이하고 탐지 사례가 적을 뿐만 아니라 상황에 따른 탐지 방법이 변경될 수 있어 본 사례가 절대적인 탐지 절차일 수는 없으나 향후 유사고장 발생시 HVDC 해저 케이블의 고장점 탐지에 있어서 성공적인 본보기라고 사료된다. 그러나 잠수부가 직접 투입될 수 없는 심해 구간 고장시 탐지방법에 대한 대안 부재는 HVDC 해저케이블 고장점 상세 탐지에 있어 해결해야 할 숙제이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 송변전선설치, "지중송전케이블시스템", pp. 763-792, 2002
- [2] 임현의, "송전케이블의 고장예방 및 고장점 탐지기술에 대한 연구", 한양대학교 산업대학원, pp.49-60, 1998.
- [3] 한국전기연구원, "HVDC 해저케이블 고장원인 분석 및 유사고장 예방대책수립 연구 용역", pp.123-129, 2006.
- [4] 한국전력공사 전력연구원, "HVDC #2Pole 해저케이블 고장점 탐지 실패 원인분석 및 대책 보고", pp2-4, 2006