관로내 송전 XLPE 케이블 고장분석 및 검토

문경희*, 강지원**
한국전력공사

Analysis of the cause of breakdown in Underground Transmission cable of Pipe

Kyoung-Hee Moon*, Ji-Won Kang**
KEPCO

Abstract - 본 논문에서는 154kV 지중송전선로의 관로내 XLPE 케이블에서 발생하는 절연파괴 고장원인을 분석하였다. 일반적으로 케이블은 제조공정 과정에서 결함을 철저히 걸러내도록 조치하고 공장 출하시 시험을 통해 점거하고 있어, 케이블 자체고장은 현장에서 시공하는 접속함에 비해 매우 작지만 드물게 발생하고 있다. 케이블 자체에서 고장 발생시 고장원인 파악을 위해 제조 품질, 시공과정 등을 체계적으로 분석하고 검토하여 케이블 생산, 시공현장 품질저하 및 관리소홀 등으로 인한 케이블 고장을 최소화하고자 한다.

1. 서 론

지중송전 케이블은 대도시의 전력 수요증가에 대한 공급설비 확충방안으로 건설되어, 지속적인 경제성장으로 인해 매년 큰 폭으로 늘어나고 있다. 더구나 설비증가에 따라 지중송전 케이블 고장발생은 점차 증가되며 고장원인 및 부위도 다양하다. 제작, 시공불량, 부식 및 열화 등 케이블 시스템 자체 요인과 외상, 낙뢰, 화재 등 외부적 요인에 의해 고장이 발생하며, 종단접속함과 중간접속함 뿐 아니라 케이블 자체에서도 절연파괴 현상을 발견할 수 있다. 이번 고장분석한 XLPE 케이블은 공장에서 생산된 케이블의 품질 조사를 위해 절연파괴된 부위의 시료를 채취하여 외관을 검사하고 시료를 분석였으며, 손상된 케이블 방식층과 Al 시스층에 대해 재질 분석 등을 수행하였다. 또한 케이블 시공에 의한 고장 발생 가능성을 검토하기 위해 고장부위 구간 케이블 부설방식인 전력구와 관로내 케이블 포설 손상발생 여부에 대해 검토하였다.

2. 본 론

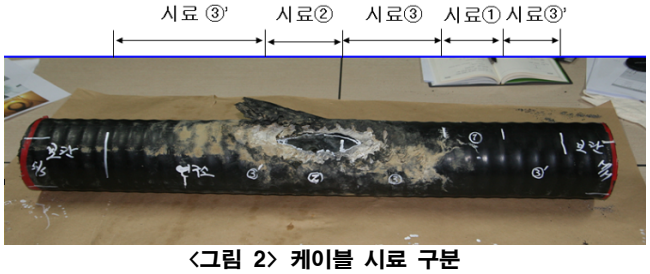
2.1 고장개요

관로식으로 설치된 케이블에서 절연파괴 고장이 발생하였다. 케이블 제원은 154kV XLPE 2000㎟, 2회선으로 가공선로와 연결된 지중선로이며, 이 선로는 가압한 지 약 13년 만에 케이블 자체에서 절연 파괴되었다.

<그림 1> 케이블 고장사진

2.2 절연파괴 부위 시료 분석

관로내 케이블의 고장원인을 규명하기 위해 절연파괴 부위 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 시료분석은 크게 절연 파괴공 주위의 외관검사와 파괴부위의 시료를 <그림 2>와 같이 5개소로 구분하여 각 부위에서 분석할 시험을 실시하였다.



<그림 2> 케이블 시료 구분

<표 1>과 같이 시료 ①은 절연체특성 분석에 대해, 시료 ②는 절연체특성 분석 뿐 아니라 응력테스트와 파괴공 원인추정에 대해, 시료 ③, ③'는 사고경위 추정을 위한 시험을 시행하였다.

<표 1> 각 시료에 대한 시험항목

구 분	시 험 항 목	비 고
시료 ①	- DSC	절연체특성 분석
	- Hot Set	
시료 ②	- Hot Oil Test(B/D 부분)	B/D 원인추정
	- Sheath 하부 검토	응력 Test 포함
	- 가교도	절연체특성 분석
시료 ③	- Sheath 손상원인 검토	사고경위 추정
시료 ③'	- Sheath 손상원인 검토	사고경위 추정

2.2.1 외관검사

절연파괴공은 맨홀과 맨홀 사이 관로구간 케이블 도체부위에서 발생하였으며, 파괴공 크기(외경)는 가로×세로 = 16[mm]×11.5[mm] 이며 도체부위 Hole은 가로 25[mm], 깊이 35[mm] 이다. 파괴공 주위의 Al 시스층의 형상은 큰 개구형상(147.8[mm]×48.2[mm])이 나타났으며, 방식층에는 외상 흔적이 있었다.

<그림 3> 파괴공 발생부위 외형 및 도체 상태

2.2.2 케이블 시료분석

Hot-Oil Test는 케이블 내외부 반도전층 사이의 결함 흔적 및 절연층 내부의 보이드 및 불순물 흔적을 찾아내기 위하여 시행하는 방법이며, 절연체 가교도측정은 가교폴리에틸렌(XLPE)의 가교가 제대로 되어 있지 않으면 각종 열화반응에 대한 저항성이 감소되어 고장 발생확률이 높아지므로 가교된 에틸렌계의 고분자의 품질을 측정하는 시험이다. Hot-Set Test는 전력케이블의 절연체로 사용되는 XLPE의 가교정도와 노화현상을 파악하기 위하여 가교도를 측정하는 시험이고, 염색Test는 케이블 절연체의 결함 유무 즉 보이드, 이물 등과 반도전층의 불균일한

압출에 의한 돌기, 함몰을 측정하기 위해 돋보기와 현미경으로 관찰하는 시험방법이다. 각 시료에 대한 외관검사 및 제조결함 여부 검토 결과 XLPE 케이블의 전형적인 B/D 형상을 나타내고 있으며 도체구멍이 외도구멍보다 큰 점을 고려시 외상부에서 도체방향으로 B/D가 진행된 것으로 판단된다. 또한 절연층내 40[㎛] 이하의 BOW TIE 트리가 다수 발견되었으나 정상치 기준(50[㎛] 이하)을 만족하며, 금속이물 및 돌기 등은 발견되지 않았다.

<표 2> 시료분석 결과 종합

시료분석구분	정상치		분석치	비고
Hot Set Test(①)	Hot: 175[%] 이하 SET: 15[%] 이하		70[%] 이하 1.5[%] 이하	정상
가교도시험(②)	참고시험		80[%] 이상	정상
Hot-Oil Test(②)	참고시험		전기트리	전형적 B/D
염색Test(②)	보이드	50[㎛]이하	5[㎛] 이하	정상
	Amber	250[㎛]이하	없음	정상
	B.,Metal	100[㎛]이하	없음	정상
	돌기	250[㎛]이하	없음	정상

2.2.3 케이블 방식층 및 Al 시스층 분석

외관 특징은 케이블 방식층에 160[mm]×60[mm] 크기의 피복탈락 부위가 발생하였으며 내층 Al 시스층에도 피복탈락부와 同心위치에 35[mm]×35[mm] 크기의 물고기 입모양의 開口가 형성되어 있다.([그림 3] 참조) 또한 케이블 방식층과 Al 시스층에 pitch 9[mm]의 일정 간격으로 금속성 물질에 의해 강하게 긁힌 흔적이 있으며 케이블 방식층은 긁힘 후 강하게 압착되어 마멸된 흔적이 있지만 열에 의한 변성, 변형 흔적은 보이지 않는다. 따라서 케이블 방식층은 Al 시스층과 더불어 pitch 9[mm]의 일정한 간격으로 금속성 물질에 의해 강하게 긁힌 후, 강하게 압착되어 마멸된 것으로 보인다. 또한 Al시스 조직 및 재료 분석결과 외층 피복 내면에서 알루미늄 부식물인 산화알루미늄 덩어리가 관찰되므로 Al 시스층 외면에서 부식작용이 진행되었을 것으로 판단되며 이러한 부식은 기계적 긁힘 흔적을 잠식하고 있어 물리적 손상 후에 발생한 현상임을 알 수 있다.

<그림 4> Al 시스 외측면 부식 상태(좌), 최외층 피복내면 상태(우)

2.3 케이블 포설시 손상 발생여부 검토

케이블 포설방식은 지중송전선로 부설방식 즉 직매, 관로, 전력구 등에 따라 결정된다. 관로내 케이블을 포설하는 경우에는 한쪽 맨홀 상부에 케이블 드럼을 설치하고 반대측 맨홀에서 윈치를 사용하여 케이블의 인입작업을 시행한다. 전력구내 케이블을 포설하는 경우에는 캐터필라와 로라를 설치하여 캐터필라의 송출력으로 케이블을 인입한다. 직매 케이블 포설방식은 경과지를 굴착한 상태에서 케이블 보호용 트라후 등을 설치 후 그 속에 케이블을 설치하거나 또는 관로 등의 케이블 보호설비 없이 도로굴착 후 케이블을 포설 및 접속을 시행한다. 이번 고장분석 케이블은 변전소 인출전력구에서 관로로 부설한 방식이므로 전력구와 관로 구간 케이블 포설시 손상 발생 여부를 검토하였다. 그리고 굴착공사로 인한 외상고장을 검토한 바 운전중인 선로 근접위치에서 상수관 및 가스관 공사 등은 두 차례 시행되었으나 해당선로에서 상당히 떨어진 지점이었으며, 고장케이블이 5단4열 관로배열에서 최하단 내측에 위치함에 따라 외상에 의한 케이블 고장 가능성은 희박한 것으로 보인다.

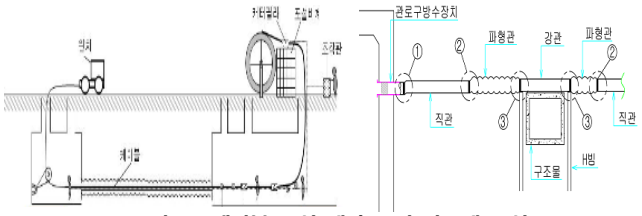
2.3.1 전력구 구간 발생 가능성 검토

최근에 송전용량의 증대 및 도심지 교통여건의 변화에 따라 전력구식으로 건설되는 지중송전선로가 점차 증가하고 있다. 현재 사용되고 있는 전력구내 케이블 포설공법은 케이블드럼 부근에 대형 캐터필라를 설치하고 전력구 내부에는 소형 캐터필라와 로라를 설치하여 캐터필라의 송출력으로 케이블을 인입한다. 이때 캐터필라와 캐터필라 사이에는 일정한 간격(1.5m ~ 2m)으로 로라를 설치하여야 하며 캐터필라에는 케이블 인입시 많은 반발력이 작용하므로 로프 등을 사용하여 견고하게 지지하여야 한다. 이와 같은 방법으로 전력구내 케이블 포설시 보호시설 미설치, 작업자 부주의 등으로 인해 케이블 로라 이탈 및 타 시설물 접촉 즉 전력구면, 금구류, 포설장비, 보강금구 등과의 접촉으로 인해 케이블이 손상될 가능성이 있다.

<그림 5> 전력구내 포설

2.3.2 관로 구간 발생 가능성 검토

관로내 케이블 포설시 케이블에 외상을 줄 수 있는 이물질을 제거하기 위해 걸래, 와이어브러쉬 등을 이용하여 관로 내부를 충분히 청소하여야 한다. 또한 관로의 배관 이음부, 돌기 등에 의해 케이블이 쉽게 통과할 수 있는지를 확인하기 위해 도통시험을 실시한다. 케이블 드럼은 케이블 포설작업이 용이하도록 장력과 측압을 고려하여 설치하여야 하며 관로내 케이블을 인입할 때는 분당 5m의 표준 인입속도로 윈치 장력을 확인하며 케이블 포설 허용장력내로 케이블을 포설한다. 관로내 포설되는 케이블은 장력이 걸린 상태에서 인입됨으로 케이블 손상방지 및 작업자 안전확보에 세심한 주의를 기울여야 하며, 고장선로 관로내 포설시 현장의 직관과 관로구 방수장치 연결부분, 직관과 파형관 연결부분, 강관과 파형관 연결부분 등이 정상적이지 않은 상태일 때 포설방향으로 케이블에 손상이 가해질 가능성이 크다.



<그림 6> 케이블 포설 개략도 및 관로내 포설

3. 결 론

케이블 고장은 최외층인 방식층과 Al 시스층이 금속성 물질에 의한 강한 긁힘현상 발생 후 다시 강한 압력을 동반한 마모가 발생한 것으로 추정된다. 케이블 절연파괴 부위는 절연체를 중심으로 분석한 시험에서 절연층내 40[㎛] 이하의 BOW TIE 트리가 다수 발견되었으나 정상치 기준을 만족할 뿐만 아니라 경년(약 13년)에 의한 정상적인 열화진행 상태라 판단된다. 또한 Void, 금속이물 및 돌기 등이 발견되지 않은 점을 고려시 제조결함을 의심할 만한 특이사항은 발견되지 않았다. 준공 후 해당선로 인근에서의 공사사례, 관로 배열도를 검토시 외부공사로 인한 외상 가능성은 희박한 것으로 추정되며, 전력구 구간 케이블 포설시 케이블과 포설장비 및 보강금구와의 접촉으로 인한 케이블 손상 또는 관로 구간의 경우 직관과 관로구 방수장치 연결부분, 직관과 파형관 연결부분, 강관과 파형관 연결부분 등 관로 연결부분이 정상적이지 않은 상태에서 포설함으로써 케이블 방식층이 손상을 입은 것으로 추정된다. 따라서 케이블 고장은 케이블 포설시 최 외층이 금속성 물질에 의해 강하게 긁혀 피복이 관통되고 알루미늄 시스층이 손상되었으며, 손상부위 부근은 다시 강한 압력을 동반한 마모가 발생한 후 Al 시스층 외면 전식이 진행됨에 따라 절연파괴 고장이 발생한 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] 지중송전케이블 시스템(2002년, 한국전력공사)