

수트리(Water Tree) 열화된 전력케이블의 성능회복을 위한 신기술

글/김 일 권(한우테크)

1. 서 론

도심지역의 전력공급 신뢰도 향상과 도시환경 개선의 차원에서 확대 시공되고 있는 지중 배전선로는 1973년부터 22kV 비접지 계통에 CV 케이블을 사용하였고 1978년부터 22.9kV 다중접지계통에 CN-CV 케이블을 사용하여 '96. 3 현재 10.287 C-Km의 지중배전선로가 직매나 관로형태로 설치되어 있다. 국내에서 사용하고 있는 지중배전용 전력케이블은 가교폴리에틸렌(XLPE)으로 절연되어 있고 반도체층을 사용하고 있으며 외피는 염화비닐수지(PVC)를 사용하고 있다. 이러한 구조는 생산공정이 간단하여 경제적이고 사고발생시 보수가 용이한 장점이 있으나 주절연층이 전압, 수분 또는 기타요인에 의하여 열화되어 절연파괴되는 단점이 있다.

한전전력연구원의 보고서에 의하면 전력케이블의 내구 사용년수가 대개 30년 이상임에도 불구하고 1985년부터 1989년까지의 고장케이블에 대한 사고원인 및 사용년수를 조사한 결과 포설후 5~6년 내에 발생하는 사고가 가장 많았고 사고 원인은

수분침투에 의한 사고가 가장 많은 것으로 조사되었으며 포설후 5~6년 사이에 이상이 발생되지 않았던 케이블의 자연열화에 의한 평균수명은 12년 정도로써 외국의 경우에도 가교폴리에틸렌 절연케이블의 경우 사용년수가 약 10년이 되면 자연열화에 의한 절연파괴사고가 증가하기 시작하는 것으로 되어 있다.

현재 한전에서 운전중인 10년 이상된 지중케이블의 경우 수분침투에 의한 수트리(Water Tree) 현상이나 케이블 접속재의 부식현상 등은 충분히 예측할 수 있으나 이를 보수할 수 있는 적절한 방안이 없는 것이 현재의 상황이며 또한 지중케이블의 점검이 그동안은 순시에 의한 육안점검 및 저항시험을 위한 Micro-Ohm Meter의 사용에 거의 의존해 왔으나 이는 케이블의 부식상태나 고장개소의 위치 등 정확한 상태분석을 할 수 없는 실정이며 기존 직매케이블에 고장이 발생되었을 때의 복구방안도 고장케이블을 현상태로 폐기하고 인근에 새로운 관로를 신설하는 복구공사를 시행하고 있으나 이는 도로굴착 허가 곤란이나 교통난 증가, 작업시간의 제한, 공사시공 곤란 등 각종 어려

<표 1. 1> CN-CV 케이블의 고장 원인별 사용년수

고장원인	사용년수														미상	계	%	평균 사용년수		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					14	
자연열화											1		2	2	3	1	2	11	26	12.0
자재 및 제조 불량	2	2	1	7	4													16	37	2.6
시공 및 보수 불량	1	1		2	1		1	1	1				1					9	21	4.9
기타	2			1	1				1		1						1	7	16	4.2
계	5	3	1	10	6		1	1	2	1	1	2	3	3	1	3	43	100		5.5
백분율	58					14					21					7	100	-	-	

* 매전용 CN-CV 케이블 접속재의 열화사고 방제대책에 관한 연구(한전기술연구원)

<표 1. 2> 지중선 고장개소별 현황

(단위 : 건수)

구분	'92	'93	'94	'95	비고
지	변압기	13	33	35	33
	개폐기	20	22	30	30
중	케이블	71	131	165	127
	접속재	43	54	82	52
선	케이블헤드	8	11	13	10
	기타	1	4	10	9
계	156	256	335	261	

- * 케이블 고장은 수트리(Water Tree)에 의한 사고가 증가 추세
- * 설치 10년 경과 케이블 및 일부 특정 제조업체의 케이블 사고발생이 증가 추세
- * 수용가 인입용 케이블 사고로 인한 계통공급중단 사고로의 파급 사고사태가 증가 추세

음이 증가되고 있어 시공상의 문제점으로 대두되고 있는 실정이다.

이와같이 도심공급지역에서 지중배전선로 고장이 발생하면 수용가에게 막대한 피해를 끼침과 동시에 고장탐색과 복구에도 많은 시간과 노력이 필요하게 된다.

이러한 수트리 사고에 대한 근본적인 문제점을 해결하고 사고발생을 예방하기 위하여 한전에서는 수밀형 케이블이나 난연성 전력케이블의 사용을 유도하고 있어 신설하는 케이블에는 적용이 용이하다. 기존의 설치된 지중케이블에 대하여는 수트리 사고를 예방하기 위한 효율적이고 합리적인 유지보수 신기술의 채택이 시급하며 이러한 신기술 적용이 요즈음 급속도로 증가추세에 있는 재경지역의 기존 지중케이블 사고를 사전에 예방할 수 있어 공급신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

2. 국내의 연구 및 기술개발 현황

'96. 3 현재 22.9kV 배전용 지중케이블은 모두 9.950 C-Km가 지중에 포설되어 있다. CN-CV전력케이블의 설계 내구 사용년수는 30년이나 수트리 열화현상등으로 인하여 실제수명은 8~12년 정도로 기대수명에 비하여 훨씬 떨어지고 있는 실정이다. 국내의 경우 고장난 케이블의 원인규명을 위한 분석기술이 단순히 수트리 크기의 측정 정도에 머무르고 있는 실정이며 지금까지 고분자 절연

체 또는 배전케이블의 열화관정에 대한 연구는 거의 모두 비파괴 전기적 방법인 직류 고전압 인가 시 흐르는 직류 누설전류 측정이나 파괴방법의 하나인 수트리 특성분석에 치중되어 있는 실정이다.

최근 배전케이블의 수트리 열화현상에 대한 연구는 크게 두가지 방향으로 이루어 지고 있는데 첫째는 현재 운용되고 있는 지중 배전케이블의 열화정도를 진단하여 전력케이블이 사고를 일으키기 전에 고장 가능성이 높은 케이블을 처리하는 사고 예방기술의 개발과 둘째는 지금까지 사용되어 온 절연재료가 수분과 전기의 복합작용에 의하여 열화된다는 점을 감안하여 수트리 열화에 대한 저항성이 높은 절연재료를 개발하여 전력케이블의 수트리 열화사고를 억제하는 기술이다.

이 두가지 방법을 병행하여 사용하면 수트리 열화에 의한 케이블의 고장을 최대한 억제할 수 있을 것이다. 또한 지중 배전선로의 전력공급 신뢰도를 높이기 위해서 다음사항에 대한 집중적인 연구가 한전기술연구원을 중심으로 제작업체와 함께 추진되고 있으며

- 전력케이블 성능개선 : 수분침투억제, 수트리 억제형 재료 사용
- 전력케이블 교체시기 결정방안 확립
- 전력케이블 품질검증방안 검토

한국전력에서는 22.9kV-y 다중접지 지중배전선로용으로 수밀형 압축도체 위에 가교폴리에틸렌으로 절연되고 무독성 난연수지로 시스를 한 무독, 난연성 수밀형 전력케이블인 22.9kV 난연성 전력케이블(FR CNCV-W)의 구매규격이 '96. 1 제정하여 지중케이블의 기술개발을 유도하고 있다.

3. 수트리 현상

1970년대 중반 처음으로 수트리 현상이 발견된 이후 수트리 열화는 전력케이블의 사고에 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 왔으며 이러한 수트리는 절연층내로 수분이 유입되는 그 자체가 수트리의 시작이라고 할 수 있을 정도로 수분과 밀접한 관계가 있다.

일반적으로 수트리는 Vented Tree 및 Bow-Tie Tree의 두가지 형태로 분류되며 이러한 분류는 수트리가 발생하는 위치 및 성장형태에 그 근거를

두고 있다.

즉 Vented Tree는 Tree 시발점이 절연체와 내부 및 외부 반도체층의 계면이고 계면의 돌기나 불순물의 접촉에 의해 Tree가 부채꼴 형태로 성장한다.

Bow-Tie Tree는 절연체 내부에 있는 Amber나 금속입자에 의해 전계방향으로 나비넥타이 형태로 성장한다.

수트리는 가교폴리에틸렌 41절연케이블의 수명에 가장 직접적인 영향을 미치고 있으나 최종적으로 케이블의 절연파괴는 전기 Tree에 의하여 파괴된다. 그러나 절연파괴가 발생하는 근본적인 원인은 수트리에 의한 것이다.

수트리는 물과 전기의 복합작용에 의해서 발생하며 이는 전기에너지에 의해서 발생하는 소위 Micro-Crack이 재료내를 전파해 나가는 현상을 말한다.

폴리에틸렌내에 Micro-Crack이 발생하면 이는 고분자 사슬의 절단을 의미하고 일단 고분자 사슬이 절단되면 이부분은 매우 불안정하므로 가장 빠른 시간내에 안정화 하려는 과정에서 주변의 산소 또는 이온들과 결합하려는 특성이 있다.

수트리 성장이 결국 Micro-Crack의 성장이라는 개념을 도입하면 폴리에틸렌의 인성(toughness)을 증가시키므로써 수트리 전파를 효과적으로 억제할 수 있다는 일반적인 결론에 도달한다. 이러한 기본원리를 이용하면 TR-XLPE(Tree-Retardant XLPE)를 개발할 수 있으며 기존의 케이블도 보강할 수 있는 것이다.

3-1. 수분의 형성 및 영향

전력케이블내에 수분이 형성되는 경로는 가교반응 중에 생기거나 케이블 제조방식에 의하여 유입되는 경우 또는 사용도중 외부로부터 유입되는 경우가 있으며 절연체내에 형성된 수분의 형태는 분자수준(Molecular Level)으로 분산되어 있는 수분과 드롭 형태로 응집되어 있는 수분등으로 구분될 수 있다.

전력케이블내에 수분이 형성되는 경로를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 전력케이블의 절연층은 반도체층 및 외피로 감싸져 있으며 반도체층은 에틸렌계 고분자에 전도성 카본블랙이 들어있는 콤파운드로써 기본수

지 자체가 극성을 띠고 있으며 카본블랙자체가 흡습성이 매우 높은 충전제이므로 반도체층은 수분 흡습률이 매우 높다고 할 수 있다.

또한 일반적인 외피는 PVC에 다량의 가소제가 들어 있는데 이들 각 성분들도 극성을 띠고 있어 극성이 매우 높은 수분과의 친화력이 좋으므로 수분 흡습률이 높다고 할 수 있다. 따라서 전력케이블 주변에 수분이 존재하는 한 외피와 반도체층을 통하여 절연층으로 유입될 가능성이 매우 높다.

둘째, 전력케이블은 제조공법상 가교과정이 있는데 종래에는 스티م가교방식을 사용하였으며 이는 약 1,000PPM 정도의 수분이 절연층으로 침투되는 것으로 알려져 있으나 최근에는 고압질소가스를 이용한 건식가교방식을 채택함으로써 가교방식에 의한 수분형성은 어느정도 억제되었다고 할 수 있다.

셋째, 화학가교제로 사용되는 Dicumyl Peroxide(DCP)는 열분해에 의하여 Redical을 형성하고 이 Redical이 가교반응을 일으키도록 되어 있다. 그러나 일부분의 Redical은 자체반응에 의하여 Acetophenone, Cumyl Alcohol 등으로 변환되어 화학가교제의 효율을 떨어뜨린다. Cumyl Alcohol은 다시 2차 반응을 일으켜 수분을 형성하며 약 2.0ppb의 DCP를 사용하는 경우, 형성되는 수분은 수천 PPM에 이르는 것으로 알려져 있다.

위의 세 경로중에서 제조과정중에 발생하는 수분, 즉 가교제 분해 및 가교방식에 의한 수분형성은 피할 수 없기는 하나 그 함량은 그다지 큰 것이 아니다. 그러나 전력케이블의 사용중에 외부로부터 유입되는 수분은 그 함량이 상당히 높은 수준까지도 가능하므로 이를 최대한 억제하여야 한다. 절연체내의 수분은 처음에는 Molecular Level로 분산되어 있으나 결국 이들은 드롭 형태로 존재하게 된다.

무극성의 폴리에틸렌에 수트리가 발생하면 수트리 지역에서는 O-C=O, C=O, C-O 등의 화학성분이 생기며 따라서 극성을 갖게 된다. 이때 극성이 높은 수분은 수트리가 발생한 지역으로 이동하여 수트리 채널에는 수분이 모이게 된다.

정상상태에서는 절연층의 수분함량이 수백 PPM 정도 밖에는 안되지만 일단 수트리가 발생하면 수분함량은 최고 10% 정도까지도 된다는 연구결과가 보고된 바 있어 일단 수트리가 발생되면

수분의 이동 및 응집력은 대단히 크다는 것을 알 수 있다.

또한 무극성의 폴리에틸렌 지역에 분자수준으로 분산되어 있던 수분은 폴분자 끼리의 응집력때문에 폴리에틸렌내를 이동하여 드롭 형태로 모일 가능성도 매우 크다.

분자수준으로 분산되어 있는 수분은 절연체의 수트리 열화에 큰 영향을 미치지 않으나 드롭 형태로 모여 있는 수분은 수트리 열화의 원인이 될 수 있다. 일단 수트리 통로에 수분이 차게 되면 이는 도전로 역할을 하므로 다시 수트리를 진전시키는 작용을 하게 되며 경우에 따라서는 전계집중 현상에 의하여 전기트리로 발전되기도 한다.

위와같이 전력케이블의 절연층내로 침투된 수분은 수트리 열화의 근본 원인이므로 이를 최대한 억제해야 한다. 여기에서 중요한 사항은 단순한 수분의 유입만이 문제가 아니라 수분에 섞여 있는 각종 이온성 불순물들도 수분과 함께 절연층으로 유입되고 이들이 결국 수트리 진전의 원인이 된다는 사실이다. 결국 수분유입의 억제는 이온유입의 억제결과를 가져오므로 수분유입의 억제는 여러면에서 중요한 과제라 할 수 있다.

현재 전력용케이블의 차수층은 수분의 이동을 어느정도 억제한다고는 하지만 이 차수층에 포집되어 있는 수분은 시간이 지남에 따라 다시 절연

층으로 유입될 가능성이 높기 때문에 이러한 방법도 수분의 침투를 근본적으로 막는 방법이 될 수는 없다.

따라서 차수층을 도입하는 동시에 절연층, 반도전층 또는 외피층에 사용되는 원재료를 개량하여 수분의 유입 및 수분과 함께 유입되는 각종이온을 트랩할 수 있는 새로운 기능을 가진 재료를 개발하는 것이 필요하다.

4. 전력케이블의 절연체

전력케이블의 절연체는 저밀도 폴리에틸렌 (Low Density Polyethylene : LDPE)을 화학가교제로 가교시킨 가교폴리에틸렌(Crosslinked Polyethylene : XLPE)을 사용한다.

이때 가교화란 선형 고분자의 사슬과 사슬사이를 화학 가교제로 화학결합을 이루는 반응으로써 고분자 사슬을 3차원 망목구조(3-Dimensional Network Structure)가 되도록 한다.

이와같은 3차원 망목구조가 되면 고분자의 기계적 강도 및 열에 대한 안정성이 증가하고 용매(Solvent)에 용해되지 않는 특성이 있다.

☞ 5. 지중케이블의 절연보강 신기술에 대하여는 다음호에 게재합니다.

협회 역사자료 수집 안내

협회는 사단법인 대한전기기사협회에서 한국전력기술인협회로 전환되는 시점인 협회 33년의 역사를 편찬하는 작업에 착수하게 되어 협회 역사자료를 수집하오니 회원 여러분께서는 전력기술인의 역사정립과 전력기술인의 활동기록을 영원히 남기는데 동참한다는 건지에서 자료를 적극적으로 발굴하여 제공하여 주시기 바랍니다.

1. 역사자료 수집범위

- 자료발생기간 1963. 12. 14 ~ 1997. 2. 28

(대한전기주임기술자협회, 대한전기기사협회, 한국전력기술인협회)

- 지부역사 : 연혁, 발기·창립·정기총회 회의록, 주요 발전사, 연도별 회원수, 지부건물 사진(간판중심) 등

- 인물사진 : 전현직 임원, 지부운영위원(반명함판)

- 인물소개 : 전현직 임원, 지부운영위원회 이력과 기술 및 회원을 위한 주요활동 내용

2. 중요역사자료 제공자 명단은 협회 역사서에 기록할 예정

3. 자료제출처 : 협회 역사편찬실