

22.9 kV 트리억제형 전력케이블의 성능평가

김위영, 윤대혁, 박태곤*
한국전기연구원 산업협력부 *창원대학교 전기공학과

Efficiency appraisal of 22.9kV tree retardant power cable

We-Young Kim, Dae-Hyuk Yun, Tae-Gone Park*
KERI, *Changwon Nat'l University

Abstract - XLPE compound have used for insulation of 22.9 [kV] power cable. But tree retardant power cable has developed and is going to be used commonly. TR XLPE compound retard production and growth of water tree.

In this paper, tensile strength, elongation at break, degree of crosslinking, lightning impulse test, AC breakdown test, cyclic aging for 14 days and accelerated water treeing test of TR XLPE insulated power cable were examined according to the KEPCO buying spec. & AEIC CS 5-94 standards. before and after As the result, tensile strength, elongation at break and degree of crosslinking test results of TR XLPE insulation were higher than requirement values. After accelerated water treeing test for 120 days, 240 days and 360 days, AC breakdown voltages were not decreased for accelerated water treeing aging duration

1. 서 론

국내에서 사용하고 있는 지중 배전용 전력케이블의 거의 대부분은 가교폴리에틸렌(XLPE)을 주절연체로 사용하는 CV 케이블로서, 그 구성은 도체, 도체 shield 및 절연체 shield를 위한 반도전층, 절연층, 염화비닐수지(PVC)등으로 된 외피로 이루어진다. CV 케이블은 사용되는 용도에 따라서 케이블이 구성되는 형태도 달라지며, 그 대표적인 형태로써 한국전력공사의 구매시방서에 따른 수밀형(CN/CV-W), 난연형(FR CNCO-W), 트리억제형(TR CNCV-W)로 구분할 수 있다.

1960년대 초반 가교기술의 발달로 등장한 고분자 절연재료인 가교폴리에틸렌(XLPE)은 절연내력 및 고유체적 저항이 높고 유전정접 및 유전율이 매우 작으며, 연속최고허용온도가 높으며 물리적, 기계적 특성이 우수하다. 이러한 이유로 XLPE는 고압전력케이블의 절연체재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 XLPE 절연 케이블의 고분자 절연층에서 나타나는 절연열화는 전력계통의 사고로 이어지게 된다. 현재까지 이러한 절연열화현상을 감소시키기 위한 많은 기술과 재료가 개발되어 절연내력과 안전성이 증대된 지중 송배전을 할 수 있게 되었으나, 아직 XLPE의 절연열화에 대해서는 명확히 규명되지 못하고 있다.

이러한 절연열화 중 가장 문제시되고 있는 것이 수트리의 발생이다. 수트리는 전력 케이블을 지중에서 장기간 운전할 경우 케이블 절연체 내부로 침투하는 수분이나 절연층 내부에 잔존하는 수분에 인가되는 고전계에 의해 시작되며 절연층 내부에 존재하는 여러 형태의 결합부위가 수트리의 발생과 성장을 돕게 된다. 이러한 수트리로 인한 절연층의 열화로 절연과피가 일어나거나, 또는 수트리가 발생된 후 전기트리로 진전되어 사고를 유발하기도 한다.

즉 케이블 절연과피에 수트리가 직접, 간접적으로 연관되어 있다고 할 수 있으며, 이와 같은 수트리현상을

억제하고 트리의 발생을 현저히 감소시키는 수트리 억제형(TR XLPE) 전력용 케이블이 개발되게 되었다.

본 연구에서는 22.9kV급 수트리 억제형 전력케이블의 개발시험에 따른 케이블의 물리적 특성, 전기적 특성 및 수트리 발생에 대하여 평가 분석하고자 한다.

2. 성능평가

본 시험에서 사용한 시료는 트리억제형 전력케이블 325mm이며, 한전구매시방서 ES 126(1999. 6. 22) 22.9kV 트리억제형 전력케이블에 따라 시험을 진행하였으며, 본 논문에서는 케이블의 특성을 평가하는데 케이블의 물리적, 기계적, 전기적 특성을 나타내는 시험항목에 대하여 분석하였다.

2.1 인장강도 및 신장율 측정

전력케이블의 기계적 구조와 전기적 절연을 담당하는 절연체의 인장강도 및 신장율 측정은 케이블 절연체의 물리적 특성을 평가하기 위한 시험이다. 시험을 위한 시편은 ASTM D 412 C형 dumbbell 시편을 사용하였으며, 시료는 절연체의 중간 부위에서 각 3개의 시험편을 채취하여 상온 및 고온 열화 처리 후에 대하여 실험하였다. 열화 후 인장강도 및 신장 측정 시편은 121±1℃에서 168시간 가열하여 상온에서 24시간 방치 한 후 20~25℃에서 측정을 실시하였다. 측정의 정확성을 위하여 제조사별 열화 전과 열화 후 인장강도 및 신장 측정을 동일한 시간과 동일한 온도에서 측정하였으며, 인장속도는 200 mm/min으로 하였다.

2.2 가교도 측정

용융점이 낮은 폴리에틸렌의 단점을 보완하기 위해 일반적으로 저밀도 폴리에틸렌을 가교(cross-linked)시키고 있다.

가교란 선형 고분자 사슬과 사슬 사이를 화학 가교제로 결합시켜 1차 선형구조의 폴리에틸렌을 3차원 망목구조가 되도록 하는 것이다. 이와 같이 폴리에틸렌이 3차원 망목구조가 되면 고분자의 기계적 강도 및 열 안정성이 증가하고 solvent에 용해되지 않는 특징이 있다.

절연체의 가교도는 전력케이블의 특성을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나로서 가교도의 증가는 기계적 특성의 증가와 밀접한 관계가 있다. 또한 가교도가 높을 경우 각종 열화반응에 대한 저항성이 증가하며 반대로 가교도의 감소는 전력케이블의 특성감소를 의미하기도 한다.

가교도의 분석은 절연체 내의 중간부위, 내부 및 외부 반도전층으로부터 약 0.5mm 지점에서 각각 0.5g의 시료를 채취하여 xylene을 이용하여 미가교된 폴리에틸렌을 추출하는 방법으로 측정하였다. 가교도는 각 3번씩 측정하였다.

2.3 14주기 열화

14주기 열화는 규정된 온도를 주기적으로 인가하여 케이블을 열화시키는 것으로서, 전력 케이블의 절연체 가

교 시에 첨가되는 산화방지제와 가교 촉매제 등으로 인한 가교 부산물의 일부는 가교 시 외부로 배출되지 못하고 절연체 내부에 잔존하게 되며 그 부산물의 대부분은 휘발성 물질로서, 130℃의 온도를 주기적으로 인가하는 케이블의 14주기 열화시험을 이용하여 절연체 내부에 잔존하는 가교부산물을 배출하는 것이 가장 큰 목적이라 할 수 있다. 아래의 그림 1과 같이 전력 케이블이 14주기의 열적 열화를 거치는 동안 가교부산물은 케이블의 절연층 중간 부분에서 내, 외부 반도체층 쪽으로 확산 이동하는 것을 알 수 있다.

케이블의 열적 과부하상태에서 진행되는 14주기 열화 시험의 부수적인 효과로서, 고온에서 고분자사슬이 서로 떨어져 움직이므로 절연체 내에 잔존할 수 있는 수분과 미세 보이드를 제거하는 효과와 절연체 고분자의 재결정화에 의한 결정영역의 증가를 가져온다. 또한, 주기적으로 온도의 변화를 가하므로 각 재료의 열적 팽창계수의 차이로 인한 도체와 절연체, 절연체와 반도체층 등에 구조적 변화가 발생할 수 있으며, 130℃ 고온에서 TR XLPE의 경화는 유전강도의 감소를 가져온다. 14주기 열화 전과 후 lightning impulse 파괴 및 AC 파괴시험을 실시하여 케이블의 특성을 분석하였다.

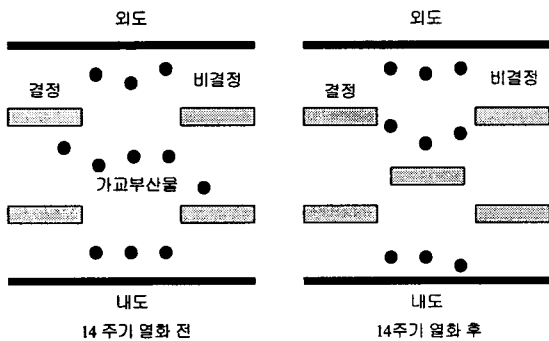


그림 1 14주기 열화 전과 후의 절연체 미세구조 모델

2.3.1 시험방법

한전구매시방서의 장기과통전시험방법에 따라 실시하였다.

- 1) 지름 80mm의 플라스틱 파이프에 케이블을 넣어서 양말을 봉한다.
- 2) 교류 40kV 전압을 14주기 노화기간 동안 연속적으로 인가하였다.
- 3) 전압을 인가한 상태에서 매일 8시간씩 지속적으로 도체에 전류를 인가하고 16시간 이상 휴지시켰다.
- 4) 인가전류는 130℃ 도체온도에서 매일 6시간 가열하였다.
- 5) 케이블은 이러한 열화를 14주기 반복하였다.
- 6) 시험 전 케이블의 온도제어를 위하여 dummy 케이블을 설치 하였으며, 시험용 케이블과 같은 방법으로 부하를 인가하고 도체에 열전쌍을 설치하여 온도보정을 실시하였다.

2.4 Lightning impulse test

Lightning impulse test는 뇌의 침입에 대한 전력케이블의 절연강도를 모의하기 위한 시험으로서, 전력용 케이블 제조 시 확정지어진 절연체 내부에 존재하는 이물, 보이드, 반도체층의 계면층기와 14주기 열화시험에 따른 케이블 절연체의 굴곡과 같은 구조변화, 열적 과부하 상태에서의 열화에 의한 절연체의 변화 등은 케이블의 절연내력에 영향을 미치는데 이와 같은 케이블의 변화에 대한 lightning impulse 절연내력 특성을 평가하기 위한 것이다.

2.5 AC breakdown test

AC 파괴시험은 전력 케이블의 절연강도를 모의하기 위한 시험으로서, 전력 케이블의 절연체 내부에 존재하는 이물, 보이드, 내, 외부 반도체층 계면층기, 14주기 열화시험에 따른 케이블의 구조변화 및 절연체의 열적 stress에 의한 변형 등은 케이블의 절연내력에 영향을 미치는데 이와 같은 케이블의 변화에 대한 AC파괴전압 특성을 평가하기 위한 것이다.

2.6 가속 수트리시험

가속 수트리시험은 일정기간 동안 규정된 온도를 주기적으로 인가하고 40 [kV]의 시험전압을 연속으로 인가하여 수트리의 발생을 가속하는 것이 그 목적이다. 트리역제형 XLPE 절연체는 수트리 발생의 원인이 되는 절연체 내부의 hole(가속수트리 열화 시 발생되는 절연체의 노화로 인해 절연체 내부에서 수분이 집중되는 부분)의 발생에 대한 저항성이 있는 것으로 알려져 있다. 가속수트리 과정을 거친 케이블은 주기적인 온도의 변화와 수분의 침투에 의하여 열화되고, 절연체 내부에서 발생하는 수트리에 의하여 전기적, 물리적, 화학적 구조가 변하게 된다. 이러한 TR XLPE 절연체 재질의 변화에 대한 수트리역제형 전력용 케이블의 장기사용 신뢰성을 평가하기 위한 시험이다. 가속 수트리 시험은 120 일, 240 일, 360 일 열화를 거친 후 케이블의 특성변화를 측정하기 위하여 AC파괴시험을 실시하였다. AC파괴 후 파괴된 부위를 중심으로 트리 관찰을 실시하였다.

2.6.1 시험방법

- 시료는 14주기 열화시킨 325 mm 케이블을 사용하였다.
- 1) 100mm의 플라스틱 파이프 속에 시료를 넣고 수돗물을 충전한다.
 - 2) 시료에 40±1 kV의 전압을 120 일, 240 일, 360 일 동안 연속 인가한다.
 - 3) 전류인가 종료 시 도체온도 90℃되는 전류를 매일 8시간씩 인가, 16시간 이상 휴지를 주 5일 연속 반복한다.
 - 4) 전류인가 종료 시 물속 외도표면온도는 45±3℃ 이내 이어야 한다.
 - 5) Dummy 케이블을 설치하여 시료의 온도를 보정하였다.
 - 6) 도체온도와 전류인가 종료 시 외도표면 온도를 만족시키기 위해서는 시험장 내부의 대기온도는 25±5℃ 이내 이어야 한다.

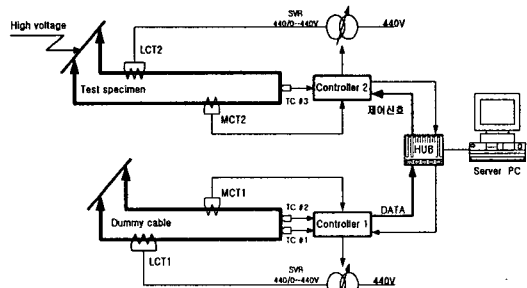


그림 2 14주기 열화시험 및 가속수트리시험 회로도

3. 시험결과 및 고찰

3.1 인장강도 및 신장율 측정결과

A사와 B사의 시료에 대하여 동일한 조건으로 시험하였다. 열화 전과 열화 후 A사와 B사 모두 인장강도와 신장율이 기준치를 훨씬 상회하는 결과로 나타났다. 또한 열화 후 B사의 인장강도가 A사에 비하여 낮으나 이는 큰 차이는 보이지 않는 것으로 보인다. 가교폴리에틸

렌 XLPE 절연체와 비교하였을 경우 인장강도는 0.1~0.2 kgf/mm², 신장율은 10~20%로 약간 높은 결과를 나타내었다.

표 1 인장강도 및 신장율 측정 결과

구분	A사 시험결과	B사 시험결과
열화 전 인장강도	2.37 kgf/mm ²	2.54 kgf/mm ²
열화 후 인장강도	2.67 kgf/mm ²	2.49 kgf/mm ²
열화 후 신장율	587 %	560 %
열화 후 신장율	623 %	633 %

3.2 가교도 측정결과

일반적으로 전력케이블의 가교도는 약 80% 정도 되는 것으로 알려져 있다.

A사와 B사 모두 전체 3부분의 가교도를 측정한 결과 80% 이상의 결과를 나타내었으며, 이는 한전구매시방서의 규격치보다 높은 양호한 특성을 나타내었다.

표 2 가교도 측정결과

구분	A사 시험결과	B사 시험결과
내도 부분	82.9 %	82.4 %
중간 부분	84.0 %	83.0 %
외도 부분	85.0 %	80.8 %

3.3 Lightning impulse 파괴 결과

Lightning impulse test는 뇌의 침입에 대한 전력케이블의 절연강도를 모의하기 위한 시험이다.

A사와 B사 모두 한전구매시방서의 규격치 보다 높은 양호한 특성을 나타내었다. 또한 B사가 A사의 파괴전압보다 높은 이유는 제조공정에서의 차이로 인한 것으로 추정된다.

표 3 Lightning impulse 파괴 결과

구분	A사 시험결과	B사 시험결과
노화 전 LI파괴	440 kV	560 kV
노화 후 LI파괴	410 kV	570 kV

3.4 AC 파괴시험 결과

A사와 B사 모두 한전구매시방서의 규격치 보다 높은 양호한 특성을 나타내었다. 또한 A사와 B사 모두 수트리 열화 후 파괴전압이 크게 낮아지지 않은 특징을 보였으며, 240일 수트리 후의 경우 양사 모두 파괴전압이 약간 높아진 특성을 나타내었다.

표 4 AC파괴 결과

구분	A사 시험결과	B사 시험결과
노화 전 AC파괴	240 kV	310 kV
노화 후 AC파괴	270 kV	230 kV
수트리 120일	230 kV	250 kV
수트리 240일	250 kV	270 kV
수트리 360일	230 kV	230 kV

3.5 수트리 관찰

120일, 240일, 360일 수트리 열화 후 트리를 관찰한 결과 트리의 크기가 150μm 이하였다. 또한 각 시험기간 별 트리의 발생 개수가 시험기간에 비례하여 증가하는 것이 아니라 120일 시험 기간 동안 발생한 개수는 65%, 240일 종료 후 발생한 개수는 20%, 360일 종료 후 발생한 개수는 15% 정도로 트리의 발생 개수가 현저히 줄어든 것을 알 수 있었다.

트리의 길이는 120일 종료 후와 360일 종료 후를 길이의 최대값으로 비교하였을 때 약 30% 정도 길어진 것으로 나타났다.

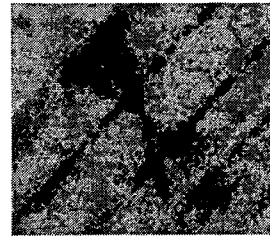


그림 3 수트리시험 후 절연체 내부에서 발생한 Bowtie tree

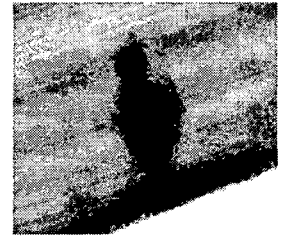


그림 4 수트리시험 후 외부체 내부에서 발생한 Vented tree

3. 결론

본 논문에서는 22.9kV 트리 억제형 전력케이블의 개발에 따른 성능을 분석하였으며 한전구매시방서의 시험 항목에 따른 트리 억제형 전력 케이블의 특성을 분석하였다.

인장강도와 신장율 측정 결과는 열화 전과 열화 후 A사와 B사 모두 인장강도와 신장율이 기준치를 훨씬 상회하는 결과치가 나타났다. 그러나 가교폴리에틸렌(XLPE) 절연체와 비교하였을 경우 인장강도는 0.1~0.2 kgf/mm², 신장율은 10~20% 정도 높은 결과를 나타내었다.

이러한 결과는 절연체의 가교도가 XLPE 절연 전력케이블에 비하여 약 2~3% 정도 높은 특성을 나타내었기 때문인 것으로 사료된다.

가교도 특성은 A사와 B사 모두 전체 세부분의 가교도를 측정한 결과 80% 이상의 결과를 나타내었으며, 절연체의 중간 부분이 84.0%, 83.0%로 양호한 결과를 나타내었다. 트리억제형 절연체의 가교도는 XLPE 절연체의 가교도에 비하여 약 2~3% 정도 높은 특성을 나타내었다.

Lightning impulse 파괴결과는 두 제조사 모두 한전구매시방서의 규격치 310 kV보다 높은 양호한 특성을 나타내었다.

AC파괴전압 역시 두 제조사 모두 한전구매시방서의 규격치 160 kV보다 높은 특성을 나타내었다. 또한 120일, 240일, 360일 수트리 후의 파괴전압이 거의 감소하지 않았으며 두 제조사 모두 240일 수트리 후 AC파괴전압이 상승한 특성을 나타내었다.

AC파괴 후 수트리 관찰 결과 120일 수트리 후와 비교하였을 경우 트리 개수의 증가가 240일이 20%, 360일이 15%로 시간에 따라 비례하지 않고 트리 발생 개수가 현저히 줄어든 특성을 관찰 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사 구매시방서, "22.9kV 트리억제형 전력 케이블", 2000.
- [2] 김종화, "22.9 kV XLPE 케이블의 절연재료 및 가교방식에 따른 열화특성 연구", pp 10-26, 1992
- [3] 홍진웅, Yasuo SUZUOKI, Teruyoshi MIZUTANI,

- "Effect of Treatment on Polyethylene Film for Power Cable Insulation", 1997 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1566-1568.
- [4] 김영호, 이상진, 이승엽, 최명규, "XLPE의 열처리에 의한 결정화도, 가교부산물에 따른 교류파괴전압 특성", 2000 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1608-1610.
- [5] 김규식, 임기조, 류부형, 박수길, "전력 Cable용 XLPE의 제조과정 중 가교제와 가교조제의 함량이 미치는 전기적 특성", 2000 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp2077-2080.
- [6] 김위영, 신영준, 윤대혁, 박태곤 "22.9 kV 수트리지형 전력용 케이블의 파괴전압 특성" 2001년도 대한전기학회 부산, 경남, 울산지부 추계학술대회 논문집.
- [7] 김위영, 박태곤 "XLPE 절연 전력케이블의 절연체 가교도에 따른 인장강도 및 신장특성" 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집.
- [8] Evert Frederik Steennis, "The behaviour of water trees in extruded cable insulation", pp2-23, 1989.
- [9] A. Barlow, "The chemistry of Polyethylene Insulation", IEEE Elect. Insul. Magazine, Vol.7, No.1, pp8-19, 1991