

## XLPE Cable의 고주파 가속열화에 대한 영향 분석

김위영, 강동식, 윤대혁, 박태곤\*  
한국전기연구원, 창원대학교\*

### Analysis of Influence for High Frequency Accelerated Aging of XLPE Cable

We-young Kim, Dong-sik Kang, Dae-hyuk Yun, Tae-gone Park\*  
KERI, Changwon national University\*

**Abstract** - XLPE compound have used for insulation of 22.9 [kV] power cable. XLPE compound is aged for use long time in distribution line. The cause of aging is water tree is happening and growth. Accelerated water tree test method are Accelerated volatge method and high frequency method.

In this paper, high frequency accelerated water tree was performed. And the result was analysed AC breakdown voltage and size and number of water trees.

#### 1. 서 론

XLPE 절연 전력 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.

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 절연파괴가 일어나거나, 또는 수트리가 발생된 후 전기트리로 진전되어 사고를 유발하기도 한다. 즉 케이블 절연파괴에 수트리가 직접, 간접적으로 연관되어 있다고 할 수 있다.

현재까지 수트리에 대한 고찰은 전압가속방법으로 수트리를 발생시켰으나 이 방법은 실용전계의 범위를 벗어난다는 단점을 가지고 있다. 이에 비하여 주파수 가속 방법은 케이블의 정격전압의 범위에서 주파수만을 증가시켜 수트리를 발생시키는 방법으로 실용전계 근처 영역에서 가속시험을 실시할 수 있다는 특징이 있다.

본 연구에서는 22.9kV급 XLPE 전력케이블의 고주파 가속열화의 방법과 고주파 가속열화가 케이블에 미치는 영향을 파괴전압특성과 고주파 가속열화에 의해 발생된 수트리의 크기 및 형태를 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 가속수트리

XLPE cable의 수명에 영향을 주는 가장 중요한 요소 중의 하나가 수트리의 발생이다. 정격전압과 상용주

파수에서 수트리를 발생시키 위해서는 많은 시간이 필요로 하게 된다. 가속수트리는 이러한 수트리의 발생을 가속시켜 시간을 단축시키는 방법으로 XLPE 절연 케이블이 실제 선로에서 운전될 때 케이블의 종합적인 신뢰성을 검증하기 위하여 실시하는 것으로서 실질적으로 케이블의 종합적인 장기신뢰성을 검증하기 위한 것이다.

가속수트리 과정을 거친 케이블은 주기적인 온도의 변화와 수분의 침투에 의하여 열화되어 절연체 내부에 hole(가속수트리 열화 시 발생하는 절연체의 노화로 인해 절연체 내부에서 수분이 집중되는 부분)이 발생되고, 절연체 내부의 이물질이나 기공과 같은 불완전한 부분에 전계가 집중되어 수트리가 발생하게 된다. 또한 절연체 내부에서 발생하는 수트리에 의하여 절연체의 전기적, 물리적, 화학적 구조가 변하게 된다.

##### 2.1.1 상용주파 가속수트리

수트리의 발생을 가속시키기 위한 방법으로 일정기간 동안 정격전압의 3배의 상용주파 전압을 연속으로 인가한 상태에서 케이블에 전류를 흘려 규정된 온도를 주기적으로 반복하여 수트리를 발생시키는 방법이다.

실제로 상용주파 가속수트리 방법으로 22.9kV급 완제품 케이블에서 길이 약 100~150mm의 수트리를 발생시키기 위해서는 정격전압의 3배의 전압에서 연속적으로 약 120일간 유지하여야 한다.

[상용주파 가속수트리 실험방법]

- 1) 100mm의 플라스틱 파이프 속에 시료를 넣고 수돗물을 충전한다.
- 2) 40±1 kV의 전압을 120일 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.

##### 2.1.2 고주파 가속수트리

많은 시간이 소요되는 상용주파 가속수트리의 V-t 실험의 시간을 단축하기 위하여 시험주파수를 높여 가속수트리를 실시하는 방법으로 고주파 가속수트리는 1주기당 방전펄스 수와 전하가 상용주파와 동일하다는 것을 전제로 하는 시험방법으로서, 주파수 가속법은 실용전계

근처 영역에서 가속시험을 실시할 수 있다는 특징이 있다.

일반적으로 가속배율 N은 다음 식으로 나타낸다.

$$N = (f / f_0)^k$$

여기서,  $f$ 는 인가주파수  $f_0$ 는 상용주파수,  $k$ 는 가속계수이다. 이 경우  $k=1$  일 때 열화의 등가가속성이 성립하게 된다.

$k=1$ 인 주파수 범위는 50(60)Hz~6kHz 범위이며, 인가주파수가 7kHz를 넘으며  $k<1$ 이 되어 열화의 등가가속성이 인정되지 않는다. 본 논문에서는 1kHz의 고주파 공격전압을 인가하여 고주파 가속수트리실험을 실시하였다.

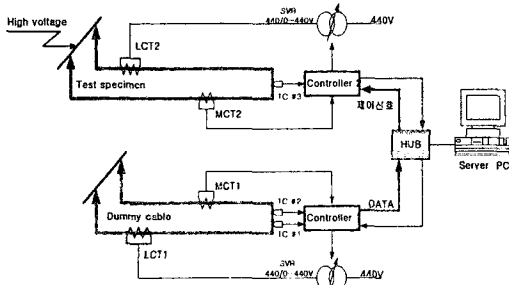


그림 1 가속수트리 실험 회로도

## 2.2 고주파 가속수트리 실험

시험 시료는 22.9kV CNCV-W 325mm<sup>2</sup>으로 실험하였으며, 시료의 설치 방법은 상용주파 가속수트리와 동일하게 하였다

표 1. 고주파 가속수트리실험 조건

|          |   |
|----------|---|
| 시험주파수    | 1 kHz   |
| 시험전압     | 15±0.5kV 연속인가   |
| 주기 열화 전류 | - 도체온도 90℃를 유지하는 전류를 8시간 인가, 16시간 휴지.<br>- 전류 인가 주기동안 최소 6시간 이상 도체온도가 포화상태를 유지하여야 한다. |
| 시험주기     | 전류 인가를 매주 5일간 연속 반복, 2일간 휴지   |
| 시험기간     | 30일   |

표 2. 상용주파 가속수트리를 기준으로 본 고주파 가속수트리의 산술적 배수

|       |            |            |        |
|-------|------------|------------|--------|
| 시험조건  | 상용주파 가속수트리 | 고주파 가속수트리  | 산술적 배수 |
| 시험주파수 | 60 Hz      | 1 kHz      | 16.7 배 |
| 시험전압  | 40 kV 연속인가 | 15 kV 연속인가 | 0.38 배 |
| 시험기간  | 120일       | 30일        | 0.25 배 |
| 종합 비교 | -          | -          | 1.6 배  |

케이블의 열화에 영향을 미치는 요인을 산술적으로 비

교해보면 표2에 나타난 바와 같이 두 시험 중 고주파 가속수트리가 약 1.6배의 열화가 되는 것을 산술적으로 확인할 수 있다.

## 2.3 AC breakdown test

가속수트리 후 AC 파괴실험은 전력케이블의 절연강도를 모의하기 위한 시험으로서, 가속수트리를 거친 케이블은 절연체 내부에 존재하는 이물, 보이드, 반도체층 계면돌기 등의 불완전한 부분에서 방전이 발생하여 전기적인 열화가 발생하며, 절연체 내부의 hole이 발생한다. 또한 주기적인 부하의 인가로 케이블의 열적 stress의 증가로 케이블 절연체의 물리적 변화가 발생된다. 이러한 요소들이 케이블 변화에 대한 AC파괴특성을 평가하기 위한 것이다.

### 2.3.1 실험방법

시험절차 및 방법은 한국전력 구매시방서에 따라 다음과 같이 실시하였다.

- 1) 길이 6m이상의 2개의 시료에 대해 실시하였다.
- 2) 시험주파수는 59~61 Hz로 상온에서 실험하였다.
- 3) 전압을 인가하기 위해 수단말을 사용하여 30kV의 전압을 인가, 그 후 전압을 단계적으로 10kV씩 승압시켜 가면서 5분간 시험전압을 인가하면서 케이블이 절연파괴가 일어날 때까지 실험을 진행하였다.
- 4) 단말부에서 절연파괴 시 재단말 후 30kV인가 30초 유지 후 10kV 상승 30초 유지를 단말부 파괴 시 전압까지 인가 후 10kV 상승 5분간 유지하여 케이블이 절연파괴가 일어날 때까지 실험을 진행하였다.
- 5) AC파괴 후 파괴된 부위를 중심으로 트리 관찰을 실시하였다.

고주파 가속수트리 후 2개의 시료에 대한 AC breakdown test 결과는 아래 표와 같다.

표 3 가속수트리 열화 후 파괴전압 비교

| 시료구분       |    | 절연파괴전압      |
|------------|----|-------------|
| 상용주파 가속수트리 | #1 | 210 kV / 1분 |
|            | #2 | 190 kV / 2분 |
| 고주파 가속수트리  | #1 | 170 kV / 2분 |
|            | #2 | 100 kV / 4분 |

## 2.4 Water tree 분석

가속 수트리 실험 후 AC breakdown test에 의해 절연 파괴된 시료에 대하여 파괴된 지점을 중심으로 trec를 분석한다.

[염색을 위한 시편 준비]

- 1) 절연파괴된 시료를 10cm 정도로 잘라 증성선, 부풀음테이프 그리고 내부도체를 제거한다. 내부도체를 제거 할 때는 도체 차폐층의 손상 없이 천천히 제거한다.
- 2) 내부도체를 제거한 시료를 선반을 사용하여 절연 파괴된 부분을 중심으로 두께 0.64mm wafer 20개, 두께 0.13mm wafer 1개 이상의 시편을 제작한다.
- 3) 시편 제작 시 칼날은 매우 날카로우야 하며 절연체 표면에 흠집을 남기지 않아야 한다.

[시편(Wafer)의 염색]

- 1) 비이커에 800~1000ml의 증류수를 채운 뒤 덮개를 덮고 Oil bath로 중탕한다. 비이커 내의 온도가 40℃ 정도가 되면 여기에 Methylene-blue 0.25~0.3g과 Ammonia 3~5ml를 적당히 조합하여 염색액을 준비한다.
- 2) 준비된 염색액에 시편을 넣고 약 2시간 정도 끓인다. 이때 시편이 서로 붙을 수 있으므로 표면에 흠이 나지 않고 염색이 골고루 되도록 잘 저어준다.
- 3) 염색이 종료된 후 미지근한 물로 세척한 다음 Methanol로 최종 세척한다.

[수트리 관찰]

염색이 완료된 wafer는 슬라이드로 제작하여 현미경으로 bowtie tree는 절연체의 내부에서 vented tree는 절연체의 안쪽(내도와 접촉되는 면)과 바깥쪽(외도와 접촉되는 면) 표면에서 관찰한다.

표 4 Bowtie tree 및 vented tree 측정결과

| 구분    | Bowtie tree |         |         |         |         |         |        | Vented tree |
|-------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-------------|
|       | 50-100      | 101-150 | 151-200 | 201-250 | 251-300 | 301-350 | 400 이상 |             |
| 크기    | 50-100      | 101-150 | 151-200 | 201-250 | 251-300 | 301-350 | 400 이상 | 250 이상      |
| 시료 #1 | 37          | 7       | 2       | 2       | 2       | 없음      | 없음     | 없음          |
| 시료 #2 | 42          | 11      | 2       | -       | 1       | 2       | 1/406  | 없음          |

Tree 측정결과 vented tree는 관찰되지 않았으며, 최대 406µm 크기의 bowtie tree가 시료 #2에서 관찰되었다.

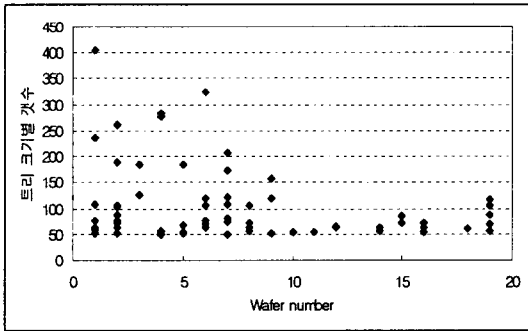


그림 2 Wafer number별 관찰된 tree의 크기 및 갯수

### 2.5 실험결과 분석

고주파 가속수트리 후 상용주파교류파괴전압은 시료 #1이 170kV, 시료 #2가 100kV로 상용주파 가속수트리에 비교하여 약 60kV 정도 낮게 나타났다.

Tree 관찰 결과, 모든 wafer 상에서 1~5개의 크기 50~100µm의 tree가 균등하게 관찰되었으며, 표 4에는 나타나지 않았지만 50µm 이하의 크기를 가지는 tree는 전체 wafer상에서 평균적으로 각 wafer 당 50~100개 정도가 발생한 것으로 관찰되었다. 또한 110~150µm의 tree는 전체 tree 갯수의 18% 정도, 151µm 이상의 tree는 전체 tree 갯수의 16% 정도로 발생되었다.

파괴지점의 wafer상에서는 50~100µm의 tree와

50µm 이하의 tree만 관찰되었는데 이는 절연파괴가 일어난 절연파괴의 원인이 되는 tree의 발생과 열화로 인한 취약부분이 절연파괴 시 같이 소멸된 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

지금까지 일반적으로 실시해오던 상용주파 가속수트리와 새로이 시도된 고주파 가속수트리는 표 2에서와 같이 인가전압이 낮고 기간이 단축되었음에도 고주파 가속수트리의 효과가 산술적 배수로 약 1.6배 높은 것으로 나타났으므로, 두 종류의 가속수트리가 종료된 후 열화 정도를 판단하기위한 상용주파교류파괴시험에서 파괴전압이 1.6배 비율로 나타난다면 고주파 가속수트리시험은 유효하다할 수 있을 것이다. 표 2에 나타난 교류파괴전압 비교에서 고주파 가속수트리 열화 후의 교류파괴전압치가 약 67% 정도 낮게 나타나므로 고주파 가속수트리시험은 유효한 시험으로 판단되어진다. 또한 tree 관찰 결과 상용주파 가속수트리 후 수트리의 최대 크기는 250µm 이상의 tree를 관찰하기 어렵지만 고주파 가속수트리 열화 후 tree 측정 결과 250µm 이상의 tree가 관찰 되었으며 최대 크기 또한 406µm로 매우 큰 bowtie tree가 발생한 것을 알 수 있다. 이와 같이 교류파괴전압이 평균값으로 65kV 낮게 나타나는 것은 고주파에 의한 열화 영향이 어느 정도 산술적 비례한다고 볼 수 있으며, 수트리의 발생 갯수는 비슷한 형태를 가지나 케이블의 장기수명 신뢰성을 평가하는 요소가 되는 수트리의 성장은 고주파전압에 더욱 가속되는 것으로 보인다.

본 논문의 결과로서 고주파 가속수트리 열화는 상용주파 가속수트리 열화에 비교하여 짧은 시간에 가속된 열화를 가져온다고 볼 수 있는 작은 사실을 확인할 수 있었으므로 인가전압 및 시험기간 등을 달리하여 계속 연구해야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Suzuki H., Mukai S., Ohki Y., Nakamichi Y., Ajiki K., "Water-tree Characteristics in Low-density PE under Simulated Inverter Voltages" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Volume 5 1998 pp: 256-260
- [2] 김위영, 윤대혁, 박태근 "22.9kV 트리억제형 전력케이블의 성능평가" 2002년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집
- [3] 김위영, 신영준, 윤대혁, 박태근 "22.9kV 수트리억제형 전력용 케이블의 파괴전압 특성" 2001년도 대한전기학회 부산, 경남, 울산지부 추계학술대회 논문집.
- [4] 김정태, "수트리현상과 폴리에틸렌의 변화 및 구조적 변화와의 관련 성에 대한 연구" pp. 8-20, 1991
- [5] 홍진웅, Yasuo SUZUOKI, Teruyoshi MIZUTANI, "Effect of Treatment on Polyethylene Film for Power Cable Insulation", 1997 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1566-1568.
- [6] 한국전력공사 구매시방서, "22.9kV 동심중성선 전력 케이블", 2000
- [7] AEIC CS5-94, "Specification for and cross- Linked Polyethylene Insulated Shielded Power Cables Rated 5 through 46kV (10th Edition)", 1994.
- [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