

고주파 전압이 XLPE cable의 가속열화에 미치는 영향 분석

김위영, 허종철, 윤대혁, 박태곤*
한국전기연구원, 창원대학교*

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

We-young Kim, Jong-chul Hu, Dae-hyuk Yun, Tae-gone Park*
KERI, Changwon national University*

Abstract - XLPE compound have used for insulation of 22.9kV power cable. XLPE insulation 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 aging method and high frequency aging 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 전력 케이블의 절연파괴의 원인이 되어 전력계통의 사고로 이어지게 된다.

현재까지 이러한 절연열화현상을 감소시키기 위하여 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 결함부위가 수트리의 발생과 성장을 돕게 되며 수트리로 인한 절연층의 열화는 케이블 절연파괴에 직접, 간접적으로 연관되어 있다고 할 수 있다.

현재까지 수트리에 대한 고찰은 전압가속방법으로 수트리를 발생시켰으나 이 방법은 실용전계의 범위를 벗어난다는 단점과 수트리를 발생시키는데 시간이 많이 걸리는 단점을 가지고 있다. 이에 비하여 주파수 가속방법은 케이블의 정격전압의 범위에서 주파수만을 증가시켜 수트리를 발생시키는 방법으로 실용전계 근처 영역에서 가속시험을 실시할 수 있다는 장점이 있다.

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

2. 본 론

2.1 가속수트리 열화

XLPE 전력 케이블의 수명에 영향을 주는 가장 중요한 요소 중의 하나가 수트리의 발생이다. 수트리는 상용 운전 중인 전력 케이블이 부하의 변동으로 인한 온도의

변화, 절연체 내부로의 수분의 침투, 절연체 내부의 이물 질이나 기공과 같은 불완전한 부분에 지속적인 전계에 의한 stress로 수트리가 발생하게 된다. 이와 같이 열화된 절연체 내부에 hole(가속수트리 열화 시 발생하는 절연체의 노화로 인해 절연체 내부에서 수분이 집중되는 부분)이 발생되고, 또한 절연체 내부에서 발생하는 수트리에 의하여 절연체의 전기적, 물리적, 화학적 구조가 변하게 된다. 이러한 수트리를 발생시키기 위해 상용주파수의 정격전압을 인가할 경우에는 많은 시간이 필요로 하게 된다. 가속수트리 열화는 이러한 수트리의 발생을 가속시켜 시간을 단축시키는 방법으로서 XLPE 절연 케이블이 실제 선로에서 운전될 때 케이블의 종합적인 신뢰성을 검증하기 위해 실시하는 것으로서 실질적으로 케이블의 종합적인 장기신뢰성을 검증하기 위한 것이다.

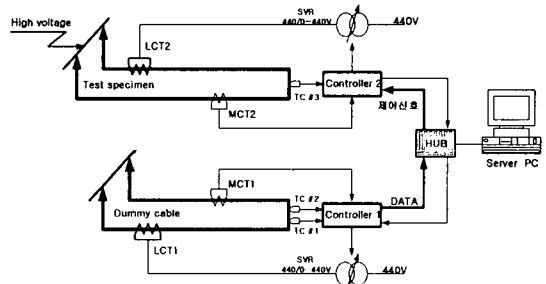


그림 1 가속수트리 실험 회로도

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.

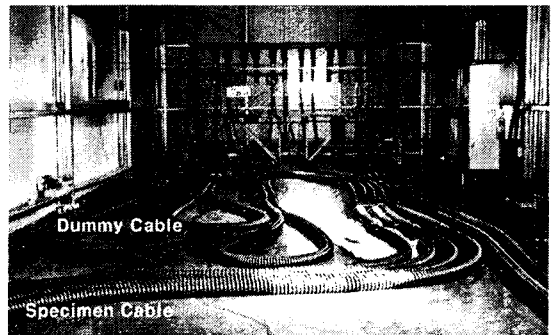


그림 2 상용주파 및 고주파 가속수트리 시료설치 모습

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

상용주파 가속수트리 실험방법은 한국전력공사 구매시방서의 장기과통전시험 방법에 따라 실시하였다.

2.2 고주파 가속수트리

많은 시간이 소요되는 상용주파 가속수트리의 V-I 실험의 기간을 단축하기 위하여 시험주파수를 높여 가속수트리 열화를 실시하는 방법으로 고주파 가속수트리는 1주기 당 방전펄스의 수와 전하가 상용주파와 동일하다는 것을 전제로 하는 시험방법으로 주파수 가속법은 실용전계 근처 영역에서 가속시험을 실시할 수 있다는 특징이 있다.

일반적으로 가속배율 N은 다음 식으로 나타낸다.

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

여기서, f는 인가주파수, f₀는 상용주파수, k는 가속계수이다. 이 경우 k=1 일 때 열화의 등가가속성이 성립하게 된다.

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

2.2.1 고주파 가속수트리 실험

시험 시료는 22.9kV CNCV-W 325mm²으로 실험하였으며, 시료의 설치 방법은 상용주파 가속수트리와 동일하게 하였다

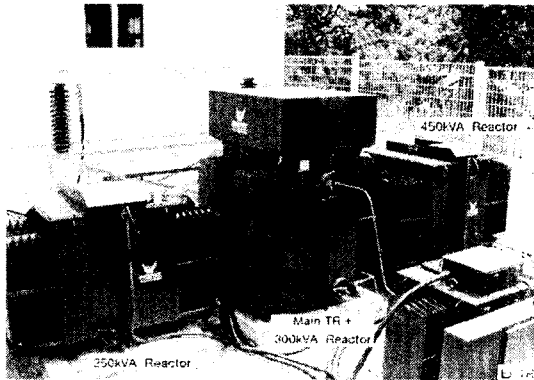


그림 3 고주파 전압인 1kHz 35kV 1000kVA

표 1. 고주파 가속수트리실험 조건

| 시험주파수 | 1 kHz | |
|----------|---|-------------------|
| 시험전압 | 10±0.5 kV 연속인가 | 15±0.5 kV 연속인가 |
| 주기 열화 전류 | - 도체온도 90℃를 유지하는 전류류 8시간 인가, 16시간 휴지. - 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

| 시험 조건 | 상용주파 가속수트리 | 고주파 가속수트리 | | 산술적 배수 | |
|-------|------------|-----------|-------|--------|--------|
| | | 1 kHz | 1 kHz | 16.7 배 | 16.7 배 |
| 주파수 | 60 Hz | 1 kHz | 1 kHz | 16.7 배 | 16.7 배 |
| 전압 | 40 kV | 10 kV | 15 kV | 0.25 배 | 0.38 배 |
| 기간 | 120일 | 30일 | 30일 | 0.25 배 | 0.25 배 |
| 비교 | - | - | - | 1.0 배 | 1.6 배 |

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 절연체 내부에 전기적인 열화가 발생된다. 또한 주기적인 부하의 인가로 케이블의 열적 stress의 증가와 절연체 내부의 hole의 발생으로 케이블 절연체의 물리적 변화가 발생된다. 이러한 요소들에 의한 케이블의 전기적 특성 변화에 대한 케이블의 절연특성을 평가하기 위한 것이다.

시험절차 및 방법은 한국전력 구매시방서에 따라 케이블이 절연파괴 될 때까지 진행하였다.

2.4 Water tree 분석

가속 수트리 실험 후 AC breakdown test에 의해 절연 파괴된 시료에 대하여 파괴된 지점을 중심으로 두께 0.64mm wafer 연속 20매에 대하여 현미경으로 bow-tic tree는 절연체의 내부에서 vented tree는 절연체의 안쪽(내도와 접촉되는 면)과 바깥쪽(외도와 접촉되는 면) 표면에서 관찰하여 tree를 분석한다.

2.5 실험결과 분석

2.5.1 AC breakdown test 결과

아래의 표 3과 같이 10kV 고주파 가속수트리 후 파괴전압은 시료 #1이 200 kV, 시료 #2가 210 kV로 상용주파 가속수트리에 비교하여 평균 약 5kV 정도 높게 나타났다으며, 산술적 열화 배수 0.98로서 표 2에 나타난 시험조건의 산술적 배수와 거의 동일한 값을 보였다. 이는 60Hz 120일 조건과 1kHz 10kV 30일 조건이 거의 유사한 열화 결과를 가져온다 할 수 있다.

15kV 고주파 가속수트리 후 파괴전압은 시료 #1이 170 kV, 시료 #2가 100 kV로 상용주파 가속수트리에 비교하여 평균 약 65 kV 정도 낮게 나타났으며, 산술적 열화 배수도 1.48로서 표 2에 나타난 시험조건의 산술적 배수와 유사한 값을 보였다. 이는 상용주파 가속수트리 조건과 비교하여 가혹한 조건이라 할 수 있으며 시험기간을 줄여야 함을 알 수 있다.

표 3 가속수트리 열화 후 AC breakdown test 파괴전압 비교

| 시료구분 | | 절연파괴 전압 | 산술적 평균 | 열화 배수 |
|------------|------|---------|--------|-------|
| 상용주파 가속수트리 | #1 | 210 kV | 200kV | 1.0배 |
| | #2 | 190 kV | | |
| 고주파 가속수트리 | 10kV | #1 | 200 kV | 0.98배 |
| | | #2 | 210 kV | |
| | 15kV | #1 | 170 kV | |
| | | #2 | 100 kV | |

2.5.2 Water tree 분석 결과

표 4 120일 상용주파 가속수트리 후 tree 측정표

| 구분 | Bowtie tree | | | | | | | Vented tree |
|-------|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| | 크기 | 50-100 | 101-150 | 151-200 | 201-250 | 251-300 | 301-350 | |
| 시료 #1 | 22 | 2 | 1 | 1/217 | 없음 | 없음 | 없음 | 4/101 |
| 시료 #2 | 25 | 1 | 1 | 1/250 | 없음 | 없음 | 없음 | 5/102 |

표 5 10kV 고주파 가속수트리 후 tree 측정표

| 구분 | Bowtie tree | | | | | | | Vented tree |
|-------|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| | 크기 | 50-100 | 101-150 | 151-200 | 201-250 | 251-300 | 301-350 | |
| 시료 #1 | 17 | 7 | 5 | 1 | 없음 | 없음 | 없음 | 없음 |
| 시료 #2 | 19 | 8 | 1 | 1 | 1/274 | 없음 | 없음 | 없음 |

표 6 15kV 고주파 가속수트리 후 tree 측정표

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

Tree 측정결과 표 4, 표 5, 표 6에서와 같이 120일 상용주파 가속수트리 시료에서만 vented tree는 관찰되었으며 고주파 가속수트리 시료에서는 vented tree가 관찰되지 않았다.

산술적으로 동배의 열화 조건인 120일 상용주파 가속수트리 시료와 10kV 고주파 가속수트리 시료에서 발생한 bowtie tree는 tree의 최대 크기가 250 μ m와 271 μ m로 큰 차이를 보이지 않으며, 발생 개수 또한 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 bowtie tree의 크기는 고주파 가속수트리 열화시료에서 101~150 μ m 크기의 tree가 상대적으로 많이 발생한 것을 알 수 있다.

15kV 고주파 가속수트리 시료는 최대 406 μ m 크기의 bowtie tree가 관찰되었으며, 발생한 트리의 개수 또한 상용주파 가속수트리와 10kV 고주파 가속수트리에 비하여 약 2배에 가까운 트리가 발생하였다.

Tree를 측정할 모든 wafer 상에서 크기 50~100 μ m의 tree가 균등하게 관찰되었으며, 표 4, 5, 6에는 나타나지 않았지만 인가전압과 주파수에 상관없이 50 μ m 이하의 크기를 가지는 tree가 전체 wafer상에서 평균적으로 각 wafer 당 50개 정도가 발생한 것으로 관찰되었다.

파괴지점의 wafer상에서는 비교적 크기가 작은 tree만 관찰되었는데 이는 절연파괴의 원인이 되는 tree와 열화로 인한 취약부분이 절연파괴 시 소멸된 것으로 사료된다.

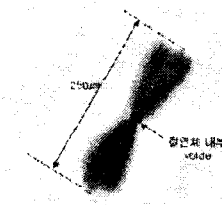


그림 4 Bowtie tree



그림 5 Vented tree

3. 결 론

표 2에서 고주파 가속수트리의 효과를 산술적 배수로 비교할 때 10kV 고주파 가속수트리는 약 1.0배, 15kV 고주파 가속수트리는 약 1.6배의 열화 효과가 있다고 본다면, 가속수트리 열화가 종료된 후 열화 정도를 판단하기 위한 교류파괴시험에서 파괴전압치가 1.0배와 1.6배 비율로 나타난다면 고주파 가속수트리시험은 유효하다할 수 있을 것이다.

표 2에 나타난 교류파괴전압 비교에서 고주파 가속수트리 열화 후의 교류파괴전압치가 10kV 고주파 가속수트리는 0.98배 차이로 약 5kV 낮게 나타나고, 15kV 고주파 가속수트리는 약 1.48배 차이로 65kV 낮게 나타나므로 고주파 가속수트리시험은 유효한 시험으로 실용전계 근처 영역에서 열화의 등가 가속성이 성립된다고 판단되어진다. 또한 tree 관찰 결과 상용주파 가속수트리와 10kV 고주파 가속수트리 후의 트리의 크기 및 발생 개수는 거의 유사하며 상용주파 가속수트리에서는 vented tree가 발생되었다.

15kV 고주파 가속수트리 열화 후 tree 측정 결과 250 μ m 이상의 tree가 관찰 되었으며 최대 크기 또한 406 μ m로 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 개수는 이와 비슷한 형태를 가지나 케이블의 장기수명 신뢰성을 평가하는 요소가 되는 수트리의 성장은 가속화 되는 것으로 생각된다.

본 논문의 결과로 고주파 가속수트리 열화가 상용주파 가속수트리 열화와 비교하여 실용전계 영역에서는 약간의 오차는 있으나 등가가속성이 성립되어지며, 짧은 시간안에 가속된 열화를 가져온다고 볼 수 있으므로 시험전압 및 시험기간 등을 달리하여 계속하여 연구해야할 사항으로 고려된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김위영, 강동식, 윤대혁, 박태곤 "XLPE cable의 고주파 가속열화에 대한 영향분석" 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [2] 김위영, 윤대혁, 박태곤 "22.9kV 트리억제형 전력케이블의 성능평가" 2002년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집
- [3] 김위영, 신영준, 윤대혁, 박태곤 "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 SUZUKI, Teruyoshi MIZUTANI, "Effect of Treatment on Polyethylene Film for Power Cable Insulation", 1997 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1566-1568.
- [7] Suzuki H., Mukai S., Ohki Y., Nakamichi Y., Ajiki K., "Water-tree Characteristics in Low-density E under Simulated Inverter Voltages" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Volume 5 1998 pp: 256-260