1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집 1999. 11. 20

반도전 재료를 이용한 Resistivity grading 방식의 XLPE절연 전력케이블용 시험단말에 관한 연구

이창영*, 신두성, Sergey M. Dudkin, 김동욱, 박완기
LG 전선 (주) 전력연구소

A study on the application of testing termination for XLPE Power Cable by Resistivity Grading Method Using Semi-conductive material

C.Y. Lee*, D.S. Shin, Sergey M. Dudkin, D.W. Kim, W.K. Park
LG Cable Ltd. Electric Power Research&Technology Center

Abstract The purpose of termination for high voltage tests of XLPE power cable is to prevent flashover during the breakdown test of specimen as well as to withstand the specified voltage between its conductor and screen without failure.

For easier treatment and simpler construction of testing termination, resistivity grading method using semi-conductive material was employed. Based on the fundamental theory, its failure characteristics by changing the resistivity of semi-conductive material on the insulation surface was investigated. With two layers construction by difference resistivity on their surfaces, much improved result than that of one resistivity was obtained through the experiment for MV cable.

1. 서 론

지중 전력케이블에 대해 실시되는 전기적인 평가는 제품에 대한 품질 신뢰성 확보를 목적으로 하며, 특히 출하전 실시되는 각종 내전압 시험 및 PD, tanδ 등의 측정은 제품의 결함 검출을 위한 중요한 시험 항목이다.

이러한 전기적인 평가를 위해서는 케이블에 규정 시험전압까지 과전이 될 수 있도록 하는 시험 단말이 필수적으로 요구되며, 시험단말의 성능에 따라 케이블의 평가능력이 결정된다고 할 수 있다.

현재 주로 이용되고 있는 시험 단말로서는, 케이블 절연체에 유침절연지를 보강하고 벨마우스에 의해 전계집중을 억제하는 방식의 유단말과 수 MΩ의 저항율을 갖는 탈이온수를 사용하여 전계완화를 시키는 수단말이 있다. 이 중 유단말은 단말 처리에 상당히 시간이 요구될 뿐만 아니라 특히 유침절연지의 사용에 따른 환경오염의 문제가 따른다. 이에 비해 수단말은 단말 시공성은 간편하지만 탈 이온수의 저항율과 온도를 일정하게 유지시키기 위한 탈이온장치 및 냉각장치가 추가적으로 필요하다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완한 새로운 방식의 단말의 개발을 목적으로 하여, 케이블 절연체 표면에 반도전 재료를 도포함으로써 전계집중을 억제시키는 Resistivity grading 방식의 시험단말에 대해 논하였다. 또한 도포되는 반도전 재료의 저항율 변화에 따라 단말 파괴특성을 조사하였고, 22.9kV MV케이블을 대상으로 하는 시험 단말로서의 적용 가능성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

일반적으로 시험단말은 케이블 종단부의 도체와 차폐사이에 충분한 이격거리를 형성한 후, 특히 차폐 끝단의 전계집중을 억제시킬 수 있도록 처리되어야 한다. 유단말은 유한요소법등의 수치해석에 의한 전계해석을 통해 절연보강부 및 벨마우스의 최적 형상을 설계함으로써 차폐끝단의 전계집중을 억제시킨다.

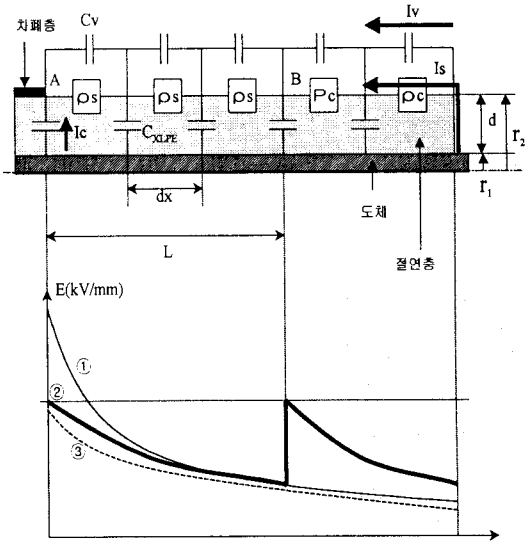
이에 비해 Resistivity grading 방식은 절연체 표면위로 적당한 저항율을 갖는 매질에 의해 차폐 끝단의 전계강도를 낮추는 방식으로써, 수단말이 이 원리를 이용한 것이다. 도체와 차폐사이를 일정거리 이격시킨 케이블 종단부는 그림 1과 같이 모델링화 할 수 있다[2,3].

A지점의 전계강도는 도체와 차폐간에 흐르는 누설전류 Iv, Ic, Is와 ρs 및 Cv에 의해 결정된다.

절연층 표면에 반도전 재료를 도포한 경우 Cv는 무시할 수 있으며, 차폐층 끝단 A지점의 전계강도는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_A = V \times \sqrt{\frac{\omega \times \varepsilon \times \rho_s}{d}} \quad \cdots\cdots\cdots \text{(식 1)}$$

V: 도체-차폐간 인가전압[kV], d: 절연체 두께[mm]
ε: 절연체의 유전율($\varepsilon_0 \varepsilon_r$)



Cv : 단위길이당 매질의 커패시턴스
ρs : 단위 길이당 표면 저항율
C_{XLPE} : 단위길이당 절연체 커패시턴스
Ic : 절연체를 통한 충전전류
Iv : 매질에 의한 누설전류
Is :절연체 표면을 통한 누설전류

그림 1. Resistivity grading 방식의 모델링

반도전 재료를 도포하기 전에는 높은 표면저항율에 의해 케이블 길이에 따라 ①과 같은 전계분포를 가지며, 반도전 재료의 표면저항율이 낮아짐에 따라 A지점의 전계강도는 낮아지고 ③과 같은 분포를 가진다.
또한 도포된 반도전층을 따라 흐르는 누설전류 Is에 의한 손실에너지 P는 (식 2)로 표현되며,

$$P = \frac{V^2}{R_s} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 2)}$$

여기서, R_s(표면저항) $= \frac{\rho_s dx}{2\pi r_2}$

손실에너지 P에 의한 표면에서의 온도상승은 (식 3)과 같다.

$$\delta T = \frac{P}{k \times 2\pi \times r_2 \times L_s} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 3)}$$

여기서, k : 공기의 열전달 계수
Ls : 도체-차폐간 표면거리

따라서 표면 저항율이 낮을수록 A지점의 전계강도는 낮아지지만 누설전류의 증가로 인해 온도상승 효과를 가져온다.
그러나 낮은 저항율의 반도전 재료로써 구간 L만큼 도포하고 나머지 구간은 높은 저항율로써 도포할 경우 절연체 표면을 따라 흐르는 누설전류는 억제되며, 이때 B지점의 전계강도는 아래와 같이 나타낼 수 있으며,

$$E_B = 2V\sqrt{\frac{\omega \times \varepsilon \times \rho_s}{d}} \times \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega \times \varepsilon \times \rho_c}{2d}}\, L\right)$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 4)}$$

이 때 단말부의 전계강도는 ②와 같은 분포를 갖는다 [1],[4,5].

2.2 저항율 변화에 따른 단말부의 파괴 특성

반도전 재료의 도포에 의한 Resistivity grading방식은 위 이론에서와 같이 표면의 저항율에 의해 파괴특성이 결정된다. 그러나 표면 저항율은 인가되는 전압에 의한 누설전류로 인해 온도의 상승을 유발시키며 이로 인해 표면 저항율의 변화를 초래한다. 결국 이러한 저항율의 변화는 단말의 파괴특성에 영향을 주게 된다.
따라서 배전 케이블을 모델로 하여 단일 Layer 구조로 도포된 반도전의 표면저항율의 변화에 따른 단말의 파괴특성을 조사하였다.

2.2.1 실험 방법

본 연구에 사용된 반도전 재료은 케이블 표면과의 접착성을 우수하게 하기 위하여 합성고무계 접착제를 사용하였으며, 동일 수지의 절연성 접착제와 전도성 접착제의 혼합비를 조절함으로써 저항율의 변화를 달리하였다. 표1은 사용된 전도성 합성고무계 접착제의 기본 물성을 나타내고 있다.
본 시험에 준비된 케이블은 절연두께 6mm의 22.9kV 325mm^{2}의 배전케이블로 도포 되어지는 케이블 절연부 길이는 900mm로 하였으며, 혼합비를 달리하여 준비된 반도전성 접착제는 톨루엔으로 점도를 저하시킨후 스프레이건을 이용하여 도포함으로써 도포 두께를 균일하게 하였다. 도포가 완료된 케이블은 48시간 이상 건조시킨후 파괴시험을 실시하였다.

표 1. 합성고무계 접착제의 주요 물성

주성분	합성고무, 테키화이어, 전도체
주용제	핵산, 톨루엔
점도[cPs/20℃]	1,500~2,000
비중 (KS M 3725)	0.89/20℃
내열성(℃)	65
전도성 (Ω)	18,000
접착력(kgf/25mm, 90℃)	5~7

2.2.2 실험 결과

그림 2는 절연성 합성고무에 대한 전도성 합성고무의 혼합비에 따른 표면 저항율의 변화를 나타내고 있다. 표면 저항율의 측정은 전극간 거리 10mm로 하여 인가전압 1kV에서 측정한 것이다. 전도성 합성고무의 혼합비가 증가할수록 표면 저항율을 감소하고 있다.

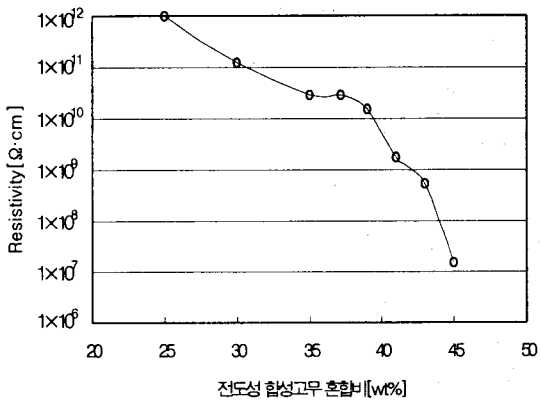


그림 2. 혼합비에 따른 저항율 변화

그림 3은 표면 저항율을 달리하여 도포한 단말의 파괴 전압 특성을 나타내고 있다. 반도전 접착제를 도포하기 전인 케이블 절연층만 노출된 상태에서는 약 60kV 정도에서 표면 섬락이 발생하였다.
시험 결과에서와 같이 절연층 표면에 도포된 반도전의 저항율이 1×10^{11}이상에서는 약 60~65kV 수준에서 표면 섬락이 발생했으며 도포전 섬락전압값과 거의 동일 수준을 나타내었다. 여기서 저항율이 더 낮게 되면 단말의 파괴전압은 높아지며, 약 2×10^9정도의 저항율을 가진 케이블의 경우 100~120kV의 전압에서 단말 파괴가 일어났다. 이 때의 파괴 특성은 인가전압이 높아짐에 따라 케이블 차폐끝단부터 어느 정도 반도전 표면상의 탄화가 진전된 후 표면 섬락이 발생되었다.
그러나 저항율이 1×10^7 이하로 떨어지면 인가전압이 상승할 수록 반도전 표면을 따라 탄화로를 형성하면서 40kV 이하의 낮은 전압에서 단말의 파괴가 일어났다.
위의 결과를 고찰해 보면 저항율이 낮아질수록 단말의 파괴 전압치가 상승됨을 볼 수 있지만 어느 임계 저항율보다 낮은 값에서는 표면탄화에 의한 낮은 파괴 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 반도전 표면을 따라 흐르는 누설전류가 도전성 접착제의 온도 상승을 유발시키고 이러한 온도상승이 접착제의 내열온도 이상에서 급격한 저항율의 변화를 일으켜 결국 파괴를 일으키는 것으로 사료된다.

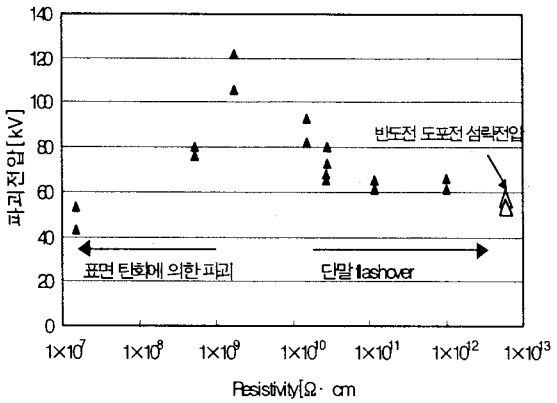


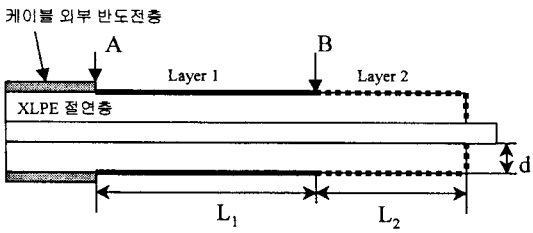
그림 3. 표면 저항율 변화에 따른 단말 파괴전압특성

2.3 22.9kV 배전 케이블에 대한 적용

이론적 검토 및 위 실험 결과를 토대로 실제 22.9kV 325mm^2 배전 케이블에 대해 목표전압을 300kV로 하여 본 반도전 접착제를 이용한 Resistivity grading 방식의 단말을 적용하였다.

목표전압을 위해 표면 저항율을 낮출 경우 누설전류로 인한 열적 파괴를 억제하기 위해서는 단말부의 길이가 상대적으로 길어지게 된다. 따라서 적정한 단말 길이를 유지하고 또한 누설전류를 억제시키기 위해서 그림 4와 같이 표면저항율을 달리한 2 Layer의 구조로 설계 하였다. 이 때 A 및 B 지점의 최대 전계강도는 목표전압에 대하여 1.5kV/mm로 설정하였다. 또한 사용된 반도전부의 내열온도가 65℃임을 고려하여 (식 3)에 의해 최적의 단말부의 길이를 선정하였다.

이상과 같은 설계기준을 토대로 한 각 Layer의 저항율 및 길이는 그림 4과 같이 설정하고 4회에 걸쳐 파괴 시험을 실시하였으며 표 2와 같은 결과를 얻었다.



Layer 1
ρ_1 : 2×10^7[Ω · cm]
L_1 : 900mm

Layer 2
ρ_2 : 3×10^9[Ω · cm]
L_2 : 600mm

그림 4. 22.9kV 325mm^2 배전케이블에 대한 단말 설계

표 2. 22.9kV 배전 케이블에 대한 단말 파괴시험 결과

횟 수	파괴전압	비 고
1회	170kV	반도전 표면 탄화
2회	182kV	〃
3회	170kV	〃
4회	140kV	도포면 기포에 의한 파괴

위의 시험 결과를 고찰해보면, 단말의 파괴 전압은 목표전압 보다 낮은 값을 보이고 있지만 단일 저항율에 의한 도포방식에 비해 파괴전압치가 더 높음을 확인할 수 있다. 또한 도포면의 기포에 의한 파괴를 제외하면 표면 탄화에 의한 파괴 특성을 보이고 있다.

이것은 본 실험에서 사용한 반도전의 내열온도가 65℃임을 고려하여 표면누설전류를 억제하기 위한 최적의 저항율 설정하였으나, 절연체를 통한 누설전류(그림 1의 Ic 성분) 때문에 내열온도 이상 발열하여 파괴된 것으로 생각된다.

이상과 같은 실험에서 보다 내열성이 우수한 반도전 재료를 도포하여 2 layer 구조로 설계할 경우, 시험 단말로써 충분한 파괴특성을 가질 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 케이블 절연체 표면에 반도전 재료를 도포하는 Resistivity grading 방식의 시험단말에 대해 논하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 도포된 반도전 재료의 저항율이 1×10^{11} [Ω · cm]이상일 경우에는 도포하지 않는 상태일 때와 동일한 파괴특성을 나타내며 도포에 의한 전계완화의 효과가 없다. 저항율이 이 값보다 낮아질 경우 단말의 파괴전압은 상승하지만 어느 임계 저항값 이하에서는 도포전에 비해 낮은 전압에서 파괴에 이르며 이때 파괴특성은 반도전의 탄화에 의한 파괴를 보이고 있다.

2. 2 Layer 구조로 설계할 경우, 낮은 저항율에 의한 차폐 끝단의 전계완화효과와 높은 저항율에 의한 누설전류의 억제를 통해 단말의 파괴전압을 높힐 수 있었다.

3. 본 연구에서 실시한 Resistivity grading 방식의 시험단말에 보다 내열성이 우수한 반도전 재료를 이용한다면 시험단말로서 충분한 성능을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] Mohaupt P, "New grading material for terminations and joints", Jicable, p630~635,1999
[2] J Rivenc, "A discussion of current-voltage and surface potential measurements to test stress grading material ", J. Phys., vol. 31, p2612~2621, 1998
[3] J Rivenc, "Conformal mapping comparison of resistive grading materials", Journal of Electrostatics, vol. 43, p127~143, 1998
[4] J Rhymer, "One-dimensional Model for Nonlinear Stress Control in Cable Terminations", IEEE, vol. 4, No. 6, p785~791, 1997
[5] S.V. Nikolajevic, "Optimization of cable terminations", IEEE, vol. 12, No. 2, 1997