

초저주파전원을 이용한 지중배전 전력케이블의 결함검출

(Defects Detection of the Underground Distribution Power Cables
by Very Low Frequency Voltage Source)

김주용* · 송일근**

(Ju-Yong Kim · Il-Keun Song)

요 약

본 논문은 기존의 지중배전케이블의 준공시험으로 사용되고 있는 DC시험을 대체 하기 위한 초저주파전원의 적용결과로서, 실험실에서 제작한 5m 길이의 실제 케이블의 칼홈집 결함과 침결함에 대해 초저주파전원의 결함검출 능력을 평가하였다. 이 시험에서 초저주파 시험은 케이블 절연체 내부에 존재하는 결함부위에서 전기트리 개시는 어렵지만, 일단 전기트리가 개시되면 트리의 진전이 매우 빠르고 내부결함이 검출되지 않는 경우, 시험으로 인한 새로운 결함이 형성되거나 결함이 더 확대되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 초저주파전원은 지중배전선로의 현장시험용으로 적용되기보다는 제조업체의 품질검사 확인용으로 사용하는 것이 효과적이라 판단된다.

Abstract

This paper presents experimental results on the application of very low frequency(VLF) voltage to replace conventional DC test as an after laying test for underground distribution cables. We carried out several tests to prove defects detecting ability of VLF test on the 5m length real cables having knife-cut or needle type defects which is made in our Lab.. Through this experiment we proved it is very difficult to initiate electrical tree from the defects inside of the cable insulation but once the electrical tree is initiated it grows very fast and VLF does not make new defects and expand the defect. Therefore VLF test equipment for quality inspection test of manufacture is more effective than field application for underground distribution cables.

*정회원 : 전력연구원 선임보연구원
접수일자 : 1998. 2. 9.

**정회원 : 전력연구원 선임연구원

1. 서 론

국내에서 사용되고 있는 지중배전용 전력케이블은 가교폴리에틸렌(XLPE)으로 절연되어 있고, 도체와 절연체 사이에는 반도체층을 사용하고 있으며, 외피는 염화비닐수지(PVC)를 사용하고 있다. 국내의 지중배전용 전력케이블의 사고원인과 내용년수를 분석해본 결과 포설 후 6년 전후가 가장 많이 발생하였고, 사고원인은 수분침투에 의한 수트리 진전으로 인한 절연물 파괴가 가장 많았다[1].

이러한 현상은 포설 후 유지보수 미흡에 의한 단기 경년열화 사고로 진전하는 경우와 포설 후 준공시험으로 내부 결함들을 절연파괴 시키지 못한채로 정상 운전하다가 장단기 경년열화 사고로 진전되는 경우로 대별할 수 있다. 그러나, 지중 전력케이블은 가공 시스템과 달리 케이블 시스템에 고장이 발생하면 고장전의 탐지와 보수에 상당한 시간이 걸리고, 그 파급효과가 산업 경제 및 국민생활에 막대한 피해를 줄 뿐 아니라, 수용가에 장시간 동안 불편함을 주기도 한다.

그러므로, 전력회사는 케이블 포설 후 준공검사 및 정기적인 진단시험 등을 통해 케이블 시스템의 고장을 최소화하고자 노력하고 있으나, 아직까지 최적의 유지 보수 방안이 마련되어 있지 않다. 이 중 케이블 포설 후 준공검사는 새로 포설된 케이블의 장기 신뢰성을 좌우하는 매우 중요한 시험이다.

현재 배전용 전력케이블의 준공검사로 많이 적용된 방법은 직류 전압시험으로, 국내의 경우에도 22.9 kV 선로의 경우 46 kV에서 10 분간 시스템이 견뎌 내면 건전한 것으로 간주하고 있다. 이와 같은 직류 전압시험은 종래 절연지 절연 케이블에 적용되어 결합검출의 신뢰성을 인정받은 방법으로 IEC 규격을 포함하여 각국에서 표준시험방법이 제정될 정도로 잘 적용되어 왔다.

그러나, 고분자 절연 케이블에 대한 직류 전압시험에서는 결합검출 능력이 낮아 비효율적이며, 고전압 직류 레벨의 사용으로 인해 케이블에 새로운 손상을 입히는 등 케이블의 준공검사로서는 적합하지 않다는 것이 일반적으로 보고되고 있다[4~6]. 또한, 상용주파수의 교류 전압시험은 운전 전압인 교류를 이용하여 시험한다는 점에서 상당히 효과적이지만, 시설장비가 매우 커서 현장 적용이 매우 어렵고 비경

제적이다.

따라서, 본 논문에서는 교류 전압시험의 문제점인 시험설비의 용량을 1/500로 줄일 수 있고, 직류 전압시험의 문제점인 공간전하로 인한 영향을 배제할 수 있는 초저주파 전원을 이용하여 결합검출시험을 하였다. 또 전력케이블의 결합 종별에 따른 검출 능력을 시험하였으며, 국내 배전용 전력케이블의 준공시험으로서 적용 가능성을 검토하였다.

2. 기준결함의 이론적 고찰

2.1 기준 시험으로서의 교류 전압시험 타당성

준공시험에서는 적절한 크기의 결함을 검출해야 하는데, 어느 정도 크기의 결함을 준공시험의 시험조건을 결정하느냐 하는 것이 매우 중요하며, 일반적으로 5년 이내의 내부결함을 검출하는 것이 보편화되어 있다. 준공시험의 대체 시험방법은 교류 전압시험을 대체하는 것을 의미하며, 케이블 시스템의 운전전압이 상용주파수의 교류전압이므로 교류 전압시험을 수행하는 것이 가장 타당하다. 그러나 케이블 공장이 긴 경우에는 케이블의 커패시턴스가 커서 대용량의 교류전압 발생장치가 필요로 된다.

이에 따라, 경제성, 장치의 이송 및 시험준비 등의 문제가 있기 때문에 보다 간편하고 경제적인 방법을 찾는 것이다. 결국, 대체 시험방법은 교류 전압시험에서 검출되는 결함을 반드시 검출하여야 하며, 대체 준공시험방법의 시험조건을 결정하기 위한 인위적인 기준 결함 즉, 검출하여야 할 결함의 크기는 적절한 교류 전압시험을 통해 결정하였다.

2.2 교류 전압시험의 시험조건

지중 전력케이블의 준공시험으로서 교류 전압시험을 수행할 경우 시험조건으로는 U_0 로서 24 시간에서 일주일 정도, $1.7U_0$ 로서 1시간, $2U_0$ 로서 30분 및 $2.5U_0$ 로서 10분 또는 15분 등의 시험 조건이 제시되고 있다. 이 중 U_0 를 이용하는 교류 전압시험은 일반적으로 효과가 작은 것으로 알려져 있으며, $2U_0$ 에서 $3U_0$ 정도의 전압레벨로 교류 전압시험을 수행하는 것이 가장 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

그림 1은 인가 전압에 따른 절연파괴까지의 시간을 비교한 그림이다.

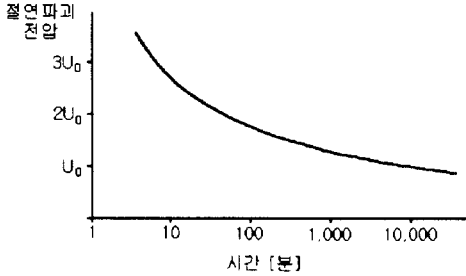


그림 1 교류 전압 레벨과 절연파괴 시간과의 관계
Fig. 1 Relation between DC voltage level and BD time

교류 전압시험 조건 중 현재 가장 많이 적용되고 있는 것은 초고압에서는 “ $2.5U_0$ 10분 또는 15분”의 조건을, 배전계통에서는 “ $2U_0$ 30분”의 조건을 적용하고 있다. 그러나, 상용주파수 교류 $2U_0$ 30분의 조건은 실제 준공시험으로 과도하게 보고 있다. 실제 준공시험을 교류 전압시험 $2U_0$ 30분의 조건으로 수행하게 되면 작은 결함에서도 전기트리가 발생되기 때문에 좋지 않다고 사료된다. 하지만, 비교적 결함을 보다 자세히 찾는다는 의미로는 좋다고 판단된다.

이상과 같은 검토에 따라 본 논문에서는 대체 준공시험 방법의 시험조건을 결정하기 위한 기준 결함 즉, 검출하여야 할 결함의 크기를 “ $2U_0$ 30분”의 교류 전압시험을 통해 결정하였다.

3. 실험장치 및 방법

시험에 사용된 초저주파 전압발생장치의 용량이 작으므로 시험 케이블의 길이를 5 m 정도로 하고, 종단에는 단말처리를 하였다. 결함은 지중배전선로의 현장에서 가장 많이 발생할 수 있는 침결함과 칼흠집 결함 두 종류로 모델을 만들어 시험하였다.

결함 크기는 교류 $2U_0/30$ 분의 교류 전압시험조건으로 결정하였고, 침결함은 45 mm 깊이로 절연층내로 삽입한 형태이며, 칼흠집 결함은 절연두께의 75% 깊이의 칼흠집에 은분을 칠한 형태로 제작하였다.

전압인가 조건은 각 케이블 시료에 대해 초저주파 전압을 $2U_0, 2.5U_0, 3U_0, 3.5U_0, 4U_0, 4.5U_0$ 로 30분씩 인가하여 절연파괴 여부를 조사하였으며, 30분 인가후 절연파괴가 일어나지 않은 경우에는 절단하여

전기트리의 발생 및 진전여부를 조사하였다. 전압조정은 스텝으로 인가하였고, 각 기준전압에 대해 절연파괴 시험을 하였으며, 시험용 시료는 새 케이블을 사용하였다.

결함검출을 위해 사용된 초저주파 전원장치는 입력전압 220V AC 1 ϕ , 출력전압 0-100 kV, 주파수 0.1Hz, 부하용량 5,000pF 장치이며, 초저주파 전원장치의 회로도는 그림 2와 같고, 정상적인 출력파형은 그림 3과 같다.

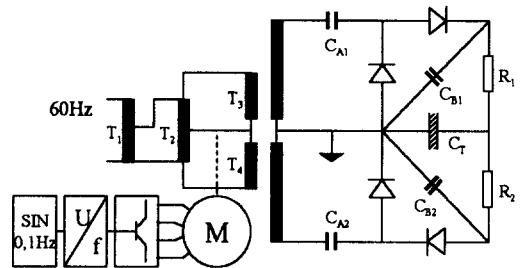


그림 2. 초저주파 전원장치의 회로도
Fig. 2. Diagram of VLF test equipment

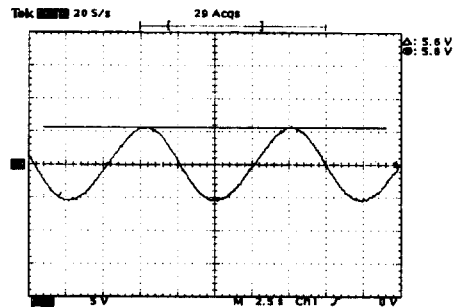


그림 3. 출력파형
Fig. 3. Output waveform

국내 배전계통에 적용되는 22.9 kV CN/CV 케이블의 준공검사를 다룰 경우에는 침결함과 칼흠집결함을 검출하여야 할 결함의 종류로 볼 수 있으며, 이에 대해 시험을 통해서 준공검사의 시험조건을 결정하였다. 따라서, 본 논문에서는 그림 4와 같은 침결함을 기준으로 시험하여 준공검사의 대체방안으로써 초저주파전압시험의 타당성을 검토하였다. 사용한 침결함으로는 케이블 절연층(22.9 kV CN/CV 전력케이블

초저주파전원을 이용한 지중배전 전력케이블의 결함검출

블의 절연 두께 7.4 mm)에 곡률반경 10 μm의 스텐레스 침을 본 실험을 위해 제작한 침결함 제조장치를 이용하여 외부반도전층 쪽에서 삽입한 것으로 전압인가시 침을 접지시켜 시험하였다.

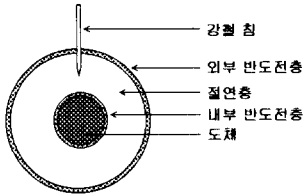


그림 4. 인위적인 침 결함
Fig. 4. Artificial needle defect

칼흠집 결함은 접속재나 단말 처리시의 작업 부주의로 인해 케이블 절연층에 존재할 수 있는 결함으로서, 주로 케이블의 외부 반도전층을 제거하는 과정에서 발생된다.

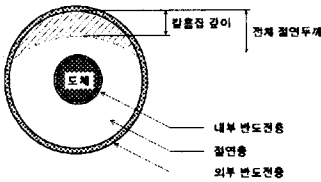


그림 5 초생달 모양의 칼흠집 결함
Fig. 5 Crescent type knife-cut defect

본 실험에서는 이러한 칼흠집 결함을 모의하기 위하여 케이블의 단말 처리 과정에서 외부 반도전층을 벗겨내는 부위에 그림 5와 같이 한 쪽만 원하는 깊이로 칼흠집을 내고, 은분을 칠한 초생달 모양의 칼흠집을 제작하여 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

초저주파전원을 이용한 케이블절연체 내부의 결함 검출은 4.5mm 침결함에 대해 인가전압을 2U₀, 2.5U₀, 3U₀, 3.5U₀로 변화시키면서 절연파괴 유무와 시료의 양부상태를 관찰하였으며, 그 실험결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 4.5 mm 침결함 검출 결과
Table 1. Test results at 4.5mm needle defect

| 인가 전압 | 시료 수 | 절연파괴 유무 | | 전기트리 |
|------------------------------|------|---------|-----|---------------------------------------------|
| | | 파괴 | 비파괴 | |
| 2U ₀ (37kVp) | 3 | 0 | 3 | 흔적 발견 못함 |
| 2.5U ₀ (47kVp) | 3 | 1 | 2 | 흔적 발견 못함 |
| 3U ₀ (56kVp) | 10 | 7 | 3 | · 절연파괴가 일어나지 않은 결함에서는 트리를 발견할 수 없음 |
| 3.5U ₀ (65kVp) | 3 | 3 | 0 | · 절연파괴가 일어난 결함에서는 파괴 경로 옆에 가지모양의 트리가 발생하였음. |

표 1과 같이 4.5 mm 침결함을 검출할 수 있는 전압은 대략 3U₀(±56kVpeak) 정도로 나타났고, 10개의 시료중 7개 시료가 절연파괴되어 검출할 수 있는 시험전압으로 볼 수 있다. 그러나, 대상 시료 모두를 검출하지 못하고 70%만 검출하였으며, 4.5 mm 침결함을 100% 검출할 수 있는 전압 조건은 3.5U₀(65kVp)으로 나타났다.

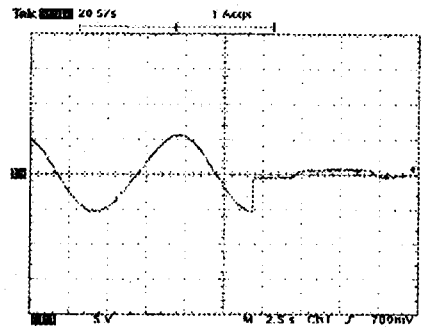
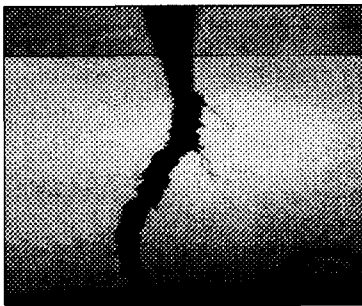


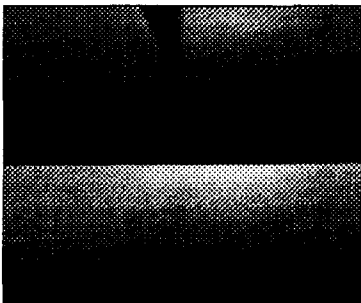
그림 6. 4.5mm 침결함 검출시 초저주파 전압파형
Fig. 6. VLF voltage waveform of 4.5 mm needle defect

그림 6에 4.5mm 침결함 검출시의 초저주파 전압 파형을 나타내었다. 절연파괴시 항상 부극성 peak 부근에서 절연파괴 되었는데, 이것은 침-평판 전극 구조의 공간전하 효과에 의하여 도체에 음의 초저주파가 인가되어 침에 양의 전압이 걸렸을 때가 침에 음의 전압이 걸렸을 때보다 더 낮은 전압에서 절연파괴가 일어나기 때문인 것으로 볼 수 있다.

즉, 본 실험의 경우에 침에 부극성 전압이 인가될 때 전자가 케이블 절연층 내로 주입되어 있다가 침에 정극성이 걸리면 전계가 강화되기 때문인 것으로 판단된다. 4.5mm 침결함 검출시의 3U₀에서 10개의 시료중 7개에서 절연파괴가 일어났으며, 파괴경로 근처에서 그림 7(a)와 같은 전기트리관을 관찰할 수 있었고, 3U₀의 동일 전압이더라도 절연파괴가 일어나지 않은 케이블 3개 시료 모두에서 그림 7(b)와 같이 전기트리가 전혀 관찰할 수 없었다.



(a) 3U₀ 전압인가 8분 10초후 BD발생



(b) 3U₀ 전압인가 30분후 BD발생 없음

그림 7. 4.5mm 침결함시의 전기트리발생 양상
Fig. 7. Electrical tree shape of 4.5 mm needle defect

따라서, 초저주파 시험의 경우 전기트리가 개시되면 몇 주기 안에 바로 절연파괴가 일어나는 것으로 판단된다. 즉 전기트리가 개시되기는 어렵지만 일단 전기트리가 개시되면 트리가 급속히 진전되어 곧바로 절연파괴에 이르는 것으로 추측된다.

표 2. 75 % 칼흠집 결함 검출 결과

Table 2. Test result of 75% knife-cut defect

| 인가 전압 | 시료 수 | 절연파괴 유무 | | 전기트리 |
|------------------------------|------|---------|-----|---------------------------|
| | | 파괴 | 비파괴 | |
| 3U ₀ (56kVp) | 3 | 0 | 3 | 흔적 발견 못함 |
| 3.5U ₀ (65kVp) | 3 | 0 | 3 | 흔적 발견 못함 |
| 4U ₀ (75kVp) | 4 | 1 | 3 | 흔적 발견 못함 |
| 4.5U ₀ (84kVp) | 2 | 2 | 0 | 절연파괴 경로 외에 전기트리 흔적은 발견 못함 |

표 2와 같이 75% 칼흠집 결함 모두 검출할 수 있는 전압은 4.5 U₀(±84kVpeak)로 나타났으며, 이 때의 전압파형은 그림 8에 나타내었다.

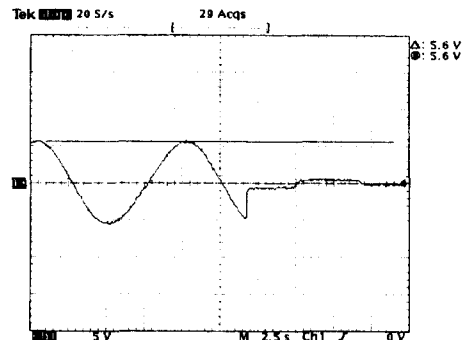
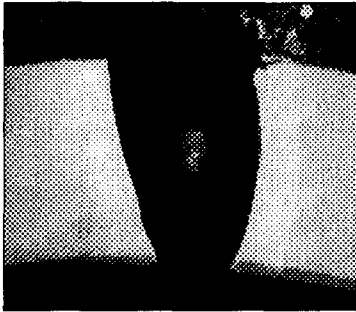


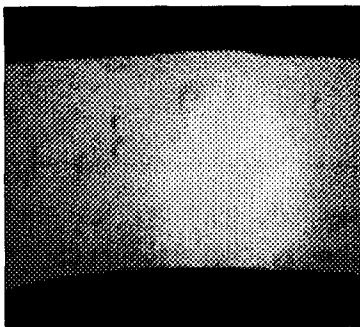
그림 8. 75% 칼흠집 결함 검출시의 전압파형
Fig. 8. Voltage waveform of 75% knife-cut defect

아울러, 그림 9(a)는 75% 칼흠집 결함 검출시의 완전 절연파괴 모양을 나타내었다. 이 경우 전기트리의 발생은 관측하기 어려웠다. 또한, 그림 9(b)에 절

연파괴가 일어나지 않은 경우의 시료 사진을 나타내었는데, 이 역시 전기트리 흔적이 전혀 발견할 수 없는 것으로 판명되었다.



(a) 4.5U₀ 전압인가 30초후 BD발생



(b) 4U₀ 전압인가 30분후 BD발생 없음

그림 9. 75% 칼집결함에서 절연파괴된 양상
Fig. 9. Breakdown shape of 75% knife-cut defect

5. 결 론

본 논문은 초저주파 전원을 이용하여 기존의 지중배전 전력케이블 준공시험으로 사용되고 있는 DC 시험 대체 가능성을 검토하기 위한 실험결과로써, 실험실에서 제작한 칼집결함과 침결함의 두 종류 결함에 대해 XLPE 지중배전케이블 결함검출 능력을 평가했다. 시험시료는 약 5m 정도의 실제 케이블이 사용되었고, 이 시험을 통해 초저주파 전원장치에 의한 준공시험 적용 가능성을 평가하였다.

초저주파 시험은 케이블 절연체 내부에 존재하는 결함부위에서 전기트리 개시는 어렵지만, 일단 전기

트리가 개시되면 트리의 진전이 매우 빠른 장점을 가지고 있다. 또 내부결함이 검출되지 않는 경우, 시험으로 인한 새로운 결함이 형성되거나 결함이 더 확대하지 않는 것으로 밝혀졌다.

반면에 DC 전압시험과 동일한 기준 결함을 검출하기 위해서는 84 kV 정도의 높은 전압이 인가되어야 하며, 시험장치의 용량($P = \omega CV^2$; V가 높아지면 P가 커지게 됨) 커지므로 전압상승에 따른 안전성 문제에 특히 주의해야 한다.

그러므로 초저주파전원은 지중배전선로의 현장 시험용으로 적용되기보다는 제조업체의 품질검사 확인용으로 확대 사용하는 것이 더 효과적으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 송 일근 외, "지중배전선로의 준공시험기술 및 접속재 진단기술 개발", (최종보고서), KEPRI-95Y-J17, 전력연구원, 1998.1
- [2] E. Pultrum et al., "Test After Laying Diagnostic Testing using Partial Discharge Test at Site", CIGRE, 1996-Session, 15/21/33-12, 1996
- [3] G. S. Eager Jr, B. Fryszczyn, C. Kalz, H. A. Elabadaly, A. R. Jean, "Effect of DC Testing on Water Tree Deteriorated Cables and Preliminary Evaluation of V.L.F as Alternative", 1991 T&D Conference
- [4] P. Gönfeld et al., "Study on Space Charge Effects in Dielectric Materials", 5th ISH 1987
- [5] H. Auclair, W. Boone, M. S. Papadopoulos, "Development of a New After Laying Test Method for High Voltage Power Cable Systems", CIGRE 1988 Session 21-06
- [6] Srinivas N. N., Bernstein B.S., "Effect of DC Testing on Aged XLPE-Insulated Cables with Splices", Jicable 1991

◇著 者 紹 介◇



김 주 용(金周勇)

1969년 9월 27일생. 경북대 공대 전기공학과 졸. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임보연구원



송 일 근(宋一根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 공대 전기공학과 졸. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 전력연구원 전력계통연구실 Project Leader/선임연구원.