

안테나를 이용한 전력용 케이블의 절연진단 연구

이현철*, 최은혁*, 박광서*, 윤대희*, 지승욱*, 이상훈*, 김충년**, 이광식*
 영남대학교*, 인터커넥션**

Insulation Diagnosis Study of Power XLPE Cable by Used Atenna

H.C. Lee*, U.H. Choie*, K.S. Park*, D.H. Yoon*, S.W. Jee*, S.H. Lee*, C.N. Kim**, K.S. Lee*
 Yeungnam Univ*, interconnection.co.ltd**

Abstract - This simulated partial discharge caused by 22.9[kV] power cable using XLPE(Peroxide Crosslinkable Polyethylene) insulation having the outside damage. A sone of the insulation diagnostic method a radiated electromagnetic waves were measured by an UHF method using a BiconiLog antenna(EMCO-3142) and a spectrum analyzer used to measure EMI, EMC.

From results of this study, It was confirmed that discharge progress were possible to be estimated by the proposed method.

1. 서 론

전력 수요의 급증으로 인하여 전기 에너지의 원활한 공급을 위해 송·배전 전력계통은 고전압·대용량화가 이루어지고 있다. 전력을 운반하는 방법은 지중 전력 케이블과 가공지선을 이용하는 방법이 있으며, 전력공급의 신뢰성, 안전성, 미관상의 이유 및 가설 공간의 부족 등으로 인해 지중케이블의 사용이 늘어나는 추세이다.

전력케이블의 절연체재료로 많이 사용되는 XLPE 고체 절연체는 폴리에틸렌에 유기 가황제를 혼합하여 가교결비를 이용하여 폴리에틸렌을 가교시켜 폴리에틸렌 구조를 결합상태(가교상태)로 만들어 폴리에틸렌에 열경화성의 점탄성 성질을 부여한 재료로 전기적 특성과 열 특성이 우수하며 성형이 용이하고 가벼워서 낮은 가설비용 등의 장점들로 인해 최근 400[kV]급의 OF 케이블이 XLPE 케이블로 대체되고 있는 실정이다. XLPE 케이블은 사용 중 여러 가지 요인에 의하여 내용 수명을 다하지 못하고 조기 파괴되는 경우가 많다. 국내에서도 지중 케이블의 절연파괴 사고가 빈번하여 최근 사고원인 규명을 위한 연구가 진행되고 있다. 케이블을 지중에 매설시 외부손상이나 지하수에 의한 침식 등에 의해서 결함이 발생한다. 발생한 결함부분에서 절연물의 절연내력이 상대적으로 약해져 그 부분에서 전계집중으로 인한 부분방전이 일어나며 이로 인해 열화가 발생 및 트리로 진전되어 결국 전로 파괴에 이르게 된다^{[1][2]}.

본 논문에서는 안테나를 이용한 비접촉식인 UHF법으로 전력용 XLPE케이블의 내·외부의 결점으로 인한 부분방전 발생시 방사되는 방사전자파의 스펙트럼 측정하고 측정된 데이터의 처리를 통해 전압 증가에 따른 트리진전시 검출되는 스펙트럼 분포 특성을 연구하여 방진진전과정의 평가가 가능함을 제시하였다^[3-6].

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

본 실험에서는 전력용 케이블에서 절연체내에 보이드 존재와 내부 도전체, 반도체층의 미소 돌기 같은 자체결점 및 외부손상 등을 모의하기 위해, 길이 50 cm의 22.9 kV급 XLPE 전력용 케이블을 이용해 시료를 제작하였다.

그림 1의 (a)는 내부 도전체 및 반도체층에 미소돌기가 존재할 때를, (b)는 절연체내에 보이드 존재시 부분방전을 모의한 시료의 그림이다. (c)는 케이블의 외부손상에 의한 부분방전을 모의한 것으로 케이블에 침 전극을 3mm 삽입하였다. (d)는 케이블의 외부 손상에 의해 보이드가 만들어 졌을 때를 모의한 것으로 침선단과 절연체사이의 갭은 보이드 1mm를 포함해 4mm이다. 시료의 크기는 50mm × 6.8mm이다.

결함을 모의하기 위해 케이블에 삽입한 침 전극은 직경이 1.07mm, 선단각도 30°, 선단곡률반경이 약 20[μm]이며 XLPE시료에 대한 영향을 최소화하기 위해 물성의 변화가 없는 45℃로 가열한 후 침 전극을 0.5[mm/min]의 속도로 삽입을 하였으며 갭은 마이크로메타를 이용해 조절하였다.

그림 2는 실험장치 개략도이다. 교류전원장치(MODEL : PCD-3CF, 입력 : AC 220 V, 4 kVA, 1φ, 60 Hz, 출력: AC 15/30 kV, 3 kVA, 60 Hz, PULTEC ELECTRONICS Co. Ltd.)를 사용하여 전압을 약 1.0 kV/s의 속도로 인가하였으며, 부분방전 개시전압 이후에는 2 kV 증가시켜 실험하였다. 부분 방전시 흐르는 전류 검출을 위하여 전극부 하단에 무유도 저항(50 Ω)을 직렬로 삽입하고 증폭기가 내장되어 있는 Active Probe를 이용해 오실로스코프(Lecroy LT-341)로 전류 파형을 측정하였다. 제작된 시료는 연면방전을 방지하기 위해 비중이 0.91이고 절연파괴 전압이 2.5mm당 30 kV 이상인 1종 2호 절연유에 함침시켜 실험을 하였다.

방진진전에 따른 방사되어지는 전자파의 스펙트럼을 분석하기 위해 EMI, EMC 측정용인 BiConiLog 안테나(EMCO model 3142, 30 MHz - 2 GHz) 및 (Advantest model R3131A)를 사용하여 스펙트럼의 분포를 측정하였다. 전압인가는 상용주파수 교류전압을 약 1.0[kV/s]의 속도로 인가하였고, 최초 방전개시 전압부터는 2[kV]씩 증가시켜 실험하였다. 고체절연체의 부분방전에 의한 열화를 고려하기 위해 전압을 일정시간 동안 유지하였다.

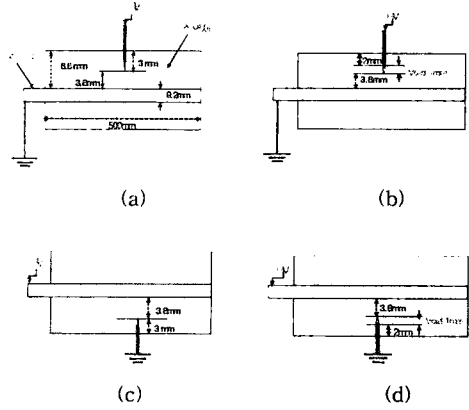


그림 1. 케이블의 내·외부결함을 모의한 시료

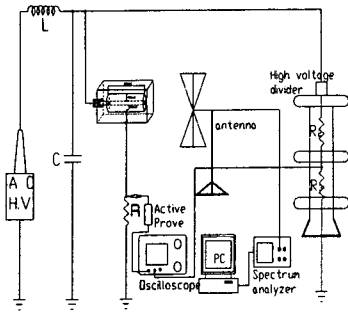


그림 2 실험장치 개략도

2.2 스펙트럼의 데이터 처리

그림 3 은 본 논문에서 방전과정의 진전판단을 위해 이용한 스펙트럼 처리 방법이다^{[7][8]}. 각각의 결점에 의해 발생하는 부분방전시 방사되는 방사전자파를 스펙트럼 아날라이저를 사용하여 측정하고, 주파수 대역별 스펙트럼을 500개의 데이터로 저장하였다. 얻어진 500개의 데이터는 파일로 저장되어지며 배경잡음과 부분방전시 측정되어진 차이를 도식하기 위한 프로그램에 입력되어진다.

먼저 전압을 인가하지 않은 상태에서 얻어진 주파수 스펙트럼 데이터를 기본으로 하여 그 데이터의 평균값을 선정하고, 각 전압을 인가한 후 얻어진 주파수 스펙트럼 데이터 값에서 이 평균값을 빼준다. 이렇게 처리된 데이터에서 '0'이하의 값에 대해서는 그 값을 '0'으로 처리하고, 각 데이터를 평균하여 그 값을 그래프로 표시한다.

위와 같은 과정을 거치게 되면 배경잡음과 인가전압에 따라 방전이 진전되어 가는 과정에서 얻어지는 데이터와의 차이를 통해 증가 정도를 알 수 있어 절연 진단에 이용할 수 있게 되며 외부노이즈에 대한 영향도 최소한으로 줄일 수 있게 된다. 즉 배경잡음과 부분방전의 스펙트럼 차이를 가시적인 도표로 나타낼 수 있게 된다.

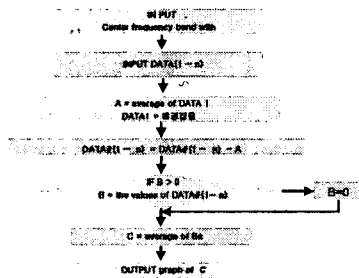


그림 3 스펙트럼 데이터처리 순서도

2.3 실험 결과 및 고찰

2.3.1 내부 도전층 및 반도체층에 미소돌기 존재에 의한 부분방전시 스펙트럼 특성

그림 4는 미소돌기에 의한 부분방전시 스펙트럼의 각 검출대역별 평균 전계강도이다. 전압인가로 인해 침전단에 전계가 집중되어 경계부분에 있는 고체 절연물 표면

에서부터 열화가 발생되고 트리의 생성으로 인해 미세한 보이드가 발생되어 절연내력은 저하되고 그 미세한 공간 사이에서 부분방전이 발생되므로 처음 보다 부분방전의 총·방전 시간이 짧아져 전류 펄스의 Rising-Time이 짧아져 부분방전이 발생하기 시작하는 초기단계인 12 kV에서부터 400 MHz 이상 고주파수대역까지 스펙트럼이 검출된다.

16~18 kV에서는 방전에너지가 증가되고 트리의 진전이 가속화되어 침 전단과 절연체 사이의 절연내력이 더 감소하여 부분방전의 가속화되므로 인해 방사전자파의 주파수 성분이 고주파수 대역으로 이동해 검출대역이 600 MHz대역까지 넓어졌다. 24~26kV에서는 절연과피 직접 단계로 트리가 급격히 진전되고 부분방전의 총·방전 시간도 짧아지므로 전 측정대역의 스펙트럼 전계강도가 크게 증가되고 850 MHz 이상 대역까지 스펙트럼이 검출된다.

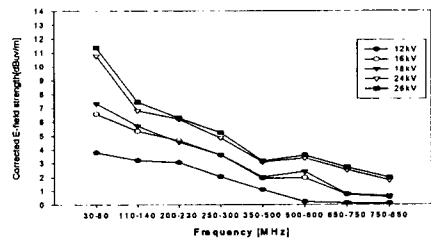


그림 4 미소돌기 존재에 의한 부분방전시 스펙트럼의 검출대역별 평균전계강도

2.3.2 내부에 미소돌기와 보이드 존재에 의한 부분방전시 스펙트럼 특성

그림 5는 미소돌기와 보이드 존재시 스펙트럼의 각 검출대역별 평균전계강도를 나타낸 그림이다. 침전극 - 보이드 - 절연체구조로 보이드가 없을 때 보다 상대적으로 절연내력이 낮아 저 전계에서도 코로나 발생으로 부분방전이 발생된다. 낮은 전계에서 부분방전 발생으로 인해 방전에너지가 작아 방사전자파의 주파수 스펙트럼이 저 주파수 대역에 주로 분포되며, 변화가 나타난다. 보이드로 인해 침 전극 선단에 코로나 발생으로 침 전단 주위 고체의 열화가 시작되는 부분방전 초기 단계인 4 kV에서는 100 MHz 이하대역에서 부분방전 신호라고 판단되는 약 2 dB 정도 증가된 스펙트럼이 검출되며, 침 전단에 전계 증가로 인해 침-보이드 절연체사이에 spark 방전이 발생되 전기 트리가 성장되기 시작하는 중기 단계인 8~10 kV에서는 300 MHz대역까지 부분방전 스펙 트럼이 검출된다. 연속적인 spark 방전이 발생되어 전기적 트리가 급속히 진전되어 전로 파괴에 이르는 14~16 kV에서는 450 MHz 대역까지 스펙트럼이 검출된다.

부분방전이 진전되어 갈수록 저 주파수 대역에서 고주파수 대역으로 신호 검출대역은 늘어나며, 500 MHz 이상 대역에서는 스펙트럼 검출은 없었다.

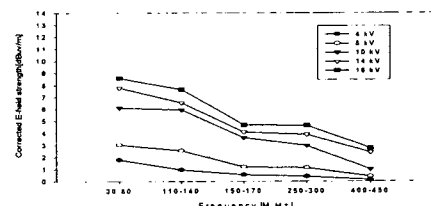


그림 5 미소돌기와 보이드 존재에 의한 부분방전시 각 검출대역별 평균전계강도

2.3.3 케이블 외부손상에 의한 부분방전시 스펙트럼 특성

부분방전 개시전압이 실험 중 가장 높은 16 kV에서 시작되며 발생 초기부터 400 MHz대역까지 스펙트럼이 검출된다. 24 kV까지 150 MHz대역까지 스펙트럼은 급격한 증가 없이 일정한 전계강도 분포를 보이며, 200 MHz이상대역에서 증가가 나타나며, 검출대역의 큰 변화는 없었다. 절연과피 단계인 30 kV에서 전 검출대역에서 스펙트럼의 증가가 나타나지만, 500 MHz 이상대역에서의 스펙트럼 검출은 없었다. 이것은 전극의 형상이 구 대 침 전극의 형태로 전계의 집중이 약하며 절연물의 경계면에 있는 하전입자들이 전계로 인해 먼저 가속화되고 얻은 에너지를 고체절연체를 구성하고 있는 결정의 결합력에 속박되어 있는 하전입자들을 여기 시켜 진전하므로 에너지의 손실이 많아 급격한 에너지의 유입이 없기 때문이다. 절연과피 직전에서는 트리의 급격한 진전과 절연내력이 급속히 감소되어 손실되는 에너지의 비율이 작아져 스펙트럼의 전계강도의 변화율이 증가한다.

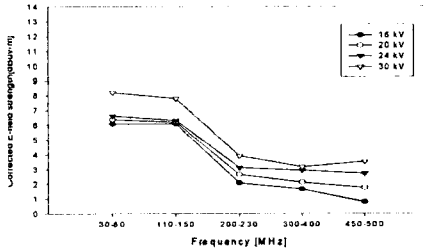


그림 6 외부손상에 의한 부분방전시 각 검출 대역별 평균전계강도

2.3.4 케이블 외부손상과 보이드존재에 의한 부분방전시 스펙트럼 특성

침 전극 선단에 코로나가 발생하여 고체내에 열화가 시작되는 부분방전 초기단계인 10 kV에서는 50 ~ 80 MHz대역부근에서 큰 변화가 나타났다. 이것은 고체내를 이동한 에너지를 갖은 하전입자들이 보이드로 인해 유입이 원활하여 보이드가 없을 때 보다 낮은 전계에서 방전이 일어나기 때문이다. 침 선단과 절연체사이에 부분방전이 발생하여 진전해 가는 부분방전 중기 단계인 18 kV에서는 150 ~ 170, 250 ~ 270 MHz대역부근에서도 스펙트럼의 변화가 검출되었다. 침선단과 절연체 사이에 부분방전이 연속적으로 발생해 급속도로 진전해 가는 부분방전 말기 단계인 24~28 kV에서는 방전전류펄스의 상승시간의 증가로 인해 부분방전 초기, 중기보다 200 MHz이상 대역에서 스펙트럼의 전계강도가 크게 증가 하였으며, 500 MHz 대역까지 모든 측정대역에서 배경잡음보다 2 dB 이상 증가한 신호가 검출되었다.

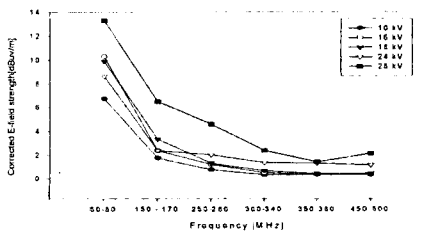


그림 7 외부손상과 보이드 존재에 의한 부분방전시 각 검출대역별 평균전계강도

3. 결 론

본 연구에서는 전력용 XLPE 케이블의 내·외부의 결합시 보이드 존재 유·무에 따른 발생하는 부분방전시 방사되는 방사전자파의 스펙트럼을 측정하고 절연진단을 위해 스펙트럼 처리법을 이용하여 데이터를 처리한 후 검출대역과 전계강도 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

케이블 내부 도전층에 미소돌기 존재시 보이드가 없을 경우 900 MHz대역까지 부분방전 스펙트럼이 검출되며 대역의 폭이 넓지만, 보이드가 존재 할 경우는 500 MHz이하 대역에서만 스펙트럼이 검출되며 일부 특정대역에서만 분포된다.

외부 손상시 보이드 유·무와 상관없이 500 MHz이상 대역에서는 스펙트럼 검출은 없었다. 보이드 존재시에는 300 MHz이하 특정대역의 변화율이 큰 반면 없을 경우에는 300 MHz 이상대역의 변화율이 크다.

이상의 결과로 비 접촉식 센서인 안테나를 이용하여 방사되는 전자파의 스펙트럼을 UHF 범을 이용한 전력용 케이블의 절연진단이 가능함을 확인 할 수 있었으며, 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 스펙트럼의 처리를 통해 스펙트럼의 변화를 명확하게 구분할 수 있었다. 외부 손상의 경우 많은 실험을 통해 좀 더 세밀한 분석이 요망된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Grzybowski, J.Fan, Mississippi State University, " Electrical Breakdown Characteristics of XLPE cables under AC, DC, and Plusating Voltages", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp389~394, 1997
- [2] H. Suzuki and T. Endoh, " Pattern Recognition of Partial Discharge in XLPE Cable Using a Neural Network", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp543~547, 1992
- [3] 이광식, 김기재, 이동인, " 방사전자파에 의한 미소간극 방전원의 방전 전류 파형 추정", 한국전자과학회 논문지, Vol. 11, No. 1, 2002. 2월.
- [4] 박광서, 이광식 외 5인, "액체질소중 정극성 직류방전시 방사 전자파의 주파수 스펙트럼 특성", 대한전기학회 논문지 Vol. 48C, No.9, pp.648~655, 1999년 9월1일
- [5] H.Okubo, et, "Electromagnetic Spectrum Radiated from Gas Discharge and its Relation to Partial Discharge Characteristics" ETEP Vol.7, No.1. 1997
- [6] Hikita, M, Hoshino, T, Kato, K, Hayakawa, N, Ueda, T, Okubo, H, "Discrimination of partial discharge electromagnetic signal in SF6 gas from external noise using phase gate control method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp117~120, 1996.
- [7] 이상훈, " 絶縁診斷을 위한 氣中放電과 放射電磁波의 상호관계", 영남대학교, 1999. 2월
- [8] Alquie C, Bert, Freestone, " Measurement of Charge Distribution in XLPE Cable Under AC Stress", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp364~367, 1996.