

미세 방전신호 분석을 통한 케이블 수트리 확산 현장진단

정상진, 김영민
한우테크(주)

On-Line Cable Water-Tree Detection by the Analysis of Pre-Discharge Signals

Sang-Jin Chung, Young-Min, Kim
Hanwootech Co. Ltd

Abstract - 배전케이블의 수 트리 현상은 XLPE케이블의 고장을 초래하는 주요원인이다. 수 트리에 기인한 신호는 아주 미세하여 현장진단은 배경 잡음으로 인해 검출이 어렵다. 본 논문에서는 고주파특성이 우수한 L-C결합센서를 사용하여 방전신호를 측정하고 이를 주파수영역에서의 분석을 통해 현장에서 부분방전이 발생하기 훨씬 이전에 존재하는 미세 신호(Pre-Discharge)를 검출하고 분석한 결과를 제시하였다. 케이블 수 트리 지점에서 다수의 반사를 일으켜 그 잡음 수준을 높이는 역할을 하게 되는 것으로 알려져 있다. 만일 여러 개소에 수 트리가 존재하는 경우에는 그 배경잡음을 현저하게 높이는 결과를 보여주었다. 실험실에서 발생하는 미세 신호와 현장의 신호를 비교한 결과 아주 유사한 패턴이 있음이 파악되어 이 방법은 수 트리의 확산 진단이 가능함을 확인시켜 주었다.

1. 서 론

XLPE 및 HMWPE케이블의 수 트리는 배전케이블의 열화 및 고장의 주요 매카니즘이다. 시간영역에서의 PD검출법(Time Domain PD Detection)은 현장잡음과 검출감도의 제약으로 인해 전기적 트리로 진전되어 수십 [pC]크기의 PD가 발생되어야만 검출이 가능하다. 반면에 주파수 분석에 의한 신호분석법은 0.5 [pC]정도의 작은 방전신호의 측정이 가능하여 현장에서 부분방전 발생 이전에 존재하는 아주 작은 펄스들도 검출할 수 있다. 케이블 시스템에서 발생하는 방전신호의 주파수는 수백 kHz - 1 Ghz 범위로서 현장진단에는 실용적으로 100 kHz - 300 MHz이하의 주파수대가 사용된다 [1].

또한 시간영역에서의 측정방법과는 달리 주파수분석방법에 의한 측정결과는 외부 배경 잡음에 민감하지 않다. 즉 PD검출센서의 위치와 PD발생개소사이의 케이블자체가 고주파수 잡음 필터링 효과를 나타내 검출감도를 높인다. 특별히 제작된 센서를 사용하고 측정점과의 거리를 150 m 이하로 유지하면 1 [pC]정도의 검출감도가 얻어질 수 있다. 이 방법을 이용하여 부분방전이 발생하기 훨씬 전에 존재하는 미세신호의 취득이 가능하다.

일반적으로 시간영역에서 진단시범은 수 트리가 발생된 케이블의 상태판정은 불가능하다. 무엇보다 사선진단시범은 수 트리를 전기적 트리로 진전시킬 위험이 있다 [2]. 다른 시험기법, 즉 유전체 손실측정, 여러 가지 유전체 분광학 등을 시간영역 PD시험과 결합하여 사용하면 케이블길이 전체의 전반적인 상태에 관한 자료를 제공할 수는 있으나 어느 부분이 양호하고 어느 부분이 불량한지는 알 수 없다. 수 트리는 고주파 신호가 케이블을 전파해가면서 아주 미소한 여러 개의 반사파를 일으키며 이 여러 개의 반사파는 케이블의 배경잡음 수준을 상승시키게 된다. 이 방법은 수트리에 기인한 열화상태를 규명하는데 사용된다 [2].

본 논문에서는 전하의 측정과 방출이 정현물의 출성변화를 초래하며 이 과정 중 발생하는 미소신호를 측정하고 이것이 수트리의 형성에 기여할 수 있음을 설명하였다. 아울러 실험실에서 측정된 Pre-Discharge신호의 파형을 현장 수트리에 기인한 것으로 추정되는 미소신호파형을 상호비교하고 유사점을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 케이블 내부에서 발생하는 PD의 크기

케이블의 동공 등에서 PD발생에 의한 전계붕괴효과는 정전용량을 증가시켜 도체와 대지간의 전압 변화가 발생하나 이는 충전선 임피던스를 통해 재충전 된다. 따라서 만약 PD펄스의 파형이 알려지면 신호크기(mV)의 예측이 가능하다.

케이블 내부 절연물 결합 즉, 동공 및 기공에서 발생하는 PD

는 통상 1.5 ns의 펄스폭을 가지며, 중간부분에 최대가 있는 1 [pC] 크기의 가우스 형 펄스로서, 전류 피크치는 0.6 mA 정도이며 이는 PD발생지점이 케이블의 중간지점에 위치하여 그 양쪽에서 균등히 공급받는 것을 가정한 경우이다. 케이블의 특성임피던스는 대략 35 Ω으로, 0.3 mA씩 양쪽에서 공급한다고 가정하면 대략 10 mV의 펄스를 발생시킨다. 이 신호는 발생지점에서 양쪽으로 전파해간다 [3].

케이블시스템의 송전선 전파특성을 감안하면 이 펄스는 매우 폭이 좁을 것이다. 그러나 진정한 배전케이블의 경우 半導電層과 유전체에 의한 손실의 결과로 고주파수에 대해 상당한 정도의 감쇄가 발생한다. 따라서 고주파영역에서의 半導電層의 큰 손실, 그리고 작지만 유전체 및 표피효과 손실로 인해 펄스폭이 증가하며 펄스 크기는 감소한다(파형이 완만해짐). 하지만 전하량은 보존되기 때문에 펄스전체의 시간적분 값은 거의 일정하게 보존될 것이다.

배전케이블의 시간영역에서의 PD검출범에서 고주파영역에서의 감쇄 때문에 최적 주파수는 20 MHz정도이다. 시간영역에서 보면 간헐적이고 산발적인(Isolated) 펄스는 파동성의(Pulsive) 잡음과 구분이 어려울지 모르나, 주파수영역에서 본다면 검출 가능한 충분한 에너지를 가진 신호를 발생시킬 수 있다.

2.2 수 트리에 기인한 미소신호 검출

2.2.1 수 트리에 따른 Pre-Discharge 현상

Pre-Discharge현상과 관련하여 전하의 축적, 이동, 방출(Extract) 현상이 주로 연구되어 왔으며 이들 매카니즘이 케이블의 열화, 성능저하(Degradation), 그리고 절연파괴에 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다.

Dorris는 [3] PD가 없어도 신호는 발생하며 측정될 수 있음을 보여주었고, Bruning은 PD가 없어도 화학적 변화는 발생할 수 있음을 보여주었다. 즉 수 트리로부터 발생하는 PD발생 이전의 신호(Pre-PD Signal)를 측정한 결과, 이 신호는 완만한 펄스(Slow Pulse)와 급준한 펄스(Fast Pulse) 2 종류가 검출되었다. 완만한 펄스는 66 nA 전류치까지 검출되었으며 급준한 펄스는 1.2 [fC](fermo Coulomb, 10⁻¹⁵ [C])까지 측정되었다. 급준한 펄스는 (~1 ~ 1.5 [C])는 초기 2-3일에 나타났으며, 완만한 펄스는 20 - 25 일 후 나타났다. 파두시간, 감쇄시간 및 피크치 모두 측정되었으며 전극(Probe)은 트리발생개소 및 그렇지 않은 개소에 각각 설치하여 비교하였다. 그 결과 급준한 펄스는 전통적인 부분방전 파형과 유사하였으나 수일 후 없어졌으며 그 원인은 Voids(기포)내에서 발생하다가 수분의 침투로 인해 사라진 것으로 추정되었다(수분은 부분방전 발생을 방지함. 또한 완만한 펄스는 상당한 시일 후에 나타나기 때문에 기계적인 문제로(Mechanical events) 발생하는 것으로 추측되었다. 즉 이러한 미세한 신호는 PD가 없는 경우도 측정될 수 있다.

Bruning et al [4]에 의해 다른 실험적 연구는 "Sub Corona 전류"에 초점이 맞춰져 수행되었다. 이 전류는 개소동공(Gaseous Cavities)에 의해 코로나개시전압(Corona Inception Voltage, CIV) 이하에서 흐르는 전류로 규정된다. 공기 중에서 이루어진 열화되지 않은 저밀도 폴리에틸렌(LDPE) 시료의 시험에서 CIV 이하에서도 화학적 변화(열화 등)가 발생할 수 있음을 보여주고 있다. X-ray를 응용한 분광기에 의해 LDPE 표면분석 결과 코로나 혹은 유사코로나(Sub Corona)가 발생한 표면 모두에서 질소 성분이 존재하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 공기 중의 유사코로나(Sub-Corona)에 의한 열화도 절연물 손상(화학적 변화)을 주는 것으로 추측된다. 즉 전통적인 부분방전 검출기에 의한 시험은 코로나 개시전압이하로 시험하는 경우에도 표면손상이 발생할 수

있음을 보여 주었다.

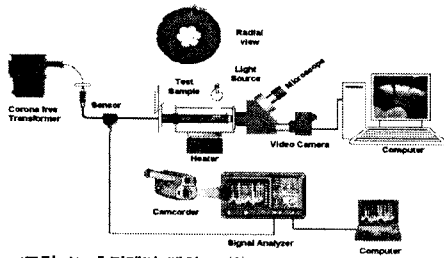
Tanaka⁽⁵⁾는 부분방전발생 이전의 현상(Pre-discharge 현상)을 공간전하와 전기적 트리와 연관시켜 설명하였으며 XLPE 및 PE케이블에 대해 중점적으로 분석했다. 그는 전기적 트리의 형성과정을 논하면서 아마도 수 트리와 관련 가능성이 있는 최초 트리 이전의 메카니즘을 분석하였다. 전기적 트리가 발생하기 이전 시간 동안, 즉 유도(Induction) 혹은 잠복기간(Incubation)에 예상되는 현상으로 ① 도체와 절연물의 경계면에서 발생하는 공간전하의 투입과 흡수, ② 절연물의 품질저하(Degradation, 전기화학적 열화), ③ 전자물리적인 성상변화에 따른 전계의 왜곡이 발생한다고 주장하였다. 주요핵심은針전극에 a.c전압을 인가할 때 전하(전자)는 절연물 중으로 투입되거나 절연물로부터 전극에 흡수됨을 반복한다. 전극주위의 약한 떨어진 곳에 電荷는 10 % 정도가 잔류되어 점차 축적되며 시간에 따라 그量は 증가한다. 전하운송물질(Charge Carrier)은 폴리머의 열화(결합고리 분리 및 산화)를 초래한다. 이렇게 교류전압인가에 따라 전극과 절연물 사이에 반복적으로 발생하는 전하의 투입과 방출현상은 트리개시 메카니즘 (Initiation Mechanism)을 대표한다고 생각했다.

또한 Tanaka교수는 전하이동(Transfer)현상은 카본블랙PE와 PE의 경계면(Interface), 또는 일반적으로 상이한 도전율을 가진 폴리머들 간의 경계면에서도 공간전하의 축적이 발생하는 것으로 주장하였다. PE와 EVA(에틸렌 비닐 아세테이트)의 박판의 경우 전하는 EVA(고도전율)에서 PE(저도전율)로 이동한다.

이 연구들을 종합하면, 1) PE 내의 수 트리에서 전류가 측정될 수 있으며, 2) 전압이 인가되면 부분방전(Corona)의 발생 없이도 화학적 변화는 일어날 수 있으며, 3) 전기적 트리 발생이전에도 "비 파괴적 전류펄스"가 PE/XLPE 경계면에서 측정될 수 있다, 4) TR-XLPE에서 PD발생이전에 신호가 발생하며, 5) 전기적 트리의 개시는 항상 PD가 관계되어 있지는 않으며, 6) 비 파괴적인 전류펄스는 트리의 형성에 기여할 것으로 추정되었다.

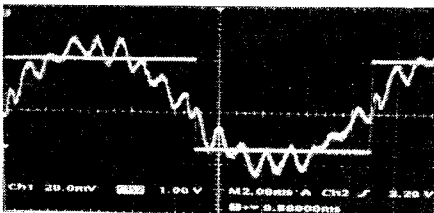
2.3 케이블에 삽입된 針電極의 Pre-Discharge 신호 측정

Morel et al⁽⁶⁾에 의해 15 kV, Tr-XLPE 절연 케이블재료의 외피에 삽입된 침전극에서 발생하는 미세신호를 측정했다. 코로나 프리변압기를 통해 60 Hz전압을 서서히 인가할 때 13 kV에서 침전극의 끝단에서 트리가 관찰되어 시험기간 동안 전압을 유지하였다. 침의 끝 부분을 마이크로스코프로 관찰하는 동시에 주파수 분석기로 발생신호를 측정하였다.

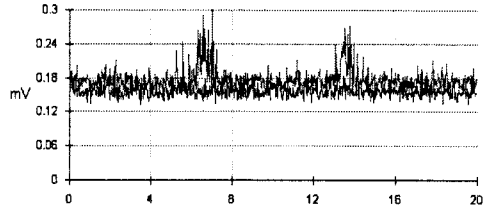


<그림 1> 측정계기 배치도 (6)

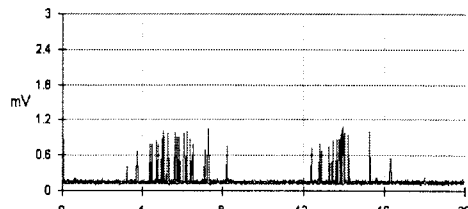
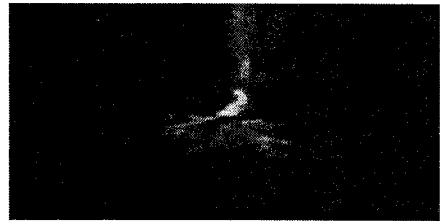
정극성 및 부극성 전압의 최대치 부근에서 발생하는 0.3 mV 정도의 미소신호가 여러 개 나타났으며 시간의 경과에 따라 트리가 발생하여 크기 1.2 mV 정도의 방전신호가 측정되었으며, 이어 트리의 성장에 따라 2.4 mV로 증가하였다. 주의해 볼 것은 배경잡음의 크기는 각각의 경우 0.15 mV 정도로 일정하였다. 이는 트리발생개소가 한 곳으로 반사도 한 곳에서 발생하기 때문인 것으로 생각된다([그림 3 - 5] 참조).



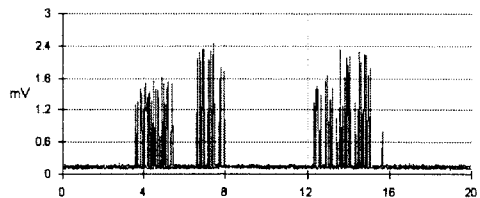
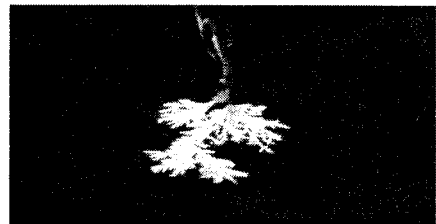
<그림 2> 저 주파수 대역 파형



<그림 3> 트리 직전 침전극 및 측정신호(최대치 0.3 mV)



<그림 4> 전기적 트리 개시와 측정신호(최대치 1.0 mV)



<그림 5> 전기적 트리 확장과 측정신호(최대치 2.4 mV)

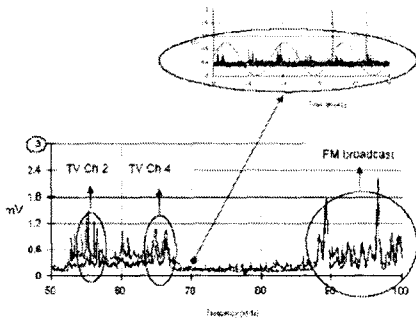
2.4 현장에서의 미소신호 측정

배전케이블의 감쇄특성은 주파수 증가에 따라 크게 증가하는 특성을 가지고 있다. 감쇄상수(dB/m)는 주파수의 1/2승과 1승사이의 값에 비례하여 증가한다. 왜냐하면 표피효과 손실(저주파에

서 뚜렷함)은 주파수의 1/2승에 따라 증가하나 유전체손실(고주파수에서 큼)은 주파수에 비례하기 때문이다. 검출센서를 PD Source에 비교적 근접 설치할 수 있기 때문에 PD신호 대역의 확장이 가능하다(300 MHz 까지). 즉 케이블의 고주파 감쇄에 의한 노이즈 필터 효과와 PD신호 대역의 확장은 결과적으로 케이블의 모든 위치까지 PD검출 감도를 현저히 향상시킬 수 있다.

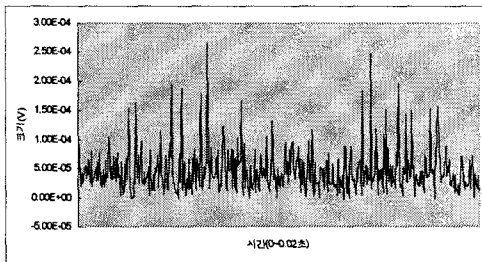
또한 특정케이블에 대한 고주파 감쇄효과를 이용하여 PD발생 지점의 위치를 예측할 수 있다. 즉 PD스펙트럼의 고주파 영역 끝단은 PD펄스가 케이블을 통과하여 멀리 전파하면 없어지며 PD신호의 펄스폭이 증가하면서 크기는 감소하기 때문이다. 앞에서 언급한 바와 같이 수 트리에 의한 미소방전신호는 경계면에서의 전기적 신호의 다중반사가 원인이며 그 발생위상은 PD와는 달리 인가전압의 피크부분에서 발생하였다.

아래 그림과 같이 광대역 주파수 스펙트럼분석을 통해 먼저 케이블 내부에서 발생하는 방전현상에서 발생하는 신호의 주파수 대역(20 MHz ~ 110 MHz) 중, 신호가 크게 나타나는 주파수 대역을 찾아(그림에서는 70 MHz 선정) Zero Scan을 통해 시간 영역에서 그래프로 표시하면 이 방전에서 발생하는 신호를 분석할 수 있다.



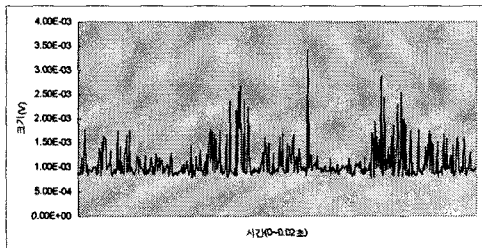
Signals from cable insulation in distribution feeder system

〈그림 6〉 광대역 주파수 스펙트럼 분포(현장 측정)



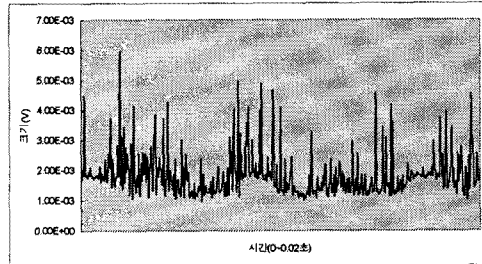
〈그림 7〉 Level2 판정, 북부지점 상계S/S 상동DL - 노원SW#50-1 ~ 노원SW#49-3 A상 (35 MHz)

[그림 7]에 수 트리가 거의 없는 경우 배경잡음은 약 0.05 mV 이고 방전신호는 0.2 mV로서 이 정도의 신호는 절연을 약화시키지 않으며 따라서 열화는 아주 천천히 발생한다.



〈그림 8〉 Level3 판정, 오산지점 오산S/S 정아DL - 윤암SW#42-3 ~ 윤암SW#40-1 A상 (35MHz)

[그림 8]의 경우 그 배경잡음이 1 mV 수준으로 여러 개소에서 수 트리가 존재하는 것으로 판단되며, 신호의 크기도 2.5 mV로서 절연에 영향을 미치는 부분방전이 시작된 것으로 판단된다. 2년 이내 고장이 발생할 가능성이 약간 있으므로 1년 이내 정밀점검, 절연보강 등의 조치가 바람직하다. 35 MHz 주파수에서 에너지가 큰 신호가 검출된 것으로 판단하건대 측정점에서 약 200 m 위치에 방전개소가 존재하는 것으로 진단되었다.



〈그림 9〉 Level4 판정, 강남지점 관내 "반포미도1차 아파트" - 인입케이블 A상 (110 MHz)

[그림 9]는 방전의 크기가 4 mV 정도로 수 트리가 이미 전기적 트리로 전진되어 절연을 심각하게 열화시킨 것으로 판단되어 케이블의 교체나 보강 등의 조치가 필요하다. 2년 이내 고장이 발생할 확률이 중간 정도이며(1년 이내 고장 확률은 약 5%, 1-2년 이내 15 %). 검출된 신호의 주파수 대역은 110 MHz로서 열화가 발생한 지점은 측정점에서 50 m 이내로 판단된다.

3. 결 론

현장에서의 수 트리 진단은 전기적 원인인 부분방전신호와 달리 케이블 인근의 기기 및 단자에서 전달되는 여러 잡음신호가 수 트리가 존재하는 곳에서 경계면의 서-지 임피던스 불일치(Mismatch)로 인해 반사로 인해 미소 신호가 검출되기 때문에 즉 기계적인 원인인 수 트리는 극히 작아 검출감도가 높은 주파수영역에서의 분석을 필요로 한다. 그 신호는 극히 작아 배경잡음 수준이며 이는 부분방전이 시작되기 훨씬 전에 즉 케이블의 열화가 시작되기 전에도 검출이 가능하여 사전 예방조치를 취할 수 있도록 해준다. 수 트리 발생개소가 여러 장소로서 케이블 열화를 가속화시킬 위험성이 있는 경우 배경잡음 수준이 크게 증가하게 되어 조기 검출이 가능한 것이다. 이것은 주파수영역에서의 신호처리방법의 높은 검출감도로 가능하였다. 또한 이 진단방법은 방전현상의 메카니즘 규명에 필요한 풍부한 Data를 제공함으로써 케이블의 결함유형은 물론이고 결합개소의 위치도 알 수 있어 배전케이블상태를 확실으로 진단할 수 있는 아주 민감하고 신뢰성 있는 방법으로 발전해 왔다.

[참 고 문 헌]

- [1] N. Ahmed & N. Srinivas, "On-line versus Off-line PD testing in Power Cables, *IEEE Trans and Dist Conf.*, 2001
- [2] Steven Boggs, "The Case for Frequency Domain PD Testing in the Context of Distribution Cable", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol 19, no. 4, pp 13-19, 2003
- [3] D. L. Dorris, M.O. Pace, T.V. Bialock and I. Alexeff, *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation* 3, pp 523-528, 1996
- [4] Bruning et al, "Corona Current on Polymer Insulation Life", *IEEE Trans Electrical Insulation*, vol 26, no 4, pp 826-835, 1991
- [5] T. Tanaka, "Space Charge Injected via Interfaces and Tree Initiation in Polymers", *IEEE Trans Dielectrics and EI*, vol 8, no 5 pp 733-743, 2001
- [6] O. Morel, N. Srinivas and B.S. Bernstein, "Partial Discharge Signals from TR-XLPE Insulated Cables", *Conf. Records IEEE Int'n'l Symposium on Electrical Insulation*, 2004