

전력케이블에 있어 부분방전PD신호 전파특성(1)

PD크기 감쇄관련 국내자료 검토

2014년 12월 08일
2014년 12월 30일 1차 보완

검토자: 김보경

[국내 자료]

<출전: 전력케이블의 부분방전 위치 추정용 센서 특성연구, 2002년도 전기학회 추계학술대회, LG전선>

전력 케이블 및 접속함에 설치하는 고주파 부분방전센서로는 크게 용량성 센서, 방향성 센서, 코일 센서, 스위치 분리 센서 등으로 나눌 수 있다 일반적으로 변압기, GIS 혹은 GIL 및 케이블에서 발생하는 부분방전은 상승시간(Rising time) 이 nano second 단위 이하이며, 펄스폭이 수 나노인 1GHz까지의 대역을 갖고 있으나, **케이블에서는 고주파 펄스의 감쇄와 분산으로 인하여** 측정되는 부분방전 펄스의 주파수 대역은 수백 MHz정도로 보고되고 있으며, 용량성 센서의 경우, S/N 비 및 케이블의 고주파 진행의 한계로 인하여 수 MHz - 수십 MHz의 대역이 부분 방전의 측정에 가장 합당하다고 보고 되고 있다.

부분방전 위치 판별하는 기술은 크게 두 가지 방법이 많이 적용되고 연구되고 있다. 하나는 센서를 한 개 설치하여 원래의 진행파와 케이블 끝단에서 반사하는 반사파를 측정하여 시간차를 구하여 거리를 판별하는 반사파법과 다른 하나는 케이블 양 끝단에 센서를 각각 설치하고 두 센서에 측정된 부분방전 펄스의 시간차를 측정하는 방법이다. 반사파법을 적용할 경우, 부분방전 신호가 진행하는 경로가 증가될 수 있고, 만약 임피던스 매칭이 잘 이루어지지 않았을 경우, 신호 끝단에 발생하는 진동파형이 반사파와 구분되기 어렵다는 단점이 있다.

검토의견: 2000년대 초반기에 LG전선에서는 고주파 펄스의 PD신호가 케이블을 따라 전파해가면서 PD신호크기의 감쇄와 분산이 발생하고 있다는 것을 알고 있었던 상태로 추측되고, 이러한 감쇄와 분산 때문에 접속재 부분에 용량성 센서를 부착하여 PD진단하는 방법을 채택. 그리고 일본에서는 케이블에서의 고주파 펄스의 PD신호 감쇄 때문에 80년대부터 수백 kHz 대역의 주파수를 사용하여 케이블 전체를 PD진단하는 방법보다는 접속재 부분에 용량성 센서를 부착하여 PD진단하고 있었음.

<출전: 최근 전력케이블 시스템의 부분방전 진단 동향, 2003년 12월 전기학회지, 대전대 김정태 교수, 한양대 구자윤 교수>

계측기술의 발달로 인해 MHz 이상의 대역뿐 아니라 GHz 대역에서까지 부분방전 측정이 가능해짐에 따라 기존에 사용하던 IEC 60270에 나타난 수십 ~ 수백 kHz 대역에서의 측정 방법을 현장에 적용하는 것은 더 이상 고려되지 않고 있다. 종래의 검출법으로 현장에서 PD를 측정하는 것은 주변 노이즈의 레벨이 높은 문제뿐 아니라 시험장치가 상당히 크기 때문에 상당히 어렵다. 따라서, 전력케이블과 같은 경우에도 수 ~ 수백 MHz의 상당히 높은 주파수 대역에서 측정하는 방법(고주파 부분방전(HFPD : High Frequency Partial Discharge) 측정방법)이 1990년대 초부터 제기되었다.

HFPD 측정방법은 높은 주파수에서는 상대적으로 노이즈 레벨이 낮기 때문에 현장에서 케이블이나 액세서리 등 국부적인 부분에 대한 측정으로 적합하다.

방전펄스의 고주파 성분이 케이블을 따라 전파해 나가면서 빠르게 감쇠되는 점은 전체 케이블 시스템을 측정하는 데에는 단점이 될 수 있지만, 주된 관심사가 액세서리에서 발생하는 부분방전이라면 HFPD 신호가 검출될 수 있는 짧은 길이에서는 장점이 될 수 있다. 즉, 접속부위나 종단 근처에서 검출하고 방전이 측정된다면, 이러한 방전은 액세서리에 기인하는 것 일 것이다.

검토의견: 2003년 자료에서는 고주파 펄스의 PD신호가 케이블을 따라 전파해가면서 빠르게 감쇠되므로 케이블 길이가 짧거나 단말&접속재 부분에서 고주파 부분방전 진단(HFPD) 필요하다고 기술

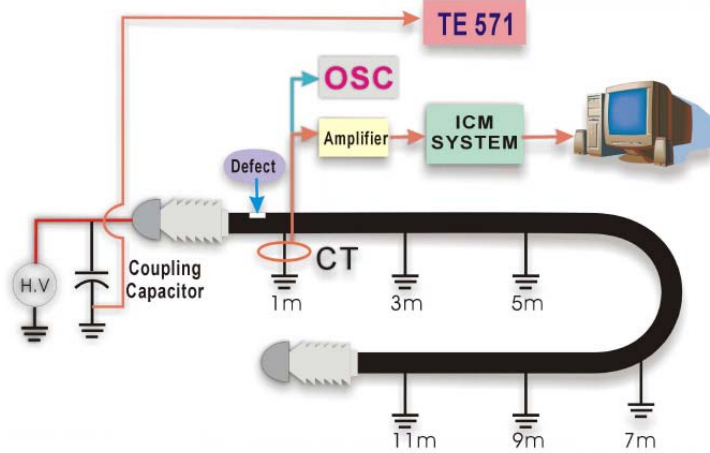


그림 1. 실험 장치 구성

케이블 길이에 따른 HFPD 부분방전 신호 감쇄량의 변화와 ICM-System을 이용한 패턴의 변화를 측정하기 위해서, 그림 1과 같이 케이블 외피를 벗긴 후 케이블 12m에 1,3,5,7,9,11m 지점에서 CT로 측정할 수 있도록 하였고, 접지선 길이 변화에 따른 CT 센서 출력 변화를 방지하기 위하여, 동일한 길이의 접지선을 각각 사용하였다. 고압측에 Coupling Capacitor를 이용한 IEC60270 방식인 TE 571을 사용하여 일정한 보이드 방전량을 조절할 수 있도록 적용하였다.

Power Diagnostix사의 고주파 calibrator CAL1을 이용하여, calibration 신호 20,50,100pC 파형을 인가한 후 케이블 각각의 지점에서 자체 제작한 고주파 CT 센서 출력전압과 파형을 측정 하였다. defect 지점에 원통형 void 결함(직경 1mm, 깊이 3mm)을 삽입한 후 전압을 인가, TE 571의 전압을 조정하여, 일정 방전량을 조절하면서, 케이블 각각의 지점에서 고주파 CT를 이용하여 ICM system을 통한 PC로 모니터링 하였다.

그림 2는 일정 방전량의 calibration 신호를 거리에 따른 감쇄 변화를 나타낸 것이다.

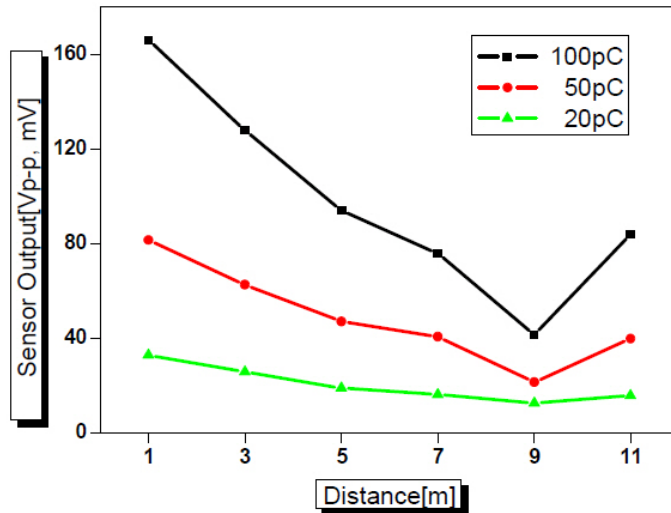


그림 2 거리에 따른 센서 출력전압의 감쇄

9m 지점까지 거리가 증가할 수록 일정한 선형성을 보이면서 센서 출력전압이 감쇄되는 것을 볼 수 있다. 11m 지점에서는 케이블 종단이 개방되어 있어 케이블 종단 임피던스(Z_e)는 무한대가 되므로 calibration 신호가 커지는 현상이 나타나므로 11m 지점을 배제한 각 지점에서 측정하였다.

그림 3(a)와 (b)는 calibration 100pC 신호를 고주파 CT로 1m와 9m 지점에서 각각 측정한 파형으로 1m 지점에서는 166mVp-p, 9m 지점에서는 41.6mVp-p의 출력전압 으로 대략 4배 정도의 크기 감소가 나타났다.

(c)는 노이즈를 배제한 calibration 파형인 (a)와 (b)를 FFT화 시킨 것이다.

9m 지점은 1m 지점과 유사한 주파수 성분을 갖고 있지만, 측정 주파수 대역에 대하여 일정한 크기의 감쇄가 나타나지 않고, peak치 부근의 주파수 성분만 감쇄가 크게 나타났다.

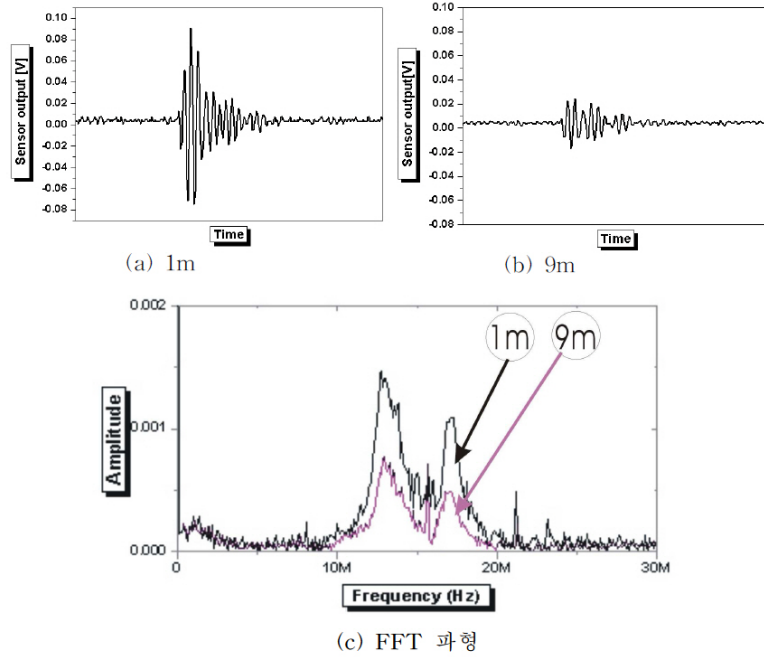


그림 3. 100pC 신호의 측정 및 FFT 분석

그림 4는 3,5,7,9m 지점에서의 방전량 20,50,100pC 신호의 거리에 따른 출력 전압의 기울기를 표현한 그래프이다.

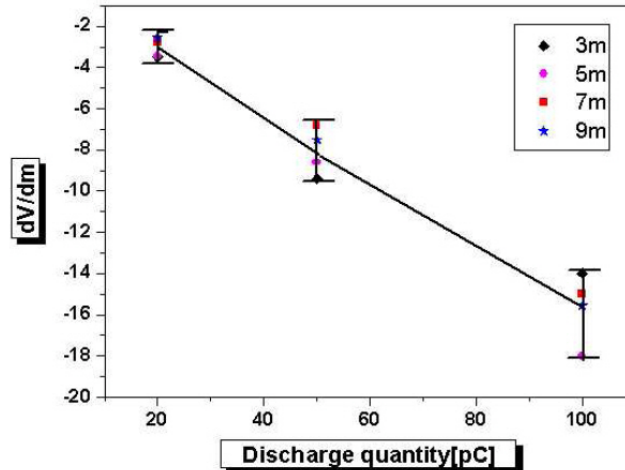


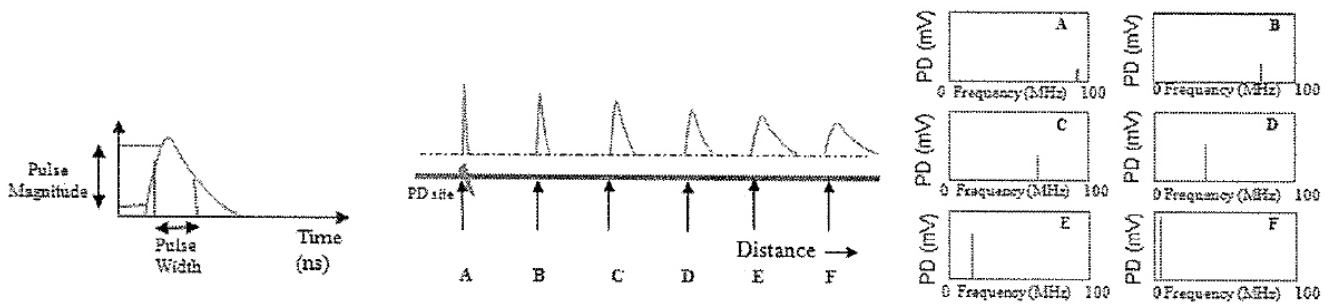
그림 4. 방전량에 대한 출력전압/거리의 기울기

PD신호는 일종의 진행파 형태의 임펄스 파형으로 생각 되어질 때 , 다시 말해서 calibration 파형과 유사하다고 생각되어진다면, 방전량이 증가할수록 거리에 따른 출력전압의 감쇄량의 기울기가 선형성을 가지는 특성이 그림4의 결과에 나타났고, 감쇄량은 표와 같다.

표 케이블 길이에 의한 감쇄량

	20pC	50pC	100pC
감쇄량	3mV/m	8mV/m	15mV/m

- 검토의견: 1) **시험실 환경조건에서** 케이블9m위치에서 100PC PD발생시 고주파CT에서 검출되는 PD신호는 감쇄되어 약25PC (발생PD크기의 1/4배) 검출
- 2) PD발생 크기별로 거리에 따라 감쇄율 변화, PD 크기 증가 → 감쇄율/m 증가
- 3) 2000년대 초반기에는 PD신호가 케이블을 따라 전파해가면서 PD신호크기만 감쇄되고, PD신호의 Pulse형태는 변화하지 않으며, 크기의 감쇄량도 거리에 따라 직선성을 가지는 것으로 판단 → 현재 자료를 검토한 결과 크기는 지수형태로 감소, 형태는 왜곡될 것임.



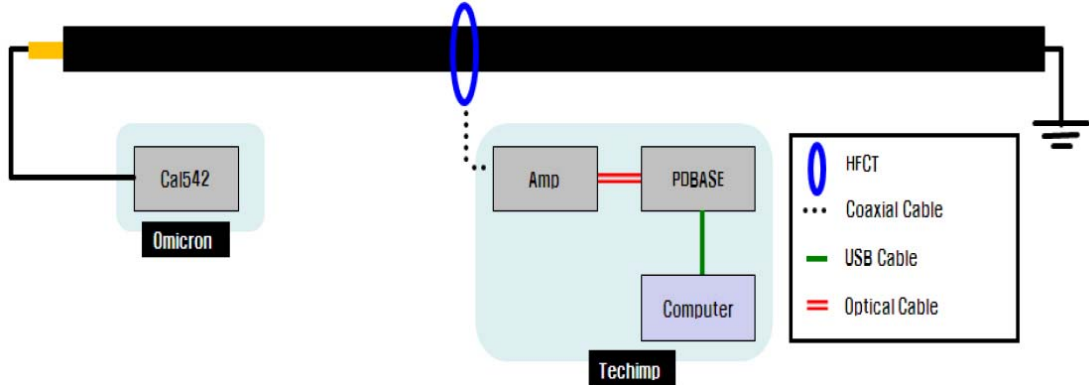
<그림. 신호전달 특성>

그림과 같은 부분방전 펄스신호가 발생하면 케이블을 따라 이동하면서 펄스의 크기는 작아지고 펄스의 폭은 넓어진다. 따라서 각 지점에서 측정되는 신호의 주파수대역이 점차 낮아지게 된다. 측정점에서는 여러 개의 신호가 무리지어 나타나고 이것이 모여 포락선을 형성하면서 PD파형을 구분하는 것으로 추정된다.

- 검토의견: 1) 상기 자료에서도 케이블을 따라 이동하면서 펄스의 크기는 작아지는 데 그림상으로는 일차함수형태로 감쇄되는 것으로 보여지고
- 2) 추후 검토할 케이블을 따라 전파되면서 PD펄스의 파형의 변형에 대해 일부 기술되어짐
- 3) PD Pulse의 크기감쇄에 영향을 보완하기 위해 Pulse의 면적을 계산하여 PD상태를 검출하고 있다고 하던데... PD Pulse의 형태가 Noise신호등의 신호에 겹쳐져도 가능할까???
- 4) 상기 자료에서는 감쇄 및 파형의 변형이 생겨도 PD파형이 구분어진다고 기술되어 있지만, 변전소에 설치된 PD검출센서로 유입되는 신호는 PD발생위치에서 발생한 PD신호가 케이블을 따라 전파되어 감쇄되어 매우 작은 Level의 PD펄스 크기와 양쪽 단말부에서에서 PD신호의 전반사되어져 PD검출센서로 유입되는 PD신호와 Original PD펄스가 거리에 따른 PD펄스의 변형과 양쪽 단말부에서의 전반사에 의한 PD펄스의 변형되어지는 데, 노이즈 신호에서 PD펄스를 구별하는 것이 가능할 까???

A. 측정 거리에 따른 신호 감쇄현상 모의 선로 구성

HFCT를 케이블 본선에 걸어 신호 주입지점을 기준으로 5~10m 단위로 측정하였다. Calibrator 신호를 500[pC]으로 고정하여 도체에 주입하였고, Techimp社의 PDBASE로 측정하였다. <그림 1>은 측정 장비가 장착된 모의 선로를 도식화하였다.



<그림 1> 거리에 따른 신호 감쇄현상 측정 개념도

B. 실험 결과

1) 측정 거리에 따른 신호 감쇄현상 결과

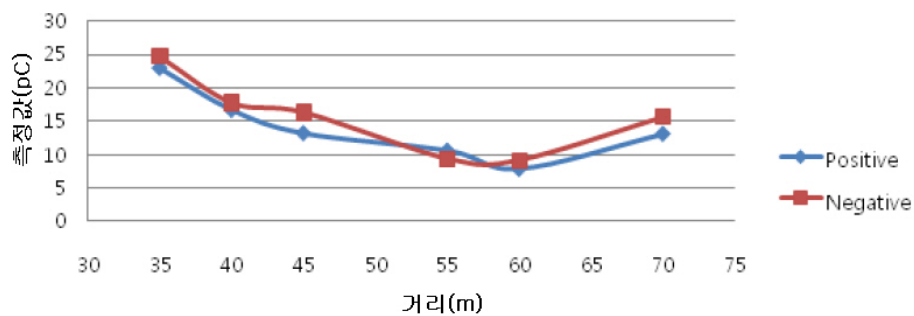
주입 신호 기점으로 측정 거리에 대한 감도는 <표>와 같다. SNR이 가장 큰 주파수 대역에 중심 주파수를 설정하고, 주파수 동조와 함께PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)를 이용하여 측정 및 분석하였다. 또한 500[pC]의 Calibrator 신호를 주입하여 신호주입 지점 기준으로35~70[m]까지 측정하였으며, 5~10[m]단위로 신호 감쇄를 확인하였다.

약 60~70[m]지점은 주입신호에 비하여 노이즈의 레벨이 높아져서 감도확인이 불가능하였다. 이는 측정 현장 주변의 전동기, 내압기 등의 외부 노이즈가 안테나 역할을 하는 케이블에 삽입되어 신호대비 노이즈 비가 높아졌을 것으로 사료된다.

표. 거리에 따른 부분방전 신호 측정결과

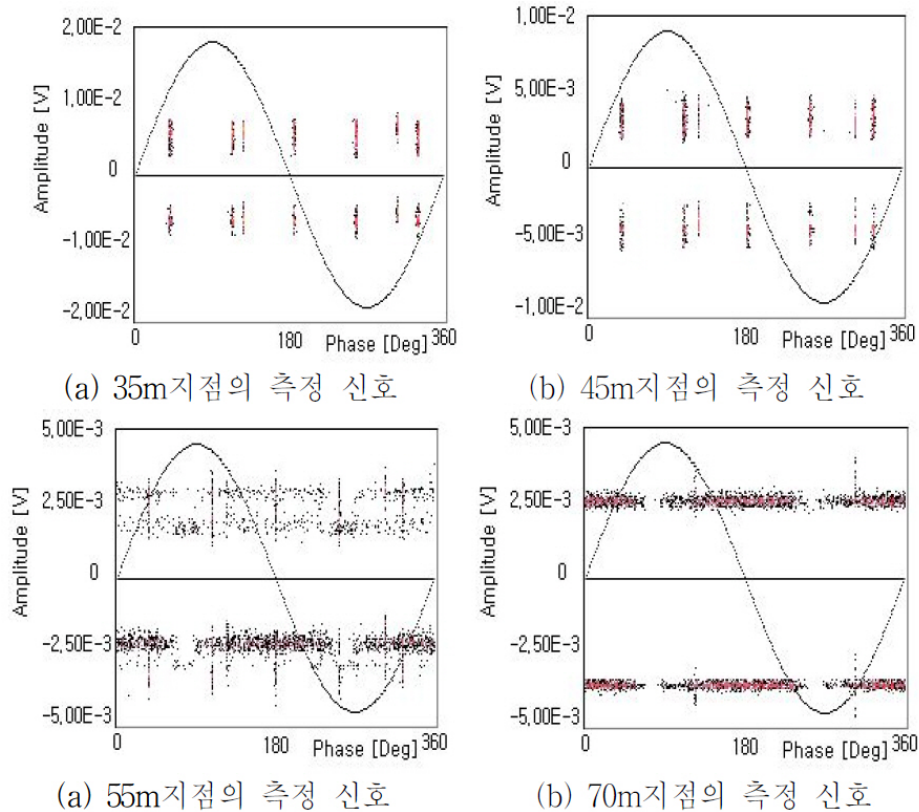
거리 [m]	측정감도 [pC]	
	Positive	Negative
35	23.02	24.74
40	16.72	17.77
45	13.21	16.33
55	10.60	9.32
60	7.85	9.14
70	13.11	15.65

15kV EPR 케이블 부분방전 측정 결과



<그림2 거리에 따라 감쇄되는 Calibrator신호>

기점으로 부터 60[m]지점 이후로 진원을 알 수 없는 외부 노이즈의 삽입으로 측정 감도가 상승하였고, 70[m] 이후 지점에서는 약 20[pC]의 노이즈 신호가 불규칙 하게 측정되어 시험을 중지 하였다. <그림 3>는 35, 45, 55, 70[m]지점에서 측정된 Calibrator 신호를 나타내었다. 55[m]지점 이후로 노이즈의 삽입이 증가하는 것을 확인 할 수 있다.



<그림 5> 측정 지점에 따른 Calibrator신호의 검출

<그림 3. 측정지점에 따른 Calibrator 신호의 검출>

- 검토의견: 1) 변전소보다 노이즈 크기가 작을 것을 판단되는 CABLE제조공장 옥외에서의 시험조건 상태에서, 부분방전 발생위치가 HFCT측정센서로부터 60m이상 떨어진 경우에 PD발생시 감쇄되어 HFCT에서 검출되는 PD크기 신호가 너무 낮아 Noise신호와 분리 곤란, PD신호 크기 확인불가
- 2) 2010년대에 있어서도 PD신호가 케이블을 따라 전파해가면서 PD신호크기는 감쇄되고, PD신호의 Pulse형태는 어떤 변형상태가 되는지, 크기의 감쇄량도 거리에 따라 어떤 형태로 감쇄되는 지...???

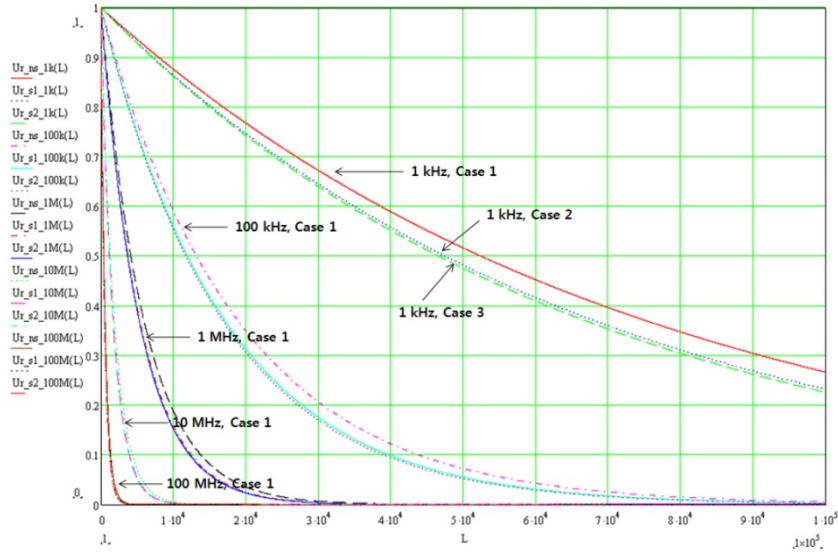


그림 8 CNCV 60mm² 케이블 길이별 주파수에 따른 감쇠전압

그림 8은 케이블 길이별 주파수에 따라 감쇠되는 전압의 크기를 나타내었다. **주파수가 높을수록 감쇠는 급격하게 나타나며**, 1 kHz의 경우 100 km 케이블에서도 입력전압 대비 약 30 %의 전압 크기를 보였다.

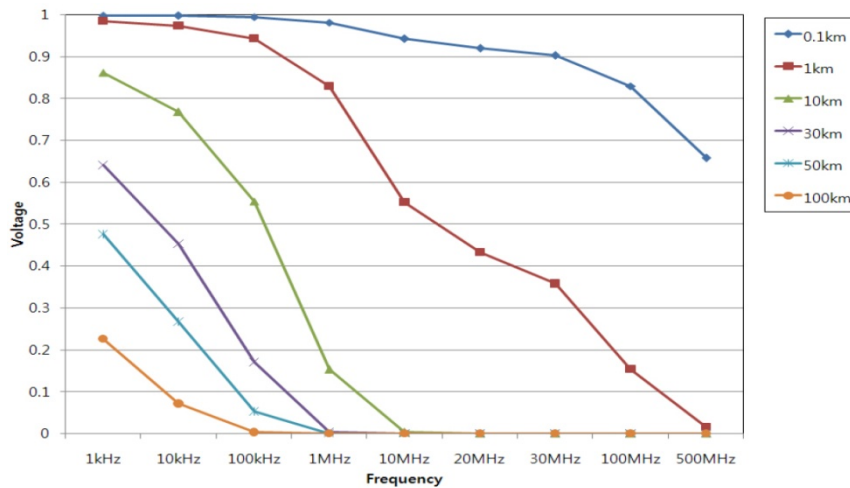


그림 9 CNCV 60mm² 주파수에 따른 감쇠전압(Case 3)

그림 9는 Case 3에 대해 CNCV 60mm² 주파수에 따른 감쇠전압의 크기를 보인 것이다. 감쇠전압 크기 분석을 위해 1상 케이블을 대상으로 모델링 하였으며, 입력전압은 1 V로 하였고, 출력단에는 두반사 영향을 무시한 순수 감쇠정도를 계산하기 위해 정합저항으로 정합하였다. 그림에서처럼 **케이블 길이가 길수록 출력단에 도달하는 전압신호의 감쇠가 크게 나타남**을 알 수 있다.

검토의견: 1) 국내에서는 2012년에 그림8과 같이 PD검출주파수가 수백kHz이상의 주파수 대역에서 케이블 길이가 길수록 부분방전 크기 감쇄량이 지수함수와 같은 형태로 감쇄되고 있다는 연구결과가 발표됨.

2) 그림9에서 1km의 케이블에서 PD발생하는 경우 수백kHz이하의 주파수 대역에서는 10%이하의 감쇄가 발생하지만, 현재 한국내에서 많이 사용하는 약20MHz이상의 주파수대역에서는 50%이상의 신호가 감쇄되어지고, 그림9의 data로서는 대략 40%정도의 PD신호크기라도 PD검출센서에서 검출가능성이 있는 것으로 보여지지만..... (외국의 시험&Simulation DATA에서는 500m에서 60%이상 감쇄되는 자료도 있음.)

3) 추후 검토할 파형의 왜곡상태와 반도체층&동TAPPE상태까지 고려하면 1km보다 짧은 500m위치에서 PD발생시, 500m지점에서 발생한 PD신호크기의 30%정도의 Level이라도 검출할 수 있을 지??? (500m지점 100pc PD발생 → 변전소 HFCT에서 30pc검출가능 ???)

< 검토의견 : 2014년 12월 08일 >

상기에서 2002년부터 2012년까지 국내에서 연구 또는 공개된 자료를 보면 전력케이블의 부분방전(PD) 검출에 있어 외부주변 Noise를 영향을 제거하기 위해 저주파 주파수 대역 보다는 고주파 주파수 대역에서 검출하는 것이 바람직하다고 하고 있으며, 케이블 선로에 있어 PD 발생시 고주파 펄스의 PD 신호가 케이블을 따라 전파되면서 발생하는 현상에 있어 국내의 연구 및 공개된 자료를 보면 2011년까지는 그림 1과 같이 고주파 펄스의 신호크기는 빠르게 감쇄하지만, 길이에 따라 1차 함수(직선함수)형태의 감쇄 경향을 가지고 있는 것으로 파악하고 있었던 것으로 파악된다.

이러한 결과가 나온 것을 추정해보면 수십 m 이하의 짧은 케이블의 시료를 사용하여 시험한 DATA에서 추출된 결과에서 기인한 것이 아닌가 생각한다.

2004년 석사논문을 보면 11m의 케이블 시료를 사용하여 케이블 길이에 따른 영향 분석 결과를 보면 고주파 PD 검출센서(HFCT)로부터 1~11m 떨어진 위치에서 PD 발생시에 100pc의 PD 발생신호에 대한 케이블 길이에 따른 PD 신호의 감쇄량을 15mV/m의 선형성을 가지고 있다고 기술하고 있으며 2011년 전기학회 발표자료를 보면 500pc의 PD calibrator를 사용하여 시험한 결과, 길이 60m까지 1차 함수의 선형성을 가지는 특성으로 감쇄가 발생하고 있다고 기술하고 있다.

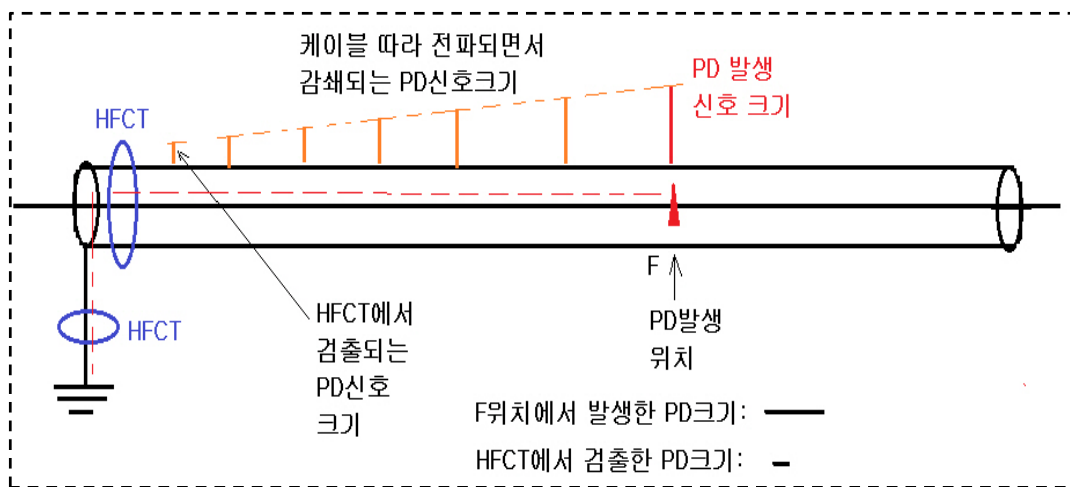


그림 1] 국내에서 2010년 이전 일반적으로 생각하였던 케이블에 있어 PD 신호크기 감쇄특성에

국내에서 고주파 대역에서 케이블의 길이에 따른 PD 신호의 감쇄특성이 1차 함수가 아닌 지수함수 형태로 감쇄하고 있다는 특성의 연구결과는 2012년에 발표되어 있다.

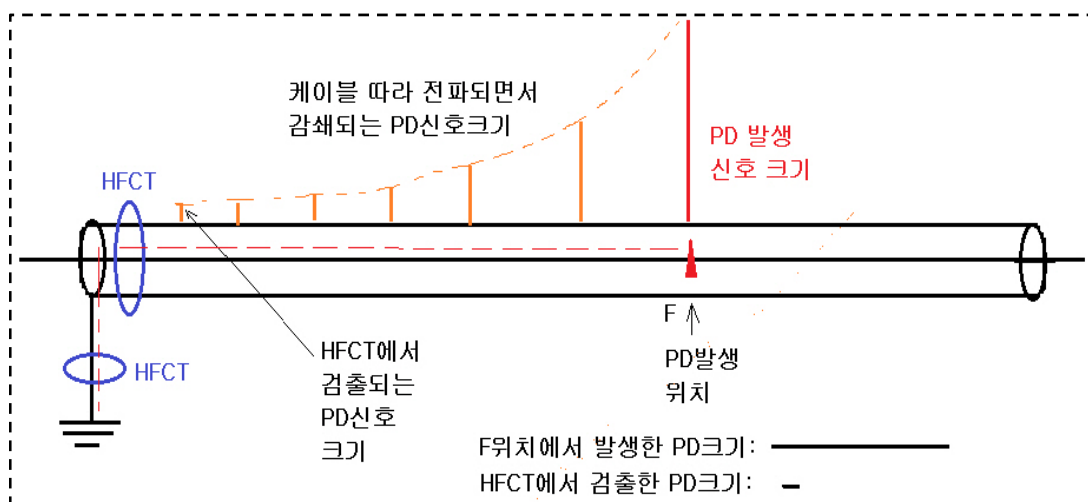


그림 2] 국내에서 2012년에 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD 신호크기 감쇄특성에

2012년 전기학회의 발표자료를 보면 케이블 길이가 길수록, 고주파 대역이 증가할수록 감쇄 특성이 증가하고 있다고 발표하고 있고, 고주파 대역이 1MHz 이상이면 PD 신호 크기 특성이 그림 2와 같이 지수함수 형태로 감쇄하는 특성을 가지고 있다.

그리고, 2011년 전기학회에 발표한 자료에서 60m 이상 떨어진 위치에서 500pc 정도의 PD 발생시에 HFCT 로 검출시에 검출되는 PD 신호 Level 이 주변 Noise 과 같은 Level 이 되어 PD 신호를 확인할 수 없었다고 하는 데,
이 사항은 케이블을 따라 크기의 감쇠뿐만 아니라 추후 검토할 PD Pulse 신호 파형의 변형되어 HFCT 로 유입되고 있기 때문이 아닌가 생각한다.

따라서 변전소측에서만 PD센서(예를 들어 HFCT Sensor)를 설치하여 케이블의 부분방전 측정시, 일반적으로 산업현장에서 많이 사용하는 수십m~수천m 범위내의 케이블 포설 사용조건에 있어, 변전소측으로부터 수백m이상(수십m이상이라고 생각되지만)의 케이블 또는 직선접속 부분에서 부분방전(PD)가 발생하는 경우,

PD신호는 케이블 길이, 케이블의 구조 등에 따라 PD발생지점으로부터 변전소측으로 전파되면서 피크치 크기가 지수 함수 형태로 급격히 감쇠되어 변전소에 설치된 PD센서로 유입되어 PD Sensor에서 PD신호는 Noise Level과 비교할 수 없을 정도로 PD신호는 감쇠되어 PD Level 확인은 거의 안될 것으로 추정된다.

1980년 이전부터 PD측정은 접속부분의 수m이내의 부분만 PD감시하기 위해 감시하고자 하는 부분에 PD센서를 설치하면 가능할 것이라는 사항이 근본적인 PD Signal 검출의 현상인데?

본 자료는 허락없이 인쇄물/site에 공개해서는 안되지만,
출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다.. 2014년 12월 08일