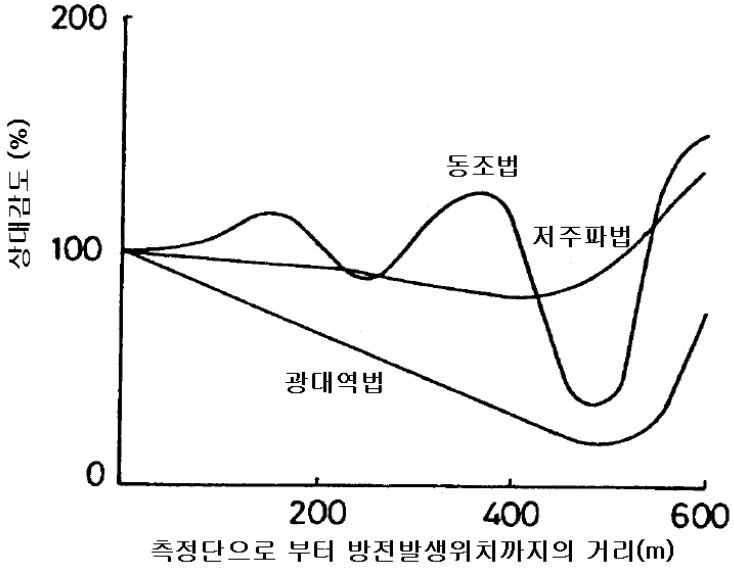
전력케이블에 있어 부분방전PD신호 전파특성(2)
PD크기 감쇠관련 일본 및 외국자료 검토

2014년 12월 20일 검토자: 김보경
2014년 12월 22일 1차 보완
2014년 12월 29일 2차 보완

[외국 자료]

A. [외국 자료-일본]

① <출전: 부분방전측정방법, **일본1984년** 미쯔비시전선 특허출원>



부분방전 측정방법에서 광대역법, 저주파법, 동조법이 있다.
광대역법은 펄스파형의 Distortion변화를 작게 하여 관측하려는 목적으로 대역폭을 넓게 하고 있으므로, 높은 고주파성분이 감쇠하기 쉽고 그림과 같이 방전발생위치가 멀수록 감쇠가 크게 되는 문제가 있다.
또, 저주파법은 방전발생위치에 의한 응답의 변화가 가장 작고, 적분효과를 사용할 수 있지만, 광대역법법과 더불어 잡음영향을 받기 쉽다는 결점이 있다.

검토의견:① **1980년 중반기에** 일본 미쯔비시전선에서는 PD발생위치가 측정단으로부터 멀리 떨어진 경우에,
<u>부분방전 펄스가 케이블을 따라 전파해가면서 감쇠하기 때문에 PD검출에 문제가 있다고</u> 기술하고 있다.

② 그리고 저주파법은 감쇠정도가 작으나 노이즈잡음에 영향을 받기 쉽다는 문제점도 기술하고 있다.

③ 따라서 일본에서는 1080년대 중반에 케이블의 PD진단에 있어서, 고주파법은 감쇠문제와 현장노이즈문제, 저주파법은 노이즈잡음 문제때문에 주파수대역을 협소화시키는 동조법을 대안으로 검토하고 있었다.

본 자료는 허락없이 인쇄물/site에 공개해서는 안됩니다만, 출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014년 12월 20일

② <출전: CV케이블용 Prefab형 접속부 및 부분방전 측정방법, **일본1992년** 후루까와사 특허출원>
부분 방전 측정 방법은, 부분 방전 발생시에 발생하는 시스간의 전압을 검출하는 것으로써 부분 방전을 검출하기 위해, 시스의 일부가 완전하게 절연 되고 있는 절연 접속부에서만 부분 방전을 측정할 수 있었다. 하지만, **실제의 케이블 선로에서는**, 시스의 절연부가 없는 접속부도 많이 사용되고 있어 그 부분에서 부분 방전이 발생한 경우, **부분 방전 펄스는 케이블 내부를 전파 하는 동안에 감쇠하고, 이 경향은 특히 고주파 성분일수록 높아진다.** 따라서, 예를 들면, **절연 접속부로 부터 수백 m~수km 멀어진 장소에 있는 통상의 접속부에 있어서의 부분 방전을 검출하는 경우의 감도는 현저하게 저하하는 것이 보통이고, 경우에 따라서는 측정이 불가능하기도 함.**

검토의견: 1990년대 **초반기에** 일본 후루까와전선에서는 **부분방전 펄스**(고주파 대역보다 감쇠특성이 좋은 저주파 대역일 것이다.)는 **케이블을 따라 전파해가면서 감쇠한다고** 기술하고 있다.
그리고 수백m이상 떨어진 위치에서 PD발생하여 케이블을 따라 전파해와 검출된 PD신호는 측정이 불가능할 수 있다고 기술하고 있다.

③ <출전: 부분방전위치표정방법, **일본1996년** 스미토모&중부전력사 특허출원>

부분 방전은 케이블 선로내를 전파 하는 동안에 고주파 성분만큼 크게 감쇠한다. 그 때문에, 검출 신호는 케이블전파거리가 길어질수록 파형형태가 변한다.
케이블내의 전파 속도는 주파수 의존이 있다. 부분 방전 발생 개소가 측정위치에 가까운 경우에는, 부분 방전 펄스중의 고주파 성분도 검출되기 위해, 그 펄스의 평균적인 전파 속도는 빨라진다. 한편, 방전 발생 개소가 측정위치로 부터 떨어져 있는 경우에는 고주파 성분이 감쇠하기 때문에, 그 펄스의 평균 전파 속도가 늦어진다.

즉, 오차를 최소로 하는 최적 펄스 전파 속도는, 부분 방전 발생 위치에 의해 변화한다. 그리고, **어디서 부분 방전이 발생하는가를 미리 예상하는 것은 불가능하다.**
부분 방전은 케이블 선로내를 전파 하는 동안에 고주파 성분만큼 크게 감쇠한다. 그 때문에, 검출 신호는 케이블전파 거리가 길어질수록 파형이 무디어지고(왜곡되고), 검출되는 전파시간차이는, 진짜 첫번째의 Pulse와 시간차이가 발생하여 다른 값이 된다.

동일 개소에서의 방전을 측정했을 경우에서도, 방전의 크기에 의해서 검출되는 전파 시간차이를 일으킨다. 케이블내의 전파 속도는 주파수 의존이 있다. 부분 방전 발생 개소가 측정점에 가까운 경우에는, 부분 방전 펄스중의 고주파 성분도 검출되기 위해, 그 펄스의 평균적인 전파 속도는 빨라진다. 한편, 부분방전 발생개소가 측정점으로 부터 떨어져 있는 경우에는 고주파 성분이 감쇠하기 때문에, 그 펄스의 평균 전파 속도가 늦어진다.
즉, 오차를 최소로 하는 최적인 펄스 전파 속도는, 부분 방전 발생 위치에 의해 변화한다. 그렇지만, 어디서 부분 방전이 발생할까를 미리 예상하는 것은 불가능하다. 그 때문에 실용상은 적당한 일정치의 전반 속도를 가정해 이용하게 되지만, 이 가정한 전파 속도가 오차를 최소로 하는 최적인 전반 속도와는 다르기 때문에 여전히 오차를 일으킨다.

검토의견: 1) **1990년대 중반기에** 일본 스미토모전선과 중부전력에서 특허 출원한 내용을 보면 **케이블에서 PD발생하여 케이블을 따라 전파하면서 신호가 감쇠하고**, 또한 케이블 길이가 길수록 **파형이 왜곡되어 PD신호인지 구분이 어렵다고** 기술하고 있다.
2) **일본에서는 케이블을 따라 PD신호가 감쇠/왜곡의 영향때문에 PD를 집중감시하고자 하는 접속재와 같은 부분에 수백kHz주파수 대역의 박전극센서 또는 용량센서를 적용하고 있지 않은지???**

④ <출전: Partial Discharge Measurement Techniques for Highly Aged XLPE Cable Systems-Propagation Characteristics of Pulse Signal, 일본전력중앙연구소, **2011년02월**, 일본전기학회 DEI-1141>

1. **PD펄스 신호는 케이블 내부를 전파하고,** 장기간 사용한 고경년 CV케이블에서는 장기간에 걸쳐 외부로부터의 수분 침투에 의해, **차폐층 동테이프가 산화해, 표면이 절연성을 가지고 있는 것이 예상되지만,** 이러한 상황에서의 **고주파 펄스전파특성은 명확하지 않았다.**
금회, 고경년 CV케이블로의 고주파 펄스전파특성을 파악하기 위한 제일 단계로서 동축 케이블을 이용해 차폐층 동테이프의 표면이 절연성을 띄고 있는 CV케이블의 모델을 작성해, 이 전파특성을 측정했다.
2. CV케이블은, 지중 매설 관로나 트레이내부에 부설 되어 운용되는 형태가 주류이며, 지하수나 빗물이 관로나 트레이 등에 침입해, 케이블이 침수되는 일이 있다.
이 때, 포설되어 있는 CV케이블에 수분이 내부에 침투해, 차폐층동테이프는 수분에 노출되게 된다.
따라서, 장기간에 걸쳐 운용에 함에 따라, 차폐층 동테이프의 표면은 산화 열화 하게 된다.
그리고, 차폐층 동테이프의 표면이 검게 산화하는 형태 또는 녹청색의 산화하는 형태의 모양도 나타난다.
여기서 **산화동은 전도성이 낮아 절연체로 취급할** 있고 또한 변색의 정도는 산화동의 두께에 따라 달라 진다는 문헌도 있다. 따라서 **경년(오래 사용한) CV케이블의 차폐층 동테이프는 절연막이** 피복되어 있다고 생각 할 수 있다.
3. 10D-FB 5m의 끝부분 1m부분에서 알루미늄TAPE와 편조선을 벗겨내고, 차폐층 동테이프의 대체로 알루미늄 테이프를 사용하고, 동테이프 표면의 산화동막(절연막)의 대체로 절연 종이 테이프 혹은 반도전성 자기 융착 테이프를 사용하여 시료를 구성하였다.

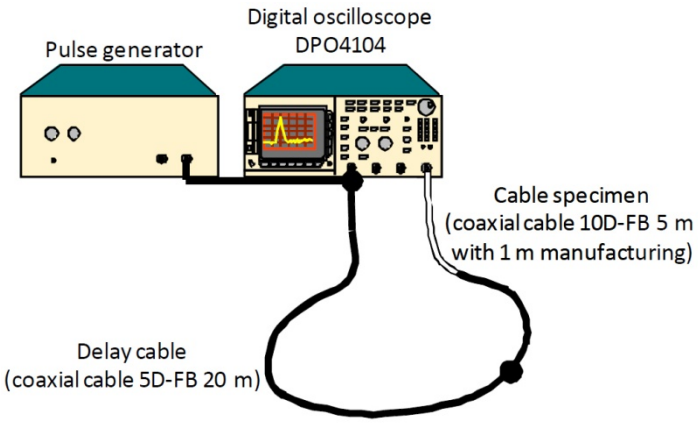


그림 고경년CV케이블Model의 고주파Pulse전반사 특성 측정

시 료		① Non-manufactured (10D-FB5m)	② Semiconducting tape	③ Aluminum tape of 40 mm width interleaved with semiconducting tape	④ Aluminum tape of 40 mm width interleaved with insulating paper tape
입력파 p-p	Vi(V)	3.94	3.12	3.86	3.20
통과파p-p	Vo(V)	3.24	0.45	2.75	2.20
통과파 감쇠율	Vo/Vi	0.822	0.144	0.712	0.686
파고치Base의 감쇠율	(%/m)	0.541	32.086	6.558	7.265

오래 사용한 경년CV케이블의 차폐층TAPE의 산화열화를 모의한 ③과④의 시료에서는 6~7%/m의 감쇠가 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 차폐층 동TAPE가 열화되지 않은 미가공 케이블 시료①과 비교하여 10배정도 크고, 표에는 나타내지 않았지만 Pulse전파속도는 차폐층 동TAPE가 산화열화된 ③과④의 시료에서는 열화되지 않은 시료①과 비교하여 10~20%정도 저하하였다.

검토의견: 1)**2011년** 일본 전력중앙연구소에서 오래 사용한 케이블에서 차폐층 동TAPE의 산화열화를 모의하여 시험결과 보면 , **차폐층 동TAPE가 산화열화한 케이블시료에서는** 열화되지 않은 시료케이블보다 검출될 수 있는 **PD Pulse의 피크치가 10배정도 감소하고** , PD Pulse의 **전파속도는** 차폐동tape가 산화열화된 케이블시료에서 **약10~20%정도 저하하였다고** 기술.

2) 본 자료는 **차폐동tape의 산화열화정도에 따라 PD Pulse의 크기 감쇠 및 속도가 달라질 수 있다는 것을 의미**하는 것이므로, **실제 현장에서는 CV케이블의 차폐동tape의 산화열화정도를 파악하여 PD검출장비에 검출 PD량을 보정할 수 있을지?????**

⑤ <출전: Soundness Verification for Whole Cable Line by Partial Discharge Measurement Only at Terminations-Considering with propagation Characteristics of High Frequency Signal, 일본전력중앙연구소, **2012년12월**, 일본전기학회 EWC-12-015>

표1. Specifications of the XLPE cable specimen

	시료 A	시료 B
공칭전압	66kV	77kV
도체Size	600	250
내외도	동시압출(E-E)	동시압출(E-E)
차폐층구조	와이어쉴드	동Tape(2중)
전체길이	99.95m	99.76m

표 2. Pulse propagation characteristics obtained from pulse waveform measurement.

		시료 A	시료 B
기준파고치(mV) [시료입력pulse pick]		1899.8	2561.3
CV케이블 전파후의 파고치(mV)		288.0	873.5
CV케이블 파고치 감쇠율(dB/m)		0.164	0.094
전파속도(m/us)		173.9	184.3
감쇠율의 주파수에 대한 특성(dB/km)	10MHz	-65	-15
	20MHz	-130	-35
	50MHz		-90

표1은 시료에 대한 설명이고, 표2의 시료케이블 약100를 사용하여 시험한 결과DATA로, 이 DATA를 살펴보면, 시료 B와 비교하여 **시료 A는 파고치의 감쇠가 크고, 전파속도가 5%정도 저하**하고 있다.
그리고 주파수특성은 시료 A에서는 20MHz이상의 주파수 영역에서 100dB/km이상의 감쇠율이 발생되고 있고, 시료 B에서는 20MHz이상의 주파수 영역에 있어서 10dB/km이상의 감쇠율이 발생하고 있다.
따라서 시료 A(와이어쉴드)과 비교하여 시료 B(동Tape)쪽이 고주파영역의 신호가 보다 전파하기 쉽다는 것이며, 이들의 차이는 차폐층의 구조에 기인하는 것으로 판단된다.
또 **CV케이블은 통신용의 동축케이블과 달리 내외도 반도전층이 있지만 이 반도전층은 고주파신호가 전파하는 절연체(유전체)에서 보면 저항성분으로 된다.**

검토의견: 1)**2012년** 일본 전력중앙연구소에서 케이블 구조에 따른 PD신호의 전파특성을 시험결과 보면, 차폐층이 와이어쉴드 케이블이 동TAPE케이블보다 감쇠가 크다.
차폐층이 와이어쉴드 케이블(A시료)은 거리100m위치에서 **PD신호크기가 약85%감쇠** 발생
차폐층이 동TAPE 케이블 (B시료)은 거리100m위치에서 **PD신호크기가 약66%감쇠** 발생
2) 주파수에 대한 감쇠특성을 살펴보면
와이어쉴드 케이블(A시료)은 20MHz이상의 주파수 영역에서 100dB/km이상의 감쇠율 발생,
동TAPE케이블(B시료)은 20MHz이상의 주파수 영역에서 15dB/km이상의 감쇠율 발생.
3) 따라서 **차폐층 구조가 와이어쉴드 케이블(A시료)과 비교해서 동tape케이블(B시료) 쪽이 PD검출에는 다소나마 어느 정도 특성양호.**
-→수십m이상의 CV케이블이라도 차폐층 구조에 따른 PD Pulse의 전파특성의 차이 때문에, PD센서에 의해 검출된 PD크기와 실제 발생한 PD크기가 달라질 수 있다.
4) 표2의 DATA는 **주변Noise를 고려하지 않은 환경조건에서 시험한 것으로,**
PD검출센서로부터 **100m떨어진 위치에서 100pc크기의 부분방전이 발생한** 경우,
A시료 케이블(차폐층이 와이어쉴드 케이블)은 PD검출센서에는 **약15pc**크기의 PD검출,
B시료 케이블(차폐층이 동TAPE케이블)은 PD검출센서에는 **약34pc**크기의 PD검출되는데
--→ **Noise가 있는 환경에서는 PD검출센서에는 어느 정도의 크기를 검출할 수 있을까?**

일본자료 종합검토 : 상기에서 검토한 일본자료를 보면
1)**일본에서는 1980년대부터 케이블에서** 고주파PD신호가 케이블을 따라 전파해가면서 감쇠가 된다고 인지하고 있었던 것으로 생각되며, 이러한 감쇠특성 때문에, PD감시하고자 하는 부분에 박막전극센서, 용량성 센서 등을 설치하여 PD상태를 감시하고 있었던 것은 아니었을까?
2) 최근, 일본 전력중앙연구소에서 전력케이블의 CV케이블의 구조특성 및 케이블의 장기간사용으로 인한 차폐동TAPE의 산화열화정도에 따른 PD신호의 감쇠특성관련 시험한 결과를 보면,
CV케이블이라도 차폐층 구조(CNCV, CV등)에 따라 감쇠특성 및 전파특성이 다르고
CV케이블의 동TAPE의 산화특성에 따라 감쇠특성 및 전파특성이 다른데,
수십m이상의 케이블의 부분방전(PD)검출시에 이러한 사항들을 고려하여 PD 검출Data를 추출해야 하는 것은 아닌지? (실제 현장에서는 어느 정도 가능성이 있을지는???)

본 자료는 허락없이 인쇄물/site에 공개해서는 안됩니다만, 출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014 년 12 월 20 일

B. [외국 자료-일본 外]

① <출전: Partial Discharge XXII: High Frequency Attenuation in Shielded Solid Dielectric Power Cable and Implications Thereof for PD location, STEVEN BOGGS, IEEE Electrical Insulation Magazine, 1996년1월 Vol. 12, No. 1>

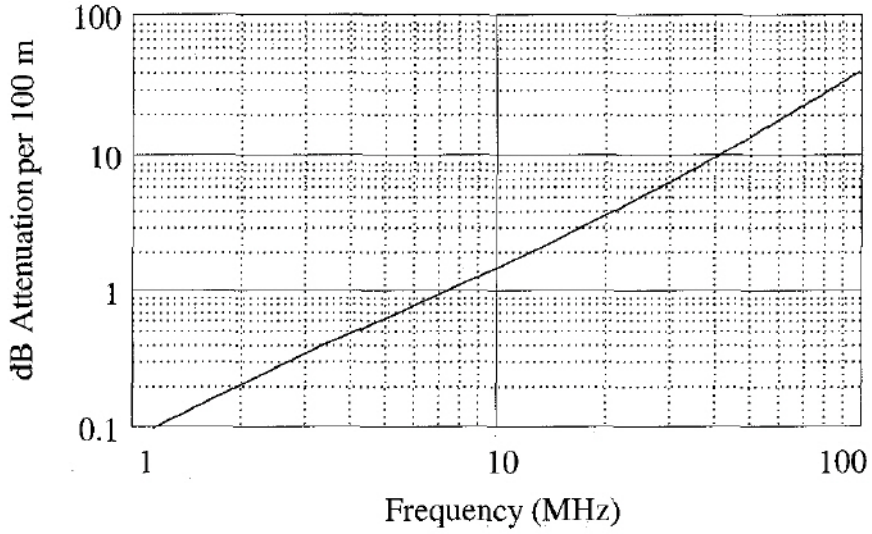


Fig.3 Dielectric properties of typical distribution cable conductor (solid line) and strippable ground (dashed line) semiconducting materials. The bottom curve shows the attenuation vs. frequency for an XLPE cable which incorporates these semicons in a cable with the following parameters: conductor diameter: 12 mm (0.5"), dielectric thickness: 5.6 mm (0.22'7, semicon thickness: 1 rnm (40 mils) each layer.

검토의견: 1)1996년도 1월에 IEEE협회지에 발표된 자료이고, 공동저자로 Hipotronics, Robins Instruments사가 있음.

2) 케이블 거리 100m에 있어 주파수에 따른 크기 감쇠율을 나타낸 것이며, 거리에 따른 크기 감쇠가 어떤 형태로 이루어지는 지는 기술하지 않고 있지만, **주파수가 높을수록 감쇠가 크다는 것을 보여줌**

3) 10MHz에서 약1.5dB 감쇠, 20MHz에서 약4dB감쇠, 100MHz에서는 약 40dB감쇠됨을 표시 따라서, CV케이블 100m에서 PD발생시 20MHz주파수대역에서는 약4db감쇠하므로 100m지점에서 100pc PD발생시에 100m떨어진 위치에서는 20MHz대역에서 PD신호는 약 63pc검출(약 37%감쇠) 가능함을 표시된 자료임.

4) 외국에서는 약20여년전에 케이블의 PD측정시의 PD Pulse의 감쇠때문에, PD발생 지점으로부터 멀리 떨어진 장소에 PD검출센서를 설치시의 문제점을 어느 정도 파악.

②<출전: Insitu Partial Discharge Detection in Power Plant Cables, 1998년 10월, NUREG/CP-0166 Vol. 3>

In solid-insulation defects, PD pulse shapes differ, and several PD pulse with different shapes can be generated simultaneously from the same defect.
PD in solid insulation gives rise to electromagnetic pulses having a rise time ranging from few ns to several 10's ns. These pulses become attenuated as they propagate.
Strong frequency discrimination occurs as pulses of high frequency are attenuated more intensively than pulses of low frequency.
As a result, the rise time of a pulse degrades rapidly after a few feet of propagation, suffering a slower degradation thereafter.
For example, the rise time of a 2ns pulse can increase to 10ns in the first 300feet, but only to 30ns after an additional 1,000feet of propagation.
PD pulses occurred within less than 30feet from the point of measurement are expected to maintain their initial shapes due to the short proximity to the source.
Therefore, it can be assumed that if the rise time of the detected pulse is less than 10us, it is very likely that this pulse has originated near the point of measurement.
Likewise, PD pulses originated some distance away from the point of testing will have much wider rise times when measured at the termination end of the cable.
In the frequency domain, PD originated near the point of testing will have frequency components as high as 500MHz.
On the other hand, the higher-frequency components of the PD originated away from the point of testing will be completely attenuated before they reach the testing equipment.
The attenuation and propagation of the PD pulses depends on the impedance of the cable.

Figure 9 shows the PD signal detected at several locations of the cable.

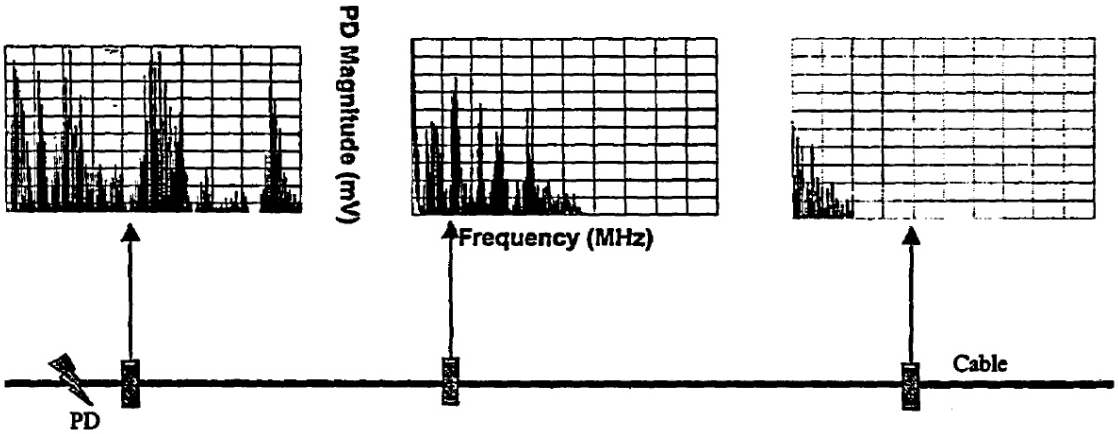


Figure 9 PD detected at several locations of the cable.

검토의견: 1)1998년도의 미국 원자력 발전소 관련하여 작성된 전력케이블의 PD검출자료를 보면
-. PD Pulse는 케이블을 따라 전파하면서 감쇠하고, PD Pulse의 rising time은 케이블을 수m만 전파하여도 급격히 증가
-. PD검출을 종단 접속부에서 측정할 때에 PD발생지점이 조금만 떨어져 있어도 검출되는 PD Pulse모양은 크게 변화
-. PD발생지점이 PD검출센서로부터 떨어져 있을 때는 PD의 고주파성분은 PD검출센서에 도착하기 전에 감쇠되어 질 것임.
-. PD Pulse의 감쇠와 전파특성은 케이블의 임피던스에 따라 달라진다고 기술하고 있음.
-. 그림과 같이 PD발생지점에서 떨어질수록 검출된 PD크기는 감소,
또한 주파수가 높은 부분의 PD신호는 검출되지 않고 있음.
2) 케이블 거리에 따른 크기 감쇠가 어떤 형태로 이루어지는 지는 기술하지 않고 있지만,
급격히 감쇠되는 형태이고 Pulse형태도 급격히 변화, PD검출센서가 PD발생지점으로부터 많이(?) 떨어지면 PD의 고주파성분은 검출되지 않을 정도로 감쇠 & 변형

본 자료는 허락없이 인쇄물/site에 공개해서는 안됩니다만, 출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014년 12월 20일

③ <출전: Developments for On-Line Partial Discharge Detection in Cables, in Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2001)

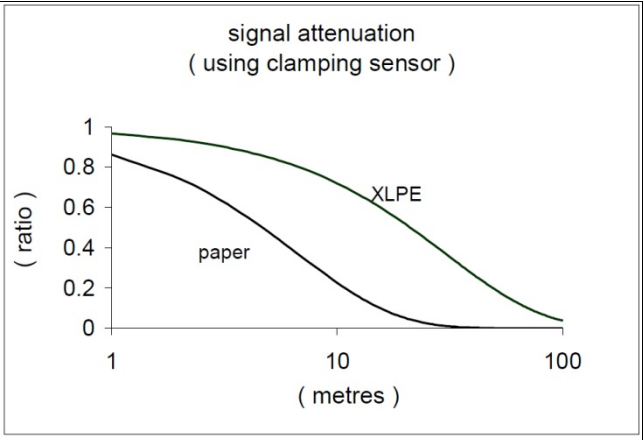


Fig.4: Attenuation in paper and XLPE cables

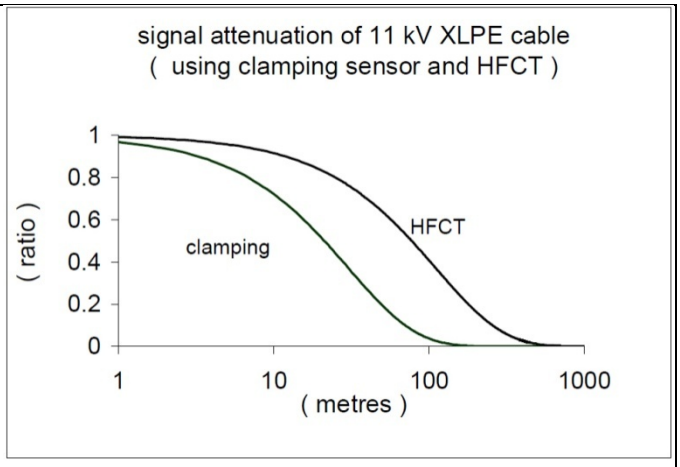


Fig.5: Clamping sensor vs HF-CT.

The rise-times of the PD pulses vary in the order of nano-seconds to several tens of ns.
The pulse widths can extend from a few ns to some hundreds of ns.
Thus, the bandwidth of the PD signal can extend up to 1 GHz. Conventional electrical PD detection is limited to the lower frequency range (<1MHz) where the noise level is relatively higher than that in the upper frequency band.
Therefore, the high frequency detection technique used here (>2MHz) would give a better SNR.
Frequency response measurement of the HF-CT sensor shows an upper limit of ~300MHz. The upper cut-off of the clamping sensor is much higher, at least >500MHz.
However, the high frequencies in both paper/oil and extruded cables are quickly attenuated.
This is shown in Fig.4 for the clamping sensor. The attenuation is much higher in paper/oil cable.
It should be noted that the allowable PD level in paper cables is also much higher.
Also, since the HF-CT can measure the lower frequency components, its signal attenuation characteristic is better than that for the clamping sensor (Fig.5).
Therefore, the HF-CT is better suited for monitoring long cables where PDs may occur far away from the sensor.
On the other hand, the attenuation of HF components can be used to advantage in monitoring cable accessories with the clamping sensor.

검토의견: 1) 2001년 오스트레일리아에서 발표된 자료를 보면
-. 그림4에서 고주파는 Paper/Oil, CV케이블에서 급격히 감쇠
-. 감쇠정도는 Paper/Oil케이블이 CV케이블보다 크다.
-. Paper/Oil케이블이 CV케이블보다 PD허용Level이 높다.
-. 그림5에서 HFCT가 Clamping Sensor보다 감쇠특성이 양호하고, PD검출센서로 부터 멀리 떨어진 위치에서도 Clamping Sensor보다 효과적
2) 본 자료는 케이블 길이에 따라 PD신호의 전파시에 크기의 **감쇠형태가 지수함수적으로** 감쇠하고 있다는 사실을 대략적이나마 나타낸 **가장 오래된 자료임**.
따라서 외국에서는 2000년대초부터 고주파PD신호가 케이블을 따라 전파시 지수함수적으로 감쇠된다는 사실을 인지하고 있었던 것으로 추정된다.
3) 그리고, 지금부터 약 13년전의 검토사항으로써는 HFCT가 Clamping Sensor보다 주파수 특성이 좋기 때문에 멀리 떨어진 위치에서 PD발생시에도 적용가능성이 있다는 사항이며,
4) 지금까지 약13년 동안의 HFCT를 이용한 CV케이블의 PD검출측면에 있어서 어느 정도의 기술발전과 효과가 있었을까?
향후에도 거리에 따른 감쇠 및 파형변형의 문제를 HFCT는 해결할 수 있을 까?????

본 자료는 허락없이 인쇄물/site 에 공개해서는 안됩니다만, 출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014 년 12 월 20 일

④ <출전: LIMITATIONS IN THE APPLICATION OF ON-LINE AND OFF-LINE PD MEASUREMENT SYSTEMS, CIRED 2005 18th International Conference on Electricity Distribution>

Attenuation of PD Pulses Along A Uniform Cable

A fast partial discharge pulse is rich in both high and low frequency content when it is represented in the frequency domain. However, the high frequency content cannot propagate through the cable for reasons already described and is increasingly attenuated as a function of cable length. Both the magnitude and the shape of the pulses therefore change as they propagate with a finite velocity along a cable.

Figure 1 shows the results of a simulation in terms of the peak voltage produced by a current transducer placed at a substation when a 20000pC PD pulse originates at a PD site in a cable (i.e. 10000pC propagates to the substation and 10000pC proceeds in the opposite direction down a semi-infinite cable length). As is expected, the magnitude of the voltage measured at the CT decreases as the distance the PD must propagate to the substation increases. The most important consequence of this decrease in partial discharge magnitude is the ultimate reduction in the output of the CT to below the noise level present within the measuring environment. The figure clearly shows the need to correct measured partial discharge pulse levels as a function of cable length.

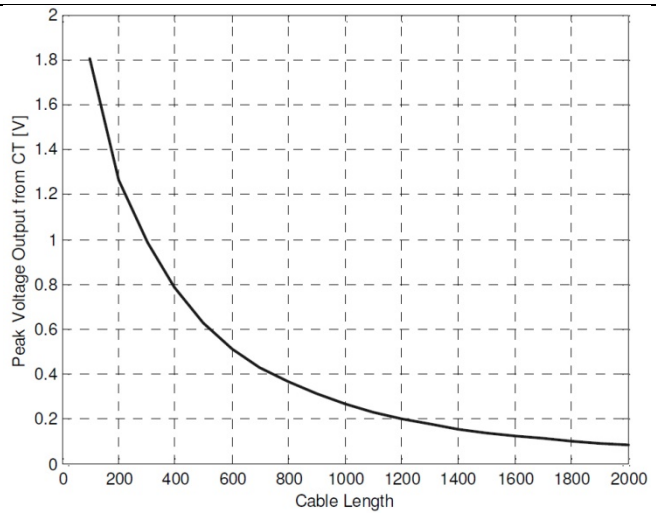


그림1. Measured signal versus distance

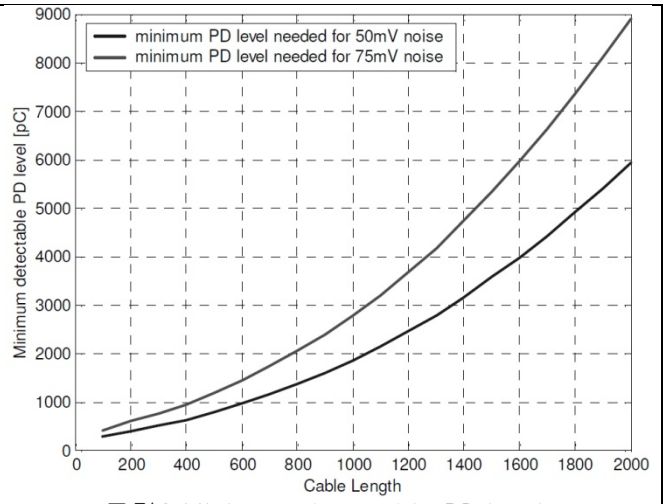


그림2 Minimum detectable PD level

With any form of measurement, but particularly for on-line techniques, continuous 'white' noise-levels of at least a few mV can be expected within a substation environment although transient power electronic noise present on cable sheaths can be magnitudes higher than this level.

The consequence of this noise is to limit the level of PD that can be detected at the substation.

Figure 2 shows the minimum PD levels required to cause triggering of a detection circuit at a substation when the noise level is 50mV or 75mV. It can be seen that for a cable length of 2km and a noise level of 50mV, a 6000pC pulse would be the minimum required for detection.

검토의견: 1) 2000년대 중반기인 2005년에 CIRED(국제 배전기술협의회)회지에 발표한 자료를 보면 그림1과 같이 PD검출센서로부터 멀리 떨어진 위치에서 PD발생시에 케이블을 따라 전파하면서 PD검출센서에 검출되는 PD신호크기가 지수함수 형태로 감쇠한다고 구체적으로 기술 PD발생위치의 신호의 크기가 2,000mV인 경우에 400m떨어진 위치에서 PD검출시 PD검출센서에는 800mV검출 (약60%가 감쇠하고 약40%정도만 검출).

2) 한편, 그림2에서는 완전히 제거할 수 없는 노이즈가 약50mV인 상태에서 케이블 길이가 600m위치에서 PD발생시에 최소로 측정할 수 있는 PD Level이 1,000pc.

3) 노이즈 Level관련하여 발표된 자료를 보면 2003년도 한양대 박사논문에서 변전소내 케이블 단말부에서는 노이즈 Level이 약50mV정도의 크기로 검출되고 있다고 기술. (현재 2014년에는 전자설비의 증가로 노이즈 Level은 더욱 증가하였을 것으로 추정)

4) 그러면 CV케이블에 있어 판정기준중 교체에 해당하는 100pc~500pc정도를 검출하는 경우, 노이즈가 약50mV Level에서 그림2을 보면 약100m위치에서 500pc의 PD발생해도 검출할 수 있을 까???

5) 참고: CV케이블의 PD판정기준중 교체Level
한국원자력- 100pc초과, EMERSON사 - 500pc초과 (PLIC는 10,000pc초과)

⑤ <출전: Characteristics of partial discharge pulses propagation in shielded power cable, Elhanafi Ouatah 외, Electric Power Systems Research 99 (2013) 38- 44>

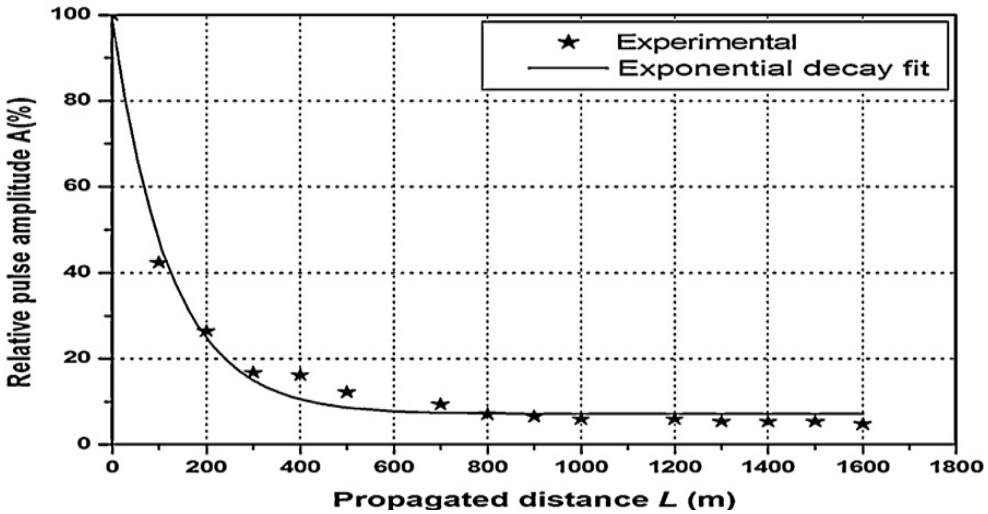


Fig 1. PD pulse relative amplitude A(%) as a function of the propagated distance L at 28 MHz frequency.

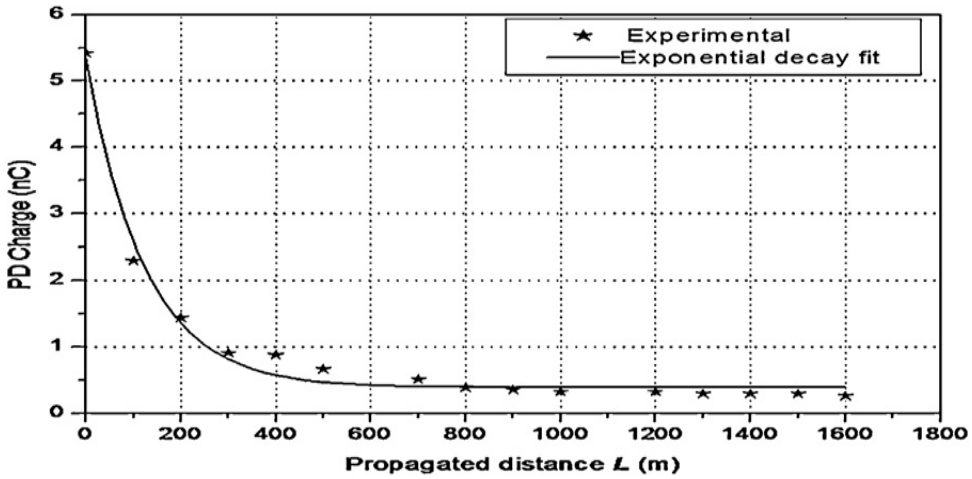


Fig 2. PD level as a function of the propagated distance L at 28 MHz frequency.

검토의견: 1) **최근 2013년도에** Electric Power Systems Research학술지에 발표한 자료를 보면 그림1과 그림2는 XLPE케이블 50m의 시료를 사용하여 시험과 Simulation한 data로 **거리에 따라 PD신호가 케이블 따라 전파하면서 검출되는 PD신호크기가 지수함수 형태로 감쇠**하는 것을 시험과 Simulation으로 확인한 자료

2) 본 자료에서는 차폐동Tape의 영향을 고려하지 않은 것이지만, 그림1과 그림2에서 PD발생지점에서 100이라는 크기가 발생하면 100m떨어진 위치에서는 약40%의 크기검출 200m떨어진 위치에서는 약 25%의 정도의 크기를 검출할 수 있는 것으로 추정.

3) 따라서 본 자료에 의하면, HFCT를 변전소의 단말측에 설치하여 케이블의 부분방전 상태를 감시하는 경우에 XLPE케이블이 **변전소로부터 200m정도 떨어진** 위치의 XLPE케이블에서 100pc정도의 부분방전(PD)가 발생하고 있다면 변전소에 설치된 **HFCT에서는 25pc의 PD크기를 검출할** 수 있을 것이다. (Noise 및 다른 특성 고려않고)

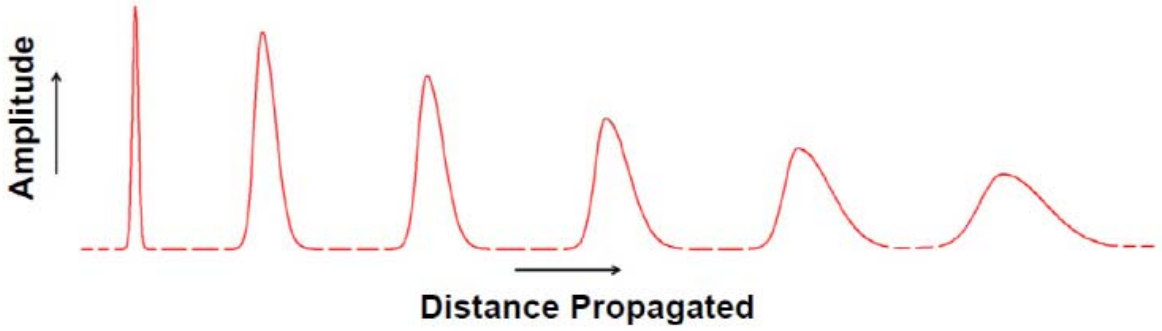
4) 한편, **변전소에서 설치된 PD센서인 HFCT에서 25pc정도의 PD크기를 검출했다면** 변전소로부터 100m위치에서는 약62.5pc 크기의 PD발생한 값에 해당하고, 200m떨어진 위치에서는 약100pc 크기의 PD발생한 값에 해당하고, 400m떨어진 위치에서는 약160pc 크기의 PD발생한 값에 해당하는데,,,, **PD가 발생한 위치를 모르는 상태에서는 25pc, 62.5pc, 100pc, 160pc 어느 것인지???**

본 자료는 허락없이 인쇄물/site에 공개해서는 안됩니다만, 출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014년 12월 20일

⑥ <출전: On-line Partial Discharge (OLPD) Monitoring of Complete High Voltage (HV) Networks in the Oil & Gas Industry, 2014년 10월, 영국HVPD사 기술자료>

HVPD PD Pulse Parameters with Distance Propagated

- At the discharge source the PD pulse can be modelled by a Dirac-δ function, with a broad frequency spectrum and a very fast (< 1 ns) rise time.



- As a PD pulse propagates from its source (within the machines' stator winding) to the machine terminals and then along the feeder cable from the machine back to switchgear, **it changes shape (as shown above)**.
- These changes occur due to the effects of attenuation and dispersion as the cable/stator winding acts as a low-pass filter, stripping out the high frequency content of the pulse and developing into a '**Shark-Fin**' shape.

검토의견: 1) 최근 2014년에 PD장비 제조사인 영국 HVPD사의 기술자료에 공개된 자료와 같이, 그림과 같이 케이블의 거리에 따라 전파하면서 PD신호 크기가 감쇠하고, 또한 펄스가 변형되고 있다는 것을 간략하게나마 보여주고 있다.

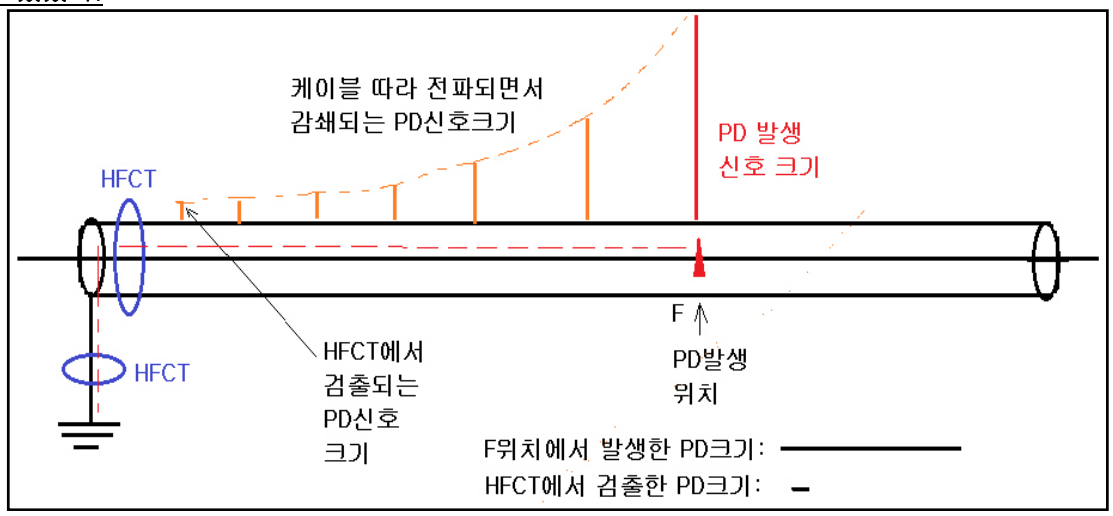
그림에는 거리에 따라 지수함수적으로 감쇠되는 것을 표현되지 않았지만, 지금까지 국내, 일본, 국외자료의 최근까지의 자료를 보면 케이블 거리에 따라 급격히 감소하는 지수함수 형태로 감쇠된다는 사실은 분명하다.

그리고, 본 자료는 PD장비 제조사에서 케이블의 거리에 따라 전파되면서 PD Pulse의 감쇠 및 파형의 변형의 형태를 공개한 사실이 중요하고,

영국HVPD사의 다른 자료를 보면 2000년 하반기부터 크기의 감쇠와 파형의 변형에 대해 기술한 자료들이 있지만, 본 자료와 같이 한눈으로 PD신호의 감쇠와 파형변형을 쉽게 파악할 수 있도록 나타낸 자료는 본 자료이전에 공개된 HVPD사의 자료는 찾지 못했다.
한편, 최근에야 PD장비 Maker인 HVPD사가 공개한 것이. . . . .???

< 검토의견 종합 : 2014 년 12 월 20 일

상기에서 일본과 일본외의 외국에서 연구 또는 공개된 자료를 보면,
케이블 선로에 있어 PD 발생시 고주파 펄스의 PD 신호가 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 현상에 있어 지금부터 약 20 년전인 1990 년 중반부터 구체적으로 전력케이블에 있어 고주파 PD 펄스의 신호크기는 빠르게 감쇠하며, 다음 그림과 같은 형태로 PD Pulse 신호의 크기가 감쇠경향을 가지는 것으로 파악하고 있었다.



그림] 외국에서 2000 년이후 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD 신호크기 감쇄특성 예

PD 발생위치와 PD 검출센서와의 거리에 따른 감쇠정도에 관한 여러 자료를 검토한 결과,
① 시험 또는 Simulation 시에 적용하는 PD Pulse 신호의 waveform 및 Pulse width 의 사양과,
② 시험 또는 Simulation 에 적용한 케이블 종류(XLPE, PLIC 등)과,
③ 시험 또는 Simulation 에 적용한 케이블 차폐층구조종류(WIRE, TAPE)
④ 시험 또는 Simulation 에 적용한 케이블의 길이 등에 따라 감쇠크기의 정도의 차이가 발생하는 것으로 추정되고 있지만, (Simulation 외 실험은 주로 100m 이하의 케이블 시료 사용,Noise 작다)
근본적으로 상기의 그림과 같이 PD 발생위치와 PD 검출센서간의 거리에 대한 감쇠정도가 거리가 멀수록 지수함수 형태로 감쇠된다는 사항에 대해서는 모든 결과가 동일하였다.

2010 년 이후에 발표된 일본자료를 포함한 외국자료를 종합분석한 결과,
동차폐구조를 가진 CV 케이블과 동 TAPE 가 산화되지 않은 상태의 CV 케이블에 있어 100m 떨어진 위치에서 PD 발생한 크기의 50%이상 감쇠되어 50%이하의 크기를 PD 검출센서에서 검출할 수 있는 것으로 판단되며,
(200m 위치에서는 약 70%이상 감쇠, WIRE SHIELD 구조에서는 감쇠정도 증가)
장기간 사용으로 인한 차폐동 TAPE 의 산화가 발생한 케이블에서는 더더욱 감쇠정도 증가됨.

따라서 실제 현장에서 현장 Noise 가 발생하고 있고, 장기간 사용하고 있는 CV 케이블의 부분방전(Partial Dischaarge, PD)검출시에 수십 m 이상 떨어진 위치에서 PD 발생한 것을 PD 신호의 케이블따라 전파시의 파형변형 특성을 제외하더라고, PD 신호 크기의 감쇠 때문에 고주파 PD 검출센서 1 개로 정상적으로 PD 상태를 검출할 수 있을까 ???????

그리고, 향후 검토할 PD 신호의 케이블 전파시의 파형변형특성을 추가 고려하면 고주파 PD 검출센서에 의해 수십 m 이상 떨어진 위치의 PD 검출은 더더욱 ?????

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

본 자료는 허락없이 인쇄물/site 에 공개해서는 안됩니다만,
출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014 년 12 월 20 일