

## HFPD 검출법을 이용한 지중 케이블 실선로 진단

이전선\* 김충식\* 이동근\*\* 공충호\*\*\* 석광현\*\*\* 이경욱\*\*\*  
 LG전선\* M-Power\*\* 한국전력\*\*\*

### Diagnosis of power cable system based on the HFPD detection at on-site

J. S. LEE\* C. S. KIM\* D. G. LEE\*\* C. H. KONG\*\*\* K. H. SEOK\*\*\* K.W.LEE\*\*\*  
 LG Cable\* M-power\*\* KEPCO\*\*\*

**Abstract**-HFPD(High Frequency Partial Discharge) measurement has been widely performed to diagnosis of cable system in the world although Korea just begin. The efficiency of measurement has been reported and proved by many researchers who are engaged in the diagnosis of high power apparatus. LG Cable has investigated the technology of diagnosis for cable system by means of PD measurement for 10 years.

In this paper, PD measurement with portable device was performed to evaluate the quality of the 154kV transmission line and the 22.9kV XLPE cable line. Test results are shown that the HFPD detection technology is very attractive for the diagnosis of power cable system by high detection sensitivity at on-site.

### 1. 서 론

송배전 전력케이블의 사고 유형을 보면 절연체 내부의 초기 결함이나 시공 불량에 의한 초기 고장이 대부분이지만, 사용 연수 증가에 따른 전기적, 기계적, 열적 스트레스에 의한 사고 가능성도 배제할 수 없다. 특히 국내에서도 노후 선로가 증가하는 추세에 있으며 이에 따라 진단에 대한 필요성도 크게 대두 되고 있다. 송전케이블의 경우, 열화진단으로서 가장 신뢰할 수 있는 방법은 보이드나 전기트리 개시 또는 진전될 때 발생하는 부분방전 측정이지만, 그동안 실선로에서는 측정감도나 설비적인 문제로 적용이 곤란하였다. 그러나 고주파 신호 처리기술과 센싱 기술을 적용한 부분방전 측정기술로 측정감도를 획기적으로 향상시켰다. 고주파 부분방전 측정(HFPD: High Frequency Partial Discharge Measurement)법으로 불리는 이 기술은 수 ~ 수십 MHz 대역의 주파수 영역에서 부분방전을 측정하는 기술로서 [1,2], 국내외적으로 초고압 선로의 준공시험과 노후 선로 진단에 적용되고 있다[3]. 또한 이러한 HFPD 측정기술은 선진 외국에서는 배전 케이블 진단에도 적용 사례가 증가하는 추세에 있고 국내에서도 송전케이블 진단에 적용했던 측정기술을 배전케이블 접속함 진단에 적용하여 수차레 부분방전을 검출하였고 사고를 미연에 예방하였다.

본 논문에서는 국내 최초의 345kV XLPE 케이블 선로의 준공시험으로서 적용하여 선로의 안정성을 입증하였던[4] HFPD 측정 기술을 초고압 케이블 노후 선로 진단에 적용하였다. 노후선로 진단은 2004년 2월부터 6개월 동안 진행 예정되어 있어 현재 진행 중이고 국내 초고압 케이블 진단 기술을 더욱더 향상시키는 계기가 될

것이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고주파부분방전 측정기술

HFPD 측정이란 부분방전의 측정 주파수 대역을 수 내지 수백 MHz의 고주파 영역에서 측정하는 것을 말한다. 케이블 절연층을 비롯하여 각종 전력기기에서 발생하는 부분방전 진류 펄스는 수백 psec의 펄스 상승시간 및 수십 nsec정도의 펄스 지속시간을 갖는다. 이러한 부분방전 신호의 주파수 스펙트럼을 보면 수백 MHz까지의 주파수 대역에 분포한다. 또한 외부 노이즈 신호는 기존의 저주파 측정법에서 사용하는 주파수 대역(400~800kHz)에서는 월드롬 등을 사용해야만 측정할 수 있을 정도로 크게 유입되지만 고주파 대역으로 갈수록 크게 감소된다. 그림 1은 전력구에 포설된 케이블 시스템에서 측정된 부분방전과 노이즈의 스펙트럼으로서, 10pC의 PD 펄스의 경우 30MHz 까지 신호가 존재하지만 노이즈는 20MHz 이하의 대역에만 존재한다.

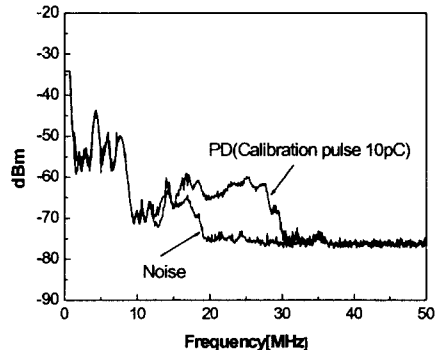
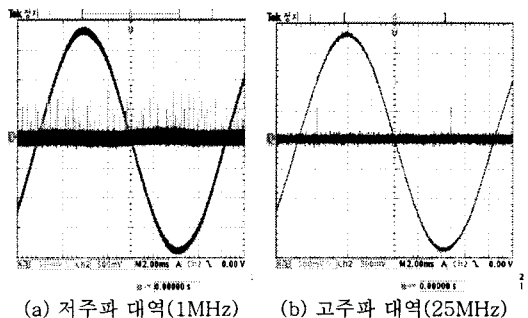


그림 1 백그라운드 노이즈와 PD펄스의 주파수 스펙트럼



(a) 저주파 대역(1MHz)

(b) 고주파 대역(25MHz)

그림 2 주파수대역에 따른 부분방전 펄스 검출

그림 2는 측정주파수에 따른 부분방전 검출 결과로서 1MHz대역에서 측정하는 경우 노이즈로 인하여 부분방전 펄스를 구분할 수 없지만 25MHz 대역의 경우 부분방전 펄스를 확연히 구분할 수 있다. 따라서 부분방전 신호의 주파수 특성을 이용하여 최적의 S/N비를 가지는 고주파 대역을 선정하여 부분방전을 측정할 경우 실선로에서 부분방전 측정이 가능하고 측정 감도를 크게 높일 수가 있다.

2.2 측정 시스템 구성

그림 3과 같이 절연접속함의 절연통 양쪽에 2쌍의 금속 박센서를 설치하고, 센서에서 검출된 광대역 신호는 앰프를 통해 측정기 본체에 입력된다. 측정기 본체에서는 주파수 분석을 통하여 S/N비가 가장 우수한 주파수 대역의 100kHz 밴드 폭을 가진 신호를 검출한다. PD 패턴 분석은 오실로스코프에서 방전위상과 방전량을 측정하고, PD 패턴 분석 소프트웨어를 이용하여  $\phi-q-n$  패턴을 분석한다. 그림 3은 휴대형 측정 시스템의 구성도이다. 각 접속함별 측정 방법 및 calibration 방법과 측정결과는 다음절에서 상세히 기술하였다.

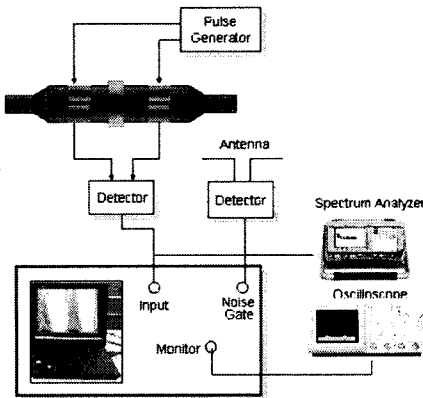


그림 3 부분방전 검출 시스템

2.3 지중송전선로 진단

2.3.1 선로개요

본 선로는 그림 4과 같이 신인천 변전소와 인천 변전소를 연결하는 1988년에 포설되어 16년 동안 운전되어온 전장 7.8km 선로이다. 신인천 변전소에서 JB 14 구간은 XLPE 케이블로 포설되었고, JB 14에서 이중 접속되어 인

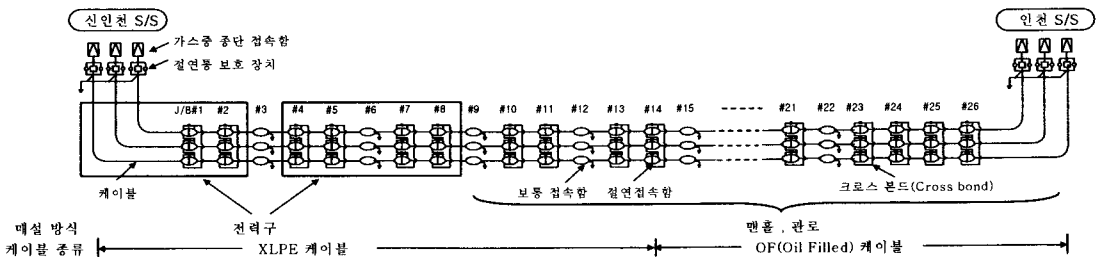
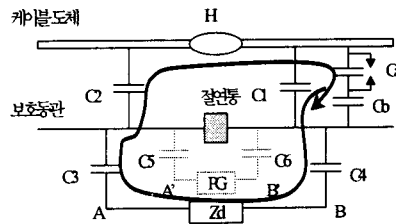


그림 4 노후선로진단 시범선로 회로도

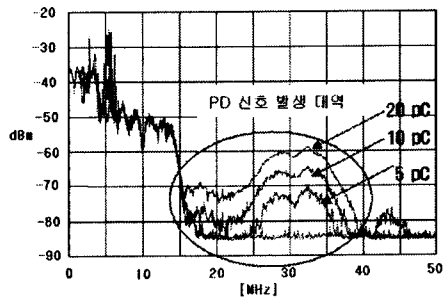
천 변전소까지는 OF(Oil Filled) 케이블로 포설되었다. 절연 접속함(Insulation joint: IJB) 57개, 보통 접속함(Normal joint: NJB) 21개 그리고 GIS로 연결되는 종단 접속함(EBG) 6개로 구성되어 있다. 또한 전력구와 관로 포설구간이 존재하여 포설방식에 따른 부분방전 검출 특성 시험이 가능하다.

2.3.2 절연접속함 진단

절연접속함(IJ)은 PVC 방식층 표면에 절연통을 좌 우로 하여 한 쌍의 금속 박 전극을 설치하고, 금속 박 전극과 보호동관 사이에 형성되는 커패시터로서 내부 부분방전을 커플링(coupling) 하는 방식을 적용하였다. 그림5(a)는 등가회로로서 접속함 내부에서 부분방전이 발생할 경우, 절연통을 경계로 한 반대 편 케이블은 C2에 의한 커플링 커패시터 역할을 하게 된다. 이때 금속 전극에 의해 형성된 C3, C4는 부분방전 Pulse 전류의 경로를 만들고 Zd에 부분방전이 커플링 된다. 그림 5(b)는 5, 10, 20pC의 calibration 펄스를 인가하였을 때의 주파수 스펙트럼으로서 20~40 MHz의 대역에서 검출 된다. 측정감도는 XLPE 케이블과 OF 케이블 접속함 모두에서 5pC 이하의 고감도 측정이 가능하였고, 전력구나 관로 포설방식에 따른 차이는 발견되지 않았다.



(a) 부분방전 검출 원리



(b) 주파수 스펙트럼

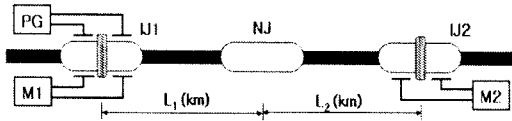
그림 5 절연접속함의 부분방전 검출

### 2.3.3 보통 접속함 진단

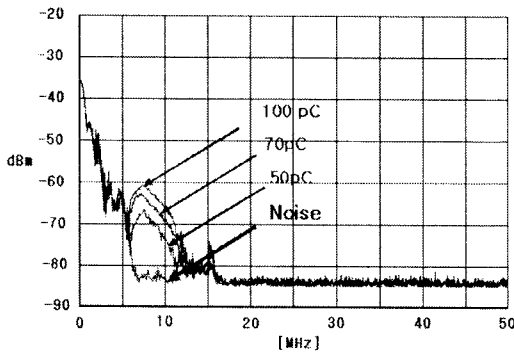
보통 접속함(NJ)은 절연통이 없고 동관으로 연결되어 있어 부분방전 펄스 전류가 입피턴스를 통하지 않고 동관을 통하여 흐르기 때문에 그림 5(a)와 같은 원리의 금속박 센서를 적용할 수 없다. 따라서 NJ에서 발생되어 전파된 부분방전펄스를 인접 JJ에서 검출하는 간접측정방식을 적용하였다. 간접측정방식의 calibration 방법은 그림 6(a)와 같이 JJ1의 PG 에서 calibration 펄스를 인가하고 JJ2에 부착된 센서(M2)를 통해 검출한다. 이 경우 신호는 약600m 길이의 케이블을 전파하므로 크기가 작아지고 고주파 성분은 감쇄된다. 그림 6(b)는 주파수 분석 결과로서 JJ의 경우 수십 MHz대역에서 검출되지만 NJ의 경우 상대적으로 저주파 대역인 5~12MHz에서 신호가 검출되어 고주파 신호의 감쇄를 확인할 수 있다. 이 같은 방법으로 calibration한 결과 XLPE 케이블 구간에서는 10~30pC의 측정감도를 가진다.

이같이 NJ 접속함의 부분방전 검출방법은 JJ의 측정감도에 비해 다소 떨어지지만 JJ와 NJ 사이의 케이블 절연체에서 발생된 부분방전도 검출되므로 케이블 절연체의 진단도 병행된다는 장점을 가진다.

관로에 포설된 OF 케이블 구간과 XLPE 케이블 보다 측정감도가 저하되는 결과를 나타내었다. 이 같은 결과는 XLPE케이블과 OF 케이블의 유전율과 구조 등의 차이로 인해 신호의 감쇄량이 커지기 때문으로 측정대역에 존재하는 노이즈의 크기를 감쇄시켜 S/N비를 높이는 방안을 강구하고 있다.



(a) 간접 측정 방식 calibration 방법



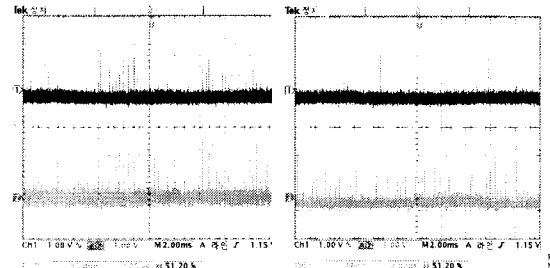
(b) 주파수 스펙트럼

그림 6 보통접속함의 부분방전 검출

### 2.3.4 중단 접속함 부분방전 진단

중단 접속함(EBG)에서는 인접한 가공선로에서 발생하는 큰 코로나 방전으로 인하여 저주파에서 수백 MHz 이상의 광대역에서 상당히 큰 신호가 검출된다. 그러므로 주파수 tuning 방식에 의한 노이즈 제거는 불가능하다. 이에 본 선로의 시험에서는 안테나 센서를 이용한 노이즈 게이팅법

을 적용하였다. 그림 7은 측정결과로서 노이즈 게이팅전(그림 7a CH1)에는 부분방전 펄스를 구분할 수 없지만 노이즈 게이팅 후에는 20pC 이하의 부분방전 펄스를 검출할 수 있었다.



(a) 노이즈 게이팅 전 (b) 노이즈 게이팅 후

그림 7 노이즈 게이팅법을 이용한 중단 접속함 PD 검출 (CH1: 박센서 검출, PD + 노이즈) (CH2: 안테나 신호 검출, 노이즈)

### 2.4 배전 케이블 진단

배전 케이블의 경우 송전 케이블보다 열악한 환경에 포설되어 운전되기 때문에 사고의 발생 빈도가 높고, 특히 화학 공장이나 IT 제품을 생산하는 공장의 경우 정전으로 인한 손실은 치명적이다.

그림 8은 운전 중 절연파괴 사고가 발생한 케이블 중단 접속부 사진으로 반도체층이 끝나는 스트레스 콘 부분에서 절연파괴가 발생되었으며 배전 케이블 사고의 상당부분을 차지한다. 이러한 유형의 사고는 부분방전 진단법을 이용하여 사고가 발생되기 전에 진단 가능하다.



그림 8 배전 케이블 중단 접속부에서 발생한 절연파괴 사진

#### 2.4.1 배전 케이블 부분방전 진단

그림 9는 중단 접속부의 접지선에 HFCT 센서를 설치하여 측정된 노이즈 스펙트럼으로 저주파 대역에서 고주파 대역까지 전대역에 걸쳐 큰 노이즈 신호가 존재하고 부분방전 신호와 유사한 펄스성 노이즈가 존재함을 알 수 있다. 이러한 노이즈로 인하여 부분방전 검출법을 이용한 배전 케이블 중단 접속부 진단은 쉽지 않다. 그리고 2.3.4 절에서 제시한 송전케이블의 중단 접속함 진단 방법을 적용하여 코로나 방전으로 인한 펄스성 노이즈의 영향은 어느 정도 제거할 수 있지만 완전히 제거하기는 어렵다. 따라서 배전케이블의 중단 접속함을 신뢰성 있게 진단할 수 있는 다양한 방법을 연구하고 있다.

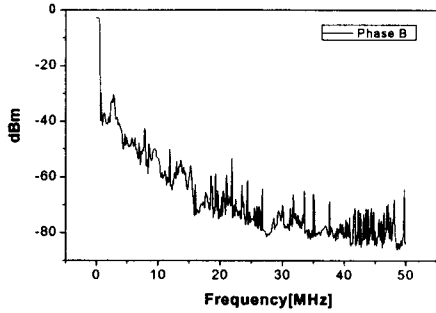
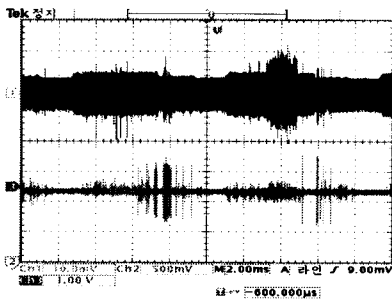
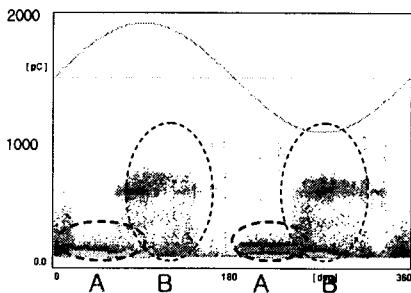


그림 9 배전 케이블 중단접속부의 노이즈 스펙트럼 (HFCT 센서 이용)

센서의 종류에 따른 배전케이블을 진단 방법으로는 유도성 센서, 용량성 센서, 초음파 센서, UHF센서를 적용하는 부분방전 검출 기술을 연구하고 있으며 실케이블 진단 시 적용하고 있다. 그림 10(a)는 그림 8의 사고가 발생한 접속함과 동시에 설치된 중단 접속함에서 초음파센서와 HFCT센서를 이용하여 검출한 부분방전 신호이다. 그림 10(b)는 HFCT 센서에서 검출된  $\emptyset$ -q-n 부분방전 패턴으로 B 부분은 코로나로 인한 전형적인 패턴을 나타내었고 A부분은 부분방전이 발생된 주기와 초음파 센서에서도 크게 검출된 것으로 보아 중단 접속함 내부에서 발생된 신호로 사료된다.



(a) CH 1: 초음파 센서, CH2 : HFCT 센서



(b)  $\emptyset$ -q-n 패턴 (HFCT센서)

그림 10 배전케이블 중단 접속부에서 검출한 부분방전 신호

### 3. 결 론

345kV 신영등포 T/L의 준공시험에 적용하여 그 유효성과 신뢰성을 인정받았던 HFPD 검출방법을 초고압 지중 케이블 시범선로 진단과 배전케이블 진단에 적용하였다.

초고압 지중케이블 시범선로 진단은 PD 진단이 완료된 후 상세한 진단결과를 발표할 예정이지만 현재까지 본 선로의 HTPD 진단결과를 요약하면 다음과 같다. XLPE와 OF 케이블 절연접속함(IJ, EBG)의 경우 고감도 PD 측정이 가능하였으며 케이블의 종류와 포설 방식에 따른 감도차는 없었다. 그러나 OF 케이블의 NJ의 경우 XLPE 케이블보다 감도가 낮게 측정되어 향후 이에 대한 연구가 진행될 예정이다.

XLPE 배전케이블 진단 시 부분방전 검출방법의 적용이 가능하며 특히 접속부 진단 시 유용한 방법으로 사료된다.

### [참고문헌]

1. E.Pultrum, M.J.M.Vanreit, "HF partial discharge detection of HV extruded cable accessories", GICABLE 95 4th international conference on insulated power cables, Paris France, June 25-29, 1995
2. Su-Kil Lee, et al. "Characteristicsof high frequency partial discharge for artificially defected extra high voltage accessories," IEEE conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.682-685, 2000
3. E.Pultrum, E.F.Steennis, M.J.M.Vanreit, "Test after laying, diagnostic testing using partial discharge testing at site", CIGRE session 15/21/33-12, 1996
4. C.S.Kim, J.S.Lee, C.Y.Lee, W.N.Kim, "On-site PD measurement for after-laying test of 345kV XLPE cable system in Korea", Proceedings of J-K Symposium on ED & HVE, pp. 125-128, Nagasaki, Japan, Nov.. 6-7, 2003