

인위적인 결함을 이용한 기존의 저주파 부분방전과 고주파 부분방전의 패턴 비교 연구

최재옥\*, 이진선\*, 임윤석\*, 김정태\*\*, 구지윤\*  
 \* 한양대학교 전기공학과 ( EM&C ), \*\* 대진대학교 전기공학과

A comparison of the conventional LFPD and HFPD patterns by use of artificial

J.O. Choi\*, J.S. Lee\*, Y.S. Lim\*, J.T. Kim\*\*, J.Y. Koo\*  
 \* Han Yang University. ( EM&C ), \*\* Dae Jin University.

**Abstract** - In this paper, Partial Discharge(PD) patterns are compared by means of Low Frequency PD(LFPD, based on the IEC 270) and recently proposed High Frequency PD(HFPD).

For this purpose, three different types of artificial defects are provided such as corona in air, void in epoxy insulator and needle defect in XLPE cable insulation. PD were generated from each defect and then detected respectively by two different methods such as LFPD and HFPD

As a result, remarkable resemblance in PD pattern for differ detecting method have been observed from each defect. Accordingly, it could be deduced that the pattern recognition by LFPD could be regarded as the reference for the investigations by HFPD

있고 저주파 케이블의 경우 공중파 노이즈보다는 접지를 통해 유입되는 노이즈가 대부분이다. 일본의 측정 결과에 의하면 전력구에서 발생하는 노이즈는 30MHz 이하에서만 발생하는 것으로 제시되었다.[5] 따라서 고주파 대역에서 부분방전을 검출하는 방법은 외부노이즈의 영향이 비교적 적은 영역에서 부분방전을 측정하기 때문에 현장에 설치된 전력기기 진단에 유용하다.

본 연구는 고주파 보정펄스와 접지로부터 유입되는 노이즈가 중첩되었을 때의 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 전자파 차폐가 되어있지 않은 지하 실험실에서 22.9kV급 배전용 지중 케이블의 접지선에 2-100MHz 대역의 HFCT센서를 이용하여 주파수 스펙트럼을 분석한 결과는 그림 1(a)와 같으며 접지를 통해 유입되는 노이즈는 10MHz에서 -68.18dBm이었다. 그림(c)는 100pC의 고주파 보정 펄스와 외부 노이즈가 중첩됐을 때의 오실로스코프 파형이며 이를 주파수 스펙트럼 분석한 결과는 그림(b)와 같으며 30MHz까지 주파수 스펙트럼이 발생하였다.

1. 서 론

IEC 270 규격에 의거하여 외부 노이즈가 차단된 차폐실과 같은 시험실에서 수백 kHz대역의 저주파 부분방전 검출은 0.1pC까지 가능한 것으로 보고되고 있다.[1] 그러나, 전력기기가 운영되는 현장에서는 백그라운드 노이즈로 인하여 저주파 부분방전 검출 시스템의 적용에 문제가 제기되고 있다.[2]

최근 이와 같은 문제점을 극복하고자 수 MHz-수백 MHz 대역의 고주파 영역에서 부분방전을 측정하는 기술이 연구되고 있다. 이러한 고주파 부분방전(HFPD) 검출 방법은 비교적 외부 노이즈의 영향이 적은 고주파 영역에서 측정하기 때문에, 측정감도를 향상시킬 수 있으며, 개개의 부분방전펄스를 측정하여 결함 판별 능력을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.[3]

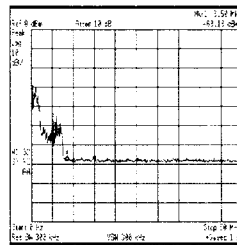
본 논문에서는 부분방전을 기존의 수백kHz 대역(LFPD)과 수MHz-수백MHz 대역(HFPD)에서 검출하여 얻은 두 가지 부분방전 패턴을 비교하려고 한다. 이를 위해 코로나, 보이드 그리고 전기트리와 같은 인위적 결함을 이용하였다.

기존의 수백 kHz대역 부분방전 측정은 Robinson사의 측정 주파수 대역이 200-800kHz인 CT형 센서를 사용하였고, 고주파 대역 부분방전 신호는 ICM사의 2-20MHz 주파수 대역을 가지는 고주파 CT형 센서를 사용하여 동시에 측정하였으며 측정된 신호는 LabVIEW를 이용하여 자체 개발한 통계적 분석 프로그램을 이용하여 분석하였다.[4]

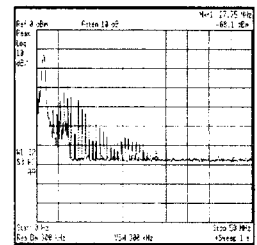
2. 본 론

2.1. 고주파 대역의 부분방전 측정의 필요성

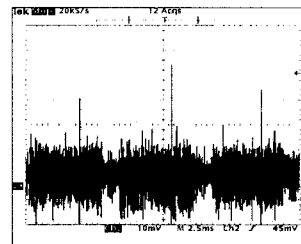
전력기기에 유입되는 노이즈는 크게 공중파에 의한 노이즈와 접지를 통해 유입되는 노이즈로 구분할 수



(a) 외부 노이즈



(b) 중첩 파형의 스펙트럼



(c) 외부 노이즈에 보정펄스가 중첩된 파형

그림 1. 접지를 통해 유입되는 노이즈와 보정펄스의 주파수 분석

이러한 실험결과와 수백kHz 대역에서 부분방전 신호를 측정하여 정확한 PD 신호검출이 불가능함을 보여 주고 있다. 따라서 부분방전 측정을 이용한 전력기기 진단법은 노이즈의 영향을 최소화시킬 수 있는 10MHz 이상의 고주파 영역에서 부분방전을 측정해야

현장 적용성을 높일 수 있다. 또한 기존의 IEC 270 규격에 의거해 측정된 부분방전 패턴과의 비교 연구는 필수적이라 할 수 있다.

## 2.2. 부분방전 측정 시스템 및 분석 요소

### 2.2.1. 측정 시스템 구성 및 센서 특성

부분방전 측정시스템 구성은 그림 2와 같다. Robinson사의 CT형 센서(LFCT)를 사용하여 저주파 대역의 부분방전 신호를 검출하였고, ICM사의 CT형 센서(HFCT)를 사용하여 고주파 대역의 부분방전 신호를 측정하였다. 동시에 측정된 신호는 LabVIEW를 이용하여 자체 개발한 통계적 분석 프로그램으로 분석하였다.

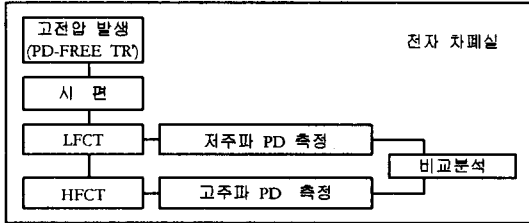


그림 2. 부분방전 측정 시스템

부분방전 측정에 사용된 상용화된 센서의 주파수 특성을 확인하기 위하여 Function Generator와 Spectrum Analyzer를 사용하였으며 측정 결과는 그림 3과 같다. ICM사의 CT 센서는 2-20MHz의 측정 주파수 대역을 가지고 있으며, 측정 대역에서의 출력은 Robinson사의 CT 센서보다 10dBm 크게 나타났다.

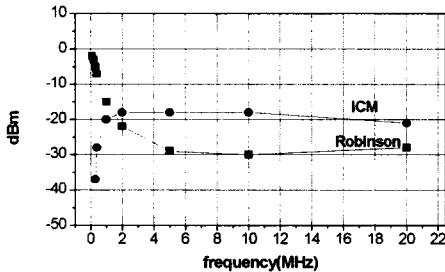
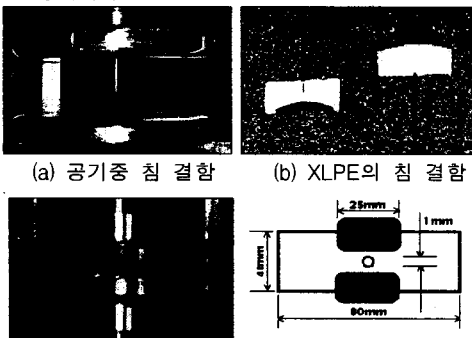


그림 3. 센서의 주파수 특성 비교

### 2.2.2. 인위적 결함

그림4는 세 종류의 인위 결함 모습이다. 그림(a)는 공기 중에서의 코로나 실험을 위한 침 결함을 나타내고 있고, 그림(b)는 전기적인 트리 실험을 위하여 전력케이블 절연체인 XLPE 시편에 침을 삽입한 형태이고, 그림(c)는 보이드 실험을 위해 에폭시수지 안에 보이드 결함을 삽입한 형태이다.



(c) 에폭시절연체에서의 침 결함  
그림 4. 각종 인위 결함들의 모델링

### 2.2.3. 부분방전 패턴 분석 요소

부분방전 패턴을 분석하기 위해서 기본적으로  $\phi$ -q-n 패턴을 분석하였고 추가적으로 표 1과 같은 통계 연산자를 이용하여 분석하였다.[6]

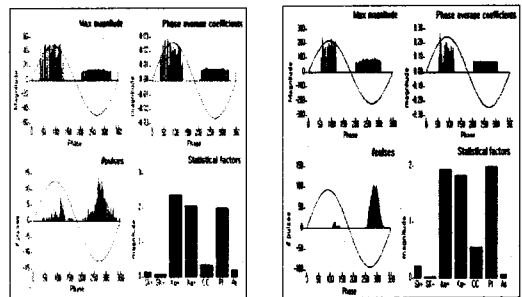
표 1. 각종 통계 분석 수식

수식	통계량
$S = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^3 q_i}{Q\sigma^3}$	Skewness : 왜도 (분포의 치우침 정도)
$K = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^4 q_i}{Q\sigma^4}$	Kurtosis : 첨예도 (분포의 첨예한 정도)
$r = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} \cdot S_{YY}}}$ $S_{XY} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ $S_{XX} = \sum (x_i - \bar{x})^2$ $S_{YY} = \sum (y_i - \bar{y})^2$	Correlation coefficient : 상관계수 (정/부극성 분포의 상관도)
$P_j = \frac{\phi_{ic}^-}{\phi_{ic}^+}$ $\phi_{ic}^-$ : 부극성 방전 개시위상 $\phi_{ic}^+$ : 정극성 방전 개시위상	Phase factor : 위상 요소 (개시위상의 차이)
$A(\phi) = \frac{(Q_i^-/N^-)}{(Q_i^+/N^+)}$	Asymmetry : 비대칭계수 (비대칭 정도)

## 2.3. 인위 결함의 LFPD와 HFPD의 패턴 비교 및 분

### 2.3.1. 코로나 방전

코로나 방전은 침의 곡률 반경이 100 $\mu$ m인 스테인레스 재질의 침 전극(Ogura사 제품)을 사용하였고 침 끝과 접지전극 사이의 거리는 3cm로 유지하였으며, 인가 전압은 방전 개시 전압의 120%를 유지하여 실험하였다. 통계적 분석을 위해 인가 전압의 900주기에 해당하는 방전 신호를 측정된 결과는 그림 5와 같다. 최대 방전을 발생하는 위상 구간은 정극성 방전 신호의 경우 LFPD:40-125, HFPD:50-120°이며 부극성 방전 신호의 경우 LFPD:200-320°, HFPD:200-310°이다. 이들 위상 구간은 거의 같으며 통계적 factor도 매우 유사한 결과를 보였다.



(a) LFPD pattern

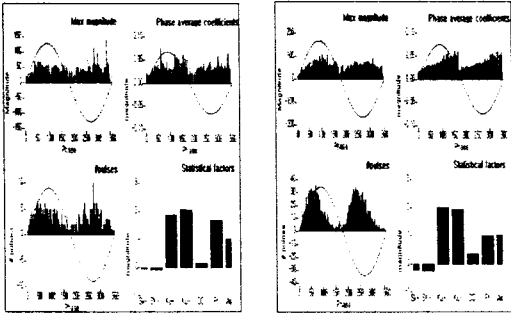
(b) HFPD pattern

그림 5. 코로나 방전의 패턴

### 2.3.2. 전기트리 방전

154kV XLPE 케이블 절연층에서 추출한 시료에 곡률 반경이 10 $\mu$ m인 침을 삽입하여 침 끝과 접지전극 사이가 3mm가 되도록 만든 시편에, 12kV의 전압을 인가하여 덤블형 전기트리를 발생시킨 후 측정된 부분방전 신호는 그림 6과 같다. 고주파 대역과 저주파 대역에서 검출된 부분방전 패턴의 통계적 분석은 다음과 같다. 두 대역에

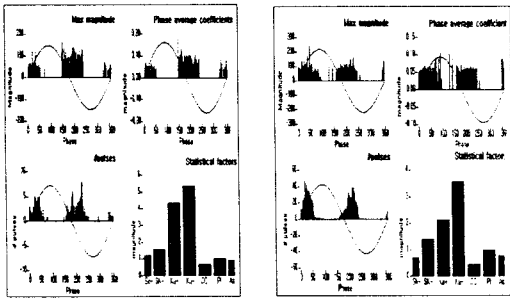
서의 통계적 factor는 다 같이 왜도(Skewness)는 음의 값, 첨초도(Kurtosis)는 양의 값, 상관계수, 위상요소 및 비대칭 계수는 양의 값으로 나타나 서로 유사함이 증명되었다.



(a) LFPD pattern (b) HFPD pattern  
그림 6. 전기트리 방전의 패턴

### 2.3.3 보이드 방전

보이드 방전은 에폭시 절연체 내부에 실린더형 보이드(지름:1mm, 높이:1mm)를 인위 삽입하고 방전 개시 전압의 120% 전압을 인가하여 측정하였다. 통계 분석 결과 고주파 대역에서 측정된 부분방전 패턴과 저주파 대역에서 측정된 부분방전 패턴의 위상분포 및 방전 형태가 유사했으며 통계 factor 역시 유사함을 그림 7을 통해서 알 수 있다.



(a) LFPD pattern (b) HFPD pattern  
그림 7. 보이드 방전의 패턴

코로나, 전기트리 및 보이드의 인위 결합에서 발생하는 부분방전 신호의 통계적 분석을 통하여 각각의 결합별 통계적 factor들은 서로 다르게 나타났다. 이는 통계적 분석을 통하여 결합의 종류를 구분하는데 좋은 판별력을 제공함을 의미한다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 외부 노이즈의 스펙트럼 분석과 각종 인위 결합에서 발생하는 부분방전 신호를 고주파 센서와 저주파 센서를 사용해 동시에 측정하여 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. HFCT 센서(측정대역:2-100MHz)를 이용하여 접지를 통해 유입되는 외부 노이즈를 측정했을 때 10MHz 이내의 주파수 대역에 노이즈 스펙트럼이 분포하였다. 따라서 현장에 설치된 전력기기를 진단하기 위해서는 S/N 비가 높은 10MHz 이상의 고주파 대역에서 부분방전을 측정하여야 함을 확인하였다.

2. 고주파 대역에서 검출한 부분방전 패턴과 저주파 대역에서 검출한 부분방전 패턴이 매우 유사하게 나타나 IEC 270 규격에 의거해 측정된 데이터를 고주파 대역에서 검출한 부분방전 패턴인식에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 기초전력공학 공동연구소 및 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터의 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부로 이에 감사 드립니다.

## (참 고 문 헌)

- [1] F.H.Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Equipment" Butterworths, 1989.
- [2] Edward Gluski, "Computer-Aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools", Delft University Press, Delft, Netherlands, 1991.
- [3] Okamoto, T., Tanaka T., "Novel Partial Discharge Measurement Computer-aided Measurement Systems", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 21, pp. 1015-1019, 1986
- [4] J.Y. Koo, et al, "A possible application of the PD detection technique using electro-optic Pockels cell with nonlinear characteristic analysis on the PD signals", pp. 531-534, CEIDP-IEEE, 2000
- [5] Katsuta, G, et al "Development of a method of Partial Discharge detection in extra-high voltage cross-linked polyethylene insulated cable lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, pp. 1068-1079, 1992
- [6] E. Gluski, F. H. Kreuger "Computer-Aided Recognition Discharge Source", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, pp. 82-92, 1992