

고주파 부분방전(HFPD) 측정용 하이브리드 센서 개발에 관한 연구

김지홍\*, 구자윤\*, 김정태\*\*  
 \*한양대학교(EM&C), \*\*대진대학교

A development of the Hybrid Sensor for the detection of the High Frequency Partial Discharge (HFPD)

J.H. Kim\*, J.Y. Koo\*, J.T. Kim\*\*  
 \*HanYang Univ. EM&C, \*\*Daejin Univ.

**Abstract** - In general, CT and Shunt have been traditionally used as a sensor for detecting the partial discharges in order to diagnose the present insulation state of the electric power apparatus. The former is very convenient for the practical application since it is not only non-contact method but its frequency bandwidth and resonance frequency could be designed for its specific application. However, it has been proved to have poor linearity and low sensitivity. For the latter, even though it is an ideal sensor, noise from the power source and the ground could flow into the system. Furthermore, the surge current could be easily come into the measuring systems giving rise to a severe breakdown.

In this respect, a hybrid sensor has been designed and fabricated in order to overcome the shortcoming of these two types of sensors. For this purpose, the experimental comparison with commercialized products has been also carried out. In this concept of the hybrid sensor, two different impedances could provide the passage of the signals. In this way, the discrimination of the noise could be accomplished very effectively with high ratio of signal over noise(S/N) under the little influence from the external noises and the breakdown.

1. 서 론

전력설비의 절연상태를 진단하기 위해 부분방전 신호를 이용하는데, 부분방전 측정을 위한 센서로는 CT와 Shunt를 이용한 방법이 많이 사용된다.

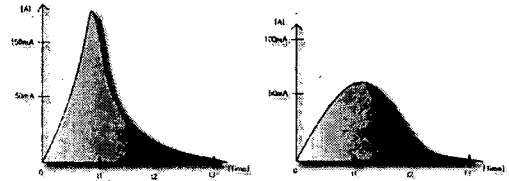
CT는 비 접촉식 방식이기 때문에 사용이 편리하고, 공진점을 이용하여 특정 주파수 대역을 이용할 수 있다는 장점에 비해, 측정 감도의 선형성 문제점과 측정감도가 떨어진다는 단점이 있고, Shunt는 가장 이상적인 감도를 지닌 센서이지만 전원노이즈(60Hz)와 접지노이즈의 유입이 매우 쉽고, 사고시 계측 시스템에 과도전압이 유입되는 결정적인 단점이 있다. 따라서 본 고에서는 CT와 Shunt의 단점을 보완하고, 장점을 최대한 살린 하이브리드 센서에 대해 다루고자 한다. 본 연구진이 개발한 하이브리드 센서는 임피던스를 두가지(Two ways) 경로로 분리하여 서로 다른 주파수의 신호를 구분하는데 매우 뛰어난 성능을 보인다. 특히 전원 노이즈(60Hz) 및 주변노이즈 성분의 유입이 매우 적고, 신호대 잡음비(S/N)가 크며 BD 발생시 낮은 임피던스 영역으로 대전류가 흐르도록 설계하여 측정 시스템에 안전을 도모하였다.

하이브리드 센서의 신뢰성 평가를 위해 코로나 방전과 모터 고정자의 부분방전 시험 및 케이블 접속재의 계면 결합에 따른 부분방전 측정을 기존의 신뢰성 있는 상용 제품과 비교하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 고주파 부분방전의 정량화 작업

IEC270에 의거한 부분방전량을 측정하는 방법은 커패시터(C<sub>k</sub>)와 시험대상물(C<sub>t</sub>)사이에서 전류 i(t)가 흐르게 하여 이 전류를 측정하는 방법으로, C<sub>k</sub>>>C<sub>t</sub>인 경우 전하량  $q = \int i(t)dt$ 로 구할 수 있다.



(a) i<sub>1</sub>(t) 방전량 (b) i<sub>2</sub>(t) 방전량  
 그림 2-1 방전량 비교

이것은 흐르는 전류의 면적의 합으로 나타나는데,  $\int i_1(t)dt = \int i_2(t)dt$ 이면, 검출된 크기(magnitude)가 달라도 방전량이 면적의 합으로 주어지기에 그림 2-1의 (a)와 (b)의 방전량이 같다고 볼 수 있다. 하지만 고주파 부분방전(HFPD)에서는 커패시터가 부재하고, 측정 센서에 따라 그 면적을 달리하기에, 새로운 센서마다 기존 방전량 측정 방식에 비례하는 정량화 작업이 필요하다.

따라서 본 고에서는 HFPD 측정에 실제 많이 사용되는 미소전압의 크기를 이용하여 기존의 방전량과 비례하는 실험식을 구해 Hybrid 센서에 적용하였고, 이에 대한

선형성 검증은 R<sup>2</sup>계급값인  $R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$  (식 2.1)

$SSE = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$ ,  $SST = (\sum Y_i^2) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}$  로 검증하였다.

2.2 Calibration

전력기기에서의 부분방전 측정 시스템을 평가하기 위해 일반적으로 Calibrator 신호를 이용하는데, 이는 현장에서 부분방전신호를 측정시스템에 바로 적용하기 전에 이러한 보정펄스를 이용하여 측정 시스템의 성능을 정확히 평가하기 위함이다. 그림 2-2는 본 연구에서 개발된 Hybrid 센서를 측정하기 위해 사용된 PD사의 고주파용 캘리브레이터의 방전량에 따른 주파수 파형이다. 방전량은 1pC에서 100pC까지 단계별로 출력하였고 방전량에 따른 주파수응답도 일정함을 볼 수 있다.

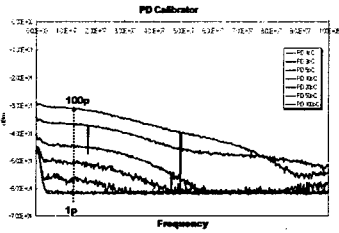
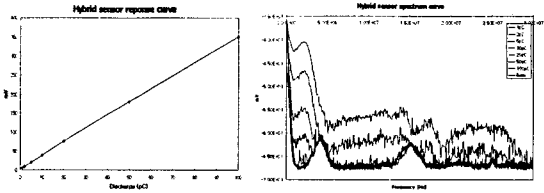


그림 2-2 방전량에 따른 Calibrator의 주파수 응답특성



(a) Calibrator를 이용한 방전량에 따른 응답곡선  
(b) Calibrator 방전량에 따른 Hybrid 검출파형

그림 2-4 Hybrid 센서의 응답특성

그림 2-4 (a)에서의 데이터의 추세식은 식 2.2와 같고,

$$y = 3.4877x + 3.0437 \quad (\text{식 2.2})$$

$$R^2 = 0.9997$$

$R^2$ -제곱값은 0.9997로써 식2.2의 가설을 받아들일 수 있다. 그림 2-4 (b)는 Calibrator 방전량에 따른 Hybrid 센서의 검출파형을 모두 한곳에 실은 그래프이다.

### 2.3 Hybrid 센서

CT센서와 Shunt센서는 각각의 많은 장점들이 있음에도 불구하고, 감도와 안전을 고려 할 때 상반되는 단점을 갖고 있기에 분리되어 현장 적용 시 많은 기술적 불편을 야기 시킬 수 있다. 따라서, 현장 적용을 염두에 두고 두가지 형태의 장단점을 이용한 하이브리드 형태의 센서를 개발하였으며 그 기술적 배경은 다음과 같다.

#### 1. CT센서의 장점 이용

- 특정주파수의 공진점을 이용해 S/N비를 높일 수 있다.

#### 2. Shunt센서의 장점 이용

- 측정 감도가 좋다.  
- 파형이 오실레이션 없이 깨끗하다.

#### 3. 하이브리드 센서의 고유 특징

- 전원노이즈(60Hz) 및 기타 주변노이즈의 성분의 유입이 매우 적다.  
- S/N비가 크다.  
- BD 발생시 측정 시스템에 안전을 도모하였다.

그림 2-3은 하이브리드 형태의 부분방전 검출센서의 기본회로도도 임피던스의 두가지 부분을 결합한 형태이다. 여기에서 유의할 점은 전체의 임피던스와 측정하고자 하는 Shunt의 값과의 매칭이다. 전원주파수를 포함한 낮은 주파수의 노이즈 성분들은 Low frequency 경로를 타고 접지로 유입된다. 고주파 부분방전 신호는 세라믹 커패시터 C1을 통하여 R1 양단에서 측정된다. 여기서 L2의 역할은 접지노이즈의 저감뿐만 아니라 측정단자의 더미 인덕턴스 역할을 해준다. 사고시 대전류는 Low frequency 경로로 흘러 계측기의 영향을 최소화하도록 하였다.

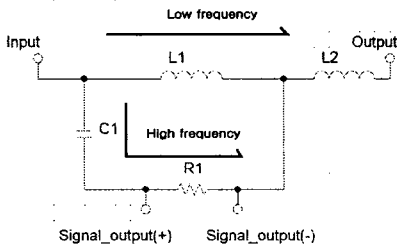
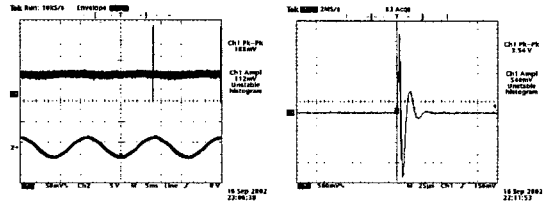


그림 2-3 하이브리드 센서의 기본 회로도

#### 2.3.1 Hybrid 센서의 응답특성

그림 2-4 (a)는 Calibrator의 방전량은 1, 2, 5, 10, 20, 50 100pC씩 증가 시켰고, 이에따른 CT센서의 응답특성을 Envelop mode로 128번 데이터를 축적한 후 Pk-Pk 평균값을 구한 것이다.

#### 2.3.2. 유증코로나 방전 측정실험

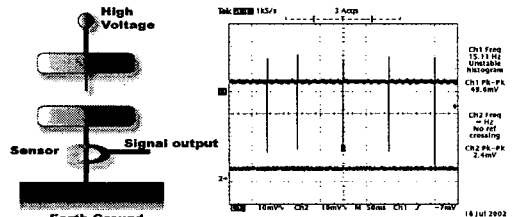


(a) 10pC (b) 유증 코로나방전 Single shot  
그림 2-5 Hybrid 센서를 이용한 유증코로나 측정파형

그림 2-5 (a)는 Hybrid 센서를 이용한 유증코로나 측정파형으로 작은 방전량에도 센서의 응답 특성이 좋게 나타남을 볼 수 있다. 또한 높은 신호대 잡음비(S/N)비는 높은 감도특성을 말해준다. 파형에 Shunt와 달리 전원노이즈의 유입이 없고 오실레이션이 작음을 그림 2-5 (b)의 Single shot에서 알 수 있다.

#### 2.3.3 코로나 방전 비교측정 실험

하이브리드 센서를 이용한 침대평판 전극 구조의 공기 중 방전 측정을 위한 실험은 그림2-6 (a)와 같이 측정 시스템을 구성하여 수행되었으며, 본 연구를 통하여 개발된 하이브리드형 센서의 성능을 객관적으로 비교하기 위하여 A사가 상품화하여 국제적으로 고주파부분방전 측정 장비로 인정은 받고 있는 범용 CT 센서를(부분방전 측정 주파수 대역은 1MHz ~ 100MHz) 이용하여 동일한 측정 대상에 대한 측정결과를 서로 비교하였다. 두 센서를 동일한 위치에 흐르는 전류방향과 수직되게 A사의 CT를 설치하였다.



(a) 시험 구성도 (b)A사의 센서와 감도 비교시험

- CH 1 : 하이브리드형 센서  
- CH 2 : 기존 해외 상용제품 (A사 100MHz용 CT센서)

그림 2-6 침대평판 전극을 이용한 코로나 방전 측정실험

그림 2-6 (b)의 코로나 실측 파형에서 볼 수 있듯이 같은 방전량(10pC)을 발생시키고 같은 위치에서 동시에 측정하였을 때, 동일 조건에서 A사의 CT는 코로나 방전을 측정하지 못하는 반면에 하이브리드형 센서는 높은 신호대 잡음비(S/N)로 코로나를 검출함을 볼 수 있다. 또한 Shunt의 문제점 중 하나인 전원주파수(60Hz)의 유입문제도 해결되었다.

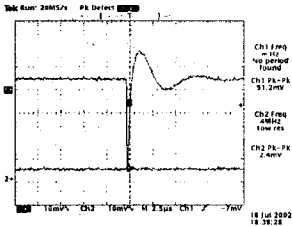
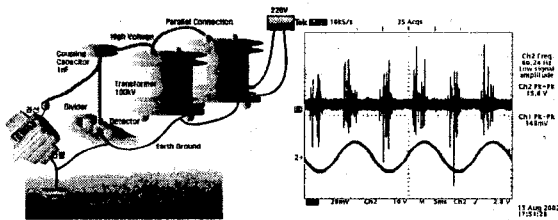


그림 2-7 코로나 방전신호 single 파형

그림 2-7 Single 부분방전 신호에 대한 하이브리드형 센서의 응답 특징을 살펴보면, 파형 자체가 전형적인 Shunt형 센서의 응답 파형과 유사하며 기술적 어려움으로 제기되었던 CT형 센서의 오실레이션과 노이즈 성분이 크게 감소되었다. 반면에, A사의 CT형 센서는 전혀 검출하지 못한 것으로 판명되었다.

**2.3.4 하이브리드 센서를 이용한 전동기 부분방전 측정**  
본 연구팀이 개발한 하이브리드 센서를 이용하여 전동기 고정자의 권선과 외함의 절연상태를 측정하기 위하여, 결선한 시스템 구성이 그림 2-8 (a)에 나타나있다.



(a) 시험 결선도 (b) 측정 파형  
그림 2-8 50마력 전동기 부분방전 측정

그림 2-8 (b)는 전동기에서 측정된 부분방전 신호로서 인가전원의 정극성과 부극성 최대값에서 발생됨을 볼 수 있다. 여기서의 CH2 전원 파형은 분압기를 이용한 것으로 인가전원과 하이브리드 센서의 인덕턴스 성분으로 인한 위상지연을 확인하기 위한 것으로, 측정결과 TE571 장비와 분압기 모두 동상으로 이상없이 잘 나타났다. 이것은 하이브리드형의 센서가 측정회로 위상에 영향을 주지 않음을 보여준 것이다.

이러한 결과들은 코로나 부분방전 측정의 경우, A사의 국제적으로 상용화된 센서보다 감도와 신호대 잡음비(S/N) 그리고 파형의 형태 등 기술적으로 고려되어야 하는 요소들에 대하여 본 연구팀이 개발한 하이브리드 센서의 우수성이 입증되었고, 또한 전동기 부분방전 측정 실험에서 센서자체의 임피던스로 인한 측정의 위상변화가 없음을 볼 수 있었고, 측정시 신호와 잡음을 구분할 수 있는 감도가 높음을 확인하였다. 아울러, 사고 시 계측기 보호기능이 하이브리드형 센서의 가장 큰 특징 중 하나이다.

### 3. 결 론

하이브리드형 센서는 CT와 Shunt의 장점을 이용한 것으로서, 측정감도가 높고, 전원노이즈와 같은 다양한

노이즈 제거효과가 뛰어나 신호 대 잡음비(S/N)가 높게 나타나며, 또한 Shunt의 문제점인 사고 발생에 의한 서지전압이 계측장치에 유입되는 문제도 임피던스를 이용하여 해결되어 측정 장치의 안전성이 향상되었다.

· 방전량 산출식 :

$$y = 3.4877x + 3.0437 \quad (x : \text{방전량}, y : \text{출력전압})$$

신뢰성 평가를 위해 세계적으로 상용되어지는 A사의 제품과 비교실험을 위해 공기중 코로나 방전과 전동기 부분방전등을 실제 차폐실에서 측정한 결과 CT형과 Shunt형 센서의 장점들이 실제에 반영된 하이브리드형 센서가 측정 감도와 안전성이 가장 우수한 것으로 판명되었다.

"본 연구(관리번호:00-역-02)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소가 주관으로 수행되었음"

### [참 고 문 헌]

- [1] Henry W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic System*, 2nd edition. pp.73~114
- [2] J.Y.Koo, "A study on the correlation between the PD pattern and the aspect of electrical trees propagation in the XLPE insulation of the underground power transmission cable", ICPADM - Xi' an 2000, June, 2000
- [3] W. Gross " Distortion of Phase Resolved Partial Discharge Pattern due to Harmonics and Saturation" CEIDP98, page1, 1998
- [4] B.A. Fruth, D. W. Gross, "Combination of Frequency Spectrum Analysis and Partial Discharge Pattern Recording", Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical on Electrical Insulation.