

논문 21-5-15

## 6.6 kV 회전기 고정자 권선에서 부분방전 신호 검출을 위한 평면 패치 센서 설계

### The Design of a Planar Patch Sensor for Partial Discharge Diagnosis in 6.6 kV Rotating Machine Stator Windings

임광진<sup>1,a</sup>, 박노준<sup>1</sup>, 김희동<sup>2</sup>, 주영호<sup>2</sup>, 박대희<sup>1</sup>  
(Kwang-Jin Lim<sup>1,a</sup>, Noh-Joon Park<sup>1</sup>, Hee-Dong Kim<sup>2</sup>, Young-Ho Ju<sup>2</sup>, and Dae-Hee Park<sup>1</sup>)

#### Abstract

In stator windings of 6.6 kV rotating machine, corona discharge, surface discharge and internal discharge are caused mainly by internal voids and insulation degradation. Also, if partial discharge occurs in inner-part of stator windings, it will be happened electromagnetic pulses at wide frequency range. In case of discharge spark, electromagnetic pulse generated from discharge source, and we can detect it by using various RF resonators as an EM sensor. In order to detect these kind of electromagnetic sources, we have designed and fabricated planar patch sensor using CST MWS simulation, and also PD signals from artificial defected cable were measured by our proposed sensor. Furthermore, HFCT was used as a reference sensor and compared with our proposed new planar patch sensor.

**Key Words** : Rotary machine stator winding, Partial discharge, Planar patch sensor, HFCT sensor, Electromagnetic wave

#### 1. 서 론

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보와 함께 터빈 발전기, 수차 발전기, 대형 전동기 등의 회전기가 대용량화, 고전압화, 소형·경량화 됨에 따라 절연 고장 예방을 위한 절연 진단이 중요시되고 있다. 이들 회전기 고장의 대부분은 권선 소손이며 절연체 중에서 가장 중요한 부분은 고정자인 전기자 권선이다. 따라서 고정자의 절연 고장은 보수하는데 장시간이 요구되므로, 회전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 미연에 발견하고 불시 정지에 따른 파급을 막기 위해서는 상시감시가 요구된다[1,2].

회전기 고정자 권선의 절연열화 현상으로 1)권선 절연물 내부에 보이드(void)가 존재하여 발생하는 내부방전(internal discharge), 2)도선성페인트 말단부에서 전계의 집중으로 발생하는 코로나방전(corona discharge), 3)철심내부에서 권선의 진동 등에 의해 도선성페인트가 일부분 제거되어 발생하는 슬롯방전(slot discharge)등이 대표적인 결함으로 알려져 있다[3-5]. 이러한 부분방전들이 일어나면서 전압과 전류 펄스가 발생되며, 방전 스파크는 방전 위치에서 전송되는 RF 전자기파를 만들어 낸다. 부분방전에 의해 발생하는 전자기파는 100 kHz ~ 수백 MHz 범위에서 RF 주파수를 갖는다. 이러한 부분방전이 발생할 때 나타나는 전자기파를 안테나로 측정함으로써 검출감도가 좋고, 검출 범위가 넓어 하나의 센서로 광범위한 검출이 가능하게 된다[6,7].

본 연구에서는 절연파괴의 초기현상인 부분 방전 신호 검출을 위해 광대역 평면 패치 센서를 설계하였다. 또한 설계된 평면 패치 센서와 HFCT

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부  
(전북 익산시 신용동 344-2)  
2. 한국전력공사 전력연구원  
a. Corresponding Author : kwangjin@wonkwang.ac.kr  
접수일자 : 2008. 1. 11  
1차 심사 : 2008. 3. 21  
심사완료 : 2008. 4. 24

(High Frequency Current Transformer)센서로 모의결함을 가지고 있는 고정자 권선을 측정하였고, 이 두 개의 센서를 통해 스펙트럼 아날라이저(spectrum analyzer)에서 얻어지는 데이터를 비교하여 부분방전의 검출 성능에 대하여 살펴보았다.

## 2. 센서 제작 및 실험방법

### 2.1 센서 제작

본 논문에 사용된 평면 패치 센서는 마이크로 스트립의 형태로서 다양한 급전 방법과 패치형태에 의해 그 특성이 달라진다. 평면 패치 센서는 매우 얇은 금속박인 CPWG(Coplanar Waveguide Ground) 급전부와 평판 패치(patch) 그리고 접지면으로 구성되어 있다. 이때 금속박의 패치와 접지면은 유전체를 통해 분리하였다. 평면 패치 센서의 성능을 좌우하는 중요한 요소는 유전체의 두께이다. 유전율을 작게 함으로써 좋은 효율, 넓은 대역폭, 적은 공간 복사손실 면을 가질 수 있다.

급전부와 방사부의 정합 특성은 급전 마이크로 스트립 선로의 폭과 급전선로의 거리를 통해 조절할 수 있으며, 다음과 같은 수식으로 임피던스 정합을 구현할 수 있다[8,9].

도체내의 실효 유전상수는 식 (1)과 (2)에 의해 정의되며,

$$\epsilon_e = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (1)$$

$$q = \frac{K(k_1)/K(k'_1)}{K(k_1)/K(k'_1) + K(k_2)/K(k'_2)} \quad (2)$$

특성 임피던스 계산은 다음 식에 의한다.

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_e}} \frac{1}{K(k_1)/K(k'_1) + K(k_2)/K(k'_2)}$$

여기서, 도체와 유전체내에서의 전파 상수는 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{\tanh(\pi a/2b)}{\tanh(\pi b/2b)} \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{\tanh(\pi a/2b_1)}{\tanh(\pi b/2b_1)} \quad (4)$$

$$k'_i = \sqrt{1 - k_i^2}$$

그림 1은 제안된 평면 패치 센서의 구조이다. 평면 패치 센서의 제작 시 사용할 재료는 5 T 우드락으로써 비유전율  $\epsilon_r=1.06$ , 두께  $h=5.7$  mm이며, 급전부와  $t_1, t_2$ 의 재질은 전기도체(PEC)로 하였다. 센서의 파라미터 값은 표1을 통해 나타내었으며, 급전부( $W_5$ )는 5 mm이며, 급전부와 윗면 그라운드 사이의 거리( $W_4$ )는 3 mm, 평판 패치와의 거리( $W_2$ )는 5 mm의 간격을 유지하였다.

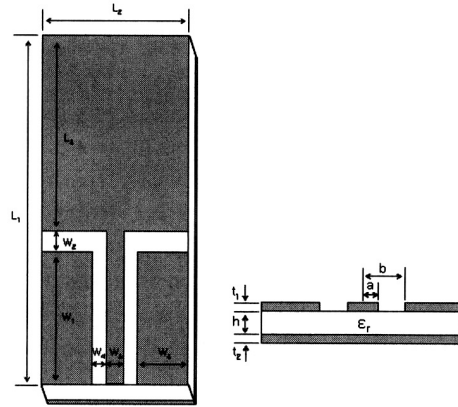


그림 1. 제안된 평면 패치 센서의 구조.  
Fig. 1. Geometry of the planer patch sensor.

표 1. 평면 패치 센서의 파라미터 값.  
Table 1. Parameter of planer patch sensor.

parameter	value [mm]	parameter	value [mm]
L1	150	W4	3
L2	50	W5	5
L3	85	t1	0.1
W1	60	t2	0.1
W2	5	h	5.7
W3	19.5	$\epsilon_r$	1.06

각각의 설정된 파라미터 값을 CST MWS(Computer Simulation Technology Microwave Studio) 프로 그래를 이용하여 그 특성을 확인하였으며, 이때 평면 패치 센서의 반사손실 값은 그림 2와 같다.

950 MHz에서 평면 패치 센서의 반사계수 최대 출력력을 나타내었다. 일반적으로 -10 dB 이하의 값을 갖는 주파수 대역을 그 안테나의 측정 주파수 대역으로 사용한다.

따라서 그림 2에서 보는 것과 같이 -10 dB 이하의 값을 갖는 주파수 대역은 약 150 MHz ~ 1.2 GHz 사이에서 나타나고 있으며, 센서 설계 시

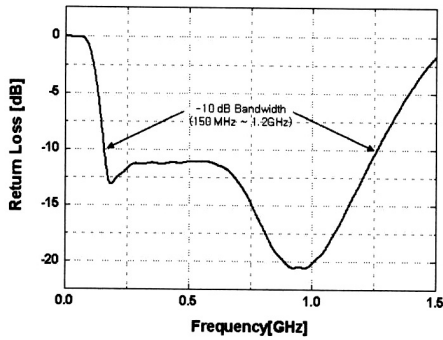
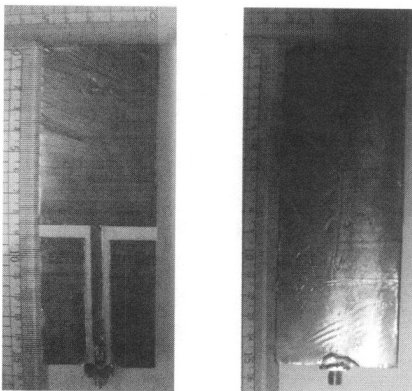


그림 2. 시뮬레이션의 반사손실.  
Fig. 2. Return loss of simulation.

고려한 100 kHz ~ 수백 MHz 범위에서 발생하는 부분방전 신호를 측정하기 위한 대역을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 실험 방법

그림 3과 같이 실제 평면 패치 센서를 제작하였다. 제작된 평면 패치 센서의 크기는 가로 5 cm, 세로 15 cm 이며, 이 센서를 이용하여 코로나 방전, 내부방전, 표면방전등의 모의 결함을 가지고 있는 고정자 권선에서 부분방전 신호를 측정하였다. 측정 시스템은 그림 4와 같이 구성도를 나타냈으며, 전원공급장치(Tektronix), 스펙트럼 아날라이저(Agilent, N9320A, 9 kHz ~ 3 GHz), Notebook PC, 평면 패치 센서(150 MHz ~ 1.2 GHz) 및 HFCT(0 ~ 50 MHz) 센서로 구성하였다. 각각의 센서는 스펙트럼 아날라이저를 통해서 크기와 주파수 사이의 관계를 나타내었다.



(a) 평면 패치 센서 앞면 (b) 평면 패치 센서 뒷면

그림 3. 제작한 평면 패치 센서.  
Fig. 3. Manufacturing planar patch sensor.

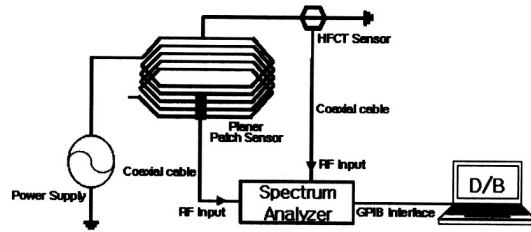


그림 4. 부분방전 측정 시스템.  
Fig. 4. Measuring system of PD.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험실 내부의 외부 노이즈 측정

실험실 주위 노이즈를 측정하기 위하여 HFCT 센서와 평면 패치 센서로 고정자 권선에 전압을 인가하지 않은 상태에서 스펙트럼 아날라이저를 이용하여 측정한 결과 그림 5와 같이 외부 노이즈가 측정되었다. HFCT 센서에서는 15 ~ 17 MHz와 24 ~ 26 MHz 주파수 대역에서 -9 dBm의 크기를 가지고 있는 외부 노이즈가 나타나며, 평면 패치 센서에서는 100 ~ 107 MHz와 187 ~ 205 MHz 주파수 대역에서 -20 dBm 크기의 외부 노이즈가 나타났다.

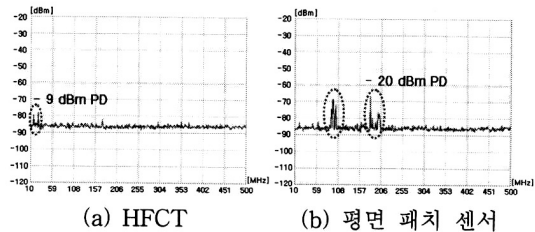


그림 5. HFCT 센서와 평면 패치 센서의 배경잡음.  
Fig. 5. Background noise of HFCT and planar patch sensor.

### 3.2 검출 신호의 분석

일반적으로 센서가 가지고 있는 신호 검출 대역은 다르나 실제 현장에서 이용되고 있는 HFCT 센서와 기존의 제작된 평면 패치 센서로 부분방전 신호를 측정하여 부분방전 신호 검출 성능을 알아 보았다.

HFCT 센서와 평면 안테나 센서로 모의 결함을 가지고 있는 고정자 권선에 4.5 kV, 6.6 kV의 전압을 인가하여 센서의 검출 특성을 측정하였다.

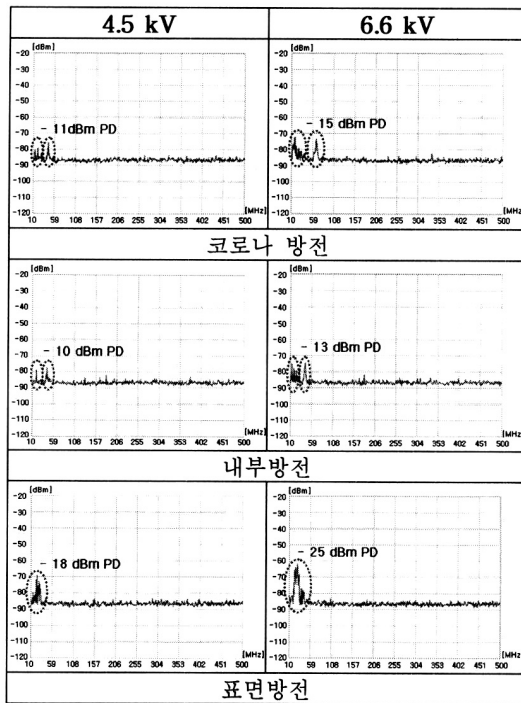


그림 6. HFCT 센서로부터 부분방전 신호 검출.  
Fig. 6. Partial discharge signal by HFCT sensor.

HFCT 센서의 경우 그림 6과 같이 부분방전 신호가 검출 되었으며, 코로나 방전의 경우 6.6 kV 인가했을 때 부분방전 신호는 10 ~ 40 MHz와 60 ~ 80 MHz 주파수 대역에서 최대 -15 dBm의 신호 크기가 측정 되었다. 내부방전은 10 ~ 30 MHz와 40 ~ 45 MHz에서 최대 -13 dBm의 부분방전 신호가 측정되었고, 표면방전은 20 ~ 50 MHz의 주파수 대역에서 -25 dBm의 부분방전 신호가 측정되었다.

따라서 HFCT 센서는 표면 방전에서 높은 측정 감도를 나타내었고, 인가된 전압이 높아짐에 따라 부분방전 신호가 넓은 대역에서 분포 되었으며, 신호 크기 또한 증가하는 것을 확인할 수가 있었다.

평면 패치 센서의 경우 코로나 방전에서 10 ~ 20 MHz와 120 ~ 160 MHz 그리고 250 ~ 310 MHz에서 부분방전 신호가 측정 되었으며, 최대 -17 dBm의 신호 크기를 나타내었다. 내부 방전에서는 10 ~ 15 MHz에서 -7 dBm 크기의 부분방전 신호와 108 ~ 138 MHz, 155 ~ 170 MHz, 240 ~ 265 MHz에서 최대 -16 dBm 크기의 부분방전 신호가 검출되었고, 표면방전은 148 ~ 177 MHz와 206 ~ 250 MHz에서 -23 dBm 크기의 부분방전 신호가 검출되었다.

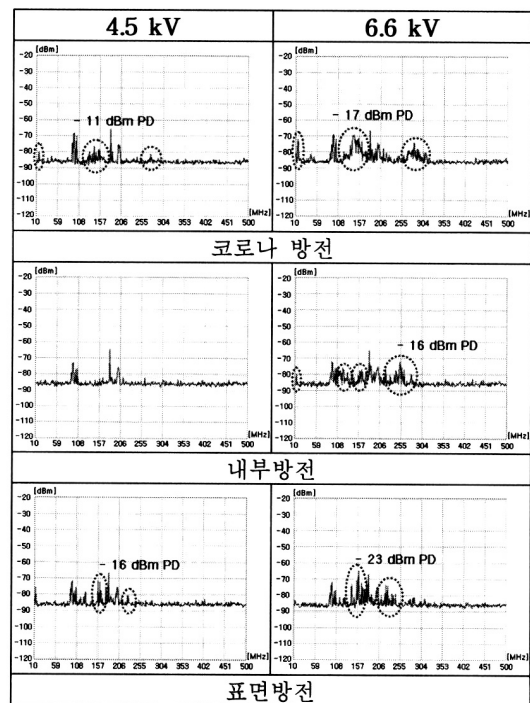


그림 7. 평면 패치 센서로부터 부분방전 신호 검출.  
Fig. 7. Partial discharge signal by planar patch sensor.

두 센서의 측정 데이터를 비교 하였을 때 평면 패치 센서의 경우 코로나 방전과 내부방전에서 높은 측정 감도를 나타내었으며, 표면 방전 경우에는 HFCT 센서가 높은 측정 감도를 나타내었다. 또한 평면 패치 센서는 광대역 검출 범위를 가지고 있어 넓은 대역에서 부분방전 신호가 검출됨을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 회전기 고정자 권선에서 100 kHz ~ 수백 MHz 범위에 발생하는 부분방전 신호를 검출하기 위해서 광대역 평면 패치 센서를 제작하였으며, 실제 현장에서 이용되고 있는 HFCT 센서와 평면 패치 센서로 코로나 방전, 내부방전, 표면방전의 신호를 측정하여 검출 성능을 비교하였다. HFCT 센서는 10 ~ 50 MHz와 60 ~ 80 MHz 주파수 범위에서 최대 -25 dBm 크기의 부분방전 신호검출 성능을 보였고, 평면 패치 센서는 10 ~ 20 MHz와 108 ~ 177 MHz, 206 ~ 310 MHz 대역에서 최대 -23 dBm 크기의 부분방전 신호 검출 성능을 보

였다. 평면 패치 센서는 HFCT 센서 보다 더 넓은 검출 대역을 가지고 있어 다양한 주파수 범위에서 부분방전의 신호를 검출할 수 있었으며, 검출 감도 또한 HFCT 센서와 비슷한 측정 능력을 가짐으로써 실제 센서로서의 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-0-074-0-00) 및 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성, 지원 사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] 오봉근, 김현일, 강성화, 임기조, “수력발전기 고정자 노후권선의 모의결합 시편에 대한 부분방전 파라미터 변화 분석”, 전기전자재료학회 논문지, 20권, 7호, p. 645, 2007.
- [2] I. M. Culvert, H. Hhirani, and G. C. Sone, “Handbook to assess the insulation condition of large rotating machines”, EPRI publication EL-5036, Vol. 16, 1989.
- [3] F. H. Kreuger, “Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment”, Butterworths, 1989.
- [4] 오무송, 김태성, “절연파괴 예측을 위한 트리방전의 영상처리에 관한 연구”, 전기전자재료학회 논문지, 14권, 1호, p. 26, 2001.
- [5] 김희동, “발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석”, 전기전자재료학회 논문지, 15권, 2호, p. 119, 2002.
- [6] IEEE Std 1434-2000, “IEEE Trail-Use Guide to the Measurement of PD in Rotating Machinery”, p. 2, 2000.
- [7] H. Okubo, H. Yamashita, N. Hayakawa, T. Ueda, and M. Hikita, “Electromagnetic spectrum radiated from gas discharges and its relation to partial-discharge characteristics”, ETEP, Vol. 7, No. 1, p. 57, 1997.
- [8] R. Mongia, I. Bahl, and P. Bhartia, “RF and Microwave Coupled-line Circuits”, Artech House Boston, p. 90, 1999.
- [9] 윤영중, 홍의석, 전계석, 김민준, 임영석, 정백호, “안테나 이론과 설계”, 교보문고, p. 261, 2000.