

## 저압 유도전동기에서 미소 부분방전 측정에 관한 연구

### A Study on the Measurement of Small Partial Discharges in a Low-voltage Induction Motor

길경석<sup>1,a</sup>, 송재용<sup>1</sup>, 서황동<sup>1</sup>, 황돈하<sup>2</sup>, 강동식<sup>2</sup>, 김용주<sup>3</sup>

(Gyung-Suk Kil<sup>1,a</sup>, Jae-Yong Song<sup>1</sup>, Hwang-Dong Seo<sup>1</sup>, Don-Ha Hwang<sup>2</sup>, Dong-Sik Kang<sup>2</sup>, and Yong-Joo Kim<sup>3</sup>)

#### Abstract

In this paper, we dealt with a partial discharge(PD) measurement method that has been accepted as an effective and non-destructive technique to estimate insulation performance of low-voltage electric and electronic devices. The PD measurement system is composed of a coupling network, a low noise amplifier, and associated electronics. A shielded box is adopted to make a better measurement environment against around noise. A low cut-off frequency of the coupling network estimated by a sinusoidal wave input was 125 kHz (-3 dB). Calibration tests on laboratory set-up have shown that the PD measurement system has a stable sensitivity of 10 mV/pC. In an application test on a low-voltage three phase induction motor (5 HP), we could detect 0.53 pC level of partial discharge at the applied voltage of AC 660 V<sub>peak</sub>.

**Key Words** : Partial discharge, Measurement system, Coupling network, Low noise amplifier, Shielded box

#### 1. 서론

유도전동기는 산업현장에서 가장 많이 사용되는 동력설비 중의 하나이다. 최근 마이크로프로세서와 디지털 제어기법의 도입, 전력용 반도체 소자의 진보에 따라 유도전동기의 가변속 제어시스템의 응용분야가 크게 확대되고, FET(Field Effect Transistor)와 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 등의 고속 스위칭 소자를 내장한 속도제어기를 사용함에 따라 600 V이하의 저압용 유도전동기에서도  $\mu$ s당 최고 수 천 V의 과도전압을 발생시킬 수 있다[1-3]. 저압 유도전동기에서 과도전

압은 절연재료의 조기 열화와 권선에 불규칙한 전압분포를 야기시켜 국부적인 절연 파괴에 이르게 된다[4-6]. 또한 생산 단계나 출고시 품질관리면에서 시행하는 비파괴 내전압 시험전압은 1 kV이상의 비교적 높은 전압을 인가하므로 절연물의 성능저하를 초래하는 요인이 되기도 한다. 이에 대한 대책으로 절연물을 대체 보강하거나 외부의 스위칭 서지 등을 저감시키기 위한 필터의 설치가 연구되어 왔으며[7,8], 최근에는 생산단계부터 품질관리의 강화로 불량품의 출고를 차단하는 방식으로 전환되고 있는 실정이다.

현재는 지난 수년간의 연구결과로서 피시험 기기의 절연성능을 저하시키지 않는 비파괴 시험방법이 제안되고 있으며, 특히 시험 전압을 가능한 낮게 설정함으로써 피시험기에 손상을 주지 않는 미소 부분방전 평가기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[9-13].

본 논문에서는 이러한 국제적 변화에 따라 저압 유도전동기의 절연에 손상을 주지 않는 부분방전

1. 한국해양대학교 전기전자공학부  
(부산시 영도구 동삼동 1)  
2. 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹  
3. 한국전기연구원 융합기술연구단  
a. Corresponding Author : kilgs@hhu.ac.kr  
접수일자 : 2005. 7. 4  
1차 심사 : 2005. 8. 1  
심사완료 : 2005. 8. 17

시험기술의 개발을 위하여, 1 pC의 부분방전 검출이 가능한 측정기술에 대하여 연구하였다. 결합회로망과 저잡음 증폭기, 차폐함을 적용하고, 고정실협과 3상 5 HP 저압 유도전동기를 이용한 실험으로부터 0.53 pC의 부분방전을 검출할 수 있었다.

## 2. 부분방전측정 시스템

### 2.1 설계 및 제작

부분방전 측정시스템은 그림 1과 같이 노이즈 차단변압기(NCT), 승압용 변압기(220 V/5 kV), 무방전 콘덴서의 결합회로망, 광대역 저잡음 증폭기(25 dB, 0.1 ~ 1300 MHz)로 구성하였다. 부분방전 측정시스템은 외부로부터의 방사잡음을 제거하기 위하여 검출 회로부는 차폐함 내에 설치하여 일점접지 함으로서 잡음에 대한 영향을 최소화시켰다.

실제 부분방전의 광대역 측정을 위해서는 그림 1과 같이 검출임피던스를 RLC 조합으로 구성하여야 한다.

그림 1의 결합회로망에서 방전전하량과 측정전압의 이론적 관계는 식(1)과 같다[8].

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \times \exp(\frac{-t}{2Rm}) \times \cos \omega t \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 방전전하량,  $R$ 과  $C$ 는 각각 측정기의 입력 저항과 정전용량,  $m = \frac{ak}{a+k} + C$ ,

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}} \text{ 이다.}$$

본 실험에서 결합콘덴서  $k$ 의 정전용량은 저압 유도전동기의 고정자 권선과 외함과의 정전용량(1 ~ 2 nF)을 고려하여 1.8 nF의 내부 방전이 없는 콘덴서(discharge free capacitor)를 사용하였다.

정현파 입력에 대한 결합 회로망의 주파수 특성은 그림 2에 나타낸 바와 같이 -3 dB의 저역 차단 주파수가 125 kHz로 60 Hz 상용주파수 인가전압은 -125 dB로 감쇄시키며, 500 kHz 이상에서는 평탄한 특성을 나타내었다. 본 주파수 특성은 측정계의 교정에 필요한 교정 펄스의 주파수가 500 kHz ~ 2 MHz임을 고려할 때, 교정 신호와 부분방전 신호의 주파수 영역에서 평탄한 특성이 되기 때문에 500 kHz 이상의 방전신호에 대해서는 감쇄없이 정확한 방전전하량의 산출이 가능하다.

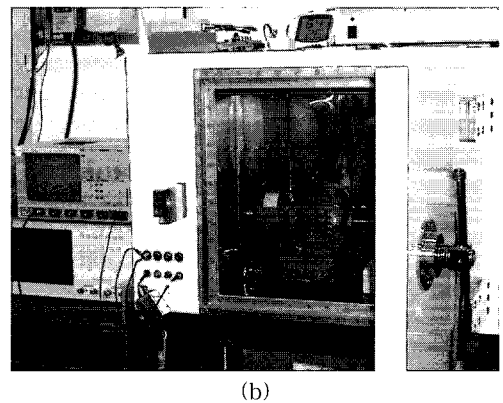
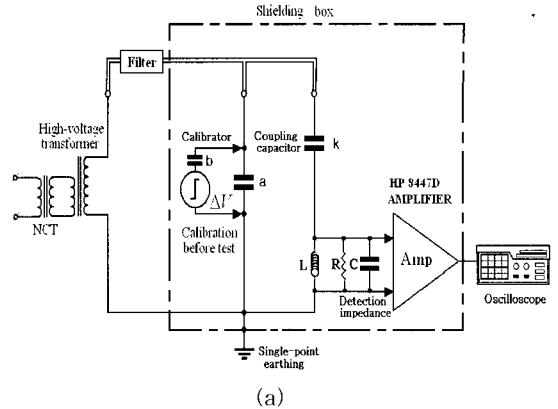


그림 1. 제작한 부분방전 측정시스템 ; (a) 구성도, (b) 사진.

Fig. 1. Fabricated PD measurement system ; (a) configuration, (b) photograph.

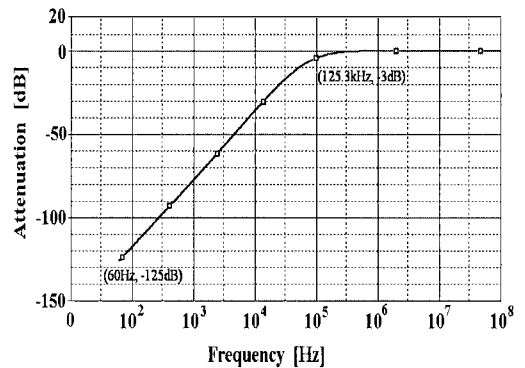


그림 2. 결합 회로망의 주파수 응답특성.  
Fig. 2. Frequency response characteristic of the coupling network.

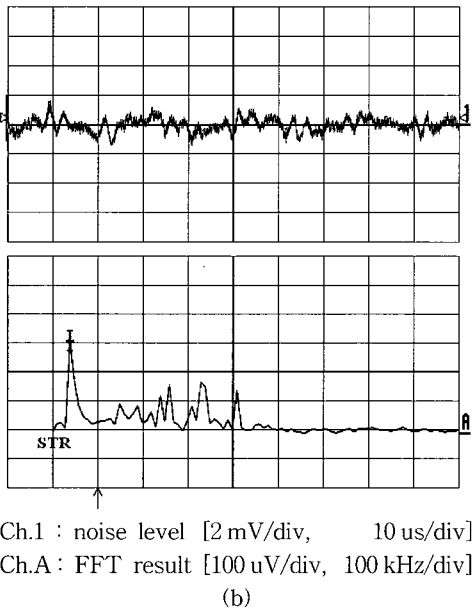
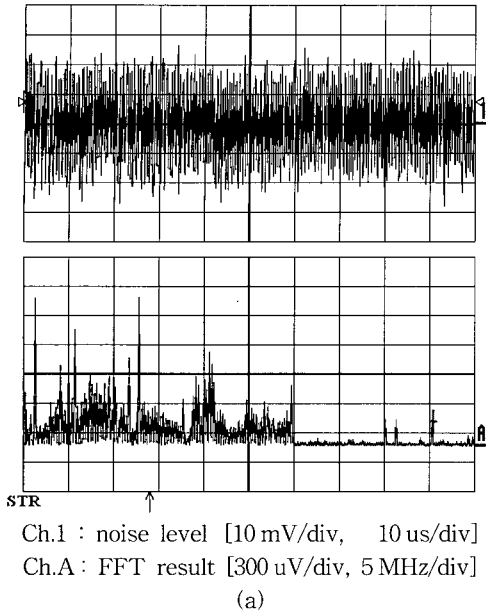


그림 3. PD 측정시스템의 잡음 레벨 평가 ; (a) 개구부 열림, (b) 개구부 닫힘.  
Fig. 3. Estimation of noise level of the PD measurement system ; (a) door opened, (b) door closed.

또한 부분방전의 측정감도 산출을 위한 교정실험을 수행하기 앞서 측정 시스템의 외부방사 및 전도 잡음에 대한 특성을 분석하였다. 증폭기를 포

함한 검출회로에서 측정된 잡음신호는 그림 3과 같으며, 개구부 열림시 잡음신호의 최대값은 25 mV<sub>peak</sub>, 개구부 닫힘시 1.25 mV<sub>peak</sub> 이므로 개구부에 의해서도 26 dB의 차폐효과가 있었으며, 가능한 부분방전 신호레벨은 최소한 잡음레벨의 2배 이상이 되어야 한다.

잡음의 주파수 성분은 개구부 열림시 30 MHz까지 넓게 분포하지만, 닫힘시는 40 kHz에서 크게 나타나고 420 kHz 이상에서는 나타나지 않는다. 이는 차폐함의 특성으로 MHz 이상의 방사전자파는 완전 차폐되며, 420 kHz 이하의 주파수 성분은 접지로부터 전도되는 잡음으로 추정된다.

본 측정시스템의 구성에 있어, 잡음과 신호의 왕복 반사에 의한 전파 특성을 고려하여 교정단계부터는 증폭기 출력단에 고역 차단주파수 30 MHz (-3 dB)의 필터를 적용하였다. 잡음 신호는 측정시스템이 설치된 환경에 따라 다르게 나타나겠지만, 실험실내에서 측정시스템의 외부잡음 차폐특성은 500 kHz 이상의 부분방전 측정에 적합한 것으로 판단한다.

### 2.2 교정 평가

부분방전 측정시스템의 감도는 피시험체인 시료의 정전용량에 의해 변화하므로, 시험대상에 따라 알고 있는 크기의 교정펄스를 인가하여 산출할 필요가 있다. 본 연구에서는 교정 실험으로서 그림 1(a)의 회로에서 시료 a에 3상 5 HP 유도전동기를 연결하고 부분방전 측정시스템에는 교류전원을 인가하지 않은 상태에서 성형(Y) 결선의 중성점과 외함 사이에 IEC 60270에 의한 교정펄스 발생기(CALIA, ± 1 pC ~ 50 pC, GmbH)로 펄스를 인가하여 인가 펄스의 크기에 대한 검출전압의 크기의 비로써 측정 감도를 산출하였다.

그림 4는 1 pC과 10 pC의 교정 펄스를 주입하였을 때, 검출된 파형의 예를 나타낸 것으로 주파수는 2 MHz, 지속시간은 약 100 ns, 출력 전압은 각각 9.2 mV와 100 mV이었다.

표 1은 전하량 1 ~ 50 pC 주입시 측정된 전압 신호의 크기를 나타낸 것으로 정극성 및 부극성에 대하여 동일하였으며, 10 pC이상에서의 감도는 10 mV/pC으로 일정하지만 1 pC에서는 10 pC 이상에서의 감도와 비교하여 8 %정도 낮게 나타났다. 이는 관측장치인 오실로스코프의 수직 해상도(8 bit)와 잡음 레벨에 기인한 것이다. 이와 같이 잡음 레벨을 고려하면 본 측정시스템에서는 약 0.5 pC(5 mV)의 부분방전의 검출이 가능하다.

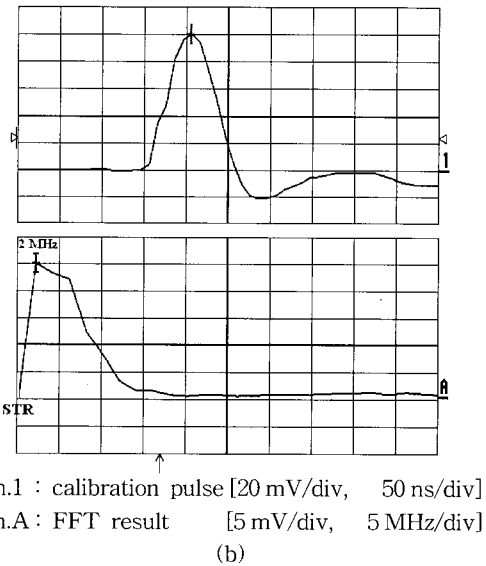
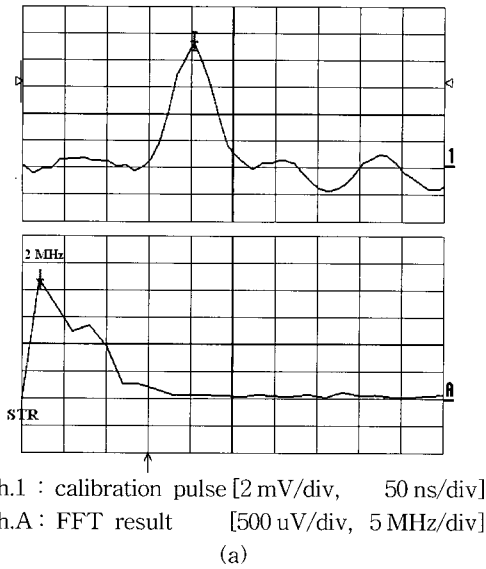


그림 4. 교정 펄스와 주파수 분석 ; (a) 1 pC, (b) 10 pC.

Fig. 4. Calibration pulses and its FFT analysis ; (a) 1 pC, (b) 10 pC.

표 1. 교정실험 결과.

Table 1. Calibration test results.

정/부극성	방전전하량 (pC)	1	5	10	20	50
	검출전압 (mV)	9.2	49	100	200	500
	감도 (mV/pC)	9.2	9.8	10.0	10.0	10.0

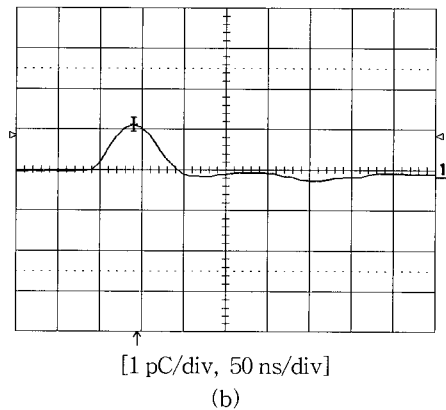
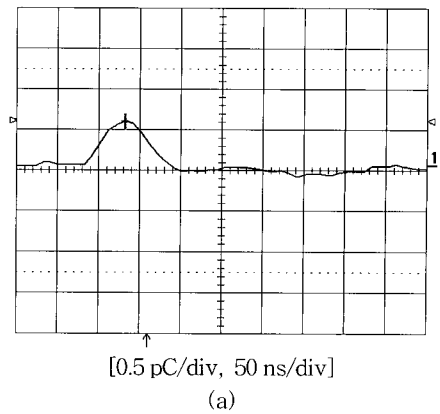


그림 5. 검출된 부분방전 파형 ; (a) AC 660 V<sub>peak</sub> 인가시, (b) AC 1,040 V<sub>peak</sub> 인가시.

Fig. 5. Detected PD waveforms ; (a) measured at AC 660 V<sub>peak</sub>, (b) measured at AC 1,040 V<sub>peak</sub>.

### 3. 부분방전의 측정과 분석

교정 실험으로부터 검출감도를 산출한 후, 교정 펄스 발생기를 유도전동기로부터 분리하고 교류 전압을 증가시키면서 부분방전 신호를 측정하였다. 최초의 파형은 그림 5(a)와 같이 교류 전압의 최대 값 660 V<sub>peak</sub>에서 5.33 mV의 크기로 검출되었는데, 이는 0.53 pC에 해당하는 크기이다. 인가전압을 서서히 상승시켜감에 따라 부분방전의 크기는 증가하였으며, 1,040 V<sub>peak</sub>에서는 12.79 mV로 약 1.28 pC으로 측정되었다.

실험 결과로부터 본 연구에서 제작한 부분방전 측정시스템은 절연변압기와 차폐함을 이용하여 외부로부터의 전도 및 방사 잡음을 최대한 차단함으

로써 1 pC 이하의 부분방전 검출이 가능함을 확인하였다. 또한 내부방전이 없는 콘덴서와 검출용 인덕터, 광대역 증폭기로 구성된 결합회로망의 0.1 dB의 지역차단주파수를 500 kHz로 설계하여, 교정펄스의 주파수를 포함함으로써 500 kHz 이상의 부분방전 신호에 대해서는 전혀 감쇄가 없이 정확하게 방전의 크기를 평가할 수 있었다.

이와 같이 본 논문에서는 실험실 내에서 차폐함을 이용함으로써 안정적 특성의 부분방전 시스템을 구성할 수 있었으나, 산업현장에 적용하기 위해서는 설치환경에서의 잡음 제거, 최적의 접지방법, 대용량 유도전동기의 적용 등에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 산업현장에서 저압 유도전동기의 비파괴 품질관리에 적용하기 위한 미소 부분방전 측정시스템의 실현에 대한 연구를 수행하였다. 부분방전 검출회로를 차폐함 내에 구성함으로써 외부의 방사와 전도 잡음에 대한 영향을 최소화 할 수 있었으며, 결합회로망의 최적 주파수대역은 교정펄스의 주파수와 인가전압의 크기를 고려하여 60 Hz에서 125 dB 이상의 감쇄특성, 500 kHz 이상에서는 평탄한 특성을 갖도록 하여 정확한 감도산출과 부분방전의 측정이 가능하도록 하였다. 또한 측정시스템에서 검출 가능한 부분방전의 크기는 감도와 잡음 레벨에 따라 달라지며, 감도는 피시험체의 정전용량에 따라 변화하므로 측정시마다 잡음레벨과 교정을 수행하였다. 교정실험으로부터 부분방전 측정시스템의 감도는 10 mV/pC이었으며, 저압 3상 5 HP 유도전동기를 이용한 적용실험에서는 인가전압 660 V<sub>peak</sub>에서 0.53 pC의 부분방전을 측정할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업과 한국전기연구원 국가지정연구실사업(NRL)의 위탁연구개발 결과로 수행되었음.

#### 참고 문헌

[1] M. Kaufhold, "Failure mechanism of the inter-turn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters", Vol. 12, No. 5, p. 9, 1996.

[2] C. J. Melhorn and L. Tang, "Transient effect of PWM drives on induction motors", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, p. 1065, 1997.

[3] A. Mbaye, F. Grigorescu, T. Lebey, and B. Ai, "Existence of partial discharges in low-voltage induction machines supplied by PWM drives", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 31, No. 4, p. 554, 1996.

[4] C. J. Melhorn and L. Tang, "Effects of PWM ASD's on standard squirrel cage induction motors", PCIM Conf., Dallas, TX, p. 356, 1994.

[5] J. A. Oliver and G. C. Stone, "Implications for the application of adjustable speed drive electronics to motor stator winding insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 4, p. 32, 1995.

[6] S. A. Boggs, "Partial discharge - Part II: detection sensitivity", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, No. 5, p. 35, 1991.

[7] E. Gulski, H. P. Burgcr, G. H. Vaillancourt, and R. Brooks, "PD pattern analysis during induced test of large power transformers", IEEE Traps. DEI, Vol. 7, p. 95, 2000.

[8] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-voltage Equipment", Butterworths, p. 73, 1989.

[9] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, and G. C. Montanari, "Advanced PD inference in on-field measurements. Part 2: Identification of defects in solid insulation systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 3, p. 527, 2003.

[10] 권동진, 박제준, "변압기 부분방전 상시 감시기법에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 12호, p. 1032, 2001.

[11] 권태호, 이종길, 이준호, "광섬유 센서를 이용한 절연유내의 부분방전 위치검출에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 16권, 9호, p. 838, 2003.

[12] 박성희, 강성화, 임기조, "부분방전원의 분류에 있어서 BP와 SOM의 비교", 전기전자재료학회논문지, 17권, 9호, p. 1006, 2004.

[13] 김정태, 이호근, "부분방전 해석 방법으로 PSA (Pulse Sequence Analysis)의 현장적용성에 대한 고찰", 전기전자재료학회논문지, 18권, 5호, p. 484, 2005.