

극미소 부분방전 측정시스템의 설계 및 제작

서황동* · 송재용* · 문승보* · 길경석* · 권장우**

*한국해양대학교 **동명정보대학교

Design and Fabrication of an Ultra-low Partial Discharge Measurement System

Hwang-dong Seo · Jae-yong Song · Seung-bo Moon · Gyung-suk Kil · Jang-woo Kwon

*Korea Maritime University **Tongmyoung University

E-mail : hwangdong95@bada.hhu.ac.kr

본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

ABSTRACT

This paper presents an ultra-low partial discharge(PD) measurement system that has been accepted as a non-destructive method to estimate electrical insulation of low-voltage electric devices. The PD measurement system is composed of a coupling network, a low noise amplifier, and associated electronics. A shielding box is used to make a better condition against electromagnetic interference. A low cut-off frequency of the coupling network was 1 MHz (-3 dB). Calibration tests on laboratory set-up have shown that the PD measurement system has a stable sensitivity of 11.4 mV/pC. In an application experiment on a low-voltage induction motor (5 HP), we could detect 0.77 pC level of partial discharge pulse at the applied voltage of AC 664 V_{peak}.

키워드

ultra-low partial discharge, detection circuit, coupling capacitor, PD measurement system

1. 서 론

절연파괴 사고가 발생하면 전원공급의 중단, 생산설비의 손상 등 사회적·경제적으로 큰 손실을 유발하게 된다. 이러한 절연파괴 사고를 방지하고, 최적의 유지·보수에 의한 경제적 전기설비의 운용을 위해서는 전기전자 기기의 정확한 절연진단이 수행되어야 하며, 기기의 초기 생산단계에서부터 정확한 절연평가가 필요하다^{[1],[2]}.

절연상태의 평가기술에 관하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 일부 기술은 실용화되어 고압 기기 및 전력설비의 절연 열화 평가에 적용되고 있다. 이들 시험방법 중 기기의 절연상태에 직접적인 영향을 주지 않으면서도 열화상태, 잔여수명 예측, 고장상태 등에 대한 많은 정보를 얻을 수 있는 부분방전 시험방법이 가장 선호되고 있다. 그러나 이러한 시험 방법 주로 전력설비 등 고압 기기 위주로 적용 되고 있으며, 저압용 기기의 경우에는 아직까지 절연파괴 과정에 대한 명확한 규명작업이나 절연평가 기술 등에 대한 연구는 미진한 실정이다. 특히, 저압용 기기의 절연 평가 기술은 생산단계초기에 단순한 절연파괴 시험이

나, 내전압 시험 등 기기의 절연상태에 직접적인 영향을 주는 시험법을 적용하고 있다^{[3],[4]}.

따라서 본 연구에서는 저압용 전기전자 기기를 대상으로 절연상태에 영향을 주지 않는 범위에서 부분방전 신호를 검출하는 것으로 신뢰성 평가를 수행할 수 있도록 저잡음 고감도 검출회로를 적용한 극미소 부분방전 검출시스템을 설계·제작하였다.

II. 부분방전 측정시스템의 설계 및 제작

1. 부분방전 검출의 원리

고체절연체에서 보이드 등의 결함이 발생하면 내부에서 부분방전이 발생하고, 이러한 방전현상이 지속되면 절연열화가 진행되어 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다. 고체절연체에 보이드가 존재할 경우 전기적 등가회로는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다^[5]. 등가회로에서 b 는 절연체내 보이드의 정전용량, c 는 보이드와 직렬로 접속되는 정상부분의 절연체 정전용량, m 은 보이드 부분과 병렬로 접속되는 정상적인 부분의 정전용량이다.

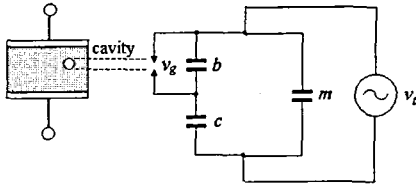


Fig. 1 Equivalent circuit of partial discharge

이때 보이드내에 가해지는 전압은

$$v_g = \frac{c}{b+c} \times v_i = \frac{c}{b} \times v_i \quad (1)$$

로 되는데, 여기서 c는 b에 비교할 때 무시될 수 있는 값이다. 보이드내에서 불꽃방전이 생길 때 발생하는 실제 방전전하량 q_r 은

$$q_r = b \times V_g \quad (2)$$

여기서, V_g 는 보이드에서의 방전발생 전압이다. 이때 시료간의 전압변화 ΔV 는

$$\Delta V = \frac{c}{m+c} \times V_g = \frac{c}{m} \times V_g \quad (3)$$

여기서, m이 c에 비하여 훨씬 큰 값이므로 c는 무시될 수 있다. 그러나 실제 방전량 q_r 은 실제 측정이 어려우며, 검출회로에서 검출되는 겉보기 방전전하량 q 은 다음과 같이 표현된다.

$$q = \frac{c}{b+c} \times q_r = b \times \Delta V \quad (4)$$

여기서, 시료의 전체 정전용량 a는

$$a = m + \frac{b \cdot c}{b+c} \cong m \quad (5)$$

와 같으며, 따라서 ΔV 는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\Delta V = \frac{q}{m} = \frac{q}{a} \quad (6)$$

실제 부분방전 측정회로에서는 시료간에 발생하는 전압변화는 그림 2의 구성과 같이 결합콘덴서 및 검출임피던스에 의해 측정된다. 따라서 부분방전 발생에 의해 검출회로에 측정되는 전압은

$$V_d = \frac{q}{c_a} \times \frac{Z_d}{Z_{ck} + Z_d} \cong \frac{q}{c_a} \quad (7)$$

와 같이 된다. 여기서 Z_d 는 결합콘덴서의 임피던스이다.

부분방전 검출회로에서의 고전압 발생원 및 결합콘덴서(coupling capacitor) k는 방전으로부터 영향을 받지 않아야 하며 방전은 시료 a에서만 영향을 받아야 한다. 검출 임피던스 Z_d 양단에는

시료내의 방전임펄스에 의해 전압 임펄스를 발생시키게 되며 증폭기를 거쳐 관측된다. 검출임피던스는 시료에 직접 연결하는 방법과 결합콘덴서 k와 직렬로 접속하는 두 가지 방법 있다. 이 두 가지 방법은 고전압 발생원의 임피던스가 충분히 크다면 전기적으로 같은 전압이 발생하며, 만일 시료 a의 용량이 크다면 충전전류는 임피던스 Z_d 를 통하여 흐르지 않으므로 k에 접속하게 된다. 실제 적용에서는 결합콘덴서와 직렬로 검출임피던스를 접속하는 방법이 일반적으로 사용된다.

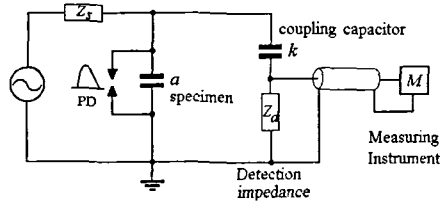


Fig. 2 Basic circuit for partial discharge measurement

2. 검출회로의 설계 및 제작

일반적으로 부분방전 신호는 고주파 전류 펄스 형태로 발생하기 때문에 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로가 필요하다. 결합회로의 구성은 부분방전 신호의 발생 주파수 범위를 고려하여 선정하여야 하는데 저압용 기기에서 발생하는 주파수 범위는 대략 수 MHz 범위에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성을 고려하여 결합회로는 그림 3과 같이 구성하였다.

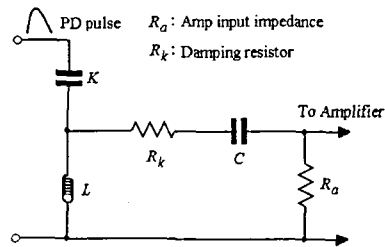


Fig. 3 Configuration of a coupling circuit

결합회로는 부분방전 시험전압인 60 Hz의 상용 주파수 전압신호는 완전히 차단하고, 고주파 펄스 형태의 부분방전 신호만을 통과시키는 고역 통과 필터의 특성을 가져야 한다. 그림 3과 같은 회로 구성에서 결합콘덴서 및 증폭기의 입력 임피던스를 포함한 결합회로의 주파수 응답특성에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같이 얻어진다.

이때 상용주파수 전압에 대한 감쇄특성은 -270 dB로 완전히 차단할 수 있으며, -3 dB가 되는 차단주파수는 1MHz로 저압용 기기에서 발생하는 부분방전 신호를 충분히 검출할 수 있는 주파수 대역을 갖는다.

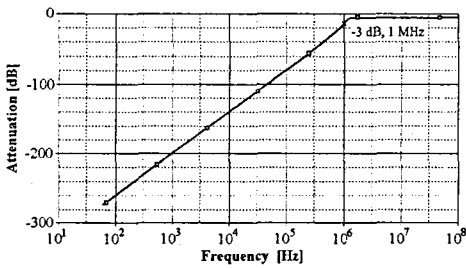
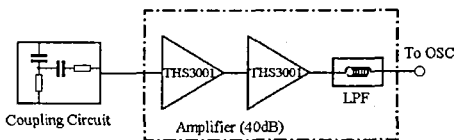
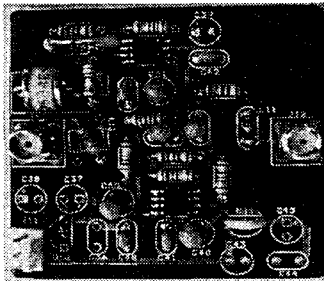


Fig. 4 Frequency characteristic of the coupling circuit

부분방전 펄스 신호의 크기는 대단히 작기 때문에 출력단에 증폭회로를 접속해야만 부분방전 신호를 검출할 수 있다. 증폭회로는 충분한 주파수 대역, 낮은 잡음특성을 갖도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 충분한 증폭 특성을 얻기 위하여 그림 5와 같이 2단으로 구성되는 증폭회로를 설계·제작하였으며, 증폭회로 구성에는 TI사의 THS3001을 사용하였다. 이 증폭기는 주파수 범위가 DC ~ 420 MHz로 부분방전 검출에 충분한 주파수 범위를 가지며, 입력 off set 전압은 3 mV_{max}로 대단히 낮은 잡음 레벨 특성을 갖는다. 증폭회로의 증폭도는 40 dB로 설계하였으며, 부분방전 신호의 발생 주파수 범위 및 외부 또는 내부의 방사잡음에 대한 영향을 고려하여 출력단에 10 MHz의 저역통과 필터회로를 삽입하였다. 따라서 증폭회로를 포함한 부분방전 검출회로의 주파수 범위는 1 ~ 10 MHz가 된다.



(a) 구성도



(b) 사진

Fig. 5 Configuration of the amplifier

3. 잡음 대책

정확한 부분방전 신호 검출을 위해서는 잡음에 대한 영향을 평가하여 적절히 잡음을 억제하고,

억제되지 않는 잡음에 대해서는 검출회로의 주파수 대역을 조절하는 등의 기법을 적용하여 부분방전 신호와 잡음의 분리가 가능해야 한다. 따라서 본 연구에서는 잡음의 발생 원인을 분석하고 이에 대한 대책을 마련함으로써 부분방전 신호만을 측정할 수 있도록 하였다.

부분방전 측정시 외부잡음은 전원으로부터 유입되는 전도잡음, 외부로부터의 방사잡음, 접지측으로부터 유입되는 접지잡음의 3가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 잡음을 최소화하기 위하여 전원공급의 인입단에 노이즈 차단변압기(NCT ; Noise Cut Transformer)를 설치하여 전원으로부터 유입되는 노이즈를 차단하고, 시험용 변압기의 출력측에 LC 필터를 적용함으로써 전도성 잡음을 최대한 억제하였다. 방사잡음은 측정시스템을 이중차폐구조로 구성함으로써 완전히 차단할 수 있었으며, 차폐함을 포함한 측정시스템은 단일접지 방식을 적용함으로써 접지로부터의 잡음을 최소화 하였다.

최종적으로 구성된 극미소 부분방전 측정시스템은 그림 6과 같이 구성되며, 시험대상 시료 및 검출회로는 차폐함내에 설치되므로 외부잡음의 영향을 최소화 할 수 있다.

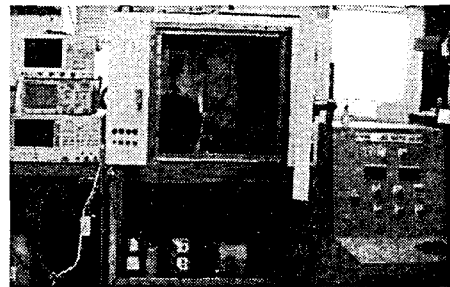


Fig. 6 Experimental apparatus

III. 측정시스템의 평가

제한한 극미소 부분방전 측정시스템의 성능평가를 위하여 외부 잡음레벨의 평가 및 감도산출을 위한 교정실험을 수행하였으며, 5 마력의 유도전동기를 대상으로 부분방전 검출 특성을 평가하였다.

먼저 외부잡음에 대한 평가 결과 그림 7에 나타난 바와 같이 최대 잡음 신호 레벨은 약 3.19 mV_{p-p}로 측정되었다. 이는 검출회로에 사용된 증폭기의 잡음레벨과 비슷한 값으로 외부로부터 유입되는 잡음은 완전히 차단되는 것으로 평가되었다.

측정시스템의 교정실험은 전용의 교정기 CAL 1A(GmbH, 1 pC ~ 100 pC)를 이용하여 이미 알고 있는 방전전하량을 시료측에 주입하고 검출회로에서 검출된 값을 오실로스코프(DL9140,

YOKOGAWA, 1 GHz, 5 GS/s)로 측정하였다.

교정실험결과를 그림 8과 같이 선형적인 특성을 나타내며, 이때 측정시스템의 감도는 11.4 mV/pC이었다. 부분방전 검출에서 최소 검출감도는 일반적으로 잡음신호에 비해 2배 이상의 크기를 가져야 검출이 가능하다. 따라서 잡음 레벨을 고려하면 본 연구에서 제안한 측정시스템은 최소 0.56 pC의 부분방전을 측정할 수 있다.

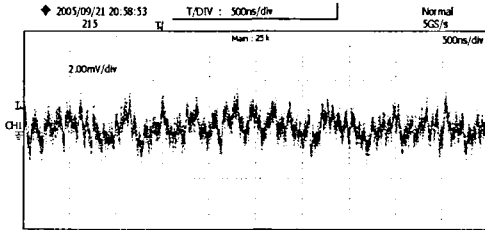


Fig. 7 Noise level of the PD measurement system

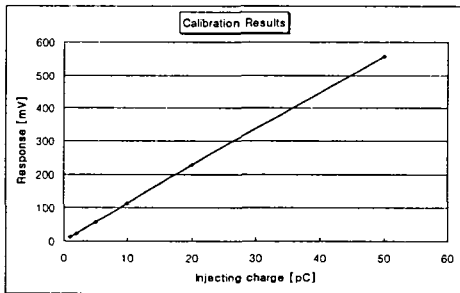


Fig. 8 Calibration results of the PD pulse

부분방전 측정시스템의 적용성 평가를 위하여 5마력 용량의 3상 유도전동기를 대상으로 부분방전 검출을 수행하였다.

시험전압을 서서히 증가시키면 그림 9와 같이 664 V_{peak}가 되는 지점에서 약 8.2mV의 부극성 부분방전 펄스가 검출되며, 이때의 신호를 교정실험결과로부터 얻어진 감도로 산출하면 0.77 pC의 방전전하량이 얻어진다.

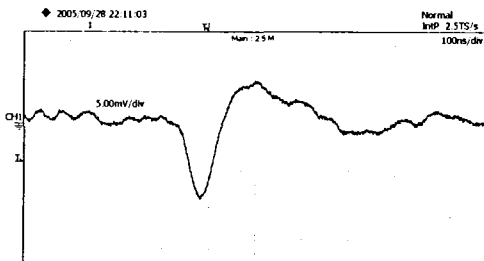


Fig. 9 Measured PD waveform in low-voltage induction motor

전압을 계속 증가시키면 5 pC의 방전전하량이 되는 레벨은 1,220 V_{peak}로 측정되는데 이는 내전압 시험에 의한 절연파괴시험과 비교할 때 약 40%의 전압을 인가하는 것으로 절연평가를 수행할 수 있다. 따라서 피시험 대상 기기의 절연에 아무런 손상을 주지 않는 범위에서 절연상태 진단이 가능하다.

IV. 결 론

본 연구에서는 저압용 전기전자 기기의 신뢰성 평가를 위한 극미소 부분방전 측정시스템을 설계·제작하였으며, 잡음 평가, 교정실험 및 적용성 평가로부터 우수한 특성을 확인하였다.

외부 잡음에 대한 평가 결과, 잡음신호 레벨은 최대 3.19 mV_{p-p}로 전원필터 및 차폐함의 적용으로 외부잡음을 완전히 차단할 수 있었다.

교정실험결과, 측정시스템의 감도는 11.4 mV/pC으로 잡음레벨을 고려하면 최소 0.56 pC의 부분방전신호 검출이 가능하다.

저압 유도전동기를 대상으로 한 적용실험결과 664 V_{peak}에서 0.77 pC의 부분방전 검출이 가능하였다.

따라서 본 연구에서 제안한 극미소 부분방전 측정시스템은 최소 0.56 pC 레벨의 부분방전 검출이 가능하므로 저압용 전기전자기기의 신뢰성 평가를 위한 시스템으로 충분한 활용 가치가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", Redwood Press, pp.242-262, 1992.
- [2] J. C. Fothergill, L. A. Dissado and P. J. J. Sweeney, "A Discharge Avalanche Theory for the Propagation of Electrical Tree", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, pp.474-486, 1994.
- [3] R. M. Eichhorn, "Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-12, No. 1, pp2-18, 1976.
- [4] E. J. McMahon, "A Tutorial on Treeing ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-13, No. 4, 1978.
- [5] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Butterworth, pp.129-152, 1989.