Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 22, No. 9, p. 786, September 2009.

논 문 22-9-15

몰드변압기의 부분방전 검출기술에 관한 연구

A Study on PD Detection Methods for Cast-resin Dry-type Transformers

박찬용[1], 박대원[1], 최재성[1], 길경석[1,a]
(Chan-Yong Park[1], Dae-Won Park[1], Jae-Sung Choi[1], and Gyung-Suk Kil[1,a])

Abstract

Transformer failures are mostly due to partial discharges (PDs) caused by the deteriorated insulation. It is, therefore, important to monitor PD occurrence in insulation system and prevent their deterioration. The presented paper deals with a PD detection method by a capacitive probe, which easily apply to cast-resin dry-type transformers. The PD detection system consists of a capacitive probe and a low noise amplifier having the frequency bandwidth of 500 Hz~30 MHz. In the experimental set-up, sensitivity of the system is 7.16 mV/pC.

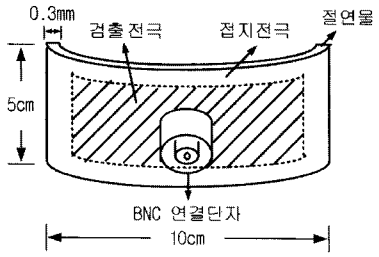
Key Words : Capacitive probe, Partial discharge, Cast-resin dry-type transformer, Low noise amplifier

1. 서 론

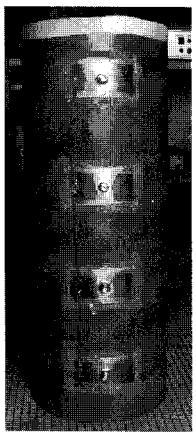
몰드변압기는 유지보수 비용이 저렴하고 환경적인 요소에 크게 영향을 받지 않기 때문에 그 수요가 증가하고 있는 추세이다[1]. 그러나 수용가의 전력소비 증가와 함께 매년 변압기 사고의 발생빈도가 증가하고 있으며, 이러한 변압기사고의 원인은 대부분 변압기를 구성하는 재료의 열화로 인한 것으로 전기적, 열적, 화학적 스트레스로 인해 절연성능이 저하됨으로써 발생한다[2-4]. 변압기의 절연열화는 곧 절연파괴로 이어져 전력공급의 중단은 물론 화재나 인명사고를 발생시킬 수 있으며, 경제적으로는 막대한 손실을 유발한다. 몰드변압기의 중대사고 요인인 내부절연파괴는 대부분의 경우 초기단계에 부분방전을 수반하며, 이는 부분방전과 절연이 밀접한 상관관계를 지니고 있음을 의미한다. 따라서 부분방전신호를 측정함으로써 절연열화에 의한 사고를 미연에 방지할 수 있으며, 변압기의 절연설계와 평가 시에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 부분방전 신호는 커플링 캐패시터, AE(Acoustic Emission)센서, 고주파변류기(HFCT) 및 UHF센서 등으로 검출할 수 있으며, 피측정 대상에 따라 유효한 방법을 선택할 수 있다[5-7]. 커플링 캐패시터와 quadrupole을 이용한 부분방전신호의 측정은 일반적으로 사용되고 있는 방식으로, 변압기 전원단자에 직접적으로 설치하여 부분방전신호를 검출함으로써 변압기 내부에서 발생하는 비교적 낮은 레벨의 방전신호까지 검출이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 변압기의 사용전압이 높아지면 커플링 캐패시터의 절연전압도 높아져야 하며, 온라인 설치가 불가능한 단점이 있다. AE센서에 의한 측정법은 유입변압기의 온라인 진단에 많이 이용되고 있지만 몰드변압기의 표면에 취부가 어려운 단점이 있다. 또한 고주파변류기를 이용한 방법은 접지선을 통하여 유입되는 전도 노이즈로부터 부분방전신호를 분별해내는데 어려움이 있어 별도의 필터회로 및 부수적인 신호처리 기술이 필요하다. 또한 현재 사용되고 있는 부분방전 검출 및 변환회로는 상용화되어 있는 고가의 제품을 그대로 적용하고 있으며, 피측정 대상에 최적화된 회로 및 증폭기에 대한 연구는 다소 부족한 상태이다.

본 논문에서는 몰드변압기의 온라인 절연진단에 비교적 간단히 적용할 수 있는 용량성 프로브를 이용한 부분방전 측정기술에 대하여 기술하였다.

1. 한국해양대학교 전기전자공학부
(부산시 영도구 동삼동 1)
a. Corresponding Author : kilgs@hhu.ac.kr
접수일자 : 2009. 3. 25
1차 심사 : 2009. 8. 4
심사완료 : 2009. 8. 14



(a) 구성도



(b) 사 진

그림 1. 용량성 프로브의 설치.

Fig. 1. Installation of the capacitive probe.

2. 부분방전 측정회로

본 논문에서 제안한 용량성 프로브는 전기적 절연물에 동판을 접착시킨 구조로써 그림 1과 같이 변압기 외부표면에 부착된다. 검출전극의 말단에는 특성임피던스 50 Ω의 BNC를 사용하여 동축케이블을 접속할 수 있도록 하였다.

부분방전 신호의 검출원리는 검출전극과 고압도체사이의 표류정전용량(C_h)과 접지전극사이의 정전용량(C_p)에 의한 분압비로 고주파 부분방전펄스를 측정하는 것으로 이는 일종의 필터에 해당하며, 주파수 응답은 증폭기의 입력 임피던스와 센서의 정전용량에 의하여 결정된다[8].

용량성 프로브의 등가회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 전체전류 $i(t)$는

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t) \tag{1}$$

로 표현된다.

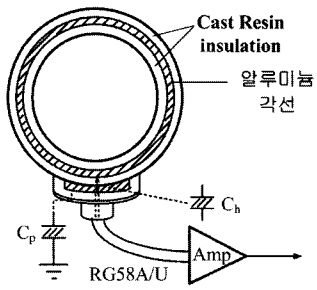
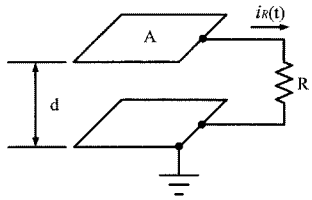
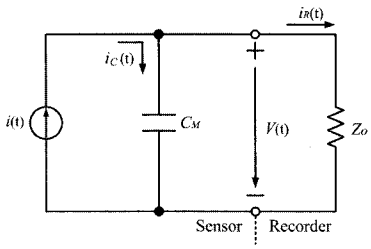


그림 2. 검출원리.

Fig. 2. Detection principle.



(a) 원리도



(b) 노튼의 등가회로

그림 3. 용량성 프로브의 등가회로.

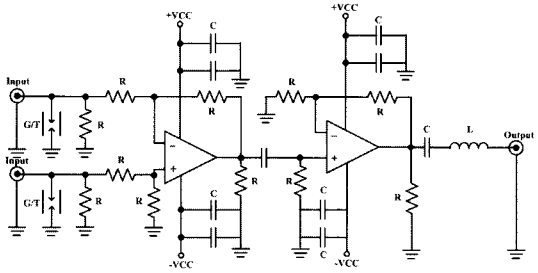
Fig. 3. Equivalent circuit of capacitive probe.

식 (1)로부터

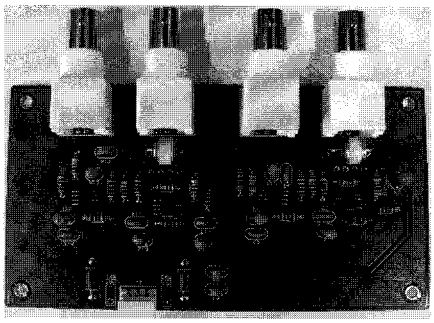
$$\epsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot A = C_M \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{Z_o} \tag{2}$$

의 관계가 성립하므로 식 (2)에 의해 산출되는 미지의 전압 $V(t)$는 증폭기의 입력임피던스 Z_o의 크기에 따라 달라진다. 증폭기의 입력임피던스가 50 Ω이라 하면, 식 (2)에서 우변의 첫 번째 항이 두 번째 항보다 매우 미소하여 이를 무시하면 측정하고자 하는 미지의 전압 $V(t)$는

$$V(t) = Z_0 A \cdot \frac{dD(t)}{dt} \tag{3}$$



(a) 증폭회로



(b) 사 진

그림 4. 시제작 저잡음 증폭회로.
Fig. 4. Prototype low noise amplifier.

로 근사화 시킬 수 있으며, 출력전압 $V(t)$의 크기는 센서의 면적 A와 전속밀도의 시간에 대한 미분량에 비례하게 된다. 그러나 부분방전신호는 그 크기가 매우 미소하므로 저잡음·고이득 특성의 증폭회로가 필요하다. 제작한 저잡음 증폭회로를 그림 4에 나타내었다.

제작한 증폭회로는 이득 40 dB, 500 Hz~30 MHz (-3 dB)의 주파수 대역을 가지며 검출된 부분방전 신호를 감쇄 없이 증폭시킨다.

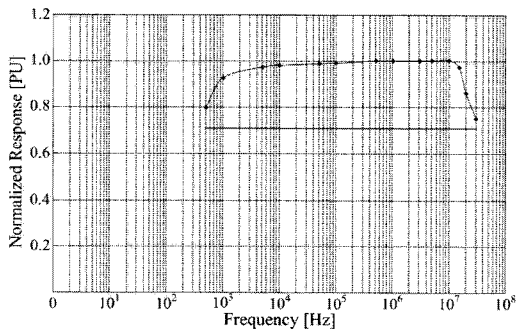


그림 5. 증폭회로의 주파수특성.
Fig. 5. Frequency characteristic of the amplifier.

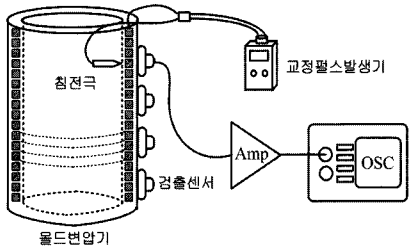


그림 6. 교정실험계의 구성.
Fig. 6. Construction of calibration experiment.

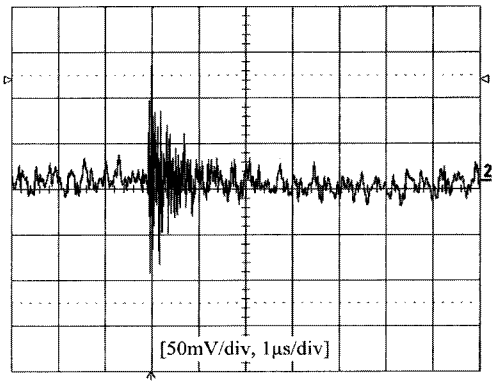


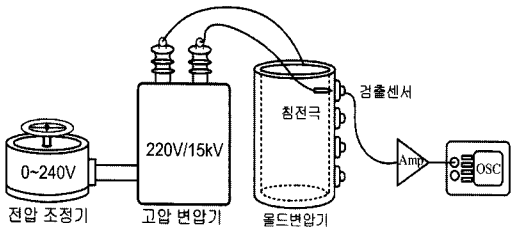
그림 7. 교정펄스파형의 예.
Fig. 7. Typical waveform of calibration pulse.

발생되는 방전신호의 전하량을 정확하게 측정하기 위해서는 검출회로의 감도(mV/pC)산출이 필요하다. 본 연구에서는 교정펄스 발생기(CAL 1A, 1~100 pC, Pos./Neg.)를 사용하여 그림 6과 같이 몰드변압기의 권선과 절연물사이에 교정펄스를 인가한 후 감도를 산출하였다.

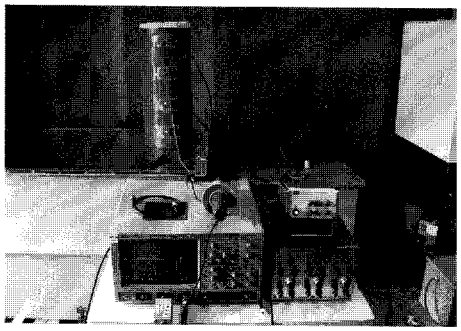
그림 7은 20 pC의 정극성 펄스입력에 대한 출력파형의 예를 나타낸 것으로, 출력전압은 143.1 mV로써 측정장치의 환산감도는 7.16 mV/pC이 된다.

3. 적용 실험

제작한 부분방전 검출장치를 이용하여 그림 8과 같이 몰드변압기에 적용실험을 수행하였다. 몰드변압기의 절연물 내부에서 부분방전이 발생하도록 변압기 상부에서부터 15 cm 하부에 침 전극을 설치하고, 외부에서 권선과 절연물사이에 전압조정기와 고압변압기 (AC 220 V/15 kV)를 사용하여 부분방전을 발생시켰다.

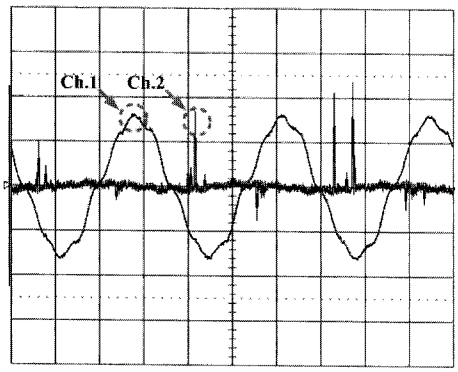


(a) 구성도



(b) 사 진

그림 8. 실험계의 구성.
Fig. 8. Configuration of experiment apparatus.



Ch.1 : 인가전압 [1 kV/div, 5 ms/div]
Ch.2 : 부분방전펄스 [0.2 V/div, 5 ms/div]

그림 9. 부분방전 펄스의 예.
Fig. 9. Example of partial discharge pulses.

그림 9에 인가전압과 검출된 부분방전펄스의 예를 나타내었다. 측정파형으로부터 부분방전 펄스의 크기 및 위상관계를 알 수 있으며, 주로 전압상승률이 급준한 부분과 전압의 최대값에서 부분방전이 발생함을 확인할 수 있다.

그림 10은 몰드변압기 절연물 내부에서 발생 가능한 대표적인 결함 중 침 전극에 의한 부분방전

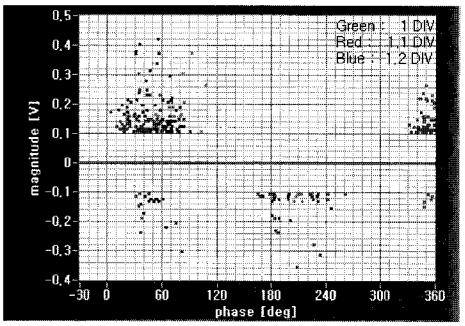


그림 10. 부분방전펄스의 위상분포.
Fig. 10. Phase distribution of PD pulses.

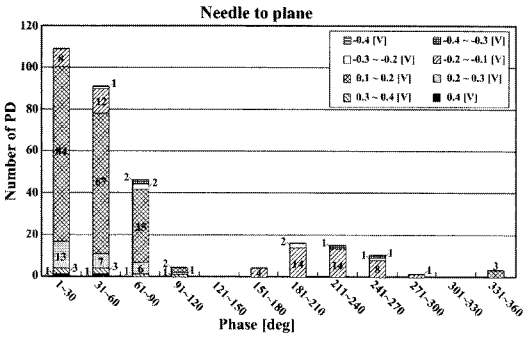


그림 11. Φ-q-n 분석결과.
Fig. 11. Result of Φ-q-n analysis.

패턴(Φ-q-n)을 분석한 결과로써 부분방전 신호의 대부분이 정극성의 반주기(half cycle)동안에 발생한 것을 관측할 수 있다.

이것은 불평등한 전계분포에 의한 것으로 몰드변압기 권선에 비해 침 전극에 전계가 집중되기 때문에 침 전극에 고압이 인가되는 반주기 동안에 대부분의 방전이 발생한 것으로 판단된다.

침 전극에서의 방전개시전압은 1.2 kV_{rms}, 방전소멸전압은 1.18 kV_{rms}로 측정되었으며, 방전횟수는 1 DIV에서 34회, 1.1 DIV에서 133회, 1.2 DIV에서 134회로 인가전압을 증가시킴에 따라 부분방전의 발생횟수와 크기도 함께 증가하였다. 초기 방전은 위상 90°을 기준으로 Q_{max} (371 mV)가 발생하였으나, 인가전압이 증가함에 따라 30°~45°로 Q_{max}의 위상이 이동함을 확인할 수 있다. 또한 방전신호원의 위치를 추정하기 위하여 그림 12와 같이 실험계를 구성하고, 부분방전신호를 측정하였다. 용량성 프로브간의 거리를 각각 10 cm로 일정하게 배치하고, 발생되는 신호를 동시에 측정하였다.

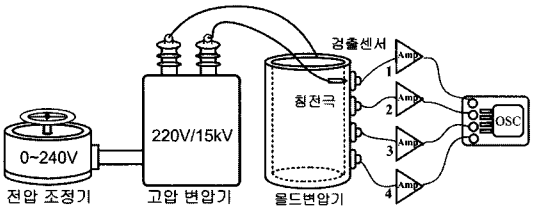


그림 12. 실험계의 구성.
Fig. 12. Configuration of experiment apparatus.

그림 13에 각각의 용량성 프로브에서 측정된 부분방전신호를 나타내었다.

측정결과, 방전신호원으로부터 멀어질수록 검출되는 신호의 크기가 감소함을 확인할 수 있으며, 부분방전신호의 크기를 비교함으로써 부분방전 발생지점의 수직적 위치추정이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

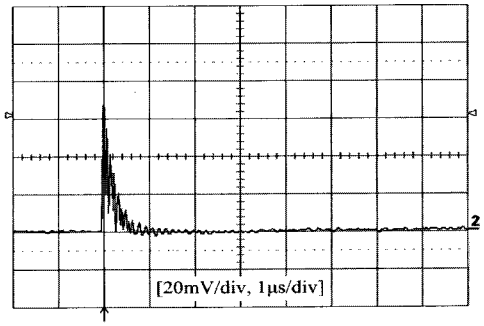
본 논문에서는 몰드변압기내의 부분방전신호를 검출하기 위해 용량성 프로브를 적용하였으며, 미소 방전신호의 고정도 측정을 위하여 주파수 대역 500 Hz~30 MHz (-3 dB)에서 이득 40 dB인 저잡음 증폭회로(LNA)를 설계·제작하였다. 교정실험으로부터 7.16 mV/pC의 측정감도를 산출하였으며, 모의 결함으로부터 방전신호를 측정하고 특성을 분석하였다.

부분방전펄스의 위상분포를 분석한 결과, 방전개시전압에서는 위상 90°부근에서 Q_{max}가 발생하였으나 방전개시전압보다 높은 전압에서는 30°~45°부근으로 이동하는 특성을 나타내었다. 또한, 용량성 프로브를 수직으로 설치하여 몰드변압기내에 발생되는 방전신호원의 위치를 추정할 수 있었다.

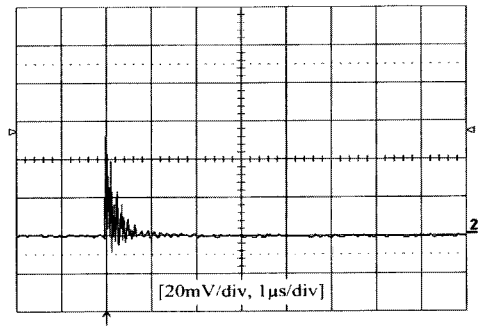
실험 결과로부터 용량성 프로브를 이용한 부분방전 측정장치는 몰드변압기 내의 방전신호를 검출함에 있어서 충분한 특성을 가짐을 확인하였으며, 다양한 환경에서 정보가 취득된다면 몰드변압기의 절연진단에 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

감사의 글

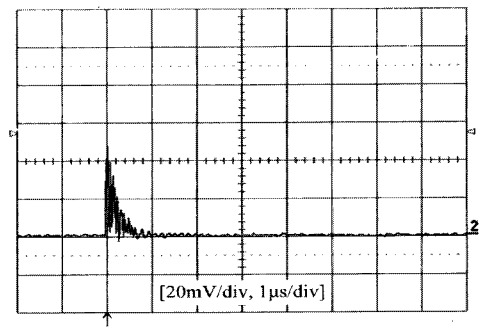
본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.



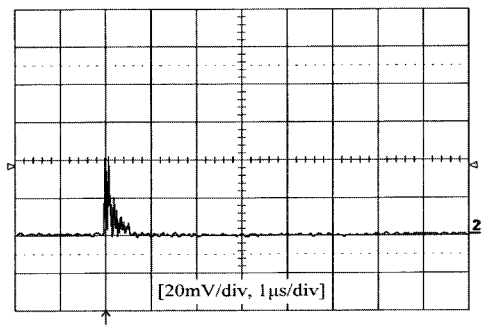
(a) 센서 1



(b) 센서 2



(c) 센서 3



(d) 센서 4

그림 13. 설치위치에 따른 출력신호.
Fig. 13. Output signals of capacitive prove according to installation location.

참고 문헌

[1] P. Werle, V. Wasserberg, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Comparison of Different Partial Discharge Measurement Methods on Dry Type Transformers in Operation", 2nd International Conference on Dielectrics and Insulation (ICDI), Stara Lesna, CZ, 2000.

[2] L. E. Lundgaard, "Partial discharge-Part XIV : Acoustic partial discharge detection practical application", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, p. 34, 1992.

[3] Y. Lu, X. Tan, and X. Hu, "PD detection and localization by acoustic measurement in an oil-filled transformer", IEEE Pro.-Sic. Meas. Technol., Vol. 147, No. 2, p. 81, 2000.

[4] 민윤홍, 유호근, 배선기, 김호철, 이윤재, "저손실형 복합절연 주상변압기 개발 및 단락특성에 관한 연구", 대한전기학회 2002하계학술대회논문집(B), p. 607, 2002.

[5] P. D. Agoris, S. Meijer, and J. J. Smit, "Evaluation of On-line Insulation Condition Assessment Techniques for power transformers", International Symposium on High-Voltage Engineering(ISH), Beijing, China, 2005.

[6] 길경석, 박대원, 김일권, 최수연, 박찬용, "부분방전에 의한 음향신호의 검출과 위치추정에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 20권, 10호, p. 907, 2007.

[7] S. Tenbohlen, D. Uhde, J. Poittevin, H. Borsi, P. Werle, U. Sundermann, and H. Matthes, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On and Off-line Methods : Results, Examples and Future Trends", CIGRÉ Paris, Paper 12-204, 2000.

[8] 길경석, 송재용, 박대원, "용량성 프로브와 광전송회로를 이용한 광대역 전압측정장치", 한국센서학회지, 13권, 5호, p. 363, 2004.

[9] 길경석, 박대원, 최수연, 김일권, 박찬용, "가스절연개폐에 용량성 전압프로브를 이용한 부분방전 측정", 전기전자재료학회논문지, 21권, 1호, p. 85, 2008.