몰드변압기에서 용량성 프로브에 의한 부분방전 검출 기술

정광석¹, 박대원¹, 차현규¹, 차상욱¹, 길경석^{1,a}

¹ 한국해양대학교 전기전자공학부

Detection Technique of Partial Discharge by a Capacitive Probe in Cast-resin Transformers

Kwang-Seok Jung¹, Dae-Won Park¹, Hyeon-Kyu Cha¹, Sang-Wook Cha¹,
and Gyung-Suk Kil^{1,a}

¹ Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received January 24 2011; Revised March 26, 2011; Accepted March 28, 2011)

Abstract: This paper dealt with a partial discharge (PD) detection method for insulation diagnosis in cast-resin transformers. To detect PD pulse, a planar-capacitive probe was designed and fabricated. The probe has no insulation problem and can be installed on cast-resin transformers even in operation since it does not connect with high voltage conductor. The PD measurement system consists of the capacitive probe, a coupling network of 100 [kHz] low-cutoff frequency, and an amplifier with a gain of 40 [dB] and a frequency bandwidth of 500 [Hz]~45 [MHz]. A plane-needle and a plane-plane electrode system were fabricated to simulate insulation defects in a cast-resin transformer. Sensitivity of the PD measurement system, which is evaluated by a standard calibrator was 0.35 [mV/pC] for positive and 0.45 [mV/pC] for negative, respectively. The PD detection by the capacitive probe was less sensitive than that by a coupling capacitor according to IEC 60270, but we could analyze the magnitude and the phase distribution of PD pulse.

Keywords: Partial discharge, Insulation diagnosis, Cast-resin transformer, Capacitive probe, IEC 60270.

1. 서 론

변압기에서 절연내력은 운전 성능과 수명에 직접적인 관련이 있다. 최적의 변압기 절연설계가 이루어지고, 우수한 특성의 절연재료를 사용해도 운전 중에 발생하는 전기적, 열적, 환경적 스트레스로 인해 절연 열화가 진행되며, 설계 단계에서 고려된 기대수명을 다하지 못하는 경우가 많다.

전력용 변압기의 제조 시 이물질, 불필요한 수분이 함유되거나 외부 충격, 진동에 의해 손상될 경우 절연물에 결함이 형성되며, 운전 시 주위 절연물에 비

해 낮은 유전율을 가지는 결함부분에 전계가 집중되어 부분방전이 발생하게 된다 [1]. 부분방전 발생 초기에는 방전전하량의 크기가 미소하여 절연물의 성능에 큰 영향을 미치지 못하지만, 장기간 지속될 경우 전기 트리 (electrical tree)를 성장시키고, 방전전하량이 급속히 증가하여, 최종적으로 절연파괴로 전력사고를 유발한다.

대부분의 절연파괴는 부분방전으로부터 진전되므로 이의 검출을 통해 전력용 변압기의 절연상태를 진단할 수 있고 운전 중에도 지속적인 측정이 가능하므로, 전력설비의 절연진단을 위해 부분방전 신호의 측정 및 분석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [2,3].

a. Corresponding author; kilgs@hhu.ac.kr

변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 임펄스 형태의 미소 전류와 동반하여 초음파, VHF, UHF 대역의 방사전자파가 발생하므로 결합콘덴서, 고주파변류기, 초음파센서 및 UHF 안테나 등을 이용하여 부분방전을 검출할 수 있다 [4-10].

유입변압기의 경우, 유증가스 분석법, 결합콘덴서를 이용한 방전펄스 측정법, 초음파센서를 이용한 음향 신호 측정법, UHF 안테나를 이용한 전자파 측정법 등이 적용되고 있다. 반면, 특고압에 사용되는 몰드변압기는 결합콘덴서를 이용한 측정법이 적용되어 부분방전의 검출감도는 좋으나 고압의 콘덴서를 변압기 외부의 각 상에 설치하는 방식이므로 기설의 몰드변압기에서 설치가 어려울 뿐만 아니라, 고압 환경에 따른 결합콘덴서의 특성변화로 인해 지속적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있다. 운전 중인 몰드변압기의 절연진단을 위한 부분방전 측정장치는 고전압환경 하에서의 절연문제, 온도특성을 고려해야 될 뿐만 아니라, 기설 및 신설 변압기에서의 설치와 유지보수가 용이하여야 하며, 방전신호의 분석을 위해 충분한 검출감도와 주파수 특성을 가져야 한다.

따라서 본 논문에서는 몰드변압기에서 용량성 프로브에 의한 비접촉식 부분방전 검출에 대해 기술하였으며 IEC 60270에 의한 검출방법과 비교하여 감도 및 부분방전펄스의 위상분포를 비교분석하였다.

2. 실험 방법

고체절연물에서의 결함은 그림 1과 같이 정전용량 C_a , C_b , C_c 를 이용한 등가회로로 나타낼 수 있다.

영역 I_1 은 절연물의 정상부분, 영역 I_2 는 결함부분이다. C_a 는 정상적인 고체절연물 부분, C_b 는 보이드와 직렬로 접속되는 고체절연물 부분, C_c 는 절연파괴의 통로로 작용하는 보이드 부분의 정전용량 값을 나타낸다 [11,12]. 교류전압 V 가 인가되는 동안 방전이 발생하지 않으면, 보이드 C_c 에 가해지는 전압은 그림 2의 점선 sV 와 같다.

전압 sV 가 v_i 에 도달하면 보이드 C_c 에서 정극성의 방전이 발생하며, 수 [ns]~수 십 [ns]의 방전지속시간 후 전압 sV 는 v_e 까지 저하한다.

방전개시전압 v_i 와 v'_i 는 결함의 상태와 위치에 따라 크기가 결정되므로 같은 값을 가지지는 않으며 방전이 발생하는 전압 v_i 를 방전개시전압 (discharge inception

Fig. 1. Equivalent circuit of a void defect.

Fig. 2. PD occurrence in AC voltage.

Fig. 3. PD detection according to IEC 60270.

voltage, DIV)이라고 하고 방전이 사라지는 전압 v_e 를 방전소멸전압 (discharge extinction voltage, DEV)이라 한다 [13].

2.1 IEC 60270에 따른 검출방법

IEC 60270에 따른 기본적인 부분방전 검출원리는 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며, 시료의 절연열화로 인해 발생한 부분방전 펄스를 결합콘덴서와 검출임피던스를 이용하여 측정하는 방법이다 [14].

실험계는 시료에 시험전압 인가를 위한 고전압 발생원, 부분방전에 의한 펄스가 검출임피던스에 유효하게 전달되도록 폐회로를 형성하기 위한 결합콘덴서, 전류펄스를 전압펄스로 변환하는 검출임피던스, 미소 펄스를 정확히 측정하기 위한 증폭회로와 관측계기로 구성된다.

2.2 용량성 프로브에 의한 검출방법

용량성 프로브를 이용한 부분방전 검출 등가회로는 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 동작원리는 부분방전 발생에 의해 측정대상 표면의 법선방향으로 형성되는 전계를 용량성 프로브를 이용하여 검출하는 것이다 [15]. 부분방전에 의한 펄스의 크기는 프로브의 단면적과 입사변위전류밀도에 비례하며, 주파수 응답은 검출임피던스 Z 와 증폭회로의 입력임피던스 Z' 에 의하여 결정된다 [16,17].

2.3 설계 및 제작

제안한 부분방전 측정계는 그림 5와 같이 용량성 프로브, 결합회로망, 저잡음 증폭회로로 구성된다. 검출전극이 몰드변압기 표면에 대해 평행으로 설치될 수 있는 그림 6의 평판형 용량성 프로브를 설계·제작하였다.

용량성 프로브는 두께 0.07 [mm], 면적 56.5 [cm²]의 동판과 유전체로 두께 0.2 [mm], 비유전율 4, 면적 150 [cm²]의 난연성 에폭시 수지를 사용하였다. 검출신호의 전송에는 고주파 특성이 우수하고 특성임피던스가 50 [Ω]인 동축케이블 (RG-58G/AU)을 사용하였으며 이와의 접속을 위해 SMA-BNC 커넥터를 접지전극 면에 부착하였다.

동축케이블의 절연체와 외부도체에 의한 정전용량 (90~100 [pF/m])은 전송신호의 왜곡을 발생시키므로, 이의 영향을 제거하기 위해 동축케이블의 특성임피던스와 같은 50 [Ω]의 정합저항 R_m 과 보상저항 R_i 를 그림 7과 같이 구성하였다 [18,19].

몰드변압기에서 부분방전은 10~20 [ns]의 상승시간을 갖는 고주파 전류펄스 형태로 발생하므로 검출임피던스와 증폭회로의 입력임피던스로 구성되는 결합회로망 A_v 가 필요하며, 여기에 사용되는 RLC 소자는 시험전압 범위에서 소손이나 방전이 발생하지 않는 안정적인 소자를 사용해야 한다.

Fig. 4. PD detection by the capacitive probe.

Fig. 5. PD measurement system.

Fig. 6. Structure of the capacitive probe.

Fig. 7. Equivalent circuit of a coupling network.

그림 7의 등가회로는 결합회로망의 출력전압 $V(t)$ 와 시간에 따라 변화하는 입사전계의 세기 $\frac{dE(t)}{dt}$ 의 관계를 나타낸다.

프로브의 정전용량을 C_e [F], 유효 검출면적을 S [m^2], 검출임피던스 R_m [Ω], C_d [F], L_d [H]와 증폭기의 입력임피던스 R_i [Ω]의 결합에 의한 합성임피던스를 A_v 라고 했을 때, A_v 는 다음과 같이

$$A_v = \frac{Z_s}{R_m + Z_s} \left\{ \frac{1}{1 - j(f_c/f)} \right\} \quad (1)$$

로 구할 수 있으며, 이때의 Z_s 는 L_d 와 R_i 의 합성임피던스로써 다음과 같이

$$Z_s = \frac{L_d \times R_i}{L_d + R_i} = \frac{2\pi f L_d R_i}{2\pi f L_d + R_i} \quad (2)$$

로 구할 수 있다. 따라서 결합회로망의 출력전압 $V(t)$ 는

$$V(t) = S \times \frac{Z_s}{R_m + Z_s} \left\{ \frac{1}{1 - j(f_c/f)} \right\} \times \varepsilon \frac{dE(t)}{dt} \quad (3)$$

로 정리할 수 있다.

상기 식에서 합성임피던스로 표현된 A_v 는 검출임피던스와 증폭회로의 입력임피던스로 이루어진 결합회로망으로써 상용주파수 성분을 차단하고 고주파 성분의 부분방전 펄스만을 검출하기 위한 일종의 고역통과필터로 동작함을 알 수 있으며, 이의 일반화된 주파수 응답을 그림 8에 나타내었다.

결합회로망 A_v 는 변압기에서 발생하는 부분방전 펄스의 성분을 고려하여 -3 [dB]가 되는 차단주파수를 100 [kHz]로 설계함으로써 부분방전 펄스를 충분히 검출할 수 있도록 하였고, 시험전압인 60 [Hz] 상용주파수는 130 [dB] 이상 감쇄시킨다.

용량성 프로브에 의해 검출되는 부분방전 펄스는 매우 미소하므로 그림 9와 같은 저잡음 증폭회로를 제작하였다.

함수발생기를 이용하여 정현파 입력에 대한 출력전압의 비로 주파수 응답을 평가하였으며 이를 그림 10에 나타내었다. 이득 40 [dB], -3 [dB]에서 주파수 대역이 500 [Hz]~45 [MHz]이다.

Fig. 8. Frequency response of the coupling network.

Fig. 9. Prototype low noise amplifier.

Fig. 10. Frequency response of the amplifier.

3. 결과 및 고찰

몰드변압기에 설치한 용량성 프로브의 부분방전 측정시스템의 감도를 산출하기 위해 그림 11과 같은 고정 실험계를 구성하였다. 몰드변압기 내부의 침예한 부분 또는 권선 및 턴간에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 곡률반경 10 [μm]의 침전극과 평판전극을 사용하여 간격 3 [mm]의 평판-평판, 평판-침결함을 제작하였다. IEC 60270 규격을 만족하는 표준

Fig. 11. Configuration of the calibration system.

교정펄스발생기 (power diagnostix, CAL1A)로 결함에 20~100 [pC]의 정극성 및 부극성의 교정펄스를 주입하고 입력전하량에 대한 출력전압의 비로써 감도를 산출하였다.

적용실험으로는 평판-평판, 평판-침 결함에서 발생하는 부분방전 펄스의 위상분포를 측정 및 분석함으로써 용량성 프로브를 이용한 검출방법의 성능을 평가하였다.

3.1 감도

몰드변압기 절연체에 삽입한 결함에 20 [pC]~100 [pC]의 정극성 및 부극성 펄스를 인가하였으며 이에 대한 측정결과는 그림 12와 같다. IEC 60270에 따른 검출감도는 정극성에서 10.5 [mV/pC], 부극성에서 12 [mV/pC]이었으며, 용량성 프로브의 감도는 정극성에서 0.35 [mV/pC], 부극성에서 0.45 [mV/pC]를 나타내었다.

3.2 위상 분포

평판-평판 결함의 방전개시전압은 3.95 [kV], 방전소멸전압은 3.89 [kV] 그리고 평판-침 결함의 방전개시전압은 3.08 [kV], 방전소멸전압은 2.86 [kV]이었다. 각 결함의 방전개시전압에서 부분방전 펄스의 위상분포를 30분 동안 측정하여 그림 13에 나타내었다.

평판-평판 결함에서 부부방전 펄스는 측정방법과 무관하게 12°~90°, 192°~277°, 평판-침 결함에서는 345°~120°, 165°~292°에서 분포하였다. 이는 결함의 형태에 따른 전계의 집중도 차이에 의한 것으로 곡률반경이 작은 침 결함에서 넓은 범위의 부분방전이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 12. Sensitivity of the PD measurement system, (a) IEC 60270, (b) capacitive probe.

Fig. 13. Phase distribution of PD pulses. (a) plane-plane, (b) plane-needle (10 μm).

4. 결 론

본 논문에서는 몰드변압기의 절연진단을 위해 비접촉식 용량성 프로브를 이용한 부분방전 측정 및 분석 기술에 대해 연구하였다. 실험계는 평판형 용량성 프로브, 차단주파수 100 [kHz]의 결합회로망, 이득 40 [dB], 주파수 대역 500 [Hz]~45 [MHz]인 증폭회로로 구성된다.

용량성 프로브의 부분방전 검출계의 감도는 정극성에서 0.35 [mV/pC], 부극성에서 0.45 [mV/pC]의 선형적 특성을 나타내었다. 용량성 프로브를 이용한 검출 방법은 IEC 60270에 따른 결합콘덴서 방법에 비해 감도는 다소 낮지만, 비접촉식으로 부분방전의 크기와 위상분포 등 몰드변압기의 절연진단에 필요한 정보를 얻을 수 있었다. 실험결과로부터 본 논문에서 제안한 비접촉식 용량성 프로브는 몰드변압기의 절연진단에 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

REFERENCES

- [1] S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Pointhevin, *CIGRE Session 2000 (CIGRE, Paris, 2000)* p. 12.
- [2] P. Agoris, P. Cichecki, S. Meijer, E. Gulski, and J. J. Smit, *Proc. 15th Int. Symp. High Volt. Eng. (ISH, Ljubljana, Slovenia, 2007)* p. 7.
- [3] G. S. Kil, S. W. Kim, D. W. Park, S. J. Kim, and J. M. Song, *J. KIEEME*, **23**, 53 (2010).
- [4] G. C. Stone, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, **7**, 9 (1991).
- [5] J. Y. Yoon, K. S. Han, H. J. Ju, and S. G. Goo, *J. KIEEME*, **23**, 798 (2010).
- [6] T. Leibfried and K. Feser, *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 1996, Montreal, 1996)* p. 34.
- [7] J. P. van Bolhuis, E. Gulski, and J. J. Smit, *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2002, Boston, MA USA, 2002)* p. 22.
- [8] M. D. Judd, L. Yang, and I. B. B. Hunter, *Sensors and Signal Interpretation, IEEE Electr. Insul. Mag.*, **21**, (2005).
- [9] G. J. Pukel, M. Muhr, W. Lick, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2006, Changwon, Korea, 2006)*.
- [10] Wang Caixiong, *International Conference on condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2010, Tokyo, Japan, 2010)*.
- [11] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High voltage engineering 4th ed* (McGraw-Hill, New delhi, 2009) p. 364.
- [12] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment* (Butterworth, London, 1989) p. 129.
- [13] T. Aschwanden, M. Hassig, J. Fuhr, P. Lorin, V. Der Houhanessian, W. Zaengl, A. Schenk, P. Zweacker, and A. Piras, *CIGRE Session 1998 (CIGRE, Paris, 1998)* p. 127.
- [14] International Electrotechnical Commission, IEC International Standard 60270, *High-voltage test techniques-Partial discharge measurements* (2000).
- [15] C. Y. Park, D. W. Park, J. S. Choi, and G. S. Kil, *J. KIEEME*, **22**, 786 (2009).
- [16] V. Fister and H. J. Koster, *4th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH, Athens, Greece, 1983)* p. 61.
- [17] J. D. Kraus, *Electromagnetics*, (McGraw-Hill, New delhi, 1988) p. 392.
- [18] J. Meppelink and P. Hoper, the 5th *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH, Braunschweig, Germany, 1987)* p. 71.
- [19] Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, and Roshdy Radwan, *High-Voltage Engineering Theory and Practice 2nd ed*, (Marcel Dekker, Inc, New York, 2000) p. 235.