

논문 22-10-14

## 변압기 절연지 표면 금속 이물질 방전에 의한 극초단파 신호특성

### Characteristics of Ultra High Frequency Partial Discharge Signals from Metallic Particle Defected Oil-paper Insulation in Transformer

윤진열<sup>1,a</sup>, 주형준<sup>1</sup>, 구선근<sup>1</sup>, 박기준<sup>1</sup>  
(Jin-Yul Yoon<sup>1,a</sup>, Hyung-Jun Ju<sup>1</sup>, Sun-Geun Goo<sup>1</sup>, and Kijun Park<sup>1</sup>)

#### Abstract

This paper was provided to help in detecting defects in power transformer. For this purpose, a partial discharge cell was designed and manufactured as a discharge source to simulate particle defected paper-oil insulation in power transformer. Experimental set-up for measuring PD signals was described. Magnitude of electromagnetic wave signals and corresponding amount of apparent discharge were measured simultaneously against phase of applied voltage to the discharge cell. Frequency range and pattern of PRPD(Phase Resolved Partial Discharge) of partial discharge signals were examined and analyzed. The results will be contributed to build the defect database of power transformer and to decrease the substation faults.

**Key Words** : Power transformer diagnosis, Partial discharge, UHF PD signal, Particle defected surface discharge, PD cell

#### 1. 서론

가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS)의 고장을 예방할 목적으로 GIS 외함 내부에서 발생하는 부분방전(Partial discharge, PD) 현상을 검출하기 위해 극초단파(Ultra High Frequency, UHF) 대역의 전자기파 신호를 내장된 혹은 외장된 센서를 이용하여 측정하는 방법인 UHF 전자기파 부분방전 측정기술이 1980년대 후반 영국에서 최초로 개발된 이후 오늘날에 이르러서는 많은 나라에서 정착의 단계에 이르고 있다. 우리 나라도 1990년대 중반부터 765 kV 변전소에 적용할 목적으로 UHF 부분방전 측정기술을 개발하기 시작하여 오늘에 이르러서는 345 kV GIS와 154 kV GIS는 물론 22.9 kV GIS까지 UHF PD 진단 기술을

적용하기 위한 노력이 시도되고 있다[1-5]. UHF PD 진단 기술은 GIS 예방진단 수단으로 신뢰성이 인정됨에 따라 본 기술을 보유하고 있는 국가들 중 일부에서는 전력용 변압기에도 적용할 목적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 변압기는 GIS와는 달리 내부공간을 1차원이 아닌 3차원으로 해석해야하는 점과 전자기파 전파매질이 가스가 아닌 절연유라는 점, 부분방전 발생장소가 코일 내부 깊숙한 곳이 될 수 있다는 점, 절연체가 절연유 뿐만 아니라 절연지 등 다양한 재료로 구성된다는 점, 내부 구조도 GIS와는 비교가 되지 않을 만큼 복잡한 점 등으로 인해 GIS용 UHF PD 진단 기술 개발 경험을 보유하고 있는 연구기관도 지금까지 상당한 기간의 연구노력에도 불구하고 상업용으로 사용할 만큼 만족스런 수준까지 도달하지 못하였으며 앞으로 많은 연구가 이루어질 것으로 예측된다[6-9]. 지금까지 각 나라의 연구결과들을 살펴보면 절연유 중에서 일어나는 부분방전에 의한 전자기파의 주파수 분포가 UHF 대역(300 MHz ~ 3 GHz)에도 고루 분포하고 있어서 GIS에서 개발된

1. 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소  
(대전시 유성구 문지동 103-16)  
a. Corresponding Author : jyyoon@kepri.re.kr  
접수일자 : 2009. 8. 19  
1차 심사 : 2009. 9. 15  
심사완료 : 2009. 9. 23

기술의 상당부분을 활용하여도 어려움이 없을 것으로 보고 되고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 변압기가 갖는 특수성으로 인해 변압기에 UHF 부분방전 검출기술을 개발하여 적용하는 데에는 연구자들마다 각기 다른 다양한 의견들이 제시되고 있다[10-12]. UHF 부분방전 기술을 변압기에 적용하기 위해서는 GIS의 경우와 마찬가지로 여러 분야의 기술이 함께 개발되어야 한다. 이들 요소기술은 센서설계 및 제작, 센서 배치, 결합위치 추정, 결합종류 식별, 잡음처리 기술을 포함하여 신호취득과 신호처리와 같은 감시시스템의 설계 및 제조기술 등으로 구성된다. 이들 중 결합 종류를 식별하는 연구의 경우 지금까지 여러 학자들이 절연물 표면방전, 절연부 공극결합, 돌출전극에 의한 코로나방전 결합, 부유전극(floating electrode)결합, 도체간 접촉불량을 주로 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)와 같은 인가전압 위상을 기준으로 분석해 온 것이 주류를 이루고 있다[13-17].

본 논문에서는 변압기류가 갖는 특수한 형태의 결합인 절연지 표면방전을 검출할 목적으로 표면방전의 일종인 절연지 표면에서의 금속 이물질 결합에 의해 발생하는 부분방전 현상을 조사하고 이들 결합에 의한 전자기파 신호의 특성을 분석함으로써 변전소 변압기 고장예방에 기여하고 변압기 부분방전 상시감시시스템 개발을 위한 요소기술 개발에 기여하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 금속 이물질 결합 방전 Cell

변압기 충전부에 금속이물이 접촉되어 있을 경우 발생하는 부분방전 현상을 검출하기 위해 그림 1의 표면방전 cell 내 고압측 전극 부위에 직경 0.5 mm 이하의 알루미늄 금속 이물질들을 절연지 표면에 접촉시킨 cell에 절연유를 충전하는 구조로 제작하였다. Cell에 충전한 절연유는 CPS사 제품의 FR3이며 이 제품의 절연과파전압 크기는 56 kV@25°C(0.0080" gap :ASTM D1816), 점도는 33 cSt@40°C(ASTM D455)의 특성을 갖는다.

### 2.2 실험장치의 구성 및 실험방법

절연지 표면 금속 이물질 결합에 의해 발생한 PD에 의해 방사되는 전자기파 신호의 파형과 주파수 분포와 방전패턴을 측정하기 위해 그림 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 방전을 모의하기 위해 그림 1과 같은 PD cell을 제작하여 사용하였다.

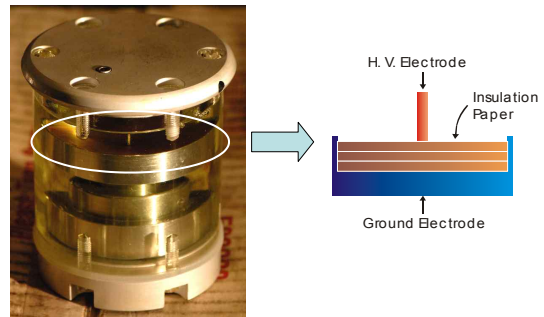


그림 1. 금속이물 방전을 모의한 PD cell.

Fig. 1. PD cell for metallic particle of surface discharge.

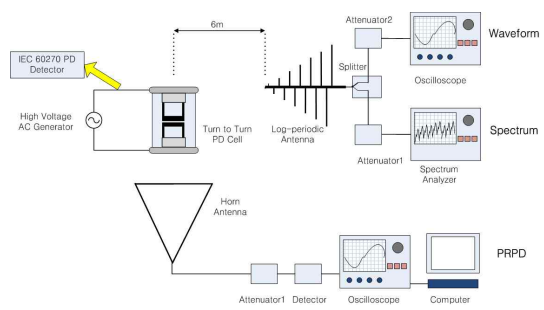


그림 2. 부분방전에 의한 방사 전자기파 측정 실험구성.

Fig. 2. Experimental set up for measuring the UHF PD signals.

0~50 kV의 60 Hz의 AC 전압을 20분 단위로 수 kV씩 증가시키면서 부분방전을 발생시켰다. PD에 의한 방사 전자기파 전기장의 세기를 측정하기 위해 PD cell과는 6 m 떨어진 위치에 교정된 대수주기 안테나를 설치하였다. 전자기파 신호의 파형과 주파수 분포를 측정하기 위해 안테나에서 검출된 신호는 신호감쇠기와 분배기를 거쳐 오실로스코프(TDS7404, Tektronix)와 주파수 분석기(FSP7, Rohde & Schwarz)로 입력되도록 하였다. 이때 분배기와 신호감쇠기의 감쇠량을 조정하여 신호의 크기를 계측기의 입력범위에 맞도록 조절하였다. 획득한 주파수 분포로부터 안테나 팩터와 감쇠기 삽입손실(6.1 dB)을 보정하여 측정된 신호의 주파수에 대한 전기장의 크기를 산출하였다.

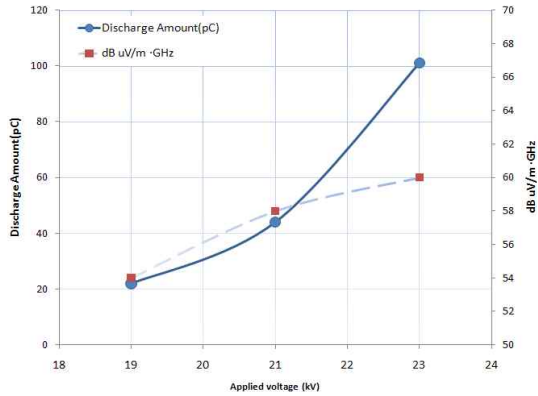


그림 3. 전압인가별 결보기방전량과 전자기파 방전신호의 크기.

Fig. 3. Apparent discharge and electromagnetic wave versus applied voltage.

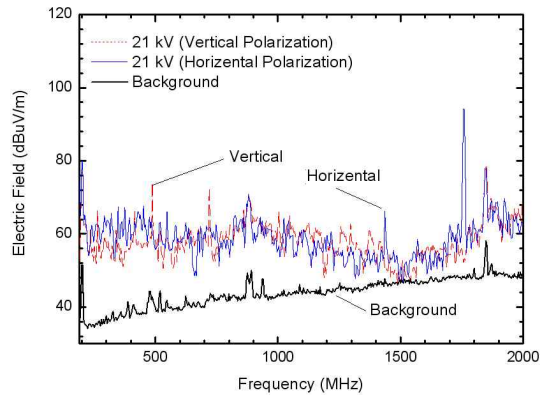


그림 5. 금속이물의 전자파 방전신호의 수직/수평편파 크기 비교.

Fig. 5. Spectral response of Horizontal and vertical polarization PD signal from particle defect.

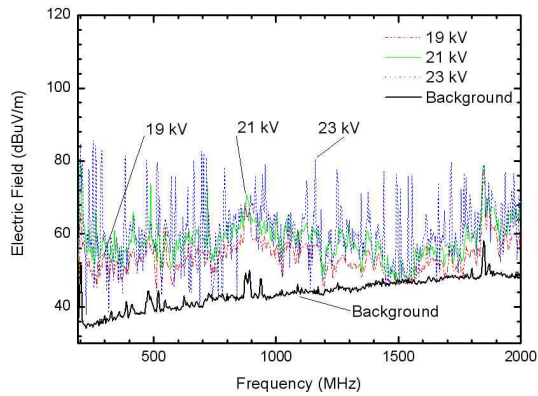


그림 4. 인가전압이 19~23 kV 일때 금속이물 방전에 의한 전자기파의 주파수 분포(수직편파).

Fig. 4. Spectra of the PD signal from particle defects at 19~23 kV.

방전에 의한 전자기파 신호의 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge) 패턴을 얻기 위하여 PD cell에서 0.5 m 떨어진 위치에 혼 안테나를 설치하였다. 안테나에서 검출된 방전신호는 필터를 이용하여 잡음이 제거되고 오실로스코프(TDS7104, Tektronix)로 입력된다. 오실로스코프에서 측정된 신호는 인가전압 위상에 대한 신호의 크기로 변환되어 컴퓨터로 전송되어 프로그램에 의해 PRPD 패턴으로 변환되어 표시된다. PRPD 패턴으로 변

환할 때 측정에 사용한 필터에 의한 손실과 안테나 팩터는 고려하지 않았으며 모든 측정에서 같은 설정을 사용하여 상대적인 크기를 표시하였다. 전자기파 신호의 측정과 함께 결보기 방전량을 IEC60270 방식에 의한 PD detector(Robinson, DDX 7000)를 이용하여 동시에 측정하였다. 모든 측정기는 인가전원의 위상에 동기하여 측정하였으며, 각각의 기기에서 측정된 결과는 PC로 전송하여 저장하고 분석하였다.

### 2.3 실험결과

절연지 표면에 금속 이물질질을 모의한 PD cell에 전압을 인가하였을 때 19 kV 에서 부분방전이 발생하기 시작하여 인가전압을 증가시킬수록 그림 3과 같이 방전량도 급격히 증가함을 알 수 있었다.

금속 이물질에 의한 전자기파 방전신호의 전기장에 대한 주파수 분포와 크기를 그림 3과 그림4에서 살펴보면 2 GHz 이하의 전 대역에서 방전신호가 비교적 균등하게 발생하였다. 그러나 인가전압이 증가할수록 결보기 방전량은 급격히 증가하는 반면 전자기파 방전신호의 크기는 상대적으로 조금 증가하였다. 이는 인가전압의 증가에 따라 방전신호가 상대적으로 저주파 영역에서 주로 증가하였음을 의미한다. 인가전압이 23 kV에서 일부 강한 크기의 전자기파 방전신호가 발생하였다. 전자기파 방전신호의 편극특성을 그림 5와 같이 살펴보면 약 900 MHz를 기준으로 낮은 주파수에서

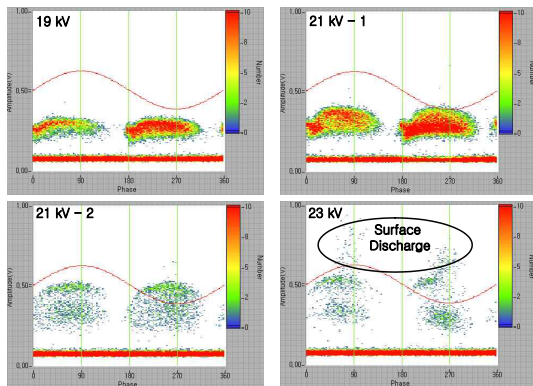


그림 6. 인가전압별 금속이물에 의한 전자파 방전 신호의 PRPD 변화. 누적시간 = 10초.

Fig. 6. Variation of PRPD pattern of particle defect according to the magnitude of the applied voltage.

는 수평편극의 신호가 약간 크고 높은 주파수에서는 수직편파가 약간 크게 발생하였음을 관찰할 수 있다. 그림 5에서 0.9 GHz와 1.7 GHz대역에서의 큰 신호는 외부에서 유입된 휴대폰 CDMA 신호이다.

금속 이물질 결함에 대한 인가 전압별 전자기파 부분방전 신호의 PRPD는 그림 6과 같다. 그림에서 1, 3사분면에서 비교적 일정한 크기의 방전신호가 발생하였음을 알 수 있다. 이는 고압측 전극 부근의 금속 이물질은 전기적으로 전극에 연결되어 있지 않아 부유전극으로서의 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다. 특히 금속 이물질 모양새가 뾰족하고 금속 이물질과 고압 전극 사이의 capacitance가 작아 부유전극에 비해 방전빈도는 높고, 방전신호의 크기는 작은 것으로 생각된다. 그림 6에서 23 kV에서의 PRPD를 보면 침도가 높은 표면방전이 동시에 발생하였다.

고전압을 인가한 후 절연지의 상태를 관찰해 보면 그림 7과 같이 절연지의 중앙부에 있는 금속 이물질로부터 외곽방향으로 백화된 영역을 확인할 수 있었으며, 이는 표면방전이 발생한 증거라 하겠다. 이 실험에서 알 수 있듯이 금속 이물질에 의한 방전현상은 다양한 양상을 보임을 알 수 있다.

### 3. 결론

전력용변압기 내부의 절연지 표면방전 결함의 한 종류인 절연지 표면의 금속 이물질 결함을 모 의한 PD cell을 제작하여 방전실험을 하였다. 금속

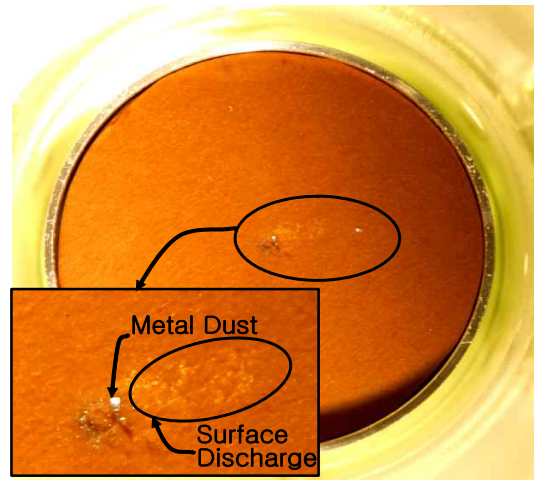


그림 7. 절연지에 부착된 금속이물의 모습과 표면 방전의 흔적.

Fig. 7. Metallic particles on the paper-oil surface and trace of the discharge.

이물질 결함에 의한 방전현상은 인가전압이 증가할수록 겉보기 방전량은 급격히 증가하는 반면 전자기파 방전신호의 크기는 크게 증가하지 않았다. 금속 이물질 결함에 대한 인가 전압별 전자기파 부분방전 신호의 PRPD는 인가전압 위상을 기준할 때 1, 3사분면에서 비교적 일정한 크기의 방전신호가 발생하였으며 금속 이물질 결함의 PRPD는 타 결함과는 달리 다양하면서도 고유한 양상을 보였다. 본 실험 결과에서 얻은 방전의 특성은 전력용 변압기에서 발생하는 내부결함의 종류를 진단하는 데에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] G. Wanninger, "Apparent charge measurement in GIS by modern diagnostic methods", Eur. Trans. Elect. Power, Pt. 4, Vol. 7, p. 251, 1997.
- [2] M. D. Judd and O. Farish, "FDTD simulation of UHF signals in GIS", Proc. 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering Montreal, Vol. 6, 1997.
- [3] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS 부분방전 검출 기술연구", 한국전력공사 전력연구원, TR 98J2002.407. 2002.

- [4] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS 고장예방을 위한 UHF 부분방전 신호해석기술 연구", 전력산업연구개발사업 최종보고서, 한국전력공사 전력연구원, 2005.
- [5] K. Raja, F. Devaux, and S. Lelaidier, "Recognition of discharge sources using UHF PD Signatures", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, Iss. 5, p. 8, 2002.
- [6] Werle, P., Borsi, H., and Gockenbach, E., "Diagnosing the insulation condition of dry type transformers using a multiple sensor partial-discharge-localization technique", Electrical Insulation, 2002. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on, p. 166, 2002.
- [7] Gockenbach, E., "Partial discharge detection and localization in power transformers", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04. 2004 Annual Report Conference on, p. 466, 2004.
- [8] Shen, Z. B. and El-Saadany, E. F., "Localization of partial discharges using UHF sensors in power transformers", Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE.
- [9] J. Fuhr, "Procedure for identification and localization of dangerous PD sources in power transformers", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 12, Iss. 5, p. 1005, 2005.
- [10] H. Xiaoyun, L. Yifeng, and L. Yi, "Study of PD detection and location by means of acoustic measurements transformer", Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on, Vol. 2, p. 753, 2000.
- [11] Homaei, M., Mazhab Jafari, A., and Akbari, A., "Investigating suitable features for partial discharge localization in power transformer", Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on, p. 923, 2008.
- [12] Jafari, A. M., Akbari, A., Mirzaei, H. R., Kharezi, M., and Allahbakhshi, M., "Investigating practical experiments of partial discharge localization in transformers using winding modeling", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 15, Iss. 4, p. 1174, 2008.
- [13] Agoris, P., Cichecki, P., Meijer, S., and Smit, J. J., "Building a transformer defects database for UHF partial discharge diagnostics", Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, p. 2070, 2007.
- [14] Massingue, F., Meijer, S., Agoris, P. D., Smit, J. J., and Lopez-Roldan, J., "Partial discharge pattern analysis of modeled insulation defects in transformer insulation", Conf. Record of the 2006 IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation 2006, p. 542, 2006.
- [15] G. P. Cleary and M. D. Judd, "UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 153, No. 2, p. 47, 2006.
- [16] Aschenbrenner, D., and Kranz, H.-G., "On line PD measurements and diagnosis on power transformers", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, p. 216, 2005.
- [17] Jongen, R. A., Morshuis, P., Meijer, S., and Smit, J. J., "Identification of partial discharge defects in transformer oil", 2005 Ann. Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2005, p. 565, 2005.