

Signal Characteristics of Ultra-high Frequency Radiation from Partial Discharge in Insulation Oil

朱 炯 俊[†] · 具 嬋 根* · 朴 基 濬** · 韓 基 善* · 尹 珍 烈**
 (Hyoun-Jun Ju · Sun-Geun Goo · Ki-Jun Park · Ki-Seun Han · Jin-Yul Yoon)

Abstract - We have designed 4 types(void in insulation paper, protrusion electrode, floating electrode, surface discharge) of partial discharge(PD) defect to simulate typical faults found in oil filled power transformers. Ultra-high frequency(UHF) radiation due to PD was measured using a UHF measuring system and a conventional PD measuring system, simultaneously. Electromagnetic radiation spectra of these defects show UHF radiation up to about 1.5-2 GHz range. The phase resolved partial discharge(PRPD) patterns of UHF radiation from the PD defects were also measured and the pattern reveals distinct feature for each defect types. The UHF measuring could be used to detect PDs in oil filled transformers and analysis of the PRPD pattern should provide useful information on origin of PD signal.

Key Words : Partial Discharge, Insulation Oil, UHF PD signal, PD detection

1. 서 론

SF₆를 절연가스로 사용하는 가스절연개폐장치(Gas-insulated switchgear, GIS)의 예방진단기법으로 부분방전에 의한 극초단파(Ultra high frequency, UHF) 대역의 전자기파를 검출하는 방법은 오랫동안 연구되어왔으며 최근 보급이 확대되어 변전소현장에 성공적으로 적용되고 있다[1-5]. 변전소현장에서의 적용성과를 바탕으로 같은 방법을 전력용 변압기에 적용하려는 시도가 세계적으로 몇몇 그룹에서 진행되고 있다[6-9]. 그러나 GIS와는 달리 절연유에서 방전이 발생하는 변압기에서의 방전시 UHF 대역의 전자파 신호의 발생현상에 대해서는 연구그룹간에 큰 이견이 없는 것으로 보고되고 있으나 적용성이나 활용성에 대해서는 의견이 상이하다[10-11]. 본 논문에서는 절연유가 채워진 모의 부분방전 발생장치(PD cell)에 4종의 전형적인 결함을 제작하여 전압을 인가하고 부분방전을 발생시켜 발생하는 부분방전의 크기와 전자기파 신호를 다양한 방법으로 측정 하였다. 측정된 전자기파 신호로부터 주파수 분포를 분석하여 절연유에서 발생하는 부분방전도 SF₆가스에서와 같이 UHF 대역에서 전자파 부분방전 신호가 발생함을 보이고, 방전신호의 인가전압 위상에 대한 크기와 밀도(Phase resolved partial discharge, PRPD)의 패턴을 분석하여 절연유에서의 방전에서도 UHF 대역의 전자기파를 이용한 부분방전 측정방법이 전력기기의 진단에 적용 가능한 효과적인 방법임을 보이고자 한다.

2. 본 론

절연유에서의 부분방전 현상은 오래전부터 연구되어 왔으며 방전현상의 측정과 분석방법 그리고 활용목적 및 연구자에 따라 방전의 종류를 다양하게 분류한다. 본 논문에서는 방전 종류를 물리적 원인에 기초하여 분류한 IEEE C57.113-1991를 근간으로 크게 공극(Void), 돌출전극(Protrusion electrode), 부유전극(Floating electrode), 표면방전(Surface discharge), 4가지로 분류하여 실험하였다[12]. 표 1에 물리적인 원인에 따라 분류한 4가지 방전의 종류와 특징을 요약하였다.

표 1 부분방전 원인 분류

Table 1 Classification of partial discharge sources

방전의 종류	특 징
공극(Void)	절연체 내부 틈새에 의한 결함
돌출전극(Protrusion Electrode, Corona)	돌출부위에 전계가 집중되어 방전이 발생하는 결함
부유전극(Floating Electrode)	전기적으로 연결이 되어있지 않은 금속체 결함
표면방전(Surface/Creeping Discharge)	절연체의 표면을 통해 발생하는 방전

2.1 실험방법

절연유에서 발생하는 부분방전에 의해 방사되는 전자기파 신호의 파형과 주파수 분포 그리고 PRPD 패턴을 측정하기 위해 그림 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 표 1에서 분류한 모의결함을 그림 2와 같은 형태로 제작하여 절연유가 채워진

* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員
 ** 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 責 任 研 究 員 · 工 博
 † 교신저자, 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 一 般 研 究 員
 E-mail: juhjun@kepri.re.kr
 接受日字: 2007年 9月 13日
 最終完了: 2008年 1月 2日

비극속성용기(PD cell)에 담아 0~50 kV의 60 Hz의 AC 전압을 20분 단위로 수 kV씩 증가시키면서 부분방전을 발생시켰다. 방전에 의한 전자기파의 전기장 세기는 6 m 떨어진 위치에 설치된 대수주기 안테나를 이용해 검출하였다. 안테나에서 검출된 방전에 의한 전자기파 신호는 신호감쇠기와 분배기를 거쳐 오실로스코프(TDS7404, Tektronix)와 주파수 분석기(FSP7, Rohde & Schwarz)로 입력되어 방전신호의 파형과 주파수 분포를 측정하였다. 이때 분배기와 신호감쇠기의 감쇠량을 조정하여 측정된 신호의 크기를 계측기의 입력범위에 맞도록 조절하였다. 획득한 주파수 분포로부터 안테나 팩터와 감쇠기 삽입손실을 보정하여 측정된 신호의 주파수에 대한 전기장의 크기를 산출하였다. 방전에 의한 전자기파 신호로부터 PRPD 패턴을 얻기 위하여 PD cell에서 0.5 m 떨어진 위치에 혼 안테나를 설치하였다. 안테나에서 검출된 방전신호는 필터를 이용하여 불요잡음이 제거되고 오실로스코프(TDS7104, Tektronix)로 입력된다. 오실로스코프에서 측정된 신호는 인가 전압 위상에 대한 신호의 크기로 변환되어 컴퓨터로 전송되어 프로그램에 의해 PRPD 패턴으로 변환되어 표시된다. PRPD 패턴으로 변환할 때 측정에 사용한 필터에 의한 손실과 안테나 팩터는 고려하지 않았으며 모든 측정에서 같은 설정을 사용하여 상대적인 크기를 표시하였다. 전자파 신호의 측정과 함께 걸보기 방전량을 IEC60270 방식에 의한 PD detector (Robinson, DDX 7000)로 동시에 측정하였다. 모든 측정기는 인가전압의 위상에 동기하여 측정하였으며, 각각의 기기에서 측정된 결과는 PC로 전송되어 저장되고 분석하였다.

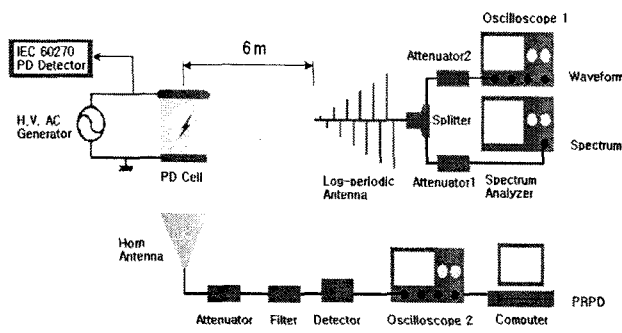


그림 1 부분방전에 의한 방사 전자기파 및 방전량 측정 실험구성
Fig. 1 Measurement setup for electromagnetic radiation

2.2 결함의 원인별 부분방전에 의한 방사 전자기파의 주파수 특성

각 결함별로 전압을 인가하고 방전이 유지되는 최소전압을 기점으로 일정 크기로 인가전압을 높이면서 부분방전에 의한 전자기파 신호의 주파수분포를 그림 3~6과 같이 측정하였다. 실험에 사용된 결함에서 부분방전이 유지되는 최소 전압과 결함의 물리적 특징을 표 2에 정리하였다. 그림 3~6에서 보인 부분방전에 의한 전자기파의 측정결과는 PD cell에서 6 m 거리에서 분배기와 감쇠기의 삽입 손실과 안테나 팩터를 보정한 전기장 세기의 주파수 분포이다. 그림 3의 공극결함에 의한 전기장의 주파수 분포에서는 인가전압이 높아짐에 따라 방전에 의한 전자기파의 세기가 양간 증가하였으며 전반적인 크기는 다른 결함에 비해 약 10~50 dB 작은 신호가 측정

되었다. 이것은 SF₆ 가스의 경우에서와 비슷하게 적은 크기로 측정되었다. 아울러 약 1.5 GHz 근처까지 신호가 분포함을 알 수 있다.

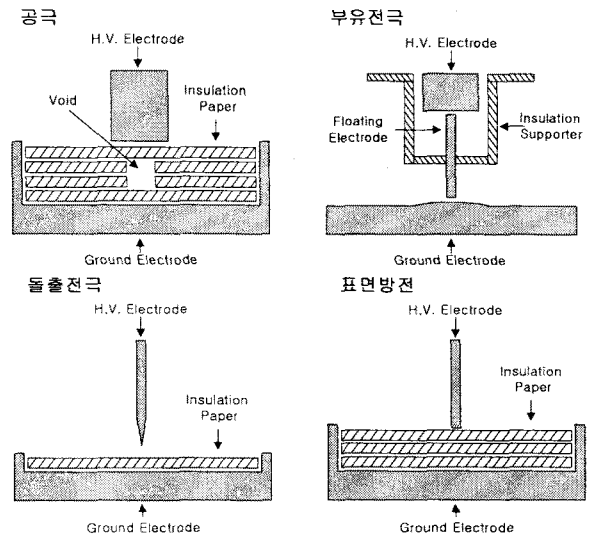


그림 2 모의 부분방전장치
Fig. 2 Models of partial discharge defects

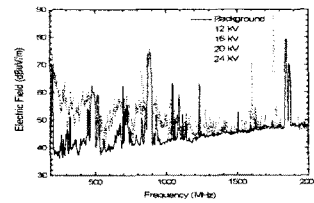


그림 3 공극 결함의 주파수 분포
Fig. 3 Spectra of void defects

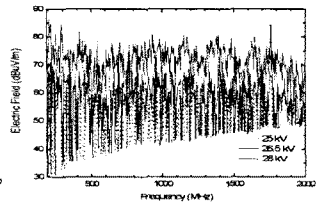


그림 4 돌출전극 결함 주파수분포
Fig. 4 Spectra of protrusion electrode defects

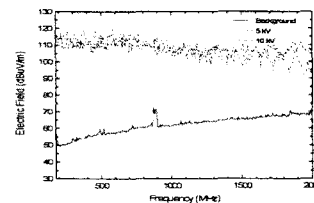


그림 5 부유전극 결함 주파수분포
Fig. 5 Spectra of floating electrode defects

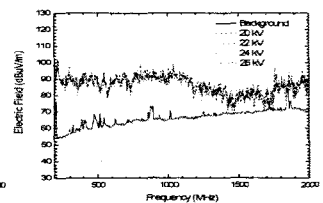


그림 6 표면방전 결함 주파수분포
Fig. 6 Spectra of surface discharge defects

그림 4의 돌출전극의 경우 측정된 전자파의 세기는 인가전압 크기에 비례하여 증가 하였으며 2 GHz 대역까지 전 주파수 대역에서 골고루 측정되었다. 특히 인가전압이 28 kV에서는 26.5 kV 인 경우 보다 방전신호의 크기가 급격히 증가했는데 이것은 절연과피 직전에 잠시 급격히 증가하는 방전 때문이라 추측된다. 부유전극의 경우 다른 결함보다 큰 신호가 그림 5에서와 같이 2 GHz 대역까지 분포하였다. 부유전극 방전에 의한 전기장의 세기는 SF₆ 절연에서와 같이 인가전압의 크기 변화에 대한 영향이 적고 다른 결함에 비해 큰 것을 알 수 있다.

그림 6은 표면방전에 의한 전기장의 주파수 분포로서 2 GHz 까지 모든 주파수 대역에서 부유전극과 같이 비교적 강한 전자파 방전 신호가 측정되었다. 부유전극과 표면방전의 경우 전자파 방전 신호의 크기는 인가전압의 크기와 관계없이 비교적 일정한 세기와 분포를 보였다(그림 5, 6). 4가지 결함 모두에서 1 GHz 이상의 극초단파 대역에서 방전에 의한 전자파 신호를 측정할 수 있었으며, 절연유에서 일어나는 부분방전을 측정하는데 극초단파 대역에서의 측정이 유효한 방법임을 알 수 있다. IEC60270 방법에 의한 측정시 표면방전 결함이 진행됨에 따라 절연지의 탄화에 의한 트랙이 발생한 경우 누설전류가 관측되었고 극초단파 영역에서는 신호를 검출할 수는 없었다. 0.3~2 GHz의 극초단파 대역에서 측정된 전반적인 신호의 세기는 부유전극이 가장 강했으며 표면방전이 그보다 조금 작았다. 그리고 돌출전극에 의한 방전의 세기는 중간 정도였으며 공극에 의한 방전의 전반적인 세기가 제일 작았다.

표 2 결함 유형별 최소 방전유지전압과 방전량

Table 2 Minimum discharge voltage & breakdown voltage of PD

방전종류	방전유지 최소전압(kV)	절연 파괴 전압(kV)	방전량 크기 IEC60270 (nC)	비고
공극	9.5	27	1 - 3.4	공극 직경: 5 mm
돌출전극	25	30	4.5 - 20	
부유전극	6	*	750	전극간격: 0.05 mm
표면방전	20	28	1.8 - 2.7	

2.3 방전 원인별 PRPD 패턴 특성

그림 7~10은 0.5~2 GHz 대역에서 측정된 방전에 의한 전자파 신호의 PRPD 패턴이다. 그림7에서 보인 공극결함의 PRPD 패턴의 경우 인가전압 위상의 1, 3 사분면에서 방전 신호가 주로 발생하였으며, 다양한 크기의 방전신호 분포를 볼 수 있다. 또한 2, 4 사분면 끝 부분에서도 일부 방전신호가 발생하였는데 이 신호의 근원은 절연지 사이에 분포하는 얇은 층의 틈새에 의해 발생하는 것으로 추측된다. 돌출전극의 경우 그림 8과 같이 인가전압 피크 부근에서 방전신호가 주로 발생하였으며 + 피크에서의 신호 크기가 - 피크에서 보다 작았으며 다양한 크기의 신호가 비교적 고루 분포하고 있고 다른 3종의 결함에서와는 다르게 방전빈도가 매우 적어서 최소 10분 이상의 신호를 누적해야 구분 가능한 PRPD 패턴을 얻을 수 있었다. 이것은 기중이나 SF₆ 가스에서 돌출전극에 의한 방전의 빈도가 대단히 큰 것과는 다른 형태이다 [9]. 그림 9의 부유전극에 의한 방전신호도 공극에 의한 방전과 비슷하게 인가전압 위상의 1과 3 사분면에서 비교적 큰 방전신호가 발생하였으며 작은 크기의 방전신호도 약간 발생하였다. 그림 10에서 보인 표면방전에 의한 전자파 신호는 1, 3 사분면에 주로 발생하고, 2, 4 사분면 초반에도 분포하였으며 크기는 다양함을 알 수 있다. 각 결함별 PRPD 패턴의 분석을 통해 유중에서 발생하는 부분방전에서도 전자파신호를 이용한 PRPD 패턴의 특징이 각 부분방전의 원인에 따라 다른 모습으로 구별될 수

있음을 보였다. PRPD 패턴의 특징을 이용하면 SF₆나 기중에서와 같이 유중에서 일어나는 부분방전의 원인을 추측할 수 있을 것이다. 실험에서 얻은 각 결함의 종류에 따라 얻은 PRPD 패턴의 특징을 표 3에서 비교 요약하였다.

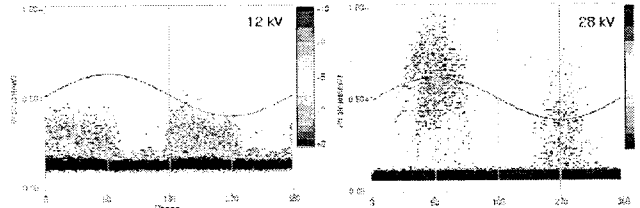


그림 7 공극 결함 PRPD (누적시간 10초, 인가전압 12kV) 그림 8 돌출전극 결함 PRPD (누적시간 10분, 인가전압 28kV)

Fig. 7 PRPD of void defects (accumulated 10 sec, 12 kV)

Fig. 8 PRPD of protrusion electrode defects (accumulated 10 min, 28 kV)

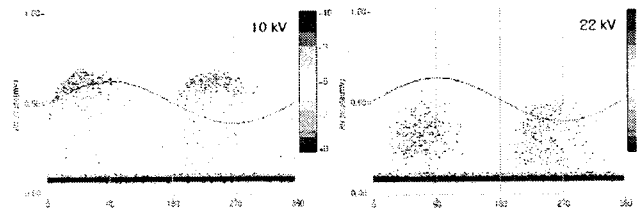


그림 9 부유전극 결함 PRPD (누적시간 10초, 인가전압 10kV) 그림 10 표면방전 결함 PRPD (누적시간 10초, 인가전압 22kV)

Fig. 9 PRPD of floating electrode defects (accumulated 10 sec, 10 kV)

Fig. 10 PRPD of surface discharge defects (accumulated 10 sec, 22 kV)

표 3 유중방전에 의한 전자파 신호의 결함 종류별 PRPD 패턴 특징

Table 3 Characteristics of PRPD pattern by PD signal of defects

결함종류	방전 전자파 신호의 최대크기	방전신호 세기의 분포	방전발생 인가전압 위상	방전발생 빈도
공극	소	다양	1, 3 사분면 2, 4 사분면 후반	대
돌출방전	대	다양	90°, 180°	소
부유방전	중	비교적 일정	1, 3 사분면	중
표면방전	소	다양	1, 3 사분면 2, 4 사분면 초반	중

3. 결 론

절연유에서 4가지 결함에 의한 부분방전에 대해 0.2~2 GHz 대역에서 발생하는 전자파 신호의 특성을 조사하였다. 절연유에서의 부분방전도 2 GHz 대역까지 전자파 신호를 발생함을 확인하였다. 그러므로 전자파를 신호를 검출하는 방법을 이용한 부분방전 측정이 절연유로 채워진 전력용 변압기의 내부 결함 진단에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

각각의 결함원인에 대해 측정된 PRPD 패턴의 특징을 이용하여 측정된 부분방전의 원인을 구분할 수 있음을 확인하였다. 절연유에서의 부분방전에 의해 발생하는 전자파의 UHF 대역의 PRPD 패턴은 SF₆ 가스에서의 PRPD 패턴과 IEC60270 방법에

의한 PRPD 패턴과는 다른 특성을 나타내었다. 그러므로 유입 변압기에 전자파를 이용한 부분방전 측정기술을 적용하기 위해서는 절연유에서도 다양한 종류의 결합과 조건이 다른 유형에 대한 실험이 요구되며 다양한 부분방전 패턴에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사 자체연구개발사업(R06TA09)의 결과물입니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Wanninger, "Apparent charge measurement in GIS by modern diagnostic methods," Eur. Trans. Elect. Power, pt. 4, vol. 7, pp. 251-255, Jul./Aug. 1997.
- [2] M. D. Judd and O. Farish, "FDTD simulation of UHF signals in GIS," in Proc. 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering Montreal, vol. 6, Aug. 1997.
- [3] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS 부분방전 검출기술연구", 한국전력공사 전력연구원, TR 98J2002.407. 2002.
- [4] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS내 자유 도전성 파티클 결합에 대한 위험도 평가방안", 대한전기학회지 Vol.51C. No.4. Apr.2002
- [5] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS 고장예방을 위한 UHF 부분방전 신호해석기술 연구", 전력산업연구개발사업 최종 보고서, 한국전력공사 전력연구원, May, 2005
- [6] K. Raja, F. Devaux & S. Lelaidier, "Recognition of Discharge Sources Using UHF PD Signatures", IEEE Electrical Insulation Magazine, pp8-14, Vol. 18, No. 8, Sep., 2002.
- [7] S. Meijer, E. Gulski, J. J. Smith, & H. F. Reijnders, "Sensitivity Check for UHF PD Detection on Power Transformer", 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, 19-22 Sep., 2004.
- [8] C. R. Li, W. Wang, Z. G. Tang & Y. S. Din, "PD Pattern Recognition in Transformer by Using UHF Technology", 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, 19-22 Sep., 2004.
- [9] M. D. Judd, B. M. Pryor & B. F. Hampton, "Transformer Monitoring Using the UHF Technique". High Voltage Engineering Symposium, 5.362.P5, 22-27 Aug., 1999.
- [10] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service," IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 18, no. 6, pp. 12-25, Nov./Dec. 2002.
- [11] M. D. Judd, J. S. Pearson, O. Farish, T. Breckenridge, and B. M. Pryor, "Power transformer monitoring using UHF sensors: Installation and testing," in Conf. Record of the 2000 IEEE Int. Symp. on Elect. Insul. Anaheim, pp. 373-376.
- [12] IEEE,C57.113, "Guide for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors", 1991.

저 자 소 개



주 형 준 (朱炯俊)

1972년 2월 20일생. 1996년 충남대 전기공학과, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사과정 수료. 2006~현재 한전전력연구원 전력계통연구소 일반연구원

Tel : 042-865-5867

Email : juhjun@kepri.re.kr



구 선 근 (具嬋根)

1967년 10월 16일생. 1990년 연세대학교 물리학과 1992년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1995년 한국전력공사 입사 2001년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원

Tel : 042-865-5866

Email : freeon@kepri.re.kr



박 기 준 (朴基濬)

1991년 인하대 공대 응용물리학과 졸업. 1993년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 책임연구원.

Tel : 042-865-5864

Email : killer@kepri.re.kr



한 기 선 (韓基善)

1966년 6월 20일생. 1991년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국전력공사 입사, 2005년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원

Tel : 042-865-5865

Email : hankison@kepco.co.kr



윤 진 열 (尹珍烈)

1966년 3월 12일생. 1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년 한국전력공사 입사, 2003년~현재 한전전력연구원 책임연구원.

Tel : 042-865-5860

Email : jyoon@kepri.re.kr