

절연유 내 변압기 Turn간 결함에 의한 부분방전의 극초단파 전자기파 신호 특성

논 문
58-10-25

Characteristics of Ultra High Frequency Partial Discharge Signals of Turn to Turn Defect in Transformer Oil

윤진열[†] · 주형준^{*} · 구선근^{**} · 박기준^{***}
(Jin-Yul Yoon · Hyung-Jun Ju · Sun-Geun Goo · Ki-Jun Park)

Abstract - In general, for the condition monitoring of a power transformer using the UHF PD measuring technique, detection of any partial discharge, identifying the defect in the transformer and locating the insulation defect are necessary. In this paper one of the most frequent defects which can result in turn to turn fault in power transformer was examined for identifying the defect. In order to model the defect, as a discharge source, a partial discharge cell was used for experimental activity. 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 phase resolved partial discharge signals were measured and analyzed. The results will be contributed to build the defect database of power transformer and to decrease the occurrence of transformer faults.

Key Words : UHF PD Signal, Power Transformer, Turn to Turn Defect, PRPD Pattern

1. 서 론

가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS)의 예방진단기법으로 부분방전에 의한 극초단파(Ultra high frequency, UHF) 대역의 전자기파를 이용한 부분방전 검출법은 근년에 이르러 국내 외 GIS의 고장예방 목적으로 널리 사용되고 있다[1-5]. 수년 전부터 가스절연개폐장치에 적용한 UHF 부분방전 검출기술을 전력용 변압기에 적용하기 위한 연구가 영국, 독일, 중국 등에서 진행되어 왔으며 상업용 수준까지는 아직 미흡하기는 하나 가까운 시일 내에 상당한 수준까지 진전이 이루어 질 것으로 예측된다[6-9]. 전력용압기 내부에서 부분방전이 발생할 때 방사되는 전자기파 신호의 주파수 분포가 UHF 대역에 걸쳐 발생하는 현상에 대해서는 연구자들 간에는 큰 이견이 없는 것으로 보고되고 있으나 GIS에 적용한 기술을 전력용 변압기에 적용하는 데에는 학자들 마다 다양한 의견이 제시되고 있다[10-11]. UHF 부분방전 기술을 변압기에 적용하기 위해서는 GIS의 경우와 마찬가지로 여러 분야의 기술이 함께 개발되어야 한다. 이들 요소기술은 센서설계 및 제작, 센서 배치, 결함위치 추정, 결함종류 식별, 잡음처리 기술을 포함하여 신호취득과 신호처리와 같은 감시시스템의 설계 및 제조기술 등으로 구성된다. 변압기는 주요 절연 매질이 절연유이고 기기 외함

구조가 육면체 형태인 3차원 구조인데다, 센서 장착 가능 위치가 제한적이라는 점 등에서 GIS와 비교할 때 기술난이도가 상대적으로 매우 높다. 센서기술의 경우 변압기 외함에 센서 장착용 창(window)을 이용하거나 변압기 보수용 밸브, 맨홀 등을 이용하여 센서를 장착하는 방법을 주로 사용하며, 센서의 장착위치 제한 때문에 센서 감도를 높이는 데에는 한계가 있으나 변압기의 구조가 갖는 밀폐특성 때문에 상당 수준 만족스런 감도를 얻을 수 있다[12, 13]. 센서를 적절하게 배치하기 위해 필요한 신호 전파특성 계산은 전자기파 신호가 변압기 내부를 전파하는 과정에서 수반되는 반사와 굴절, 신호감쇠 등의 특성을 전산모사 방법을 이용할 경우 상당수준까지 계산이 가능하다[14-16]. 결함의 위치를 추정하는 방법은 많은 학자들이 TOA(Time of Arrival)방법을 제시하고 있으나 위치추정 정확도 측면에서 아직까지 부족한 편이며, 많은 학자들에 의해 다양한 시도들이 이루어지고 있다[17-20]. 결함 종류를 식별하는 기술의 경우 지금까지 여러 학자들이 절연물 표면방전, 절연부 공극결함, 돌출전극에 의한 코로나 방전 결함, 부유전극(floating electrode)결함, 도체간 접촉불량을 주로 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)와 같은 인가전압 위상을 기준으로 분석해 온 것이 주류를 이루고 있다[21-25]. 전력용변압기에서 흔히 나타나는 고장 중의 하나가 층간단락 고장이다. 본 논문에서는 층간단락 고장의 초기단계라 할 수 있는 turn to turn 결함에서 발생하는 부분방전 결함을 모의하여 부분방전 현상으로부터 방사되는 전자기파 신호크기를 결보기 방전량 크기 변화와 상호비교하고, 전자기파 신호가 갖는 주파수 분포를 분석하였으며, 전압인가 시간경과에 따른 신호발생 특성을 전압위상에 대비시켜 분석함으로써 변전소 현장에서 발생할 수 있는 변압기 층간단락고장 예방에 기여하고 변압기 예방

[†] 교신저자, 정회원 : 한전 전력연구원 책임연구원

E-mail : yoonjiy@kepco.co.kr

^{*} 정 회원 : 한전 전력연구원 일반연구원

^{**} 정 회원 : 한전 전력연구원 선임연구원

^{***} 정 회원 : 한전 전력연구원 책임연구원

접수일자 : 2009년 8월 12일

최종완료 : 2009년 9월 7일

진단시스템 개발을 위한 요소기술 개발에 기여하고자 한다.

2. 실험

2.1 부분방전 발생장치

Turn to turn 방전은 권선의 선간 또는 층간에 발생하는 방전을 의미하며, 부유전극 및 돌출전극, 공극, 절연체 표면에서 발생하는 방전들의 조합으로 생각할 수 있다. Turn to turn 방전을 모의하기 위해 그림 1과 같은 부분방전 발생장치(PD cell)를 제작하였다. PD cell 내부에는 절연지로 마감된 두개의 구리권선이 교차되어 설치되었으며 양 권선 사이에 고전압을 인가하는 구조로 제작하였다. 특히 권선 표면의 절연지 사이에는 그림 1과 같이 얇은 판형 공극을 설치하였다. 이 공극은 변압기 제작시 baking 및 진공처리 불량으로 권선에서 발생할 수 있는 공극을 모의한 것이다. Cell에 충전한 절연유는 CPS사 제품의 FR3이며 이 제품의 절연파괴전압 크기는 56 kV@25°C(0.0080" gap :ASTM D1816), 점도는 33 cSt@40°C(ASTM D455)의 특성을 갖는다.

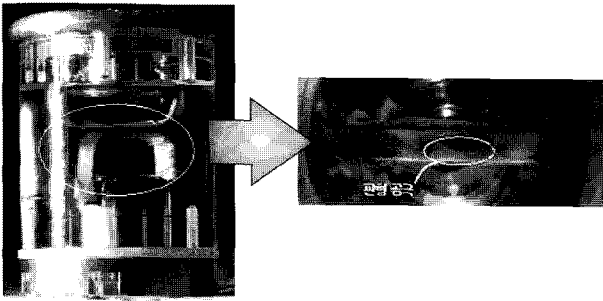


그림 1 Turn to turn 방전을 모의한 부분방전 발생장치.

Fig. 1 PD cell of turn to turn defect.

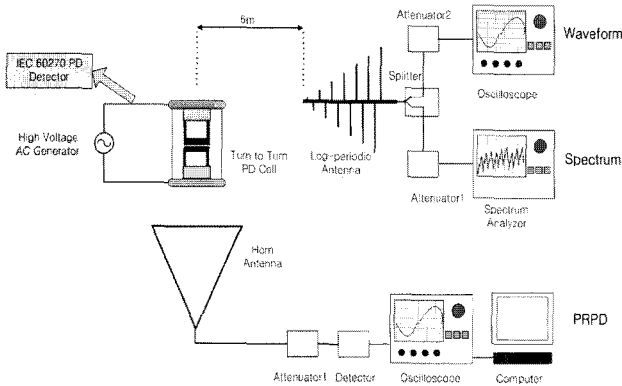


그림 2 부분방전에 의한 방사 전자기파 측정 실험구성.

Fig. 2 Experimental set up for measuring PD signals.

2.2 실험방법

Turn to turn 결함에 의해 방사되는 전자기파 신호의 파형과 주파수 분포와 방전패턴을 측정하기 위해 그림 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 방전을 모의하기 위해 2.1에서

설명한 PD 발생장치를 사용하였다. PD 발생장치에 0~50 kV, 60 Hz의 AC 전압을 20분 단위로 수 kV씩 증가시키면서 부분방전을 발생시켰다. 방전에 의한 전자기파의 전기장 세기는 6 m 떨어진 위치에 설치된 교정된 대수 주기 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 신호의 크기를 계측기의 입력범위에 맞도록 조절하였다. 획득한 주파수 분포에서 안테나 팩터와 감쇠기의 삽입손실(6.1 dB)을 보정하여 측정된 신호의 주파수에 대한 전기장의 크기를 산출하였다.

실험을 통하여 유중에서 얻어진 방전에 의한 전자기파 신호는 공기를 전파매질로 하여 얻은 신호이다. 본 논문에서는 결함원이 갖는 방전신호의 특성만을 해석하였으며 본 결과를 실제 변압기에 적용하게 되면 절연유가 전파매질로 작용하게 되어 전파속도와 신호 크기에만 영향을 미칠 뿐 결함원의 신호 특성에는 영향을 미치지 않게 된다.[26]

방전에 의한 전자기파 신호의 위상분해 부분방전 패턴(Phase Resolved Partial Discharge, PRPD)을 얻기 위하여 PD cell에서 0.5 m 떨어진 위치에 혼(Horn) 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 변환할 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 부분방전 측정장치(DDX 7000, Robinson)를 이용하여 동시에 측정하였다. 사용된 분배기 삽입 손실은 0 ~ 4.2 GHz에서 6.1 dB 이다. 모든 측정은 인가전압의 위상에 동기하여 측정하였으며, 각각의 기기에서 측정된 결과는 PC로 전송하여 저장하고 분석하였다.

2.3 부분방전에 의한 전자기파 신호의 주파수 특성

Turn to turn 결함 PD cell에 전압을 인가하면 약 4 kV 부터 부분방전이 발생하였다. 그림 3과 같이 결보기 방전량은 인가전압 크기 및 전압 인가시간에 따라 200 pC부터 500 pC 사이에서 다양하게 변화하였으며 21 kV 이상의 전압에서 절연파괴가 발생하였다. 인가전압 증가에 따라 전자기파 방전신호의 크기는 결보기 방전의 크기와 같은 경향을 보였다. 방전된 전자기파의 크기는 그림 4의 주파수분포에서 500~1,500 MHz 영역을 적분하여 산출하였다.

Turn to turn 방전에서 전기장에 대한 주파수 분포를 측정하면 그림 4와 같이 2 GHz 이하의 전 주파수 영역에서 신호가 고루 분포하였다. 전자기파 방전신호의 편파특성은 그림 5와 같이 약 800 MHz 이상에서 수직편파가 수평편파에 비해 약 3dB 크게 측정되었다. 이를 통해 평판공극 내부에서 전자파 방전신호를 발생하는 방전전류가 수직방향으로 발생함을 알 수 있다.

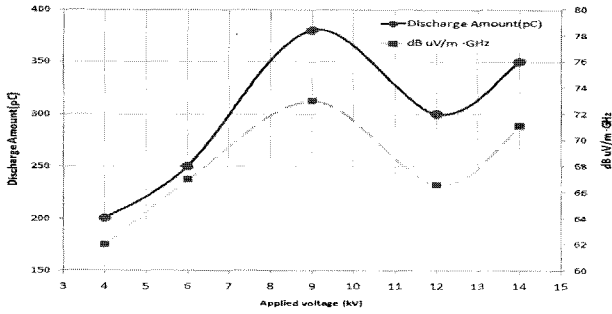


그림 3 전압인가별 겉보기방전량과 전자기파 방전신호의 크기.

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

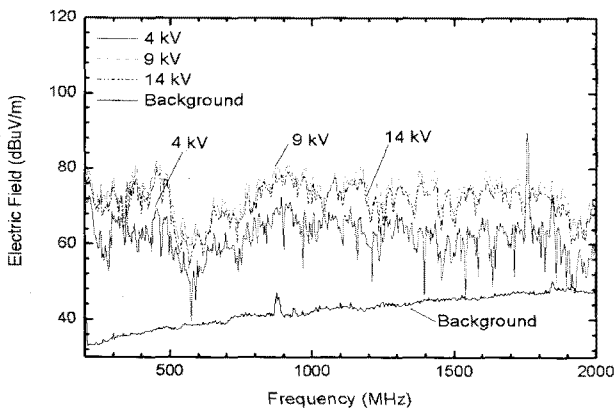


그림 4 Turn to turn 방전에 의한 전자기파 신호의 주파수 분포.(수직편파).

Fig. 4 Spectra of turn to turn defect(vertical spectra).

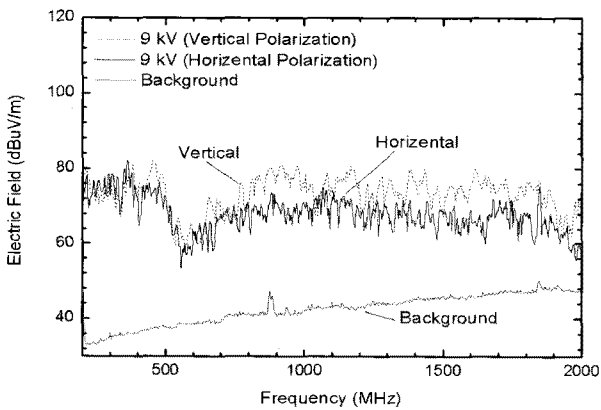


그림 5 Turn to turn 방전에 의한 전자기파 신호의 수직/수평편파 크기 비교, 인가전압 9kV

Fig. 5 Horizontal and vertical spectra from turn to turn defect.

2.4 부분방전에 의한 전자기파 신호의 PRPD패턴 특성

9 ~ 17 kV의 인가전압별 전자기파 방전신호를 5분 간격으로 각각 10초간 누적하여 얻은 PRPD 형상은 그림 6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 인가전압이 다를 때는 물론 동

일 전압에서도 시간의 경과에 따라 방전신호의 크기가 일정하지 않고, PRPD 패턴의 형태가 일정 영역에서 집중되는 형태에서 여러 영역으로 변화하는 모습을 보임을 알 수 있다. 이러한 현상은 다른 종류의 결함(금속이물, 공극, 절연체 결함[27])이 인가전압에 따라 가압 시간에 관계없이 일정한 패턴을 유지하는 것과 다른 특징으로서 이 특징을 응용할 경우 결함종류를 진단하는 데에 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 이러한 현상을 보이는 이유를 살펴보면, 그림 6의 9kV-1 그림은 구형상의 이물과 뾰족한 형상의 부유전극에 의한 방전 현상이 조합된 형태를 보이고 있다. 9kV-2 그림은 9kV-1 현상이 심화된 모습을 보이다가 9kV-3 그림에서는 거의 부유전극 결함에 의한 단독방전 현상을 보이고 있다. 12kV-1에서는 선(wire)형상의 이물과 chip형상의 이물에 의한 방전현상이 조합된 형태를 보이다가 12kV-2에서는 2종의 선형상의 의한 방전현상을 보이고 있다. 14kV-1 그림은 9kV-1 그림과 12kV-1 그림이 혼재된 양상을 보이다가 14kV-2 그림에서는 12kV-2 현상의 원인이 심화된 형태를 보이고 있다. 이와 같이 구형상의 이물과 뾰족한 형상의 부유전극, 선(wire)형상의 이물, chip형상의 이물 등 다양한 형태의 방전원에 의한 현상들이 변화하는 것과 같은

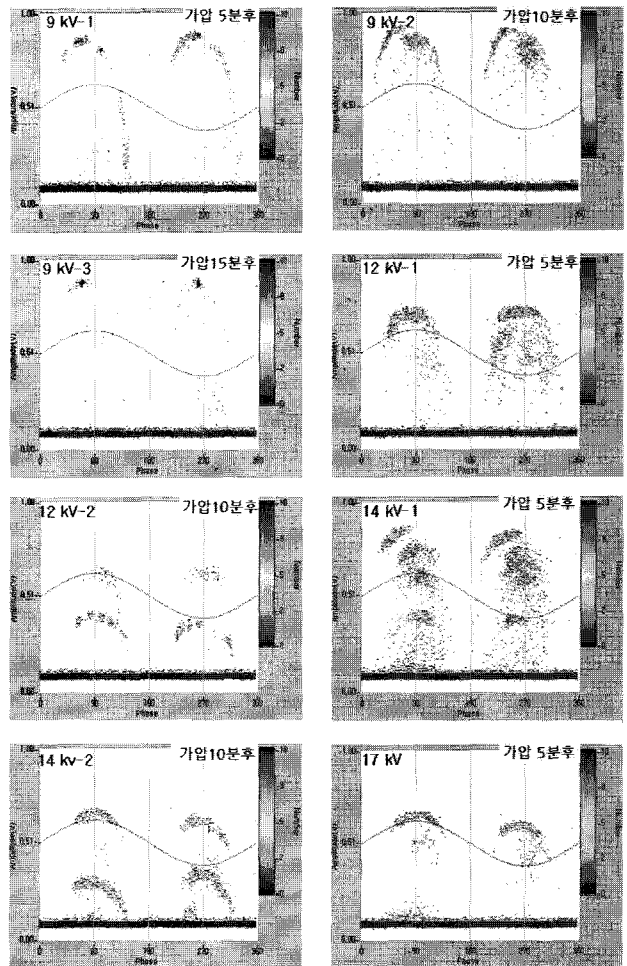


그림 6 인가전압별 턴간 방전에 의한 전자기파 PRPD 변화, 누적시간 10초.

Fig. 6 Variation of PRPD pattern of turn to turn detect.

모습을 볼 수 있다. 이와 같은 특이한 현상은 전선표면 절연지 사이에 설치된 판형 공극의 모양과 체적, 내용물 등이 절연유의 이동과 방전현상에 의한 반응물의 생성 등으로 방전현상이 불규칙하게 변화된 때문인 것으로 추정된다. 그러나 어느 전압 크기에서나 인가전압 위상 90°, 270° 근처에서 가장 큰 방전신호가 발생함을 볼 때 일반적인 절연체 결함이 갖는 전압위상 기준 1, 3 사분면에 신호가 집중되는 현상과는 다름을 알 수 있다.

인가전압을 21 kV로 높여서 섬락현상이 발생 후 방전위치의 모양을 자세히 관찰하기 위해 cell을 분해하였다. 그림 7은 분해한 후의 PD cell 내부의 그림이다. 권선의 표면에 위치한 판형 공극의 결함으로부터 섬락현상이 발생한 후 두 권선사이의 섬락전류가 절연지를 관통하였음을 탄화흔적으로 알 수 있었다.



그림 7 21 kV에서 섬락 발생 후 각 권선의 모습.

Fig. 7 Trace of flashover after breakdown in PD cell

3. 결 론

전력용 변압기 내부 권선에서 발생할 수 있는 결함 특성을 조사하여 진단에 응용하고자 권선의 선간 결함을 모의한 PD cell을 제작하여 방전실험을 하였다. Turn to turn 결함에 의해 발생하는 PD에 의한 전자기파 부분방전 신호는 2 GHz까지 전 주파수 영역에 걸쳐서 신호가 비교적 균등하게 발생함을 확인할 수 있었다. 이 때 측정되는 결보기 방전량은 50 pC에서 500 pC까지 광범위하게 측정되었다. 측정된 전자기파의 편파특성은 약 800 MHz 이상에서 수직편파가 수평편파에 비해 크게 측정되었다.

인가전압의 크기에 대한 전자기파 부분방전 신호의 PRPD 형상은 전압이 다른 때는 물론 동일한 전압하에서도 시간의 경과에 따라 약간 다른 모습을 보였다. 이러한 현상은 다른 종류의 결함에서는 흔히 나타나지 않는 특징으로서 이러한 특징을 이용할 경우 외부에서 신호를 측정하여 결함 종류를 진단하는 데에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 어느 전압에서나 인가전압 위상의 90°, 270° 부근에서 가장 큰 방전신호가 발생함을 알 수 있었다.

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, Aug. 1997.

- [2] 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.
- [3] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS 부분방전 검출기술연구", 한국전력공사 전력연구원, TR 98J2002.407. 2002.
- [4] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS내 자유 도전성 파티클 결함에 대한 위험도 평가방안", 대한전기학회지 Vol.51C. No.4. Apr.2002
- [5] 윤진열, 박기준, 구선근, "GIS 고장예방을 위한 UHF 부분방전 신호해석기술 연구", 전력산업연구개발사업 최종보고서, 한국전력공사 전력연구원, May, 2005
- [6] 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.
- [7] S. Meijer, E. Gulski, J. J. Smith, & H. F. Reijnders, "Sensitivity Check for UHF PD Detection on Power Transformer", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, 19-22 Sep., 2004.
- [8] Shen, Z.B.; El-Saadany, E.F.; "Localization of partial discharges using UHF sensors in power transformers" Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [9] Jitka Fuhr; "Procedure for identification and localization of dangerous PD sources in power transformers" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Volume 12, Issue 5, Oct. 2005
- [10] Homaei, M.; Mazhab Jafari, A.; "Investigating suitable features for Partial Discharge localization in power transformer" 2008. CMD
- [11] Jafari, A.M, Akbari, A.; "Investigating Practical Experiments of Partial Discharge Localization in Transformers using Winding Modeling" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Volume 15, Issue 4, August 2008
- [12] Lopez-Roldan, J, Tang, T, Gaskin, M. ; "Design and testing of UHF sensors for Partial Discharge detection in transformers" Proc. of 2008 Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, 1052-1055, Apr. 21-24, 2008
- [13] Agoris, PD, et al. ; "Sensitivity check of internal sensor for power transformer partial discharge measurements", Proc. of the 8th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vols 1 and 2; 230-233, Jun. 26-30, 2006
- [14] Yang, L, Judd, MD, Costa, G, ; "Simulating propagation of UHF signals for PD monitoring in transformers using the finite difference time domain technique", Ann. Rep. Conf. on electrical insulation and dielectric phenomena, 410-413, Oct. 17-20, 2004
- [15] Li, JH, et al. ; "Propagation characteristic study of partial discharge UHF signal outside transformer",

- Proc. of 2008 Int. Conf. on condition monitoring and diagnosis, 1078- 1080, Apr. 21-24, 2008
- [16] Coenen, S, et al., ;"Attenuation of UHF signals regarding the sensitivity verification for UHF PD measurements on power transformers, Proc. of 2008 Int. Conf. on condition monitoring and diagnosis, 1036- 1039, Apr. 21-24, 2008
- [17] Tang, ZG, et al., ;"The feasibility of locating PD source in transformer using the UHF technology", Ann. Rep. Conf. on electrical insulation and dielectric phenomena, 477-480, Oct. 17-20, 2004
- [18] Zhou, LX, Li, WG, ;"partial discharge sources detection and location with an electromagnetic vector sensor", 2006 1st IEEE Conf. on Ind. electronics and applications, Vol 1-3, 615-619, May 24-26, 2006
- [19] Shen, ZB, 띠-Saadany, EF, ;"Localization of partial discharges using UHF sensors in power transformers", 2006 Power Engineering Society General Meeting, Vols 1-9, 2660-2665, June 18-22, 2006
- [20] Yang, JG, et al. ;"Study of time delay of UHF signal arrival in location partial discharge", Proc. of 2008 Int. Conf. on condition monitoring and diagnosis, 1088-1092, Apr. 21-24, 2008
- [21] P. Agoris, et al. , ;"Building a transformer defects database for UHF partial discharge diagnostics", 2007 IEEE Lausanne powertech, vols. 1-5, 2070-2075, Jul. 01-05, 2007
- [22] Massingue, F, et al., ;"Partial discharge pattern analysis of modeled insulation defects in transformer insulation", Conf. Record of the 2006 IEEE int. symp. on electrical insulation, 542-545, Jun. 11-14, 2006
- [23] 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, p47-54, March 2006
- [24] D. Aschenbrenner et al., ;"On line PD measurements and diagnosis on power transformers", IEEE Trans. on dielectrics and electrical insulation, Vol. 12, No. 2 p216-222, Apr. 2005
- [25] Rogier A. et al, ;"Identification of partial discharge defects in transformer oil", 2005 Ann report conf. on electrical insulation and dielectric phenomena", p565-568, Oct. 16-19, 2005, Nashville, TN
- [26] 구선근, 주형준, 박기준, 한기선, 윤진열, "TDR을 이용한 극초단파 대역에서 사용 절연유의 유전율과 전파 속도 측정", KIEE, Vol. 57, 11, NOV, 2008
- [27] 주형준, 구선근, 박기준, 한기선, 윤진열, "절연유에서 부분방전에 의한 극초단파 신호특성분석", KIEE. VOL. 57P Mar 2008"

저 자 소 개



윤진열 (尹珍烈)

1956년 3월 12일생. 1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년 한국전력공사 입사, 2003년 ~ 현재 한전 전력연구원 책임연구원
Tel : 042-865-5880
E-mail : jyyoon@kepri.re.kr



주형준 (朱炯俊)

1972년 2월 20일생. 1996년 충남대 전기공학과, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사과정 수료. 2006~현재 한전전력연구원 송배전연구소 일반연구원
Tel : 042-865-5884
E-mail : juhjun@kepri.re.kr



구선근 (具嬋根)

1967년 10월 16일생. 1990년 연세대학교 물리학과 1992년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1995년 한국전력공사 입사 2001년~현재 한전전력연구원 송배전연구소 선임연구원
Tel : 042-865-5883
E-mail : freeon@kepri.re.kr



박기준 (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 책임연구원.
Tel : 042-865-5122
E-mail : killer@kepri.re.kr