

레이저 간섭계와 포켈스 효과를 이용한 불평등 전계 측정

論 文

51C-6-3

A Possible Application of the Nonuniform Electric Field Measurement Using Laser Interferometer and Pockels Effect

康元鐘*·具滋允**

(Won-jong Kang · Ja-yoon Koo)

Abstract - In this paper, a novel optical measuring system for the measurement of nonuniform electric field was proposed. The electric field distorted by the discharges was detected through proposed optical measuring system based on the Pockels effect and Mach-Zehnder interferometer. In order to produce distorted electric field, corona discharge was generated from needle-plane electrode in air and detected by optical measuring system. This optical measuring system is constructed by He-Ne laser, single mode optical fiber, 2×2 50/50 beam splitter, LiNbO₃ Pockels cell, photo detector and PC. In this system, output signal of Pockels sensor is measured by digital oscilloscope and transferred to the PC for recording and statistical processing. Through this paper, a promising possibilities of proto-type optical measuring system were evinced.

Key Words : corona discharge, Pockels effect, LiNbO₃, laser measuring system

1. 서 론

지난 20 여년간 급증하는 전기에너지 소비를 충족시키기 위하여 고전압·대용량으로 개발되어 운전되고 있는 각종 전력설비에 대한 사고는 설비 규모에 따라 매우 다양해질 뿐만 아니라 발생건수에서도 비례 증가되고 있다. 단 한번의 사고로도 사용자가 겪을 수 있는 피해규모나 파급 효과는 엄청나게 크다. 따라서 설비를 운영함에 있어서 사고 발생의 예방 및 운전의 신뢰도 향상을 위한 상시적인 설비의 예방진단 시스템의 필요성은 절대적이다.

이러한 상시적인 설비의 예방진단 시스템 개발을 위해서는 외부 노이즈에 영향 받지 않고 전력기기의 위험을 예고할 수 있는 여러 가지 진단 방법들 중에서 가장 많이 연구 투자되고 적용되는 부분방전(PD) 검출에 의한 사고 예방 진단 기술이 확립되어야 한다. 그러나, 이러한 부분방전 측정법에서 현재까지 일반적으로 사용되고 있는 전기적인 PD 측정법은 전자기장 간섭(EMI)에 의한 외부 간섭신호 분리에 효과적이지 않다. 따라서 이러한 측정법은 완벽하게 차폐된 실험실에서는 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 현장 적용에는 현재 해결되지 못한 여러 가지 문제들로 인하여 어려움이 많다. 또한 전력 변압기 또는 변전소 규모의 스위치기어와 같은 부피가 큰 시험대상물에 대해서는 PD 발생 유무만을 검출하는

것보다는 PD 발생위치 검출이 요구되는데, 전기적 측정방법에 의해서는 PD 발생부의 위치를 검출하는 것이 불가능하여 상시적인 설비의 예방진단 시스템으로 사용하기에는 적합하지 못하다.[1][2] 최근에는 많은 연구투자가 이루어지고 있는 레이저 및 광섬유를 이용한 광계측법을 이용하여 기존의 전기적인 진단방법에서 발생되는 문제점들을 해결하고 현장 적용을 용이하게 하고자 하는 연구[3]가 진행되고 있지만 실용화를 위한 완성도는 아직까지 높지 않다.

본 연구에서는 전기 광학 효과를 나타내는 LiNbO₃ 결정을 응용하여 PD-전계를 측정할 수 있는 새로운 방법으로서 개발된 포켈스 전계 센서를 이용하여 부분방전이 발생될 때 왜곡되는 전계 측정값을 분석함으로써 부분방전을 해석하는 방법을 국내 최초로 제안하여 그 가능성을 확인하였다.[3],[5] 이러한 비선형 광학결정을 이용하여 전계를 측정하는 방법은 다음과 같은 이점이 있다. 첫째, LiNbO₃ 결정은 유전체로서 측정하고자 하는 전계에 영향을 거의 주지 않는다. 둘째, 측정 가능한 주파수 대역이 DC 부터 GHz까지로 매우 넓어 정확한 측정이 가능하며 센서의 소형화, 경량화가 가능하다. 셋째, 측정 신호가 광파이버를 통하여 전달되므로 외부 전자기장 등의 노이즈에 강하다.[4]

본 논문에서는 이미 발표된[3],[5] 연구결과와 가능성을 완성시키기 위한 것으로서, 자체 제작한 LiNbO₃ 포켈스 프루브 센서의 특성 시험, 부분방전 검출신호처리를 위한 프로그램 개발 및 시스템 구축, 측정신호 규격화 및 진단시스템 개발을 위한 기초연구로서 기중 코로나 방전에 대하여 다양하게 측정 위치를 변화시키면서 검출된 부분방전 신호특성에 관한 연구를 수행하였다.

* 正 會 員 : LG産電 電力試驗技術센터 主任研究員

** 正 會 員 : 漢陽大學教 電氣工學科 教授·工博

接受日字 : 2001年 3月 30日

最終完了 : 2002年 3月 13日

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

부분방전(PD)을 검출하기 위한 측정시스템은, 그림 1의 개략도에 보여지는 바와 같이, PD 전계를 측정하기 위한 포켈스 센서가 모의 PD를 발생시키는 침-평판 전극 사이에 위치해 있고, He-Ne 레이저와 광신호 검출기 사이는 Mach Zehnder 간섭계로 구성하여 결합시켰다. 50/50 빔살 가르개(BS)로 나누어진 기준광(reference beam)은 외부의 간섭을 받지 않고 진행하며, 침-평판 전극에서 PD의 발생유무에 따라서 변화되는 전계가 센서에 인가될 때 센서를 통과하는 신호광(modulation beam)은 전계에 대응되어 광의 세기(intensity)가 변하는 변조 신호광이 된다. 이들 두 개의 광신호는 포토다이오드로 각각 검출되고, 각각의 신호에 동일하게 포함되어 있는 레이저 잡음을 제거하기 위한 두 신호 사이의 차등신호를 출력하는 검출기의 출력신호는 디지털 오실로스코프에 저장되며 GPIB를 통하여 PC로 전송되어 자체 개발한 프로그램으로 처리 분석하였다. 또한, 광계측 시스템을 이용해 검출된 부분방전 신호의 검증을 위해 상용 CT를 이용해 동시에 부분방전신호를 검증하였다.

전체 시스템은 외부 전자파의 영향을 받지 않도록 전자파 차폐실(1 kHz-1 GHz 전계: 100 dB, 100 kHz-1 GHz 자계: 100 dB) 내부에 설치된 방진 광학테이블 위에 설치하였다. 또한 pC~nC이상의 PD를 임의로 발생시킬 수 있는 모의 PD 발생기의 전압원은 내부 잡음과 PD를 발생시키지 않는 고전압 변압기(noise free high-voltage transformer PZTL100-0.25, Haefely Trench사)를 사용하였다.[5]

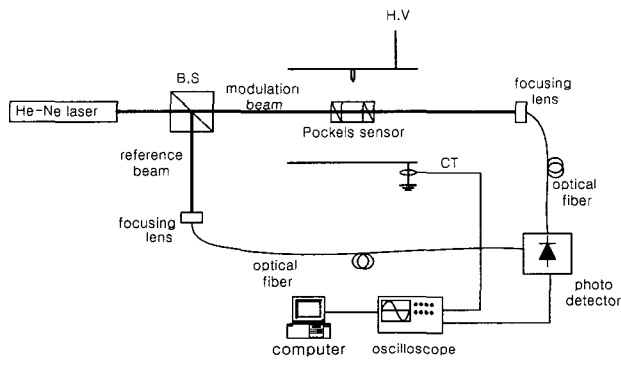


그림 1 실험 시스템의 개략도
Fig. 1 Block diagram of experimental setup

측정할 전계가 그림 2에서 보는 듯이 포켈스 결정의 광축(Z-axis) 방향으로 인가될 때, 선형 편광된 레이저광이 결정의 X-축에 $\pi/4$ rad으로 결정에 입사되어 진행하면서 인가전계에 의하여 변조된 후, 편광자에 $\pi/2$ rad으로 설치된 검광자(analyzer)를 통하여 검출된다. 결정에 대하여 측정할 전계의 인가 방향과 레이저 광의 진행 방향이 서로 평행한 종형 모드(longitudinal mode)에서는 반파장 전압(halfwave voltage)이 레이저 광의 결정내의 진행거리에 따라 일정한 값으로 고정되지만, 그림 2와 같은 횡형 모드(transverse mode)는 일정한 전계하에서도 광이 진행하는 거리에 따라 반파장 전압이

변화되는 특징을 가지고 있어므로 측정 전계의 범위에 따라 소자내의 광의 진행거리를 변화시킴으로써 반파장전압의 크기를 손쉽게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. [3], [5], [6], [7]

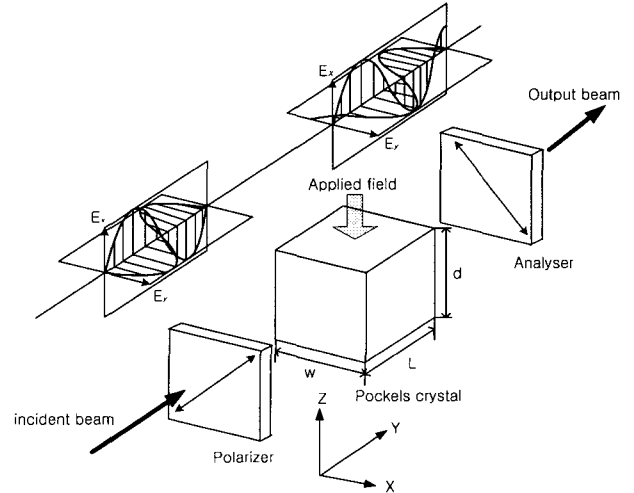
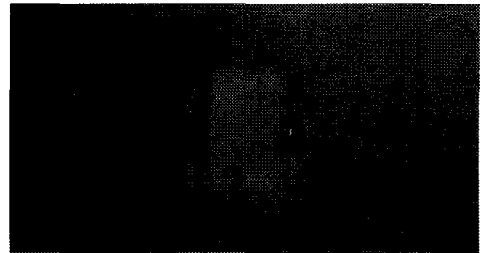
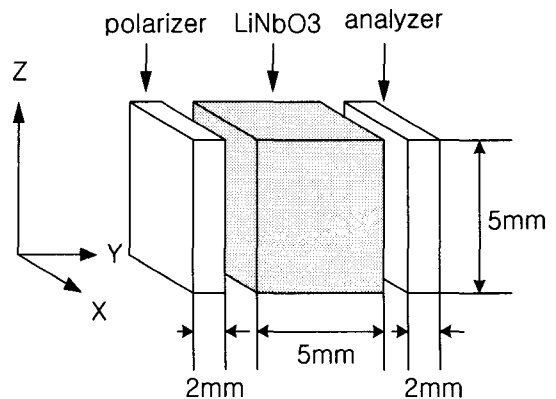


그림 2 일반적인 전기광학 변조기
Fig. 2 A typical electro-optic modulator



(a) 센서부 사진
(a) A photo of Pockels sensor



(b) 센서부 구성도
(b) Structure of Pockels sensor

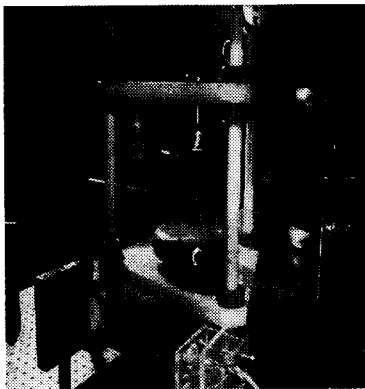
그림 3 제작된 포켈스 센서의 구성
Fig. 3 General view of fabricated Pockels sensor

표 1 LiNbO3의 전기광학 계수

Table 1 Electro-optic coefficients of LiNbO3

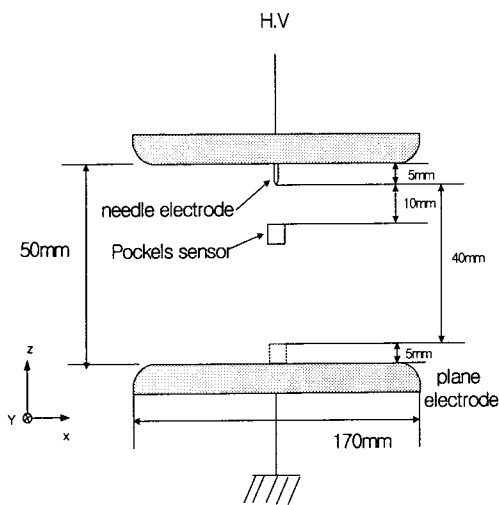
| substance | symmetry | wavelength $\lambda(\mu\text{m})$ | electro-optic coefficients $r_{ik} (10^{-12} \text{ m/V})$ | | index of refraction n_i | |
|--------------------|----------|--------------------------------------|---|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| LiNbO ₃ | 3m | 0.633 | (T)r ₁₃ =9.6 | (S)r ₁₃ =8.6 | n _o =2.286 | |
| | | | (T)r ₂₂ =6.8 | (S)r ₂₂ =3.4 | | n _e =2.200 |
| | | | (T)r ₃₃ =30.9 | (S)r ₃₃ =30.8 | n _o =2.229 | |
| | | | (T)r ₅₁ =32.6 | (S)r ₅₁ =28 | | n _e =2.150 |
| | | 1.15 | (T)r ₀ =21.1 | | n _o =2.136 | |
| | | | (T)r ₂₂ =5.4 | | | n _e =2.073 |
| | | | (T)r ₀ =19 | | | |
| | | 3.39 | (T)r ₂₂ =3.1 | (S)r ₃₃ =28 | n _o =2.136 | |
| | | | (T)r ₀ =18 | (S)r ₂₂ =3.1 | | n _e =2.073 |
| | | | | (S)r ₁₃ =6.5 | | |
| | | | | (S)r ₅₁ =23 | | |

(T) = low frequency from DC through audio range
(S) = high frequency



(a) 전극 사진

(a) A photo of electrode



(b) 전극 구성도

(b) Structure of electrode

그림 4 침대 평판 전극 사진 및 구성도

Fig. 4 General view of point to plane electrode

횡형 모드를 설계된 LiNbO3 포켈스 센서의 반파장 전압 v_{π} 는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$v_{\pi} = \frac{d}{L} \left(\frac{\lambda}{n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}} \right) \quad (1)$$

여기서, 각 광학 계수값은 표 1과 같고 본 연구에서 사용한 횡형 모드 Y-cut LiNbO3 결정소자와 같이 광축방향의 길이 $d=5\text{mm}$, 광의 진행거리 $L=5\text{mm}$ 일 때 파장 $\lambda=632.8\text{nm}$ 의 He-Ne 레이저광에 대한 v_{π} 는 2810[V]로 계산된다.

본 연구에서 PD 전계를 검출하기 위한 시스템의 센서부는 그림 2와 같은 전기광학 변조기를 하나의 소자로 일체화시키기 위하여 그림 3(a)의 사진과 같이 두께 1mm 광학유리 두장 사이에 diachroic 편광필름을 접착시킨 상용제품(Melles Griot 사)을 다이아몬드 톱을 이용하여 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 의 규격으로 가공하여 제작한 편광자와 검광자 사이에 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 크기의 Y-cut LiNbO3 포켈스 결정을 삽입하여 구성하였다.

모의 부분방전을 발생시키기 위한 침-평판 전극은 곡률반경 $100\mu\text{m}$ 의 스테인레스 재질의 침전극(ogura사 제품)과 로고스키 전극과 유사하게 가공한 원형 평판 황동 전극으로 구성하여 그림 4(a)의 사진과 같이 전극간의 거리를 임의대로 조절할 수 있도록 설계 제작하였다. 여기에 60Hz의 교류 고전압을 인가하여 부분방전이 발생될 때 왜곡되는 전계의 변화를 측정하기 위하여 침-평판전극 사이에 센서를 삽입하고, 방전원으로부터 거리를 이동시키면서 변화되는 부분방전 전계의 양상을 측정하였다.

그림 5는 GPIB를 통하여 오실로스코프를 제어, 데이터를 획득 및 패턴 해석이 가능하도록 자체적으로 개발한 프로그램 화면이다. 이 프로그램을 이용하여 온라인 상에서 4-채널 오실로스코프를 제어할 수 있고, 측정 데이터의 실시간 저장 기능이 가능하며 또한, 검출 신호의 필터링, FFT 및 패턴 해석 등이 모두 가능하다.

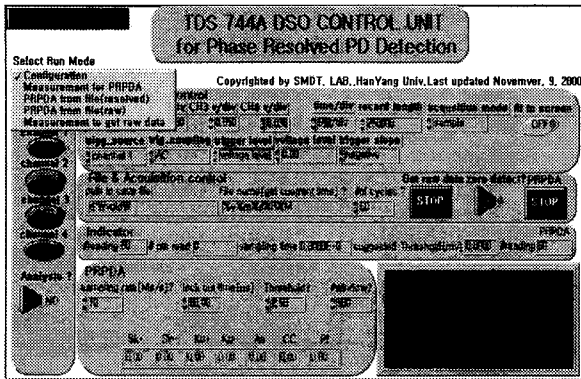
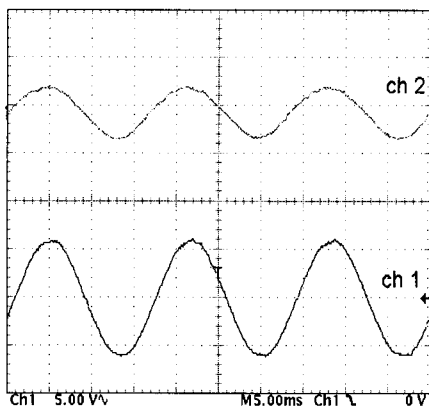


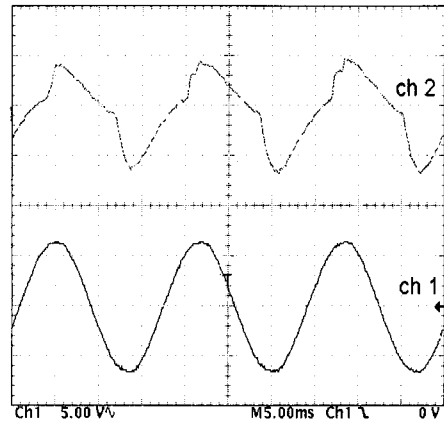
그림 5 오실로스코프 제어 및 데이터 해석을 위한 프로그램
 Fig. 5 Program for oscilloscope control and data analysis

2.2 결과 및 고찰

완전방전이 되지 않도록 침-평균 전극의 간극을 조정 한 후, 10kV AC 전압을 인가하여 임의의 코로나 방전을 발생 시킨 상태에서 포켈스 전계 센서를 삽입하여 침전극 부근의 전 계 변화를 관측하였다. 그림 6은 침전극에서 PD의 발생유 무에 따른 레이저 변조광의 검출 신호를 나타낸 것이다. 그림 에서 ch 1은 인가 전계 파형, ch 2는 포켈스 센서의 출력파 형으로서 그림 6(a)는 PD가 발생되지 않은 경우이므로 레이 저-PT와 같이 센서출력이 인가전압의 파형과 잘 일치되고 있다. 그러나 그림6(b)에서는 센서의 신호가 상당히 왜곡된 양상으로 보여주고 있는데, 이때 함께 설치한 PD 검출기 (TE-571, Haefely사)로 측정 검출한 부분방전 발생량이 약 100pC임을 고려할 때 PD의 발생으로 인하여 전계에 영향을 준 것임을 확인할 수 있었다. 이는 부분방전 발생할 때의 전 계를 포켈스 센서로 측정 한 신호 파형과(ch 1)와 동시에 측 정된 CT 센서의 출력 파형(ch 3)을 비교한 그림 7에서와 같 이 정극성 및 부극성 부근에서 PD가 일어남으로서 전계 센 서의 신호도 왜곡되며 또한 부분방전이 검출되는 위상도 서 로 잘 일치됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6 인가 전계(ch 2)와 포켈스 센서 출력파형(ch 1) 비교
 (a) 부분방전이 발생하지 않은 경우,
 (b) 부분방전이 발생한 경우

Fig. 6 PD signal through Pockels sensor

(a) without partial discharge, (b)with partial discharge

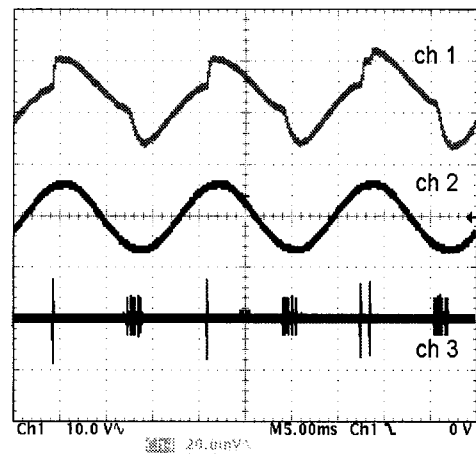


그림 7 서로 다른 센서의 코로나방전 측정 파형

ch 1 : 포켈스센서 출력, ch 2 : 인가전계,
 ch 3 : CT센서

Fig. 7 Measurement signals of different sensors for the corona discharge.

ch 1 : Pockels sensor, ch 2 : applied field, ch 3 : CT type sensor

그림 8에서는 PD발생시의 전계를 포켈스 센서로 측정 한 신호를 소프트웨어적으로 필터링하여 PD에 의한 전계 변 화 만을 나타낸 것이다. 이 결과에서도 알 수 있듯이 그림 7의 CT 센서의 결과에서와 같이 정극성과 부극성에서 발생한 PD 신호의 양상이 뚜렷이 다를 뿐 아니라 신호의 크기도 구 별되어 정성적인 해석이 가능하게 되었다.

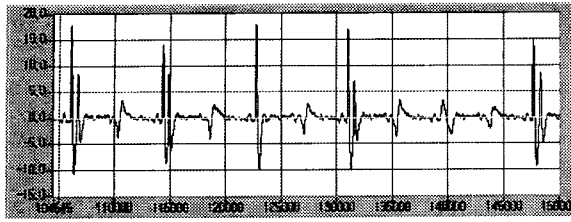


그림 8 필터링을 수행한 PD 검출 신호
 Fig. 8 Filtered PD signal detected through Pockels sensor
 (Low frequency : 500Hz, High frequency : 500kHz)

측정 신호의 정량적인 분석을 위하여, 최초 침전극과 센서의 거리를 5mm로 하고, 방전(약 100pC)이 개시됐을 때의 전압(10kV)을 그대로 유지시킨 상태에서 센서와 침전극 간의 거리를 5mm씩 증가시키면서 30mm까지의 센서 출력을 측정하였다. 출력 신호의 피크값의 정확한 측정을 위하여, 50-주기씩의 신호를 500kS/s로 샘플링하여 측정하여 GPIB를 통해 PC에 저장한후, 정극성과 부극성 피크의 평균값을 계산 하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이, 거리변화에 따른 정극성과 부극성에서 나타나는 PD에 대한 센서 출력값은 센서와 침전극 사이의 거리가 멀어질수록 출력에 규칙적으로 감소됨을 알 수 있고 또한, 불규칙한 방전 펄스의 측정으로 인한 오차가 나타나는데, 이러한 오차를 줄이기 위해 다양한 방전량에 대한 추가실험이 진행중이다.

또한 현재의 광계측 시스템으로는 20pC이하의 PD는 검출이 불가능하며 이것은 차후 광파이버를 이용한 완전한 시스템이 구축되면 수 pC까지의 감도 개선이 가능할 것으로 예측된다.

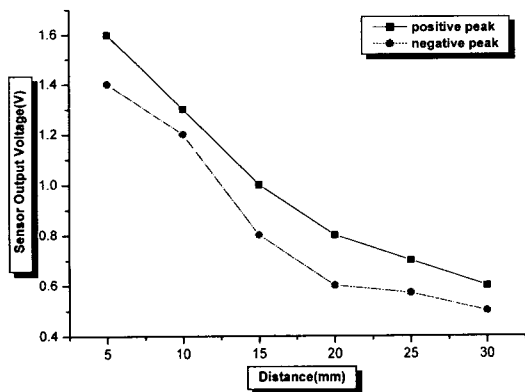


그림 9 부분방전 발생시 방전원으로부터의 측정 거리 변화에 따른 검출신호 크기의 변화
 Fig. 9 Relationship between the peak value of sensor output and measuring distance from discharge source.

3. 결 론

본 논문에서는 레이저 간섭계 및 전기광학 효과를 이용한 광측정시스템을 이용하여 부분방전 진단을 위한 최초의 제안

으로, 부분방전 측정을 위하여 프루브형 센서를 이용하여 전계 변화를 측정함으로써 부분방전을 진단 분석하기 위한 기초 연구를 수행하였고, 이를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 방전이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우를 측정한 포켈스 센서의 출력 결과와 방전 발생시 CT 센서와 포켈스 센서로 동시에 측정된 결과 등을 고려하여볼 때, PD에 의한 전계왜곡을 검출 분석함으로써 부분방전 검출이 가능함을 보였다.
2. 부분방전이 발생하는 위치에서 센서까지의 거리가 멀어질수록 센서 출력이 반비례적으로 감소함을 알 수 있었다. 따라서 포켈스 센서를 이용한 부분방전 검출 및 위치 판별 가능성도 제시하였다.

이러한 결과로써 초고압 변압기와 같은 여러 고전압 기기에서의 프루브형 포켈스 센서를 이용한 PD검출 및 해석 가능성을 보였으며, 앞으로는 이러한 광측정 시스템이 실제 현장에서의 신뢰할 수 있는 정량적인 측정이 가능케 하는 연구가 더 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소(과제번호:99-중기-06) 및 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터(RRC)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J.P. Steiner, IEEE EI Magazine, "Partial Discharge IV , Commercial PD testing", Vol. 1, No. 1, pp.20-33, 1991
- [2] E. Howells et al., "Partial discharge Handbook", Physical Acoustics corporation, pp. 1.1 ~ 9.11, 1989
- [3] J.Y.Koo, Y.M.Chang, J.H.Lee, JEEIS, "Development of Measuring techniques for High-voltage impulse and small signals using Pockells cell", Vol.1(3), pp 12-24, 1996
- [4] T.Takahashi et al , "New optical-waveguide Pockels sensor for measuring electric field", pp. 8356, International Symposium on High Voltage Engineering. 1997
- [5] J.Y.Koo, Y.S.Lim, W.J.Kang, Y.M.Chang, "A possible application of the PD detection technique using electro-optic Pockells cell with nonlinear characteristic analysis on the PD signals", CEIDP-IEEE, pp 531-534, 2000
- [6] Amnon Yariv, Pochi Yeh, "Optical waves in crystals", John Wiley & Sons, 1984
- [7] David N. Nikogosyan, "Properties of optical and laser-related materials a handbook", John Wiley & sons, 1997

저 자 소 개



강 원 종 (康元鐘)

1975년 1월 21일생.
1997년 한양대학교 전기공학과 졸업.
1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 및
(주)LG산전 전력시험기술센터 주임 연구원

Tel : (043) 261-6584

Fax : (043) 261-6628

E-mail : wjkang@lgis.com



구 자 윤 (具滋允)

1951년 2월 7일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1980년 프랑스 ENSEEHT 졸업(석사). 1980년~1984년 프랑스 ENSIEG 졸업(공학). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 한양대 전자재료부품 연구센터(EM&C)소장

Tel : (031)400-5163

Fax : (031)407-9873

E-mail : koojy@hanyang.ac.kr