

포켈스 효과를 이용한 불평등 전계 측정

강원종\*, 임윤석, 최재욱, 장용무, 구지운  
 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 (EM&C)

A possible application of the nonuniform electric field measurement using Pockels effect

W.J.Kang, Y.S.Lim, J.O.Choi, Y.M.Chang, J.Y.Koo  
 Dept. of Electrical Engineering of Hanyang Univ. (EM&C)

**Abstract** - In this paper, new Partial Discharge (PD) detection technique using Pockels-cell was proposed. For this purpose, PD was generated from needle-plane electrode in air and detected by optical measuring system using Pockels cell, based on Mach-Zehnder interferometer, consisting of He-Ne laser, single mode optical fiber, 50/50 beam splitter and photo detector. We show the characteristic of the proto-type sensor for the corona discharge.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

그림 1의 측정시스템 개략도에 보여지는 바와 같이, 부분방전(PD)을 발생시키기 위한 침대평판 전극 사이의 불평등 전계를 검출하는 프루브센서는 발생부위에 삽입되며, He-Ne 레이저광원과 광신호 검출기 사이의 기준 광과 변조 신호광은 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 결합시켰다. 50/50 빔살가르개 (beam splitter)으로 나누어진 기준광은 외부의 간섭을 받지 않고 진행하며, 동시에 침대평판 전극 사이에서 PD 발생 유무에 따라 변화되는 전계에 선형적으로 비례하여 변조시키는 센서를 통과하면서 변조 신호광이 된다. 이들 광신호는 광신호 검출기의 포토다이오드에 의해 각각 검출되며, 두 신호 사이의 차등신호를 출력하게 된다. 또한 검출기의 출력 신호는 디지털오실로스코프에 의해 검출 저장되고, GPIB를 통하여 PC로 전송되어 자체 개발한 프로그램을 이용하여 처리하였다.

전체 시스템은 전자파 차폐실(1kHz-1GHz 전계: 100dB, 100kHz-1GHz 자계: 100dB)내부에 설치된 광학 방진 테이블 위에 세팅되었고, 모의 PD를 발생시키는 전압원은 내부 잡음과 PD를 발생시키지 않는 고전압 변압기 (noise free high-voltage transformer PZTL100-0.25, Haefely Trench사)를 사용하였다.[4]

1. 서 론

급증하는 전기에너지 소비를 충당하기 위하여 대용량의 고전압·대전력화로 개발되어 설치 운영하면서 각종 전력설비들에서 발생될 수 있는 여러 가지 유형의 사고 가능성은 설비 규모에 비례하여 증가될 뿐 아니라, 사고 당의 피해규모나 파급 효과는 엄청나게 크다. 따라서 설비를 운영함에 있어서 사고 발생의 예방 및 운전의 신뢰도 향상을 위한 상시적인 설비의 예방진단 시스템의 필요성은 절대적이다.

부분방전을 측정하여 분석하는 방법은 전력설비의 상태를 진단을 위한 다른 여러 방법들에 비하여 많은 장점을 가지고 있어 현재 널리 연구 개발되고 있다. 그러나, 기존의 부분방전 측정법에서는 여러 가지 장점이 있음에도 불구하고 측정 신호의 크기가 미소하며, 외부 전자기장의 영향을 받기 쉽기 때문에 진성신호에 혼입된 잡음과의 분리를 위한 다단계의 증폭 및 필터링이 필요하고 현장 적용에 어려움이 많다. 그러나, 최근에 레이저 및 광섬유를 이용한 여러 가지 광측정법이 제안되어 기존의 문제점들을 해결하고 현장적용을 용이하게 하고자 하는 연구가 여러 방향으로 진행되고 있다.[1]

본 연구에서는 전기광학 효과를 나타내는 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 응용하여, 부분방전이 발생될 때 왜곡되는 전계를 측정하여 부분방전을 해석하는 방법을 제안하였다. 이러한 비선형 광학결정을 이용하여 전계를 측정하는 방법은 다음과 같은 이점이 있다. 첫째, LiNbO<sub>3</sub> 결정은 유전체로 측정하고자 하는 전계에 영향을 거의 주지 않는다. 둘째, 전계의 변화에 대한 주파수 응답 특성이 매우 우수하며 센서의 초소형 경량화가 가능하다. 셋째, 전계를 측정할 레이저 변조광 신호는 광파이버를 통하여 전달되므로 공간적인 제한이나 외부 전자기장에 의한 영향을 전혀 받지 않는다. 넷째, 이러한 측정 시스템은 DC부터 GHz대역까지 넓은 주파수 응답을 갖는다.[2-3]

본 논문에서는, 자체 제작한 LiNbO<sub>3</sub> 포켈스 프루브 센서를 이용하여 방전원으로부터의 측정위치를 변화시키면서 부분방전 발생시의 전계변화를 측정하였고, 이 데이터를 컴퓨터로 저장하여 자체 개발한 분석프로그램을 이용하여 필터링, 주파수 분석을 수행하였다.

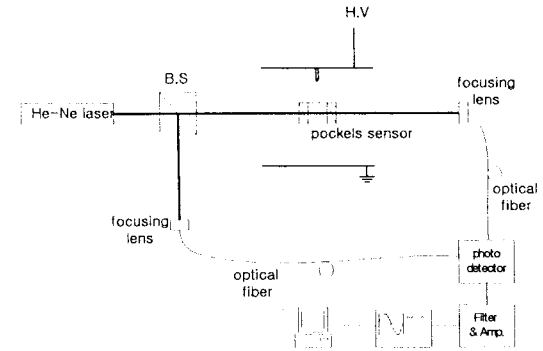


그림 1. 실험 시스템의 Block Diagram

본 연구에서는 인가 전계에 직교하게 진행하는 레이저 광을 변조시키는 횡형 모드(transverses mode)의 Y-cut LiNbO<sub>3</sub> 결정소자를 적용했다. 그림 2에서와 같이 측정할 전계를 포켈스 결정의 광축(optic axis) 방향으로 인가한 후, 편광자의 x축에  $\pi/4$  rad로 선형 편광시킨 레이저광이 결정을 진행하면서 변조되어 편광자에  $\pi/2$  rad으로 설치된 검광자(analyzer)를 통과한다. 광의 진행 방향과 인가된 전계 방향이 평행한 종형 모드(longitudinal mode)는 결정소자의 모양이나 크기에

따라 반파장 전압(halfwave voltage)이 일정한 값으로 고정되지만, 횡행 모드는 일정한 전계하에서도 광이 진행하는 거리에 따라 반파장 전압(전계)값이 변화되는 특징을 가지고 있어 측정 전계의 범위에 따라 소자의 길이 변화를 손쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다.[5]

본 연구에서 사용된 LiNbO<sub>3</sub> 포켈스 센서의 반파장 전압은 (식) 1과 같이 주어진다.

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

여기서, 이상광선 및 상광선에 대한 LiNbO<sub>3</sub> 굴절율은 각각  $n_e=2.286$  및  $n_o=2.200$ 이고, 결정의 전기광학 계수는  $r_{33}=30.8 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ,  $r_{13}=8.6 \times 10^{-12} \text{m/V}$ 으로 주어진다. 따라서, 광축방향의 길이  $d=5\text{mm}$ , 진행방향의 길이  $L=5\text{mm}$ 일 때 파장  $\lambda=632.8\text{nm}$ 의 HeNe 레이저광에 대한  $v_x$ 는 2810[V]로 계산된다.

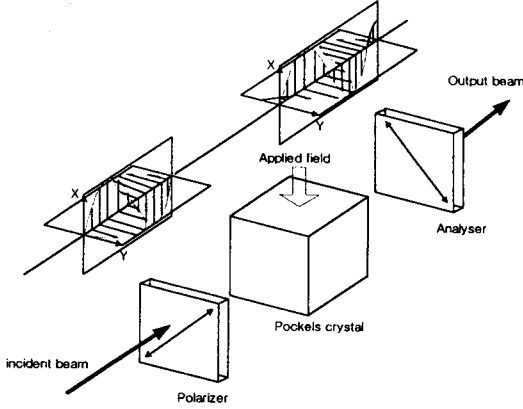
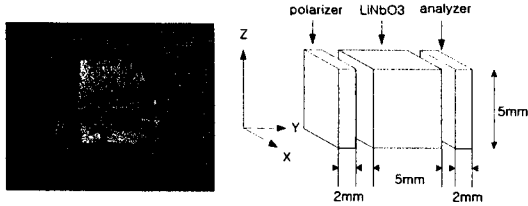


그림 2. 포켈스 효과를 이용한 전계 측정 원리

전계 검출에 사용된 센서부의 구성은 그림 3(a)의 사진과 같이 두께 1mm 광학유리 두장 사이에 diachroic 편광필름을 접착시킨 상용제품(Melles Griot사)을 다이아몬드 톱을 이용하여 5mm×5mm의 규격으로 가공하여 제작한 편광자와 검광자 사이에 5mm×5mm×5mm 크기의 Y-cut LiNbO<sub>3</sub> 포켈스 결정을 삽입하여 구성하였다.

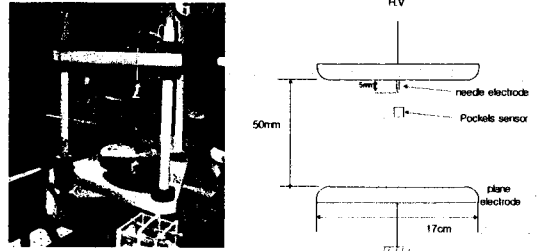


(a) 센서부 사진 (b) 센서부 구성도

그림 3. 제작된 포켈스 센서의 구성

부분방전을 발생시키기 위하여 곡률반경 100 $\mu\text{m}$ 의 스테인레스 재질의 침전극(ogura사 제품)과 황동으로 코팅된 전극과 같이 가공한 원형 평판 전극으로 침대 평판 전극을 구성하여 그림 4(a)의 사진과 같이 전극간의 거리를 임의대로 조절할 수 있게 하였다. 여기에 60Hz의 교류 고전압을 인가하여 부분방전이 발생될 때 침전극에서 왜곡되는 전계의 변화를 측정하기 위하여 침대

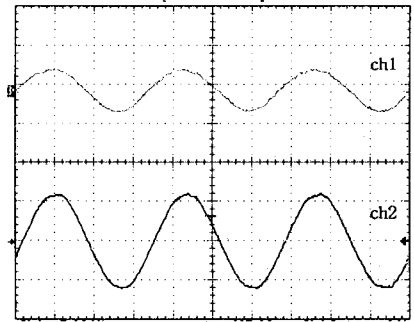
평판전극 사이에 센서를 삽입하고, 방전원으로부터 거리를 이동시키면서 변화되는 부분방전 전계를 측정하였다.



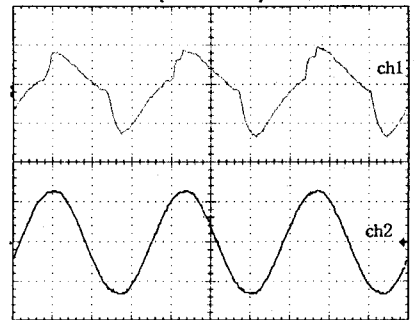
(a) 침대평판 전극사진 (b) 전극 구성도  
그림 4. 침대 평판 전극 사진 및 구성도

## 2.2 결과 및 고찰

침대 평판 전극에 10kV AC 전압을 인가하여 코로나 방전이 발생될 때 포켈스 프루브 센서를 삽입하여 침전극 부근의 전계 변화량을 측정하였다. 그림 6은 PD 발생유무에 따른 레이저 변조광의 검출파형으로 발생한 PD의 영향으로 왜곡된 모양을 보여준다. 동시에 PD 검출기(TE-571, Haefely사)로 측정 검출한 부분방전 발생량은 약 100pC이었다. 그림 7은 부분방전 발생시의 인가전계와 포켈스센서 및 CT 센서 출력 파형을 비교한 것으로서 부분방전이 검출되는 위상이 서로 일치함을 알 수 있다.



(a)



(b)

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

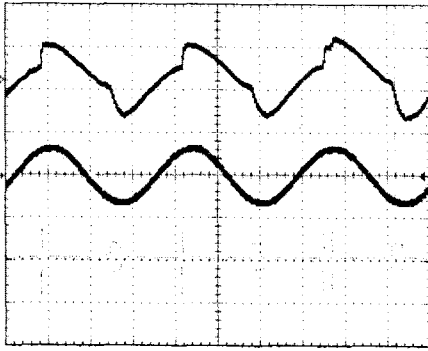


그림 7. 부분방전 발생시의 인가전계(중), 포켈센서 출력(상), CT 출력(하) 비교

그림 8에서는 PD발생시의 전계를 포켈스 센서로 측정된 신호를 소프트웨어적으로 필터링하여 PD에 의한 전계 변화만을 나타낸 것이다. 여기서 정극성과 부극성에서 발생한 PD신호를 뚜렷이 구별하여 볼 수 있어 정성적인 해석이 가능하며, 이것을 이용하여 정량화로 해석하기 위한 연구도 지속적으로 진행중이다.

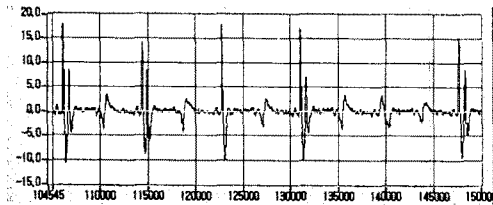


그림 8. 소프트웨어적 필터링을 수행한 PD 검출 신호

부분방전 발생부의 측상에서 10~40mm 떨어진 거리를 10mm씩 변화시켜가며 전계변화를 측정된 포켈스 센서의 출력 파형은 그림 9에서 보여준다. 이 파형은 50-주기씩의 신호를 500ks/s로 샘플링하여 측정하여 GPIB를 통해 PC에 저장한 후, 임의의 5-주기만을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 방전원으로부터 센서까지의 거리가 멀어질수록 인가전압의 피크부근에서 방전에 의한 전계변화량의 차이는 줄어들고, 변화가 시작되는 위상이 점차적으로 뒤로 이동 되어감을 알 수 있다. 이것은 방전이 진행하면서 코로나가 공간적으로 퍼지게 되어 거리가 먼 센서에 미치는 영향이 적어지는 것이며, 공간을 진행하는 시간에 의해서 위상 지연이 보이는 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 포켈스 센서를 이용하여 부분방전 검출 실험을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 방전이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우를 측정된 포켈스 센서의 신호 파형과 CT 센서로 검출한 신호와 비교하여볼 때 PD에 의한 전계왜곡을 검출 분석함으로써 부분방전 검출이 가능함을 보였다.
2. 방전원과 센서의 거리를 변화시키며 실험한 결과, 방전 발생부로부터 센서의 측정 위치가 멀어짐에 따라 방전에 의한 전계 변화량은 감소하며, 검출되는 신호

의 위상도 지연되어 이동됨을 알 수 있었다. 따라서 포켈스 센서를 이용한 부분방전 검출 및 위치 판별 가능성도 제시하였다.

이러한 결과는 포켈스 센서를 이용한 PD 검출 및 위치 판별의 가능성을 보였으며, 향후 PD 패턴 해석을 위한 연구와 현장 적용을 위한 연구가 필수적이라고 사료된다.

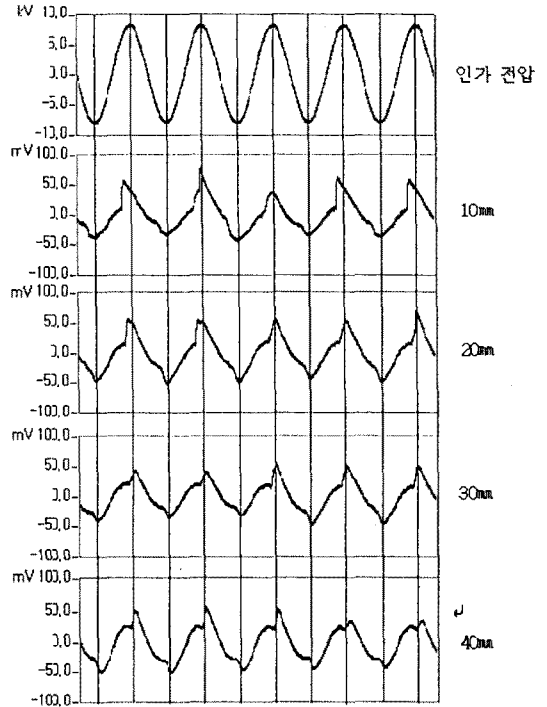


그림 9. 부분방전 발생시 방전원으로부터의 거리 변화에 따른 전계변화 파형

본 연구는 기초전력공학 공동연구소 및 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터의 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부로 이에 감사드립니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J.P. Steiner, IEEE El Magazine, Vol. 1, No. 1, pp.20-33,
- [2] J.Y.Koo, Y.M.Chang, J.H.Lee, J.EEIS, Vol.1(3), pp 12-24, 1996
- [3] T.Takahashi et al., "New optical-waveguide Pockels sensor for measuring electric field", pp. 8356, International symposium on High voltage engineering, 1997
- [4] J.Y.Koo, Y.S.Lim, W.J.Kang, Y.M.Chang, "A possible application of the PD detection technique using electro-optic Pockels cell with nonlinear characteristic analysis on the PD signals", CEIDP-IEEE, pp 531-534, 2000
- [5] Amnon Yariv, Pochi Yeh, "Optical waves in crystals", John Wiley & Sons, 1984