

부분방전 전계 측정용 LiNbO<sub>3</sub> 프루브 센서 제작

강원중\*, 장용무, 구자윤  
 한양대학교 전기공학과 (EM&C)

A development of LiNbO<sub>3</sub> probe sensor for detecting partial discharge

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

**Abstract** - In this work, a possible new PD detection technique, based on the electro-optic effect, has been proposed. A proto-type probe sensor for detection partial discharge is made by LiNbO<sub>3</sub> Pockels cell, diachroic sheet polarizer and right-angle prism. The Mach-Zehnder interferometer system is proposed by using this sensor and this system is applied to detecting high electric field. we show the characteristic of the proto-type probe sensor and the design of a proposed probe type sensor.

1. 서 론

초고속 산업 발전에 따른 소비전력의 급증으로 인하여 전력설비들이 초고압·대용량화 되어가며, 이것에 병행하여 각종 설비들에서 발생될 수 있는 여러 유형의 사고 가능성도 계속적으로 증가되어왔다. 이러한 사고예방이나 운전, 공급 신뢰도 등의 향상을 위한 상시적인 설비의 예방진단 시스템의 필요성은 매우 절실하다.

여러 전력설비의 진단방법중, 전력설비에서 발생하는 부분방전을 측정하여 수명예측을 진단하는 기술은 중요한 방법으로서 널리 연구된다. 이러한 부분방전의 해석은 전력설비를 설계, 개발하는데 필요한 가장 중요한 요소중 하나이다. 부분방전 측정법은 여러 가지 장점으로 각광받고 있음에도 불구하고 신호잡음 문제 등으로 인하여 현장적용에 어려움이 많다. 그러나 최근에 레이저 및 광섬유를 이용한 여러 가지 광계측법이 제안되어 기존의 문제점들은 해결할 뿐만 아니라 현장적용에 간편하게 이용하고자하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

전계를 측정하는데는 여러 방법이 있으나 Pockels 광학소자를 이용하는 전계 측정방법은 다음과 같은 이점이 있다. 첫째, Pockels 소자는 절연체이므로 측정하고자 하는 전계에 거의 영향을 주지 않는다. 둘째, 전계의 변화에 대한 응답 특성이 좋으며 소형화가 가능하다. 셋째, 측정된 전계에 대한 정보는 광파이버를 통하여 빛의 형태로 전달되므로 외부 전자장에 의한 영향을 받지 않는다. 넷째, 이러한 측정 시스템은 DC부터 GHz까지 넓은 주파수 응답을 가진다. [1],[2]

본 연구에서는 선행 연구결과를 바탕으로 부분방전 전계 측정을 위한 포켈스 전계 프루브 센서를 설계 제작하고자 한다. 프루브는 LiNbO<sub>3</sub> Pockels 소자를 이용하며, Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 변조광을 검출하고자 한다. 현재까지의 초소형 프루브에 대한 설계 파라메타를 결정하기 위한 기초적인 측정 결과 및 제안된 프루브 디자인을 발표하고자 한다. [3]

2. 본 론

2.1 간섭계형 측정시스템의 구성

시간적으로 변화가 심한 불평등 전계를 측정할 레이저 변조광의 신호검출을 위하여 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 간섭계의 10mW, 633nm He-Ne 레이저 광원은 50/50 optic fiber coupler에 의해 기준광(reference beam)과 신호광(signal beam)으로 각각 나누어진다. 신호광은 발생되는 전계가 인가되는 센서부를 통과하면서 전기광학적으로 변조된다. 이렇게 변조된 신호광과 기준광이 서로 간섭하여 광원의 출력잡음이 제거된 변조신호만을 얻을 수 있다. 레이저광은 photodiode에 의해 검출되어 detector 내부에서 두 신호 사이의 차등신호로 출력된다. 이 출력신호는 본 연구진이 자체 제작한 MPB형 로우패스필터 및 앰프를 거쳐 디지털오실로스코프로 측정되고, GPIB 및 Labview 프로그램을 이용하여 처리하였다.

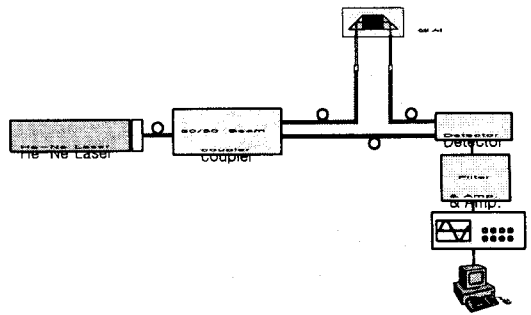


그림 1 전계 측정 시스템 개략도.

전계 검출을 위한 프루브 센서부는 그림 2와 같이 양단에 2개의 직각프리즘과 중앙에 Pockels 결정이 있고, 2개의 프리즘과 결정사이에 편광기 및 해석기(analyzer)가 각각 위치해 있다. 여기서 사용된 편광기 및 해석기는 직경 30mm의 상용 diachroic sheet polarizer를 다이아몬드 톱을 사용하여 5mm×5mm의 크기로 직접 절단 가공하여 사용하였다. Pockels 소자는 5mm×5mm×5mm크기로 연마 가공된 Y-cut LiNbO<sub>3</sub> 결정으로 공간 전계를 측정하기 때문에 전극부착을 위한 금속코팅은 하지 않았다.

여기서 사용된 LiNbO<sub>3</sub> 소자는 횡모드(transverse mode)를 적용하였는데, 이는 종모드가 반파장 전압 값에 대하여 소자의 모양이나 크기가 일정하게 주어지는

반면에 펄모드는 소자의 크기를 조절함에 따라 반파장 전압 값을 검출하고자 하는 범위에 맞게 조절이 가능하다. 여기서 결정에 입사된 선형 편광된 레이저광은 결정의 z-축에 대하여 45° 기울어져서 y-축 방향으로 진행하며, 진행되는 레이저광은 z-축 방향으로 인가된 전계에 의해 선형 편광된 레이저광의 위상차가 발생되어 변조된다. 이때 발생하는 위상차가 레이저 파장의 절반이 되게 하는 전압의 크기를 반파장 전압으로 정의하면, LiNbO<sub>3</sub> 소자의 반파장 전압은 식 (1)과 같이 주어진다. [4]

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

여기서, 굴절률  $n_e=2.286$ ,  $n_o=2.20$ , 전기광학 계수  $r_{33}=30.9(10^{-12} \text{m/V})$ ,  $r_{13}=9.6(10^{-12} \text{m/V})$ ,  $d=5\text{mm}$ ,  $L=5\text{mm}$ ,  $\lambda=632.8\text{nm}$ 인 본 연구의 센서에 대한 반파장 전압  $v_{\pi}$ 는 2370[V]가 된다.

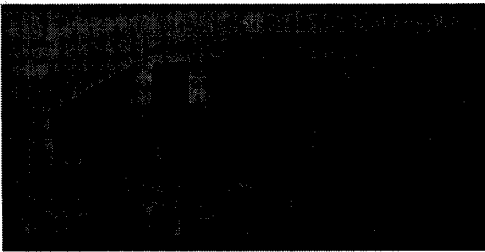


그림 2 LiNbO<sub>3</sub>을 사용한 Pockels 센서부 사진.

본 실험은 그림 3의 전경사진에 보는 바와 같이, 외부 잡음차단을 위하여 쉴드룸(전계 1kHz-1GHz : 100dB, 자계 100kHz-1GHz : 100dB)내에서 실시되었고, 전압원으로는 Haefely Trench사의 noise free High-voltage transformer PZTL100-0.25를 사용하였다. 또, 부분방전이 발생시 측정된 신호해석 및 비교검토를 위하여 Haefely사의 partial discharge detector TE-571을 이용하였다.

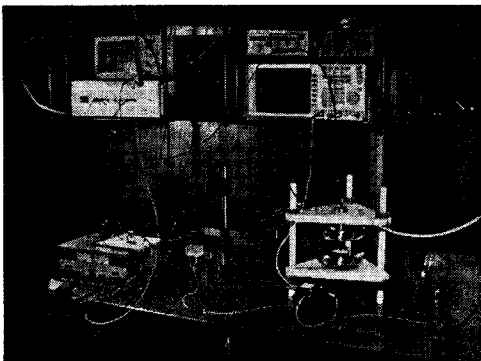


그림 3 전계 검출 시스템 전경사진

## 2.2 전계 검출 실험

센서의 특성을 측정을 위하여, 직경 15cm의 평행평판

전극사이에 5cm의 간격을 두고 1kV에서 12kV까지의 전압을 인가하여, 그림 4와 같이 평판전극 사이의 평등 전계를 측정하였다.

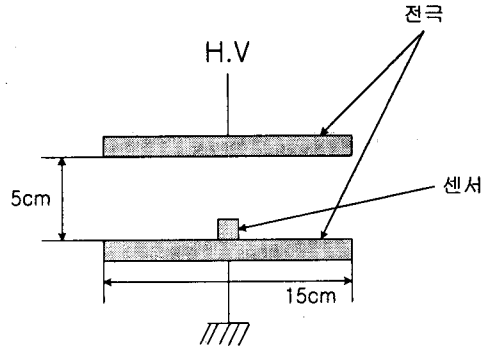


그림 4 전계 검출부 개략도

그림 4의 평판 전극에 대하여 5kV 인가시의 전계 분포 및 평등 전계 내에서의 센서에 의한 전계 왜곡 등을 검토하기 위한 3D-Maxwell 전자기해석 프로그램의 시뮬레이션 결과는 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보듯이 LiNbO<sub>3</sub> 센서소자에 의한 전계 왜곡의 정도는 전체적인 전계 분포로 볼 때, 영향은 국부적인 것으로서 측정결과에 대한 보정값으로 충분히 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다고 사료된다.

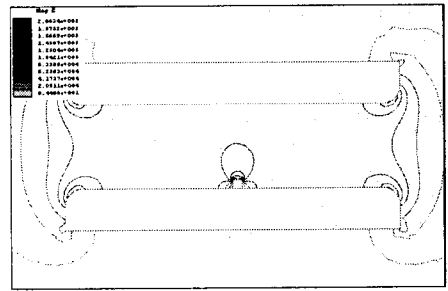


그림 5 평판전극 사이에 5kV 전압인가시 전계분포

그림 6은 5kV의 전압인가시의 센서에 의한 측정 파형이다. 채널 1은 1000:1 고압 프루브를 이용하여 인가 전압을 직접 측정한 파형이고, 채널 2의 파형은 본 시스템의 Pockels 전계 센서에 의해 광변조 신호파형이다. 그림에 나타난 것과 같이 두 파형 사이에서 발생하는 위상차는 검출 신호가 필터를 통과하면서 필터회로에 의해 발생하는 것이다. 이는 필터회로 정수에 의해 계산되어 지므로 보정이 가능한 것을 고려할 때, 인가된 전압에 대한 측정 신호는 서로 일치됨을 알 수 있다.

그림 7은 인가 전압을 1kV부터 12kV까지 변화시켰을 때의 측정결과이다. 그림 7에 그려진 것과 같이 전계 변화에 따른 측정신호의 크기 변화에 대한 선형성은 확인되고 있지만 기대치 이상의 오차를 가지고 있는 것으로 생각된다. 이는 레이저 광원의 출력변동, 광섬유 및 포토다이오드의 입사광량의 변동, 인가 전압변동 등으로 인한 오차로 판단되므로 이들의 영향에 무관하도록 시스템 설계의 수정이 진행 중이다. 또, 설계된 센서에 대한 측정 전계의 선형범위를 확인이나 광검출부, 필터 및 앰프 출력신호의 최적화도 병행되어야 할 것으로 생각된다.

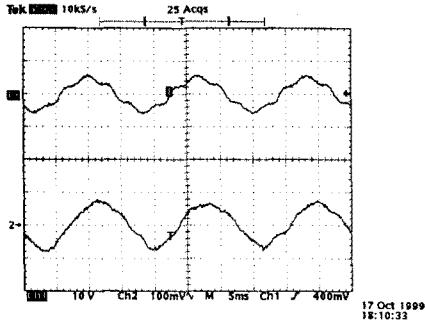


그림 6 5kV 전압인가시의 측정 파형

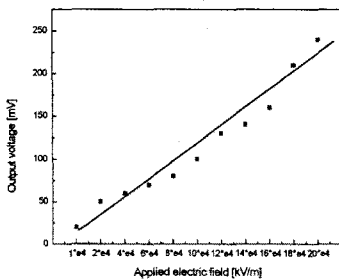


그림 7 인가 전계와 출력 신호사이의 관계

본 연구는 부분방전 검출을 위하여 측정하고자 하는 전계의 왜곡을 일으키지 않는 공간 전계 측정용 프루브형 Pockels 센서 제작을 목적으로하여 연구가 진행 중이며, 현재 proto-type 센서에 의한 실험이 완료되어 프루브제작이 진행 중이다. 현재 그림 8과 같은 형태로 광파이버를 이용하여 신호를 전달시킬 수 있는 프루브 센서로 설계되었다. 프루브는 FC-type 광 커넥터로 시스템과 연결되고, 멀티모드 광섬유를 통하여 빛을 전달하여 집광 렌즈를 이용하여 검출부와 연결하기 위해 광섬유와 결정 또는 프리즘간의 결합, 박막형의 편광기의 조립 등에서 국내 기술적인 해결방안을 모색 중이다.

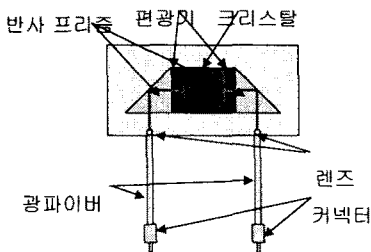


그림 8 전계 프루브센서의 개략도

### 3. 결 론

Pockels 센서에 의한 부분방전 검출가능성이 확인된 선행 연구결과를 기본으로 하여, 부분방전이 발생될 때 변화되는 전계를 측정하기 위한 전계센서를 설계 제작 하

고자 한다. 이를 위하여 측정하고자 하는 전계의 왜곡을 일으키지 않으면서 공간적으로 시간적으로 불규칙한 방전 전계 측정용 초소형 프루브형 Pockels 전계센서를 설계하여 얻어진 소자특성에 대한 실험 데이터를 기반으로 연구가 진행 중이며, 추후 완료된 결과를 발표하고자 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 日高邦彦, 室岡義廣, "ポッケルス素子による長ギャップ交流コロナ放電中の電界測定", 日本電氣學會論文誌A, 昭58-5, 卷5号, pp.241-248, 1983
- [2] T.Takahashi, T. Kouno and K. Hidaka, "New Optical-waveguide Pockels sensor for measuring electric fields", 9th Int. Symp. on High voltage Engineering, vol. 8, pp.8356-1-4, 1995
- [3] Amnon Yariv, Pochi Yeh, "Optical waves in crystals" pp.220-270, John wiley & Sons, 1984
- [4] 日本電氣學會技術報告(II部)第 219号, 昭和 61年 5月 pp.45-53 (1986)