

# 레이저를 이용한 전력설비 진단용 광전송 시스템 개발

홍진영\*, 조광래, 이정현, 장용무, 구자운  
한양대학교 전기공학과

## Development of Optical Transmission System for The Diagnosis of Power Apparatus Using Laser Beam

J.Y. Hong, K.L. Cho, J.H. Lee, Y.M. Chang, J.Y. Koo  
Dept. of Electrical Eng., Han Yang University

### ABSTRACT

It is practically required to develop an optical transmission system, for the diagnosis of electric power apparatus, which enables to distinguish the right signals related to the partial discharge taken place inside the apparatus. These partial discharges are transformed into ultra sonic signals by the sensor and then used for the voltage application to pokels cell. Afterwards, the modulated laser beam is transmitted through the optical fiber.

Throughout this work, a laser-beam based detecting system is developed and permits us to reproduce the transmitted signals indirectly without electromagnetic interference. For this purpose the characteristics of this system is well analyzed by means of different type of signals from function generator.

### 1. 서 론

최근 전력기기 사용량이 증가함에 따라, 전력 계통의 공급 신뢰도에 대한 관심이 집중되고 있다. 즉, 변전소에 신뢰도가 높은 기기와 각종 설비관리 시스템을 적용함으로써 운전면에서 자동화, 보수면에서 점검 기기의 개선이 요구되고 있다. 전력기기 운전상태 감시의 목적은 설비의 예방진단 및 사고의 신속한 복구와 설비의 이상을 사전에 감지하는데 있다. 사고상황을 신속하게 파악하기 위하여 상시 감시 및 진단기법의 필요성은 다음과 같다 :

- (1) 전력기기의 갑작스런 고장방지 및 이로 인한 정전사고 방지.
- (2) 경제적으로 최적인 보수계획 수립.
- (3) 전력용 변압기의 수명 예측 및 사고 예방.
- (4) GIS 설비의 사전 사고 예방.

본 연구의 목적은 진동센서와 광전송 장치를 이용하여 전력기기를 상시 감시하는 시스템을 개발하는 것이다. 즉, 설비이상시 발생하는 P.D 신호를 진동센서로 감지, pre-Amp로 증폭시킨후 이를 LiNbO<sub>3</sub> 소자에 인가하게 되면 포켈스 효과에 의해 레이저빔에 변조가 일어나게 되고, 이 변조된 빔을 광화이버를 통해 전송시켜 제작된 센서를 이용하여 P.D

신호를 재생시켰다. 이와같이 개발된 시스템은 전자파 장애로 인한 노이즈를 배제할 수 있고, 케이블을 이용할 경우 나타나는 신호감쇄 문제를 해결할 수 있는 장점을 갖고 있다.

### II. 관계 이론

#### LiNbO<sub>3</sub>의 전기광학 효과

그림1과 같이 LiNbO<sub>3</sub>결정의  $xz$ 평면에서  $z$ 축(optic axis)에 대해 45°로 편광된 레이저광을  $y$ 축 방향으로 입사시켜, 이때  $z$ 축 방향으로 피축정전압을 인가시킨 경우를 생각해보자.

이때 LiNbO<sub>3</sub>결정에 입사된 레이저광의 전계가

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1)$$

로 주어지면,  $y$ 축을 따라 전파하는 레이저광의  $x$ 축과  $z$ 축성분의 전계는

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - kz) \quad (2.a)$$

$$E_z = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - kz) \quad (2.b)$$

으로 나타낼 수가 있다. LiNbO<sub>3</sub>결정의  $x$ 축과  $z$ 축방향의 굴절율은 각각

$$n_x' = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z' \quad (3.a)$$

$$n_z' = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_x' \quad (3.b)$$

이다. 단, 여기서  $E_x' (= V_{app}/d)$ 는 LiNbO<sub>3</sub>결정에 인가된 전압에 의한 전계이다.

길이가 L인 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 통과한후 레이저광의 각 성분별 전계의 위상변화는 식(4)로 주어진다.

$$\phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_x' L = \frac{2\pi}{\lambda} n_o L (1 - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z') \quad (4.a)$$

$$\phi_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_z' L = \frac{2\pi}{\lambda} n_e L (1 - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_x') \quad (4.b)$$

그러므로, 두 파간의 위상지연(retardation)은 식(5)로 주어진다.

$$\Gamma = \phi_x - \phi_z = \frac{2\pi}{\lambda} L [(n_o - n_e) + \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E_x'] \quad (5)$$

식(5)에서 자연적인 복굴절현상으로 인한 위상지연 ( $\phi_{int}$ )과 LiNbO<sub>3</sub> 결정에 인가한 전압으로 인해 발생된 위상지연 ( $\phi_{ext}$ )은 식(6.a)와 식(6.b)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\phi_{int} = \frac{2\pi}{\lambda} L (n_o - n_e) \quad (6.a)$$

$$\phi_{ext} = \frac{\pi}{\lambda} L (n_e^2 r_{33} - n_o^2 r_{13}) E_x' \quad (6.b)$$

LiNbO<sub>3</sub> 결정을 통과하여 나오는 두 파의 성분은  $\phi = knL$  이므로 식(2)와 식(4)로부터 식(7)을 얻을 수 있다.

$$E_x' = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \left[ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_o L \left( 1 - \frac{1}{2} n_o^2 r_{13} E_x' \right) \right] \quad (7.a)$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \left[ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e L \left( 1 - \frac{1}{2} n_e^2 r_{33} E_x' \right) \right] \quad (7.b)$$

이다.

그러므로, analyzer를 통과한 레이저광의 전계의 합은

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_x'}{\sqrt{2}} - \frac{E_y}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{E_0}{2} [\cos(\omega t - kz_1) - \cos(\omega t - kz_2)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{단, } z_1 = n_o L \left( 1 - \frac{1}{2} n_o^2 r_{13} E_x' \right)$$

$$z_2 = n_e L \left( 1 - \frac{1}{2} n_e^2 r_{33} E_x' \right)$$

이다. 한편, 레이저광의 irradiance는 주기 ( $T = \frac{2\pi}{\omega}$ )로  $E^2$ 을 평균하여 얻으므로, irradiance  $I$ 는

$$I = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} E^2 dt \quad \text{이므로, analyzer의 입, 출력}$$

irradiance는 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{I_{out}}{I_{in}} &= \frac{1}{2} [1 - \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} L \left( (n_o - n_e) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{2} (r_{33} n_e^2 - r_{13} n_o^2) E_x' \right) \right]] \end{aligned} \quad (9)$$

한편, 자연복굴절 현상으로 인한 위상지연 ( $\phi_{int}$ )을 고려하지 않는다면  $\Gamma$ 는 식(10)으로 주어진다.

$$\Gamma = \phi_{ext} = \frac{\pi}{\lambda} L (n_e^2 r_{33} - n_o^2 r_{13}) E_x' \quad (10)$$

여기서,  $\pi$ 만큼의 위상지연을 일으키게 하는 반파장 전압  $v_\pi = E_x' d$ 를 구해보면,

$$v_\pi = \frac{\lambda}{n_e^2 r_{33} - n_o^2 r_{13}} \frac{d}{L} \quad (11)$$

인데, 본 실험에 사용된 LiNbO<sub>3</sub>의 반파장전압을 계산해 보면,  $\lambda = 632.8nm$ 일 때 약 466 V 이며, 식(9)는 식(12)로

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{2} [1 - \cos \frac{v}{v_\pi} \pi] \quad (12)$$

되어 인가전압에 따른 irradiance의 변화량을 그래프로 나타내보면 그림2의 (a)와 같음을 알수가 있다.

자연적인 복굴절현상을 고려하여 식(9)를 식(6.a)와 식(11)을 이용하여 다시 표현하면

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{2} [1 - \cos (\phi_{int} + \frac{v}{v_\pi} \pi)] \quad (13)$$

으로 되어 인가전압에 따른 irradiance의 변화량을 나타내 보면, 그림2에서와 같이  $\phi_{int}$ 만큼 축이 이동한 효과와 같음을 알수가 있다.

### III. 실험방법 및 결과고찰

LiNbO<sub>3</sub> Pockels 소자를 이용하여 부분방전 신호를 측정하기 위한 전체 시스템 구성도는 그림3과 같다.

광원으로 사용된 He-Ne레이저는 파장이 632.8nm이고, TEM<sub>00</sub>모드 출력은 10mW이고, 선형편광된 레이저광을 출력시킨다. 한편 광검출을 위해 사용된 photo-diode는 Hamamatsu s-2216을 사용 하였으며, spectral response range가 320-1,060nm이며, 암전류가 InA이었다. 또한 외부로부터의 노이즈광을 배제하기 위하여 red filter를 사용하여 레이저광의 파장만을 통과할수 있도록 하였으며, 이 빛을 센서에 전달할수 있도록 집광렌즈를 사용하였다. 노이즈를 배제하고 안정된 실험을 하기 위해 red filter, 집광렌즈 및 photo-diode를 하나의 housing으로 일괄처리 하였다. 그림4는 이 housing의 단면도를 나타낸 그림이다.

측정장치의 광학정렬 및 실험절차는 다음과 같다.

- 1) 선형편광된 레이저광의 편광방향을 편광기(polarizer)를 조정하여 Pockels소자의 z축과 45°로 입사시킨다.
- 2) 광검출기를 빛의 초점이 센서에 감지되도록 설치한 후, 광검출기의 출력단자를 오실로스코프에 연결시킨다.
- 3) 편광기 바로 뒤에 분해기를 두고 분해기를 편광기와 같은 편광 방향으로 조정한 후, irradiance를 측정한다. 이 때의 irradiance가 input irradiance가 된다.
- 4) 분해기를 편광기의 편광방향과 수직으로 조정하여 irradiance가 영이 되도록 한다.
- 5) LiNbO<sub>3</sub> 소자를 편광기와 분해기 사이에 둔다. 이때 transverse mode LiNbO<sub>3</sub> 소자의 자연복굴절로 인해 위상지연이 발생하게 되는데 3)의 input irradiance의 0.5배가 되도록 하여 자연복굴절에 의한 위상지연을 보상한다. 본 실험에 사용된 LiNbO<sub>3</sub> 결정의 길이는 30mm이므로  $\phi_{int}$ 는 식(6.a)로부터 300.37°가 됨을 알 수 있는데 이 값을 (13)식을 이용하여 그래프로 그려보면 그림2의 (b)와 같이 나타난다. 길이 L에 대해 위상지연의 변화는 0.1 $\mu$ m에서도 5.69°의 오차가 발생하는데, LiNbO<sub>3</sub>결정에 빛이 통과할 때 위치에 따라  $\phi_{int}$ 가 상당히 다른 값들을 갖게 된다. 그러므로 그림2에서 선형성이 가장 양호한 부근에서의 곡선을 이용하기 위해  $\phi_{int}$ 가 90°인 그림 2의 (c)를 찾아서 실험하였다. 결국 이 그래프를 이용하여 측정된 irradiance값을 비교, 해석하므로써 인가된 펄스전압을 측정하게 되었다.
- 6) 피측정전압의 두 단자를 Pockels 소자에 광축 방향으로 연결한다.
- 7) 광학정렬을 마친후 신호 발생기로 정현파신호를 발생시켜 실험을 실시하였다. 본 실험에서는  $V_{pp}$ 가 5V, 10V, 30V를 인가전압으로 사용하였으며 이 인가전압과 측정장치에 의한 파형을 비교하였다. 그 결과파형은 그림5와 같다. 각 그림의 하단파형은 LiNbO<sub>3</sub> 소자에

인가되는 전압을 나타낸 것으로서  $\text{LiNbO}_3$  소자에 의해 측정된 상단의 파형과 그 크기와 파형에 있어서 잘 일치함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 설비진단 시스템을 개발하기 위해 레이저 소스,  $\text{LiNbO}_3$  포켈스 셀, 광학렌서 그리고 광학소자를 이용하여 시스템을 구성한 후, 신호발생기를 이용하여 임의의 크기의 정현파를  $\text{LiNbO}_3$  결정에 인가하여 변조된 빔을 측정함으로써 시스템의 응답특성을 관찰하였다. 현재까지의 결과에 의하면 불안정한 레이저 소스 및 전원으로 인해 발생하는 노이즈를 제거할 수만 있다면 완벽한 시스템이 개발될 수 있으리라 기대된다.

#### REFERENCE

1. EUGENE HECHT : OPTICS, Second edition, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY
2. J. WILSON, J. F. B. HAWKES : Optoelectronics An introduction, Second edition, PRENTICE HALL
3. AMNON YARIV : Introduction to optical electronics, Second edition, HOLT, RINEHART AND WINSON
4. A. Gharak and K. Thyagara : Optical Electronics, Cambridge Univ. Press, 1989.
5. 日本電氣學會, 電氣學會 技術報告 II部 第 219號, 1986

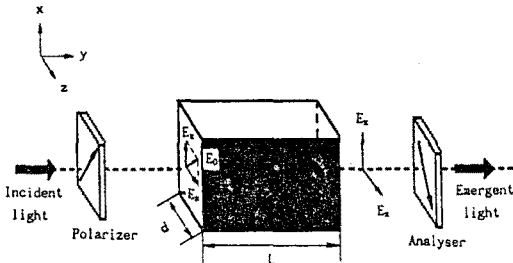
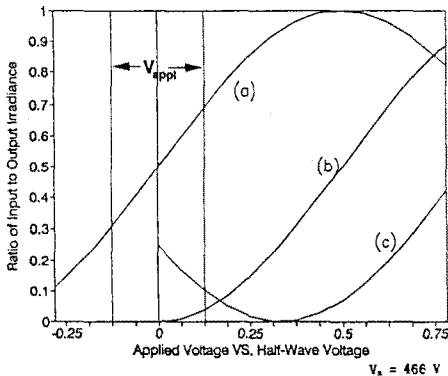


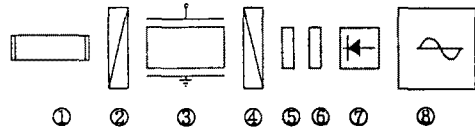
그림 1.  $\text{LiNbO}_3$ 의 전기광학 효과



(a)  $\phi_{int}$ 가  $90^\circ$  일때 (b)  $\phi_{int}$ 가  $0^\circ$  일때

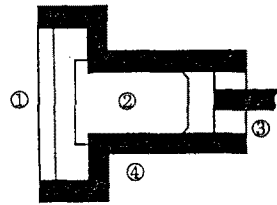
(c)  $\phi_{int}$ 가  $300.37^\circ$  일때

그림 2. 인가전압에 따른 irradiance의 변화추이 곡선



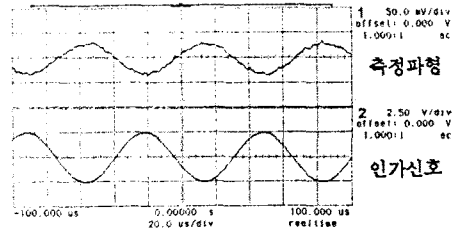
- ① He-Ne Laser
- ② Polarizer
- ③  $\text{LiNbO}_3$  Cell
- ④ Analyser
- ⑤ Red Filter
- ⑥ Focus Lens
- ⑦ Light Sensor
- ⑧ Oscilloscope

그림 3. 전체 시스템 구성도

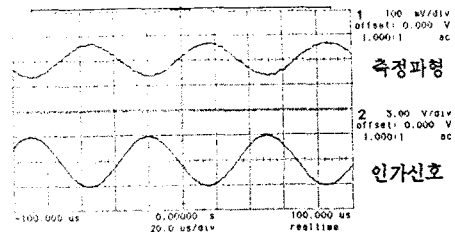


- ① Red Filter
- ② Focus Lens
- ③ Optical Fiber
- ④ Housing

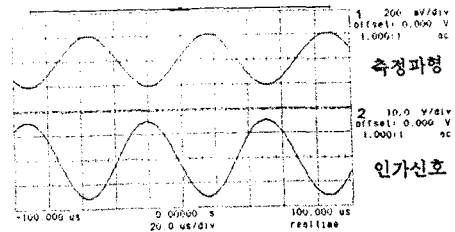
그림 4. 광검출부분을 일괄처리한 housing



(a) 인가신호의 피크치가 5V 일때



(b) 인가신호의 피크치가 10V 일때



(c) 인가신호의 피크치가 30V 일때

그림 5. 150kHz 인가신호에 대한 레이저 변조광의 irradiance 파형