

# KDP Pockels 소자를 이용한 고전압 펄스 측정

조광래\*, 이정현, 장용무, 구자윤, 강형부  
한양대학교 전기공학과

## Measurement of High Voltage Pulse using a KDP Pockels Cell

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

### ABSTRACT

A measuring technique for the fast transient high voltage is under development by use of laser source in order to substitute for the conventional measuring system which could bring about several technical inconveniences.

At this moment, this work is aimed to construct a compact measuring system with the use of Pockels cell and specially designed voltage divider. This system is likely to enable us to measure the lightning impulse voltages at the level of 30kV, 50kV and 70kV. Throughout this work, qualified measuring devices are required to be developed for discriminating different kinds of noise from which the system should be protected.

### I. 서 론

전력소비의 급격한 증가로 인하여 전력계통의 초고전압화, 전력기기의 대용량화가 요구되어 전력기기의 사고진단 및 예방을 위한 필요기술으로써 fast transient voltage의 계측기술 확보가 크게 요구되고 있다. 또한 고전압 공학 및 pulsed-power공학(펄스 대전력 공학)을 발전시키기 위해서는 각종의 새로운 측정기술의 개발이 절대적인 해결문제라고 할 수 있다.

현재 사용되고 있는 기존의 분압기 또는 P.T. (potential transformer)는 측정대상의 전압 및 전류의 크기가 커짐에 따라 측정상의 여러가지 어려운 문제점이 발생되고 있다. 즉, 고조파 공진등의 영향에 의한 측정의 정밀도 저하, 초고압 대용량화로 인한 설치면적 및 비용증대, 전기적 절연문제 그리고 계통의 사고, 고장등으로 발생하는 surge전압과 같은 펄스형태의 전압을 정밀측정 하는데 어려움이 따르는 등이 그것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 측정기술의 개발 및 기술축적이 요구되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 레이저를 이용한 고전압 측정기술은 뇌전압, surge전압등과 같은 펄스 측정능력에 관한 특성이 우수하게 나타나고 있다.

본 연구에서는 레이저를 이용한 고전압 펄스 측정기술을 개발하기 위하여, Pockels효과를 갖는 KDP결정을 이용한 Pockels소자로 고전압 펄스 측정장치를 구성하였고, 이 레이저 voltage divider의 특성을 연구하였다.

### II. 관계 이론

#### KDP의 전기광학 효과

그림1과 같이 KDP결정의  $x'$ - $z'$ 평면에서  $z$ 축(optic axis)에 대해  $45^\circ$ 로 편광된 레이저광을  $y'$ 축 방향으로 입사시켜, 이때  $z$ 축 방향으로 비축경전압을 인가시킨 경우를 생각해보자.

이때 KDP결정에 입사된 레이저광의 전계는

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

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. KDP결정의  $x'$ 축과  $z$ 축방향의 굴절율은 각각

$$n_{x'} = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} E_z' \quad (3.a)$$

$$n_z = n_e \quad (3.b)$$

이다. 단, 여기서  $E_z' (= V_{appl}/d)$ 는 KDP결정에 인가된 전압에 의한 전계이다.

길이가  $L$ 인 KDP결정을 통과한후 레이저광의 각 성분별 전계의 위상변화는 식(4)로 주어진다.

$$\phi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} L = \frac{2\pi}{\lambda} n_o L (1 - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} E_z') \quad (4.a)$$

$$\phi_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_z L = \frac{2\pi}{\lambda} n_e L \quad (4.b)$$

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

$$\Gamma = \phi_{x'} - \phi_z = \frac{2\pi}{\lambda} L [(n_o - n_e) - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} E_z'] \quad (5)$$

식(5)에서 자연적인 복굴절현상으로 인한 위상지연 ( $\phi_{in}$ )과 KDP결정에 인가한 전압으로 인해 발생된 위상지연 ( $\phi_{ex}$ )은 식(6.a)와 식(6.b)로 각각 나타낼 수 있다.

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

$$\phi_{ex} = - \frac{\pi}{\lambda} L (n_o^3 r_{33} E_z') \quad (6.b)$$

KDP결정을 통과하여 나오는 두 파의 성분은  $\phi = kz = kL$ 이므로 식(2)와 식(4)로부터 식(7)을 얻을 수 있다.

$$E_{x'} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_o L (1 - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} E_z')] \quad (7.a)$$

$$E_z = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e L) \quad (7.b)$$

이다. analyzer를 통과한 레이저광의 전계의 합은

$$E = \frac{E_{x'}}{\sqrt{2}} - \frac{E_z}{\sqrt{2}} = \frac{E_0}{2} [\cos(\omega t - k_1) - \cos(\omega t - k_2)] \quad (8)$$

$$\text{단, } k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_o L (1 - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} E_z')$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_o L$$

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

$$I_{in} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} E^2 dt$$

이므로, analyzer의 입출력 irradiance는 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{2} [1 - \cos[\frac{2\pi}{\lambda} L((n_o - n_e) - \frac{1}{2} n_o^3 r_{33} E_s')] ] \quad (9)$$

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

$$\Gamma = \phi_{out} = -\frac{\pi}{\lambda} L(n_o^3 r_{33} E_s') \quad (10)$$

여기서,  $\pi$ 만큼의 위상지연을 일으키게 하는 반파장 전압  $v_s = E_s d$ 를 구해보면

$$v_s = \frac{\lambda}{n_o^3 r_{33}} \frac{d}{L} \quad (11)$$

인데 본 실험에 사용된 KDP의 반파장전압을 계산해보면,  $\lambda = 632.8nm$ 일 때 약 20.2kV이며, 식(9)는 식(12)로

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

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

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

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

### III. 실험방법 및 결과고찰

KDP Pockels 소자를 이용하여 고전압 펄스를 측정하기 위한 전체 시스템 구성도는 그림3과 같다. 그림3에서 측정하고자 하는 고전압 펄스용 용량성 분압기를 이용하여 Pockels 소자의 반파장전압 이하로 분압한후, 분압된 전압을 Pockels 소자에 인가하였다. 편광기(polarizer)를 이용하여 그림1과같이 KDP의 z축에 45°로 편광된 레이저광을 입사시키면, Pockels 소자의 자연복굴절과 인가된 전압으로 인한 Pockels 효과가 발생하여 입사된 레이저광에 편차가 일어나게 된다. 이렇게 변조된 광을 polarizer의 편광면과 직각을 이루는 analyzer에 통과시킨 다음 렌즈를 거쳐 광검출센서로 irradiance를 측정하여, Pockels 소자를 통과하기 전 빔의 input irradiance와 비교 해석하므로써 인가된 전압 펄스를 측정할 수 있었다.

광원으로 사용된 He-Ne레이저는 파장이 632.8nm이고, TEM<sub>00</sub>모드 출력은 10mW이며 편광비가 500:1인 선형편광된 레이저광을 출력시킨다. 그림4는 본 연구를 위해 설계제작된 용량성 분압기로서 고전압측 커패시터의 유전체는 비유전율이 3.7인 polyacetal resin봉을 선반가공 하였다. 또한 커패시터의 고전압전극과 중간전극은 각각 알루미늄과 황동으로 가공하여 용접등으로 인한 이음새가 없는 일체식으로 조립되도록 하여 커패시터의 용량 C가 약 25pF이 되도록 설계하였다. 저전압측 커패시터는 동작전압이 30kV이고 용량 C가 2000pF인 세라믹 커패시터 3개를 직렬로 연결하여 용량을 변화시키도록 하였다. Pockels 소자인 KDP결정은 광투과파장의 범위가 0.2~1.5 $\mu$ m, 고유저항이 10<sup>10</sup>~10<sup>14</sup>  $\Omega$ m 이고 투명성과 가공성이 용이하고, Pockels 효과의 감도계수가 약 30  $\times 10^5$  V<sup>-1</sup>정도로 우수한 KDP결정을 사용하였다. 또한 KDP결정은 transverse mode 전기광학 효과를 일으키기 위해 45° z-cut절단을 하여 레이저광이 투과하는 결정 입출력면의 표면 가공정도를 평형도가 약

$\lambda/20$ 정도로 되게 polishing하였다. 가공된 결정의 크기는 높이  $\times$  폭  $\times$  길이가 23  $\times$  20  $\times$  20 mm의 정육면체이다. 그러나 KDP결정은 대기중의 습기를 흡수하여 용해되는 조해성을 가지므로, 결정의 polishing 가공면을 보호하기 위해 결정에 접촉될 전극을 포함한 housing을 제작하였다. housing은 가공성과 절연성이 우수한 polyacetal로 제작하고 레이저광의 투과창은 BK-7으로 가공된 window를 사용하였다. window는 housing에 epoxy로 고정시키고 housing속의 결정과 공기와의 접촉을 차단하기 위해 결정과 굴절율이 비슷한 propylen carbonate index matching oil을 채워 넣었다. 한편 광검출을 위해 사용된 photo-diode는 Hamamatsu s-2216으로써 spectral response range가 320-1060nm이며, 암전류가 1nA로 암전류의 영향을 거의 받지 않음을 사용하였다. 또한 외부로부터의 노이즈광을 배제하기 위하여 red filter를 사용하여 레이저광의 파장만을 통과할 수 있도록 하였으며, 이 빛을 한점으로 모아 센서에 전달할 수 있도록 집광렌즈를 사용하였다. 노이즈를 배제하고 안정된 실험을 하기 위해 red filter, 집광렌즈 및 photo-diode를 하나의 housing으로 일괄처리 하였다. 그림5는 이 housing의 단면도를 나타낸 그림이다.

측정하고자 하는 펄스전압이 인가되지 않은 상태에서 측정장치의 광학정렬 및 실험준비를 다음과 같이 한다.

1) 선형편광된 레이저광의 편광방향을 편광기(polarizer)를 조정하여 Pockels 소자의 x'z'평면에서 z'축과 45°로 입사시킨다.

2) 그림5의 광검출기를 편광기에서 나오는 빛의 축점이 정확히 센서에 감지되도록 설치한 후, 광검출기의 출력단자를 오실로스코프에 연결하고 photo-diode회로를 구동 시킨다.

3) KDP 소자가 없는 상태에서 편광기(polarizer) 바로 뒤에 analyzer를 두고 analyzer를 조정하여 편광기와 같은 편광방향을 설정한 다음 이 상태에서 irradiance를 측정하여 기록한다. 바로 이 때의 irradiance가 input irradiance이다.

4) 이번에는 analyzer를 편광기(polarizer)의 편광방향과 수직을 이루도록 조정하여 irradiance가 영이 되도록 한다.

5) 이제 KDP 소자를 polarizer와 analyzer 사이에 둔다. 이때 transverse mode KDP 소자의 자연복굴절로 인해 위상지연이 발생하게 되는데 선형성이 양호한 부근에서 실험이 이루어질 수 있도록 3)의 input irradiance의 0.308배가 되도록 하여 자연복굴절에 의한 위상지연을 보상한다. 본 실험에 사용된 KDP결정의 길이는 20mm이므로  $\phi_{in}$ 는 식(6.a)로부터 111.28°가 됨을 알 수 있는데 이 값을 식(13)식에 대입하여 그래프를 그려보면 그림2의 (b)와 같이 나타난다. 식(14)로부터 길이 L에 대해 위상지연의 변화는 0.1 $\mu$ m에서도 2.43°의 오차가 발생함을 계산으로부터 알수가 있다. 결국 KDP결정에 빛을 통과시킬때 그 빛이 통과하는 위치에 따라  $\phi_{in}$ 가 상당히 다른 값을 갖게 된다. 그러므로 이런 효과를 이용하여 그림2에서 선형성이 가장 양호한 부근에서의 곡선을 이용하자면  $\phi_{in}$ 가 67.4°인 위치를 찾아서 실험을 하면 되는데,  $\phi_{in}$ 가 67.4°일때의 irradiance 관계 그래프를 그려보면 그림2의 (c)와 같으며, 결국 이 그래프를 가지고 측정된 irradiance값을 비교, 해석하므로써 인가된 펄스전압을 측정하게 되는 것이다.

6) 이제 피측정전압의 두 단자를 Pockels 소자에 광축 방향으로 연결한다.

이상과 같이 측정장치의 광학정렬을 마친후 HAEFLEY 고전압 발생장치(Multi Test Set)를 이용하여 고전압펄스를 발생시켜 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 펄스의 파우징과 파미장이 각각 1.2 $\mu$ s와 50 $\mu$ s인 뇌임펄스를 인가전압으로 사용하였으며 레이저 voltage divider에 의해 측정된 전압파형과 Multi Test Set에 장착된 측정장치에 의한 파형을 비교하였다.

인가한 뇌임펄스 전압의 크기를 30kV, 50kV, 70kV로 하였을 때 그 결과파형은 그림6과 같다. 각 그림의 상단 파형은 Pockels 소자에 인가되는 전압을 tektronix P6015 probe를 이용하여 측정한 것으로서 KDP 소자에 의해 측정된 하단의 파형과 잘 일치함을 알 수 있다.

Pockel 소자에 직접 인가되는 전압은 비선형 결정의 반파

장 전압에 의해 제한될 뿐 아니라 반파장 전압에서도 측정의 선형성을 고려하면 측정가능한 전압의 범위는 좁아진다. 따라서 100kV 이상의 고전압 펄스를 측정하기 위해서는 1차 분압기만을 수정설계한 후 KDP 소자를 적용하면 된다. 본 연구에서는 비선형 결정의 Pockels 효과의 감도계수에 비중을 두어 KDP 결정을 선택 했으나 KDP 결정의 조해성으로 인해 공기 중에서 취급이 용이하지 않으므로 보완이 있어야 할 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 기존의 Potential Transformer( P.T.)가 갖는 전기절연문제, 측정파형의 왜곡, 전자파장으로 인한 잡음 등 여러가지 결함을 배제할 수 있는 레이저 voltage divider 장치를 설계 구성하여 임펄스형 고전압을 측정하였다. 현재까지의 측정결과에 의하면 Pockels 소자의 온도특성이나 광검출회로에서 기인되는 측정오차의 요인을 제거할 수 있는 device 개발이 우선적으로 해결되어야 함을 알 수 있다.

#### 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. Thyagarajan : 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

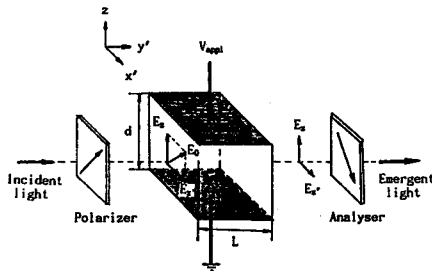


그림 1. KDP의 전기광학 효과

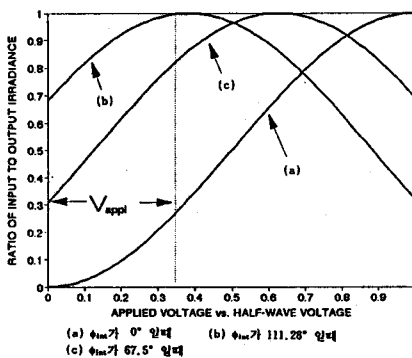


그림 2. 인가전압에 따른 irradiance의 변화추이 곡선

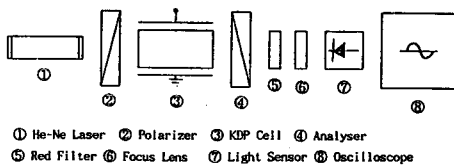


그림 3. 전체 시스템 구성도

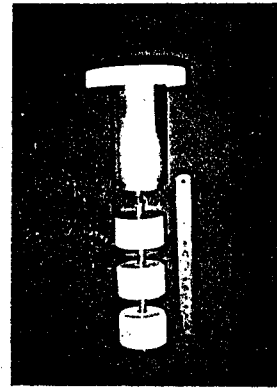
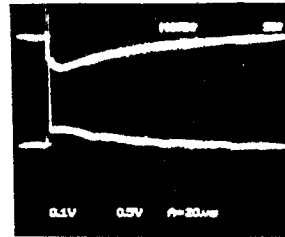


그림 4. 용량성 분압기

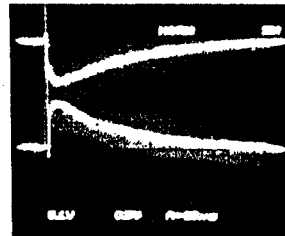


- ① Red Filter ② Focus Lens ③ Photo-Diode 소켓
- ④ Housing ⑤ Photo-Diode

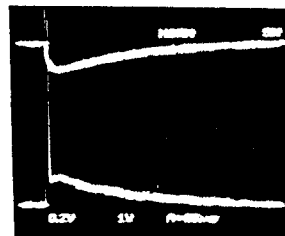
그림 5. 광검출부분을 일괄처리한 housing



(a) 인가전압이 30kV일때



(b) 인가전압이 50kV일때



(c) 인가전압이 70kV일때

그림 6. 각 인가전압에 대한 irradiance의 결과 파형