

레이저를 이용한 펄스형 고전압 및 대전류 측정

이윤석·장용무·김정태·구자윤·강형부
한양대학교 전기공학과 전기재료 및 고전압 공학 연구실

Measurement of High Voltage and Large Current Pulse
Using Laser System

Yoon-Seok Lee^a, Yong-Moo Chang, Jung-Tae Kim, Ja-Yoon Koo, Hyung-Boo Kang
HANYANG UNIVERSITY DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT

The waveforms of high voltage and current pulse were measured using laser measuring systems. Existing potential transformer and current transformer have low measuring precision because of resonance phenomena and waveform distortion due to the magnetic saturation. But using laser measurement, it is possible to obtain clear waveforms which have no effect of distortion and harmonic resonances. And electromagnetic interferences (EMI) in the measuring of high voltage and current pulse, but the optical measuring systems are not subject to the influence of EMI. Using laser measuring systems based upon Pockels effect and Faraday effect is not free from any errors yet, but it could replace existing measuring systems by routine experiments and error corrections. And it needs that more research and development of optical crystals and equipments would be taken.

1. 서론

고전압 및 대전류 측정에 주로 사용되어온 기존의 PT 및 CT에 의한 전기적인 측정 방법은 고조파 공진 및 철심의 자기 포화에 의한 파형의 왜곡으로 인해 측정 방법상 피할 수 없는 절대적인 오차가 포함된 상태에서 이용되어 왔다. 또한 고전압으로 인한 측정 장비와 측정 대상의 절연 문제와 전기적인 직접 측정 방법의 한계로 인해 장비의 규모는 점점 커지고 있는 실정이다. 특히 펄스형 고전압 및 대전류를 발생시킬 때 야기되는 전자기파 장애 (Electromagnetic interference : EMI)는 전기적인 측정 방법의 정밀도를 감소시키므로 현재 pulsed power 공학의 중요성이 커지고 있는 시점에서 초고속 과도현상 신호(high fast transient signal)의 정밀 측정이 어려워 pulsed power 공학에 관한 연구의 난점이 되고 있다. 그러므로 전기적인 절연성이

매우 우수하며 전자기적 간섭을 받지 않는 광학적 측정 방법의 중요성이 점차 강조되고 있다.

레이저를 이용한 광학적 측정 방법은 레이저 광의 전자기파적 성질을 이용하는 것으로서 전압 측정의 경우와 전류 측정의 경우는 서로 방법상의 차이가 있다. 전자의 경우에는 광원과 감지부 사이에 전압에 의해 광변조를 가지는 비선형 광학 소자(Pockels cell)가 위치하게 된다. 소자에 인가된 전압에 따라 상광선과 이상광선에 대한 굴절율의 변화에 의해 레이저 광의 위상차가 발생하는 Pockels 효과를 이용하여 전압을 측정하고, 후자의 경우에는 비선형 광학 소자에 인가된 자계에 비례하여 선형 편광된 입사광의 편광면이 회전되는 Faraday 효과를 갖는 Faraday 소자를 사용하여 대전류 펄스에서 발생하는 자장을 측정함으로써 전류 측정이 가능하게 된다.

본 연구에서는 비선형 광학 소자인 KDP (KH_2PO_4) 결정을 Pockels cell로서 이용하고, Faraday 소자로서는 광섬유 그 자체가 지니는 비선형 광학 효과에 의해 Faraday 효과가 발생되므로 단일 모드 및 편광유지 단일 모드 광섬유를 이용하여 고전압 및 대전류 측정에서 각종 파라미터들을 측정하였다. 레이저에 의한 광학적인 측정 방법의 단점인 진동에 의한 오차와 광학 소자의 열에 의한 소자의 특성변화는 아직 개선되어야 할점이 많으나, 실험실적 조건에서 행해지고 있는 pulsed power 공학에서의 펄스형 고전압 및 대전류의 측정에는 이 레이저 측정 방법을 적용시키기 어렵지 않으며 보다 많은 실험을 통해 오차의 원인을 규명하고 측정에 사용되는 양질의 광학 능동소자의 개발이 요구된다.

2. 실험 장치의 구성

레이저 측정 장치의 구성은 크게 세부분으로 나뉘는데 먼저 광원과 광변조 부분 그리고 변조된 광을 감지하는 광 감지부로 나뉘며 광학적 측정 방법의 개략도를 그림 1.에

나타내었다.

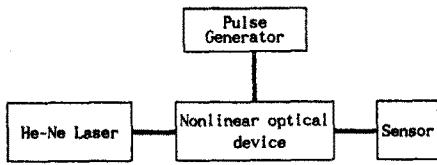


그림 1. 레이저 측정 방법의 개요
Fig 1. Block diagram of laser measurement system

전압측정의 경우 광변조기에 Pokels 결정으로서 KDP (KH₂PO₄) 결정을 사용하고 전류 측정의 경우 단일 모드 광섬유 (single mode fiber) 또는 편광 유지 광섬유 (PMF: polarization maintaining single mode fiber)를 사용한다.

펄스 발생 장치는 100kV, 1μF의 capacitor bank, spark gap switch, trigger generator, load(single turn coil)로 구성되어 있으며, 그림 2.에 장치 전경을 나타 내었다.

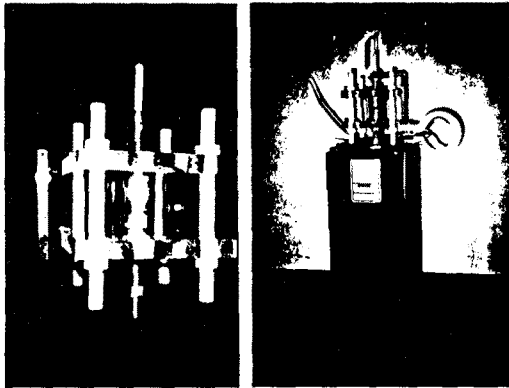


그림 2. 펄스 발생장치의 전경
Fig 2. Pulse generator

여기서 가압 spark gap switch는 자체적으로 설계 제작 하였으며, spark trigger 및 laser trigger를 모두 가능케 하였고, 전극은 황동으로 선반 가공하여 제작 하였다. 그림 3.은 레이저 PT, CT를 위한 실험 장치회로의 개략도이다.

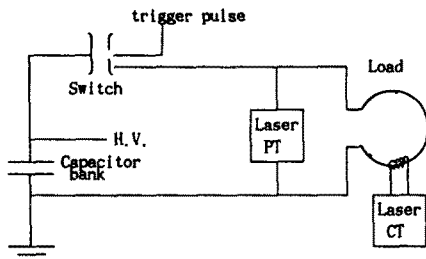
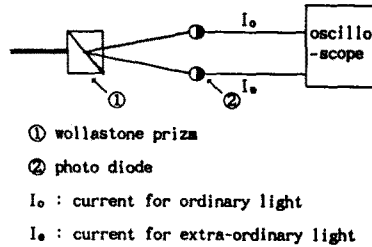


그림 3. 실험 장치 개략도

장원으로는 파장이 632.8nm, 출력이 7mW인 Meles-Griot 사의 He-Ne Laser를 이용했는데 이 레이저는 발전후에 양질의 선형 편광을 출력시킨다.

광검출부의 구성은 선형 편광의 상태를 분석할 수 있도록 구성되어 있는데 입사된 빛을 상광선과 이상광선으로 분해하여 20° 각도로 분리시켜 출력시키는 Wollstone prizm 을 사용한다. 또한 분리된 두광선의 세기를 감지할 수 있는 포토 다이오드를 설치한다. 이 광검지부를 간략하게 나타 내면 그림 4.와 같다.



① wollstone prizm
② photo diode
I_o : current for ordinary light
I_e : current for extra-ordinary light

그림 4. 광 검출부의 구성
Fig 4. Optical sensor

3. 실험 방법 및 결과

레이저를 이용한 전압 측정 장치의 개략도는 그림 5. 와 같다. 전기광학 효과는 전계가 일정한 방향으로 가해진 비선형 결정을 레이저 광이 통과할 때 결정의 비선형성에 의해 레이저광의 위상이 변화되는 현상으로서 위상의 변화량을 측정함으로써 결정에 인가된 전압의 크기를 알 수 있다.

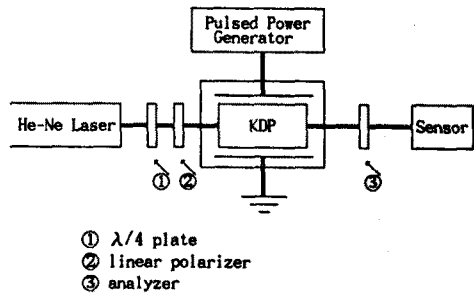


그림 5. 광학적 전압 측정 장치의 구성도
Fig 5. Optical voltage measurement system

빛은 전자기파로서 vector 적인 해석이 가능하다. 선형 편광된 빛을 나타낼 때 진행 방향에 수직인 직각 좌표 평면을 적용하여 각 좌표축에 대한 정사영으로 분해할 수 있을 뿐 아니라, 각 좌표축으로 분해된 빛의 합으로 나타낼 수도 있다.

즉, 직각좌표계에서 z방향으로 진행되는 선형 편광된

빛은 분해할 경우 x 축과 y 축의 특정한 값을 가지며 x 축과 y 축 방향으로의 진행속도가 달라 두 축의 위상이 변화될 경우 출력되는 빛은 타원 편광될 뿐만 아니라 두 축에 대한 정사영의 값도 다르게 된다. 이렇게 x 축과 y 축의 진행 방향에 대한 굴절률이 틀려져서 각 축방향의 빛의 진행속도가 틀려지는 경우에 이 효과를 가지게 한 원인이 전기적일 경우 이를 전기 광학 효과라 하며 이러한 광학 효과를 갖는 소자를 전기광학 소자라 한다. 전기 광학 효과는 인가된 전계의 1차에 비례하는 Pockels 효과와 전계의 2차에 비례하는 Kerr 효과가 있는데 2차 전기 광학 효과는 1차 전기 광학 효과가 존재하는 경우에는 무시할 수 있다.

본 실험에 사용된 KDP(KH₂PO₄)의 Pockels 효과는 다음과 같은 행렬식으로 표시된다.

$$[\delta_i] = [\gamma_{ij}] [E] \dots\dots\dots (1)$$

$$[\delta_i] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \dots\dots (2)$$

여기서 $[\gamma_{ij}]$ 는 Pockels 상수 행렬이며 E_1, E_2, E_3 는 결정의 광축과 이에 수직인 두 방향 즉, E_x, E_y, E_z 방향의 전계를 의미한다. KDP 결정은 42 m 군에 속하는 V₄형 결정으로서 He-Ne Laser 파장인 632.8 nm에서, KDP 결정의 특성은 Pockels 상수가 $\gamma_{41} = 8.6 \times 10^{-10}$ cm/V이며 $\gamma_{63} = -10.5 \times 10^{-10}$ cm/V이다. 또한 KDP 결정의 반파장 전압은 z-cut의 경우와 45° z-cut의 경우가 다른데 45° z-cut의 경우 반파장 전압이 결정의 길이와 두께 z-방향으로의 E에 관한 함수이므로 결정의 모양에 따라 달라진다.

45° z-cut의 반파장 전압 (V_{π})은

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{\gamma_{63} n_o^3} \cdot \frac{l}{d} \dots\dots\dots (3)$$

로 표현되는데 본 실험에 사용된 KDP는 $l = 4$ cm이며 $d = 2$ cm 이므로 V_{π} 는 약 35 kV가 된다.

광학에서 편광 상태를 해석하기 위한 수학적 모델로서 Jones vector가 있는데 이를 이용하여 전기광학 효과를 표시할 수 있다. 이러한 Jones vector는 물리적 공간에서의 의미는 지니지 않으며 다만 편광 해석에서 수학적 편의를 위해 사용하는 것으로서 여러 광학 소자마다 각기 다른 행렬 값을 갖는다. Pockels 소자는 광학 소자 중에서 위상자 (phase retarder)의 역할을 하므로 그 Jones 행렬은 x 방향 진상인 경우 다음과 같다.

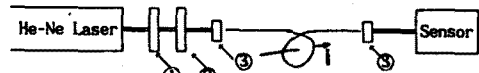
$$J_{\text{pockels}} = \begin{pmatrix} \exp(j \cdot \phi/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j \cdot \phi/2) \end{pmatrix} \dots\dots (4)$$

여기서 $\phi = \pi \cdot (V/V_{\pi})$ 이고 V_{π} 는 식 (3)에 나타났다. 그러므로 이 식 (4)를 이용하여 그림 5.와 같은 구성에 대한 전기광학 효과를 표시하면 식 (5)와 같다. 여기에 표현된 전기광학 효과는 x 축과 45° 방향의 광을 통과시키는 검광자(일종의 편광자)를 이용할 경우, 검광자에 평행한 광파를 E_1 , 수직인 광파를 E_2 로 표시했다.

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} J_{\text{Pockels}} \begin{pmatrix} E/\sqrt{2} \\ E/\sqrt{2} \end{pmatrix} \dots\dots (5)$$

검 광 자
Pockels
선형
x 축과 45° 인
소 자
편광
광을 통과

전류 측정 장치의 개략도를 그림 6.에 나타내었다. 전류 측정 장치의 기본 원리는 자기광학 효과이며 이는 선형 편광된 빛이 자체가 인가된 비선형 매질을 통과할 때 자계의 영향에 의해서 편광의 진동면이 회전하는 현상을 의미하며 Faraday에 의하여 발견된 Faraday 회전은 자계의 1승에 비례하므로 전류에 의해 발생된 자계 측정이 용이하여 전류측정에 널리 이용된다.



- ① λ/4 plate
- ② linear polarizer
- ③ objective lens & fiber chuck

그림 6. 광학적 전류 측정 장치의 구성
Fig 6. Optical current measurement system

선형 편광된 레이저광이 측정하고자하는 전류에 의해서 발생된 자계내의 비선형매질에 자계와 평행하게 진행될 때 인가된 자계에 비례하여 편광면이 회전하게 되는데 이때 회전각 θ 는 식 (6)으로 나타 낼 수 있다.

$$\theta = V \cdot H \cdot L \dots\dots\dots (6)$$

여기서 V는 비선형 매질의 Verdet 상수이며 각 매질에 따라 다른 값을 가지게 된다. 또 H는 인가된 피측정 전류에 의한 자계의 세기이고 L은 자계의 영향을 받는 비선형 매질의 길이 즉, 자계의 영향을 받는 비선형 매질 내에서의 광로를 나타낸다.

본 실험에서 사용되는 비선형 매질인 Faraday 소자는 광섬유를 이용하고, 피측정 전류는 펄스 발생장치의 단진 코일에 흐르는 펄스 전류이다. 그리고 전류의 변화에 의해 발생하는 자계의 변화를 자기광학 효과인 Faraday rotation을 이용해 검출해 내는것이다. 비선형 매질로서의 광섬유는 단일 모드 광섬유 (single mode optical fiber)와 편광 유지 광섬유 (polarization maintaining single mode optical fiber)를 바꾸어 가며 실험을 해 보았다.

광섬유는 그 자체의 불균질에 의해 입사된 편광면의

편광각이 유지되어 나오지는 않는다. 그러므로 측정의 편리함과 신뢰도를 높이기 위해 고유 복굴절에 대한 보정을 해주게 되는데 이 방법은 광 감지부에서 상광선과 이상광선의 각각의 세기를 감지하는 두개의 photo diode의 출력이 같은 상태로 즉, 초기 출력 편광각을 45° 로 해두면 자계의 영향을 받아 편광면이 회전하는 각에 따라 두개의 photo diode의 상대적인 출력 변화를 계산하여 실제 인가된 자계를 구할 수 있고, 구해진 자계로부터 전류 값을 계산할 수 있다.

100kV까지 가변되는 직류전원으로 capacitor bank에 충전한 후 스위치에 trigger를 인가해 coil에 펄스가 발생하도록 구성되어 있으나 실험을 위해 10~30kV 정도의 충전전압을 사용하였다. 이때 발생하는 coil 양단전압을 Pockels 효과를 이용한 laser PT로, 또 coil에 흐르는 수십 kA이상의 펄스 대전류를 Faraday rotation을 이용한 laser CT로 측정하였으며 P6015 Tektronix 고압 probe 및 Rogowski coil에 의해 측정된 값과 비교하였다. 또 AC 전압 측정은 neon 변압기를 사용하였으며, 변압기의 입력은 slidac으로 0~100 V까지 가변 시켜 발생하는 0~15 kV의 변압기 출력을 측정하였다.

REFERENCES

1. Robert E. Hebner, Richard A. Malewski, E.C. Cassidy "Optical Methods of Electrical Measurement at High Voltage Levels", Proc. IEEE, Vol. 65 No.11 1977
2. A. J. Rogers, "Optical technique for measurement of current at high voltage", Proc. IEE. Vol.120, No.2, February 1973.
3. E.C. Cassidy, H.N. Cones, S.R. Booker "Development and Evaluation of Electrooptical High-Voltage Pulse Measurement Techniques", IEEE, Trans. Instrum. Meas. Vol.IM-19, No. 4 November 1970
4. Kunihiko Hidaka, Hiroyuki Fujita "A new method of electric field measurements in corona discharge using Pockels device" J.Appl.Phys.53(9) September 1982
5. Amnon Yariv "Introduction to Optical Electronics" Holt, Rinehart and Winston 1976
6. G. I. Chandler and F. C. Jahoda "Current measurement by Faraday rotation in single-mode optical fibers", Rev. Sci. Instrum. 56(5), May 1985
7. A. M. Smith "Polarization and magneto optic properties of single mode optical fiber", Applied Optics, Vol. 17, No 1, January 1978