

고주파 전압 측정용 광섬유 센서 구현

박해수*, 오상기*, 김요희*, 이한철*, 노종대*, 김영수**
 *한국전기연구소, **초당대학교

An Implementation of Fiber-Optic Sensor for High Frequency Voltage Measurements

Haesoo Park*, Sangki Oh*, Yohee Kim*, Hanchul Lee*, Jongdae Roh*, Youngsoo Kim**
 *KERI, **Chodang University

Abstract - In this paper, a fiber-optic voltage sensor for measurement of impulse voltage is implemented. A BSO single crystal is used as a Pockels cell. A new signal processing technique is adopted not only to avoid the influences of external perturbations of transmitting optical fiber, but to improve the frequency response characteristics of the optical voltage sensor. Experimental results show that proposed sensor has maximum $\pm 2.5\%$ error rate, and has good frequency response.

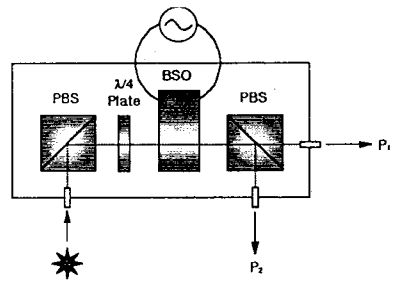
는 현상을 포켈스 효과라 하며 인가 전계의 세기에 따라 발생하는 위상차($\varphi = \pi V/V_x$)는 소자마다 고유의 값을 갖는 반파장 전압(V_x)에 의하여 결정된다. 반파장 전압이 크면 일정한 전계를 인가했을 때 위상차가 적게 발생함을 의미하므로 감도 높은 측정을 위해서는 반파장이 적은 소자를 사용하고 피측정 전압이 높을 경우에는 반파장 전압이 큰 소자를 사용해야 한다.

〈그림 1〉은 광섬유 전압 센서의 구성을 나타낸다. 반도체 레이저로부터 출사된 랜덤광이 로드 렌즈를 통하여 선형 편광자(PBS)를 통과한다. 이 선형 편광은 $\lambda/4$ 판을 통과하게 되며 외부에서 피측정 전계가 인가되지 않았을 때 원편광이 되도록 바이어스를 걸어주는 기능을 한다.

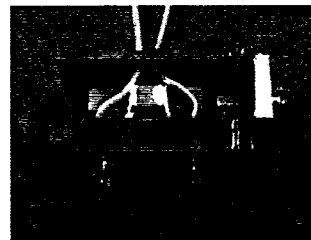
1. 서 론

낙뢰와 같은 임펄스 써지는 상승 및 지속 시간이 매우 짧아 전기전자 설비에 침입했을 경우 전기 설비의 오동작 및 고가의 측정 설비 파손을 유발한다. 따라서 전력 시스템의 절연 설계나 뇌써지에 견딜 수 있는 시스템을 설계하기 위해서는 임펄스 전류와 전압 파형을 신속 정확하게 측정 분석하여 뇌써지와 유사한 환경하에서 각종 신뢰성 시험이 이루어져야 한다.

현재, 임펄스 측정에 이용되는 센서로는 동축 원통형 분류기, 고주파 변류기, 로고스키 코일 및 픽업 코일 등이 있다. 이러한 센서는 전자파 간섭(EMI: Electro-Magnetic Interference) 및 전자유도의 영향 때문에 측정정도가 낮아 널리 활용되지 못하고 있다. 광섬유 센서는 이와 같은 환경에 적용할 수 있는 최적의 센서로 평가받고 있다. 광섬유 센서는 센서가 위치하는 부근에 능동 소자인 전원 회로 및 전기계 센서를 사용하지 않기 때문에 폭발이나 스파크의 위험이 없다. 전송매체로 광섬유를 사용하므로 센서부와 측정부 사이에 광신호만 송수신되어 전자파 간섭의 영향을 받지 않는다. 또한 센서 구성이 간단하고 기존 방식에 비하여 측정정도가 높으며 주파수 대역폭도 넓은 장점을 갖는다. 본 논문에서는 포켈스 효과소자를 이용하여 임펄스 전압 측정용 광섬유 센서를 제안한다. 센서부는 온도특성이 우수한 BSO를 사용하여 구현한다. 센서부에 광을 전송하기 위한 전기/광신호 변환부와 수신된 광신호를 전기 신호로 변환해주는 광/전기신호 변환부를 설계한다. 광섬유 접동의 영향을 받지 않고 임펄스 전류측정에 적합한 새로운 신호처리 회로를 구현하고 시스템의 선형성 및 주파수 응답특성을 조사한다.



〈그림 1〉 광섬유 전압 센서의 구성



〈그림 2〉 제작된 광섬유 전압 센서

2. 본 론

원형 편광된 빛을 포켈스 효과소자에 인가하고 광의 진행 방향으로 전계를 가하면 인가 전계의 세기에 비례하여 광의 직교성분에 굴절률의 변화가 생긴다. 따라서 투과광에 위상차가 발생하게 되어 출력광의 형태는 타원 편광이 된다. 굴절률의 변화가 인가전계의 1승에 비례하

이후에 광섬유 전압 센서인 BSO(포켈스 소자)를 통과하고 검광자(PBS)를 경유하여 수광소자로 전달된다. 수광소자는 광신호를 전기신호로 변환해주는 기능을 하기 때문에 전기신호로 변환된 후 신호처리 과정을 거쳐 임펄스 전압 측정이 이루어진다. 일반적으로 외부에서 인가한 전계의 세기에 의한 상광선과 이상광선의 위상차는 $\varphi = \frac{\pi V}{V_x}$ 로 표현할 수 있다. 여기서 V 는 포켈스 소자에 인가된 전압을, V_x 는 포켈스 소자의 반파장 전압

으로서 $V_x = \frac{\lambda_0}{2n_0^3\gamma_{41}}$ 의 관계를 갖는다. 여기서 λ_0 는 투

과광의 파장, n_0 는 포켈스자의 상광선 굴절률, γ_{41} 은 포켈스 소자의 전기광학 계수를 나타낸다. 위의 관계로부터 반파장 전압이 작으면 같은 피측정 전압에 대한 상대적인 위상차가 크기 때문에 출력의 변화가 크게 되어 높은 감도로 전압 측정이 가능하다. 그러나 피측정 전압이 큰 경우에는 낮은 반파장 전압을 갖는 소자의 선택이 필요하다. 포켈스 소자는 외부 인가 전계의 세기에 비례하여 상광선과 이상광선 사이에 위상차가 생기게 하는 위상자의 기능을 갖고 있으므로 입력광을 E_0 로 했을 때 투과광의 출력을 검광자에 평행한 성분 E_{\parallel} 으로 하여 Jones 행렬을 이용하여 전개하면 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_{\parallel} \\ E_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{2}} \\ \frac{E_0}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

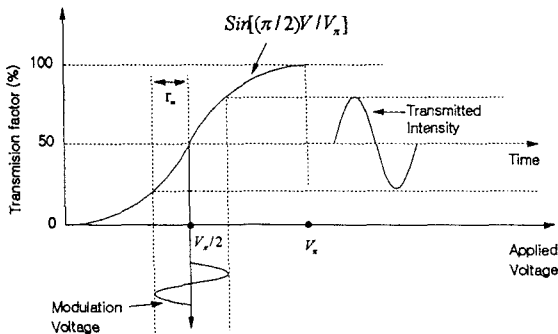
여기서, E_{\parallel} 은 검광자에 평행한 광파의 전체성분을, E_0 는 입력광의 전체성분을 나타낸다. 검광자에 평행한 광파의 성분 E_{\parallel} 을 구하면 식(2)와 같이 된다.

$$E_{\parallel} = E_0 \cos\left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2)$$

한편 광의 강도는 전체 성분의 자승으로 표시할 수 있으므로 검광자를 통과한 후에 광의 입출력 관계 변조식은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T = \frac{\text{출력광강도}}{\text{입력광강도}} = \frac{E_{\parallel}^2}{E_0^2} = \cos^2\left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2}(1 + \sin\varphi) = \frac{1}{2}[1 + \sin(\pi \frac{V}{V_x})] \quad (3)$$

식(3)에서 위상차 $\varphi(\pi V/V_x)$ 가 아주 작은 범위에서는 $\sin\varphi \approx \varphi$ 와 같이 근사적으로 표현할 수 있다. 따라서 입력 광파위를 P_0 라 하고 출력 광파위를 P 라 할 때 입출력 관계식은 $P = P_0(1 + m)$ 이고 $m = \varphi = \frac{\pi V}{V_x}$ 의 관계가 있다. 한편 신호처리 회로를 이용하여 AC 성분인 m 값을 구함으로써 피측정 전압(V)을 측정할 수 있다.



〈그림 3〉 인가전압에 기인한 위상차 변화에 따른 입출력 특성

〈그림 3〉은 상광선과 이상광선 사이에 90도의 위상차를 갖는 광학 바이어스점에 있을 때 인가 전압에 의한 위상차 변화에 기인한 출력 광강도(P)의 변화를 도시한 것이다. 위상차의 변화가 적은 선형 영역에서 광강도 변화가 이루어지도록 설계함으로써 고정도 계측 시스템 구성이 가능하게 된다.

대표적인 포켈스 효과소자의 특성을 〈도표 1〉에 나타낸다.

〈도표 1〉 대표적인 포켈스 소자의 특성

항목 소자	정 균	위상차(Γ)	반파장 전압(V_x)
KDP ADP	42m	$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} V_z$	$V_x = \frac{\lambda}{2r_{63}n_0^3}$ KDP $\approx 8.7kV$ ADP $\approx 10.1kV$
LiNbO ₃	3m	$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{22} V_z$	$V_x = \frac{\lambda}{2r_{22}n_0^3}$ ($\approx 7.8kV$)
BSO	23	$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} V_z$	$V_x = \frac{\lambda}{2r_{41}n_0^3}$ ($\approx 6.8kV$)

본 논문에서는 출력광 성분을 두개 검출하고 신호처리함으로써 고주파 응답 특성을 개선하였다. 기존 단일빔 검광방식에서는 AC성분과 DC성분을 분리하기 위하여 저역필터와 고역필터를 설계하여 구현하였다. 이 방식에서는 신호처리에 있어서 필터를 통과할 때 시간 지연이 발생하여 고주파 임펄스 전류의 파형을 정확히 측정하는데 어려움이 많았다. 따라서 검광자의 두 출력성분을 구하고 두 출력 성분의 합과 차를 구한 후 나누기를 함으로써 필터 방식에 비하여 빠른 응답 특성을 갖도록 하였다. 여기서 두 광출력 성분을 각각 P_1, P_2 라 하면 P_1, P_2 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = \frac{1}{2} P_0(1 + m) \quad (4a)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} P_0(1 - m) \quad (4b)$$

여기서 관심 사항은 순수한 m 값만을 검출하여 피측정 전압을 구하는 것이다. 따라서 출력광 성분 P_1, P_2 의 합과 차를 구한 후 그 결과를 나누어주면 아래식과 같이 순수하게 m 값만을 구할 수 있다.

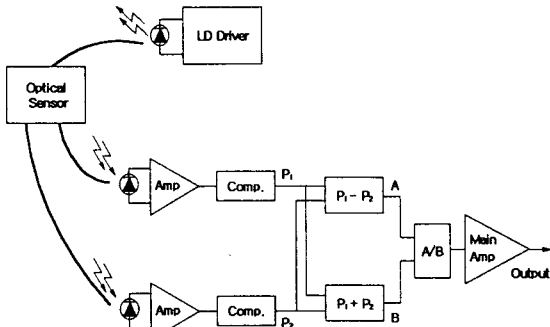
$$m = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad (5)$$

이 값이 AC성분으로써 필터 방식으로 구현할 경우 필터 통과시 발생하는 신호의 지연 때문에 고주파 전류 측정에 사용되지 못하고 상용 주파수 전류 측정용으로만 사용되었다. 본 논문에서 제안한 방식을 적용함으로써 광전압 센서를 이용한 임펄스 고주파 전압 측정이 가능하게 되었다. 또한 입력광파위에 무관하게 AC성분을 검출할 수 있어 광섬유 접동의 영향을 배제할 수 있다.

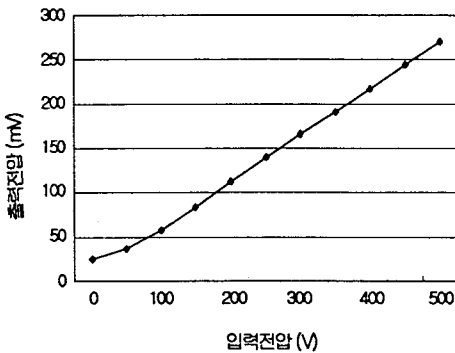
상용주파수 전압 측정 실험을 위해 〈그림 4〉에서와 같이 계측 시스템을 구성하였다. 광섬유 전류 센서용 도

체에 부착하고 송수광부를 측정실에 배치하였다. 송수광부와 센서부는 광섬유 코드로 연결하였다. E/O 변환기에서 출사되는 광이 센서부를 거쳐 다시 광섬유를 통해 수광소자에 도달하여 O/E 변환되고 신호처리 회로에 의하여 피측정 전류를 측정한다. 여기서 수광용 광섬유가 두가닥인데 이유는 검광자에서 출력되는 두 변조신호의 출력(P_1 , P_2)을 각각 수신하기 위해서이다. 센서부에는 피측정 전압이 0 볼트 일때 출력광의 강도가 입력 광 강도의 1/2이 되도록 하기 위하여 $\frac{1}{4}$ 판을 두고 원편광이 되도록 광학 바이어스점을 설정하였다. 이것은 직선성이 가장 좋은 영역을 이용하기 위해서이다.

상용 주파수 전압을 0 볼트에서 500 볼트까지 변화해가면서 출력 광파위의 변화를 측정하였다. 그 결과를 <그림 5>에 나타내었다. 측정 시스템의 최대 측정오차가 $\pm 2.5\%$ 로 설계 시스템이 양호한 선형 특성을 가짐을 확인하였다.

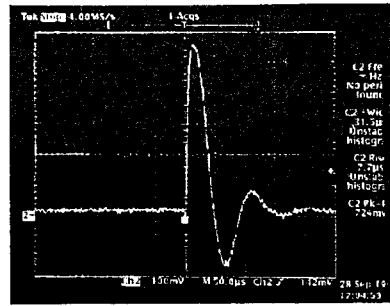


<그림 4> 비정현성 고주파 전압 측정 시스템 구성도

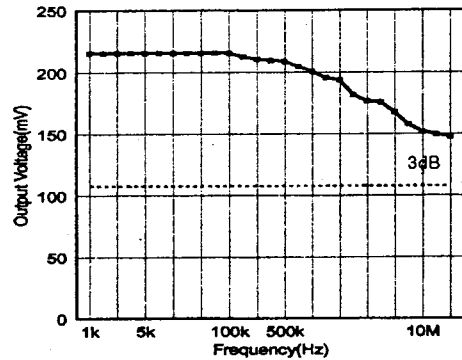


<그림 5> 광전압 센서의 입출력 특성

한편 설계한 광섬유 전압 센서에 표준 임펄스 전압 발생기를 연결하고 피측정 전압을 관측하였다. 그 결과 <그림 6>에서 보여주는 바와 같이 임펄스 전압 파형의 재현성이 양호하게 얻어졌다. 또 임펄스 전압 측정을 위해 제작된 광신호처리부의 주파수 응답특성을 조사한 결과 <그림 7>과 같이 직류분에서 10MHz 대역에 이르기까지 균일한 주파수 응답특성을 보여주었다. 이 결과로부터 임펄스 측정용 광섬유 전압 센서가 우수한 주파수 응답특성을 가지며 또한 고주파성 전압 측정에 적용할 수 있음을 확인하였다.



<그림 6> 임펄스 전압 측정 결과



<그림 7> 센서의 주파수 특성

3. 결 론

본 논문에서는 임펄스 전압 측정용 광섬유 전압 센서를 구현하였다. 온도특성이 우수한 BSO를 포켈스 소자로 이용함으로써 온도 안정도를 개선하였다. 광섬유 접동에 의한 출력 드리프트 영향을 줄이기 위하여 검광자 출력단에서 두 개의 출력광(P_1 , P_2)을 각각 검출하여 두 출력 신호의 합과 차를 계산한 후 그 비를 취하는 신호처리 기법을 적용하였다. 그 결과 임펄스 측정용 광전압 센서가 광섬유 외부 섭동 영향을 받지않았다. 또한 필터 설계법에서의 주파수 대역 제한 문제를 해결할 수 있었다. 센서의 상용주파 전압측정 실험 결과 0 볼트에서 500 볼트 범위에서 최대 측정오차는 $\pm 2.5\%$ 로 나타나 양호한 선형 특성이 있음을 확인하였다. 주파수 특성 실험 결과 DC에서 10MHz 주파수 범위에서 양호한 응답 특성을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Edward A. Ulmer, "A high-accuracy optical current transducer for electric power systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.2, April, 1990.
- [2] R. Wolf, E. M. Gyorgy, et al., "High Frequency Magnetic Field Sensors Based on The Faraday Effect in Garnet Thick Films," Proc. IEEE 8th Optical Fiber Sensors Conf., 390-392, 1992.
- [3] 김영수 외, "Garnet film을 이용한 광전류 센서 구현," 한국통신학회논문지, 제 20권, 제 6호, pp. 249-255, 1995.
- [4] 김영수, 김요희, "광전류/광전압 센서의 일체화 설계에 관한 연구," 한국통신학회논문지, 제21권, 제6호, 1996.6.