

BSO와 YIG를 이용한 임펄스 전압, 전류 측정용 광센서 구현

An implementation of fiber-optic sensors for impulse voltage and current measurement using a BSO and an YIG

송재성*, 김영수**

(Jae-Sung Song*, Young-Soo Kim**)

Abstract

In this paper, an optical voltage sensor and an optical current sensor which can be used for the measurement of impulse voltage and current are implemented. BSO single crystal is utilized as a voltage sensor(Pockels effect cell). An rare earth doped YIG is used as a current sensor(Faraday effect cell). A new signal processing technique is adopted not only to avoid the influences of external optical fiber perturbations of transmitting optical fiber, but also to improve the frequency response characteristics of the fiber-optic voltage and current sensors.

Experimental results show that optical voltage sensor has maximum 2.5% error within the voltage range from 0V to 500V, and optical current sensor has maximum 2.5% error within the current range from 0A to 500A. The maximum temperature dependence error of optical voltage sensor is about 0.4%, and that of optical current sensor is about 1.5% within temperature range from -20°C to 60°C.

The proposed optical sensors have good frequency response characteristics within the frequency range from DC to 10MHz.

Key Words(중요용어) : Optical Voltage Sensor(광전압 센서), Optical Current Sensor(광전류 센서), Pockels Effect Cell(포켈스 효과소자), Faraday Effect Cell(파라데이 효과소자), Half Wave Voltage(반파장전압)

1. 서론

전력시스템의 절연 설계 및 뇌저지 대책을 위한 각종 환경 시험을 위해서는 임펄스 전압, 전류 파형을 정확하게 측정 분석하여 뇌저지와 유사한 환경에서 각종 전력시스템의 환경 내력시험 및 신뢰성 시험이 필요하다. 이를 위해 현재 임펄스 측정

에 사용되고 있는 동축 원통형 분류기, 고주파 변류기, 로고스키 코일, 픽업 코일 등은 자기 포화 현상에 의한 파형 왜곡과 고조파 공진에 의한 측정정도의 저하등이 큰 문제점으로 지적되고 있다.

또한 기존의 센서 방식은 절연을 위해 많은 비용 부담과 시스템의 부피가 커지는 등 협소한 지역에서 사용하는데 어려움이 많다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 광센서를 채용한 새로운 방식의 전압, 전류 측정용 센서 연구가 활발히 진행되어 왔다[1, 4] 광센서는 센서가 위치하는 부근에 능동 소자인 전원 회로 및 전기계 센서를 사용하지 않기 때문에 폭발이나 스파크의 위험이 없으며 전송매체로 광섬유를 사용하므로 센

* 한국전기연구소 전략기술연구단
(경남 창원시 성주동 28-1번지, Fax: 055-280-1640
E-mail : jssong@keri.re.kr)

** 초당대학교 전자공학과
2000년 5월 15일 접수, 2000년 8월 8일 심사완료

서부와 측정부 사이에 광신호만 송수신되어 전자파 간섭(EMI)의 영향을 받지 않는다. 또한 센서 구성이 간단하고 포화특성이 없기 때문에 기존 방식에 비하여 측정정도가 높으며 주파수 대역폭도 넓은 장점을 갖는다[5, 7] 본 논문에서는 포켈스 효과소자를 이용한 임펄스 전압 측정용 광전압 센서를 제안하고, 파라데이 효과소자를 이용한 임펄스 전류 측정용 광전류 센서를 제안한다. 광전압 센서로 온도특성이 우수한 BSO를 사용하여 임펄스 전압 측정 센서를 설계하였다. 광전류 센서로 회도류첨가 YIG를 이용하여 임펄스 전류 측정 센서를 설계하였다. 신호 전송로인 광섬유 외부 섭동에 의한 파형 왜곡의 영향을 받지 않도록 새로운 신호처리 기법을 적용하였다. 본 논문에서는 임펄스 전압, 전류 측정에 적합하도록 하기 위하여 두 빔 검출방식을 제안하였다. 두개의 수광소자를 사용하여 검광자에 출사되는 각각의 빔을 검출하고 검출된 두 빔의 합과 차를 구하여 나누는 신호처리 방식을 적용하였다. 설계한 광전압 센서 및 광전류 센서의 선형특성과 임펄스 응답특성을 알아보기 위하여 상용주파 전압, 전류를 인가하고 선형특성을 조사하고 적합한 신호처리장치를 이용하여 주파수 응답특성을 조사하였다.

2. 광센서의 원리

2.1 전압 센서

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 타원편광이 된다. 굴절률의 변화가 인가전계의 1차에 비례하는 현상을 포켈스 효과라 하며 인가 전계의 세기에 따라 발생하는 위상차($\varphi = \pi V/V_{\pi}$)는 소자마다 고유의 값을 갖는 반파장 전압(V_{π})에 의하여 결정된다. 반파장 전압이 크면 일정한 전계를 인가했을 때 위상차가 작게 발생함을 의미하므로 감도 높은 측정을 위해서는 반파장이 적은 소자를 사용하고 피측정 전압이 높을 경우에는 반파장 전압이 큰 소자를 사용해야 한다.

그림 1은 광전압 센서의 구성을 나타낸 것이다. 반도체 레이저로부터 출사된 램덤광이 로드 렌즈를 통하여 선형 편광자(PBS)를 통과한다. 이 선형 편광은 $\lambda/4$ 판을 통과하게 되며 외부에서 피측정 전계가 인가되지 않았을 때 원편광이 되도록

광학 바이어스 역할을 한다. 이후에 광전압 센서인 BSO(포켈스 소자)를 통과하고 검광자(PBS)를 경유하여 수광소자로 전달된다.

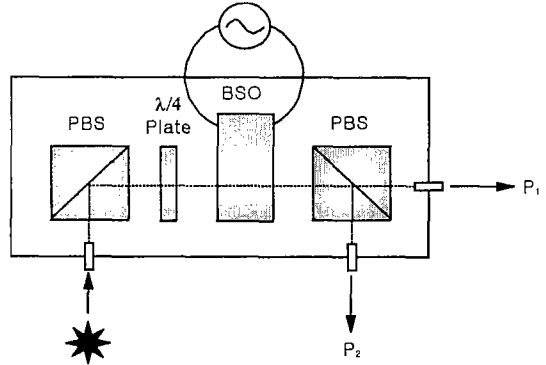


그림 1. 광전압 센서의 구성

Fig. 1. Configuration of optical voltage sensor

표 1. 포켈스 소자의 특성

Table 1. Characteristics of Pockels cells

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

수광소자는 광신호를 전기신호로 변환해주는 기능을 하기 때문에 전기신호로 변환된 후 신호처리 과정을 거쳐 임펄스 전압 측정이 이루어진다. 일반적으로 외부에서 인가한 전계의 세기에 의한 상광선과 이상광선과의 위상차는 $\varphi = \pi V/V_{\pi}$ 로 표현할 수 있다. 여기서 V 는 포켈스 소자에 인가전압을, V_{π} 는 포켈스 소자의 반파장 전압 ($V_{\pi} = \lambda_0/2n_0^3r_{41}$)이다. 여기서 λ_0 는 투과광의

파장, n_0 는 포켈스 소자의 상광선 굴절률, γ_{41} 은 포켈스 소자의 전기광학 계수를 나타낸다. 일반적으로 광전압 센서에서 출력 광강도 P 는 아래 식(1)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{1}{2} [1 + \sin(\pi \frac{V}{V_\pi})] \quad (1)$$

식(1)에서 위상차($\varphi = \pi V / V_\pi$)가 아주 작은 범위에서는 $\sin(\pi V / V_\pi) = \pi V / V_\pi$ 와 같이 근사식으로 표현할 수 있다. 따라서 센서에 입력되는 광파워를 P_0 라 하고, 출력 광파워를 P 라 할 때 입출력 관계식은 $P = P_0(1 + m)$ 이고, $m = \varphi = \pi V / V_\pi$ 의 관계가 있다. 한편 신호처리 회로를 이용하여 AC 성분인 m 값을 구함으로써 피측정 전압(V)을 측정할 수 있다. 표 1은 대표적인 포켈스 소자의 특성을 나타낸 것이다. 반파장 전압이 크면 고전압 측정에는 유리하지만 감도가 낮기때문에 낮은 전압 측정은 어렵다. 반면에 반파장 전압이 낮으면 전압 측정 감도가 높기때문에 낮은 전압 측정에 유리하지만 피측정 전압이 높을수록 측정 오차가 증가하여 적용에 한계가 있다.

2.2 전류 센서

직선 편광된 빛을 자계 방향과 같은 방향으로 입사시키면 자계의 세기에 비례하여 광의 편광면이 회전한다. 이러한 현상을 파라데이 효과라 하며 인가 자계의 세기에 따른 파라데이 회전각은 파라데이 효과 특성을 가지는 소자마다 고유의 값을 갖는데 통상 Verdet 상수(deg/Oe·cm)로서 그 값을 정의하여 사용한다. Verdet 상수가 크면 일정한 자계 세기에서 파라데이 회전량이 크고 이것은 미약한 자계도 측정 가능하다는 것을 의미한다. 그림 2는 광전류 센서의 구성을 나타낸 것이다. 반도체 레이저로부터 출사된 램덤광이 로드 렌즈를 통하여 선형 편광자(PBS)를 통과한다. 이 선형 편광은 45도 회전자를 통과하게 되며 외부에서 피측정 자계가 인가되지 않았을 때 45도 지점에 광학 바이어스점이 설정되도록 구성된다. 이후에 전류 센서인 회로류 첨가 YIG(파라데이 소자)를 통과하고 검광자(PBS)를 경유하여 수광소자로 전달된다.

수광소자는 광신호를 전기신호로 변환해주는 기

능을 하기 때문에 전기신호로 변환된 후 신호처리 과정을 거쳐 임펄스 전류 측정이 가능하다. 일반적으로 외부에서 인가한 자계의 세기에 의한 파라데이 회전각은 $\theta = V \cdot H \cdot l$ 로 표현할 수 있다. 여기서 V 는 Verdet 상수(min/Oe·cm)로서 단위 길이와 단위 자계의 세기당 파라데이 회전량을 나타낸다. H (Oe)는 인가자계의 세기를 l (cm)은 파라데이 소자의 길이를 나타낸다. 일반적으로 광전류 센서에서 출력 광강도 P 는 아래 식(2)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{1}{2} (1 + \sin 2V \cdot H \cdot l) \quad (2)$$

식(2)에서 회전각 θ 의 변화량이 아주 작은 경우에는 $\sin 2\theta \approx 2\theta$ 와 같이 근사식으로 표현할 수 있다. 따라서 입력 광파워를 P_0 라 하고 출력 광파워를 P 라 할 때 입출력 관계식은 $P = P_0(1 + m)$ 이고 $m = 2\theta = 2V \cdot H \cdot l$ 의 관계가 있다. 한편 신호처리 회로를 이용하여 AC 성분인 m 값을 구함으로써 피측정 자계의 세기(H)를 측정할 수 있다.

대표적인 파라데이 효과소자의 특성을 표 2에 나타내었다. Pb-glass와 BSO, BGO와 같은 반자성체 재료는 온도특성이 우수하지만 Verdet 상수가 작기 때문에 감도가 떨어지는 것이 단점이다.

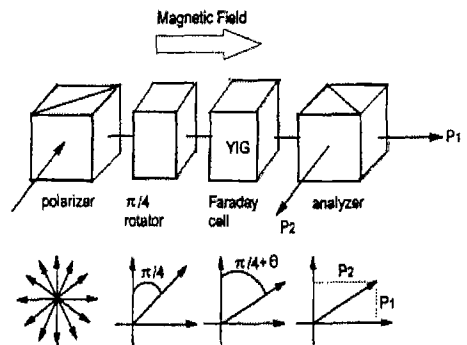


그림 2. 광전류 센서의 구성

Fig. 2. Configuration of optical current sensor

YIG와 같은 강자성체는 Verdet 상수가 크기 때문에 미약 자계 검출이 가능하지만 온도특성이 좋지 않아 광 아이솔레이터에 주로 응용되고 있다. 최근에는 온도특성이 개선된 회로류 첨가 YIG 등

이 활발히 연구되어 광전류 센서용으로 응용되고 있다.

표 2. 파라데이 소자의 특성

Table 2. Characteristics of Faraday cell

항 목 소 자	Verdet 상수 (deg/Oe · cm)	온도계수 (/°C)	선광성 (deg/mm)
ZnSe	0.34×10^{-2}	2.5×10^{-4}	없음
BGO	0.31×10^{-2}	1.5×10^{-4}	9.6 ($\lambda=0.85\mu\text{m}$)
BSO	0.16×10^{-2}	1.5×10^{-4}	10.5 ($\lambda=0.87\mu\text{m}$)
YIG	0.2×10^{-1} ($30\mu\text{m}$)	$\pm 1.0 \times 10^{-3}$	없음
Pb-Glass	0.11×10^{-3}	0	없음

2.3 광송수신 신호처리부

광전압, 전류 센서에 광을 공급하고 센서부에서 광강도 변조되어 돌아온 광으로부터 피측정 전류를 검출하기 위해서는 전기신호를 광신호로 변환해주는 전기신호/광신호 변환회로와 광신호를 전기신호로 변환해주는 광신호/전기신호 변환회로가 필요하다. LED를 구동하기 위한 구동회로는 안정화 전류원을 이용 할시 일정한 광파워가 센서부에 공급되도록 해야한다. 피측정 전압과 전류의 크기에 따라서 광센서부에서 광강도 변조된 광변조신호는 다시 수신용 광섬유를 통하여 광 수신부에 도달한다. 광 수신부는 두 개의 수광소자와 신호처리 회로로 구성되며 각각의 수광소자에 의해 전기신호로 변환된다. 전기신호로 변환된 변조신호는 동일한 이득을 갖는 전치증폭기에서 증폭된 후 신호처리된다. 두개의 광출력 성분을 각각 P_1, P_2 라 하면 P_1, P_2 는 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = \frac{1}{2} P_0(1 + m) \quad (3a)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} P_0(1 - m) \quad (3b)$$

여기서 관심 사항은 순수한 m 값을 검출하여 피측정 전압과 전류를 구하는 것이다. 기존의 신호처리 방식에서는 DC성분과 AC성분을 분리하기 위하여 R-C 회로로 구성된 필터를 사용하였다. 따라서 기존 신호처리 방식은 상용주파 측정시에는 별 문제가 없으나 임펄스 전압, 전류 측정시에는 임펄스성 전압, 전류 측정시에는 빠른 주파수

신호에 충분히 대응하지 못하여 사용할 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 새로운 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 검광방식과 신호처리 기법을 제안하였다. 즉, 검광자에서 출사되는 두 개의 출력광 성분 P_1, P_2 의 합과 차를 구한다. 이후에 그 결과를 나누어주면 아래식 (4)와 같이 순수하게 피측정 성분(m)만을 구할 수 있다.

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = m \quad (4)$$

이 m 값이 새로운 신호처리 기법을 적용하여 얻어진 AC성분으로써 임펄스 전압, 전류 측정에 적합하도록 응답특성이 개선된 방식이다. 또한, 본 신호처리 기법은 입력광파워의 변동에 무관하게 AC성분을 검출할 수 있어 광섬유 접동의 영향을 배제할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

전압, 전류 측정 실험을 위해 그림 3과 같이 광전압, 전류 측정 시스템을 구성하였다. 광전압 센서와 광전류 센서를 도체에 부착하고 송수광부를 측정질에 배치하였다. 송수광부와 센서부는 다중 모드 광섬유로 연결하였다.

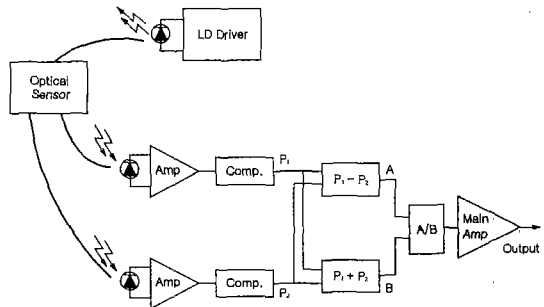


그림 3. 고주파 전압, 전류 측정 시스템 구성도
Fig. 3. Blockdiagram of high frequency voltage and current measurement system

전기신호/광신호 변환기(E/O)에서 출사되는 광은 센서부를 거쳐 다시 광섬유를 통해 수광소자에 도달한다. 수광소자에 도달한 두 광신호는 각각 광신호/전기신호(O/E) 변환기에 의해 전기신호로 변환되고 신호처리 회로에 의하여 피측정 전압과 전류값으로 환산 처리된다. 여기서 수광용 광섬유가

두가닥인데 이유는 검광자에서 출력되는 두 변조 신호의 출력(P_1 , P_2)을 각각 수신하여 합과 차를 구하기 위해서이다. 센서부에는 피측정 전압이 0V 일때 출력광의 강도가 입력광 강도의 1/2(광학 바이어스)이 되도록 하기위하여 $\lambda/4$ 판을 두어 초기 편광상태가 원편광이 되도록 하였다. 이것은 직선성이 가장 좋은 영역을 이용하기 위해서이다. 제작된 광전압 센서와 광전류 센서의 특성평가가 실험실내에서 이루어졌다. 실험실 환경조건은 온도 25℃, 상대습도 50%였다. 광전압 센서의 특성을 조사하기 위하여 상용 주파수 전압을 0V에서 500V까지 변화해 가면서 출력 광파위의 변화를 측정하여 그림 4에 나타내었다. 실험결과 제안된 임펄스 측정용 광전압 센서의 최대 측정오차는 $\pm 2.5\%$ 로써 양호한 선형 특성이 있음을 확인하였다. 또 광전압 센서를 항온조에 넣어 온도를 -20℃에서 60℃까지 변화를 주고 출력변동을 관측한 결과 20℃때 출력을 기준으로 하여 최대 측정오차는 -10℃일때 0.4%로 나타났다.

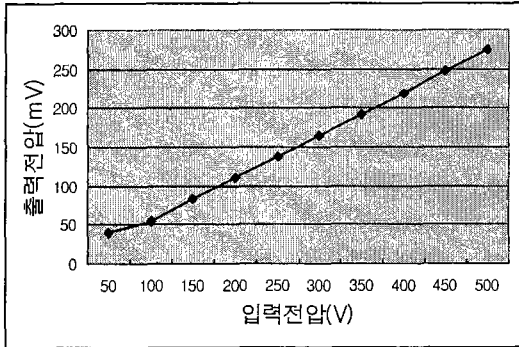


그림 4. 광전압 센서의 입출력 특성
Fig. 4. Input-output characteristic of optical voltage sensor

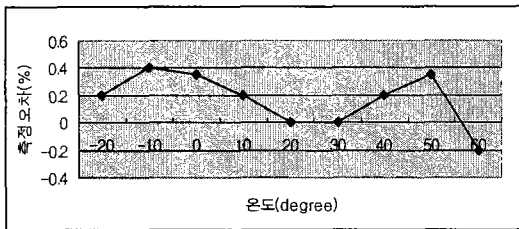


그림 5. 광전압 센서의 온도 특성
Fig. 5. Temperature Characteristic of optical voltage sensor

한편 광전류 센서의 특성을 조사하기 위하여 상용 주파수 전압을 0 암페어에서 500 암페어까지 변화해 가면서 출력 광파위의 변화를 측정하여 그림 6에 나타내었다. 실험결과 제안된 임펄스 측정용 광전류 센서의 최대 측정오차도 $\pm 2.5\%$ 로써 양호한 선형 특성이 있음을 확인하였다. 또 광전류 센서의 온도특성 실험 결과 그림 7에서 알 수 있듯이 최대 측정오차는 60℃에서 1.4%로 나타났다. 광전류 센서의 온도 안정도가 광전압 센서에 비하여 약간 떨어지나 이 정도의 오차는 육내 배전반용으로 사용하는데는 그다지 문제되지 않는다.

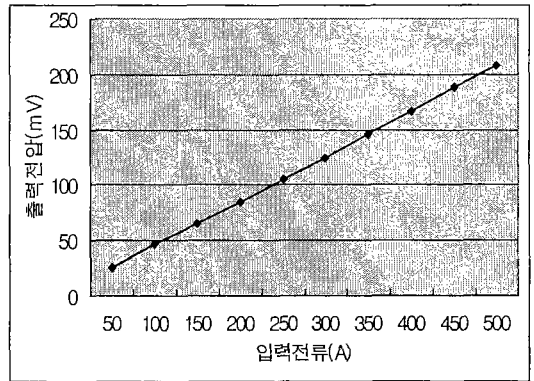


그림 6. 광전류 센서의 입출력 특성
Fig. 6. Input-output characteristic of optical current sensor

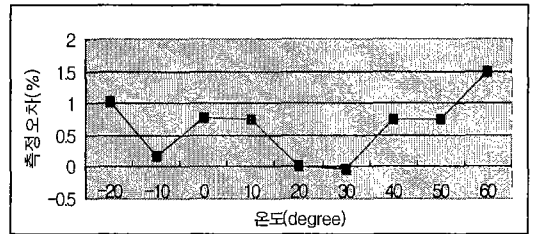


그림 7. 광전류 센서의 온도 특성
Fig. 7. Temperature Characteristic of optical current sensor

한편 설계한 광전압 센서와 광전류 센서에 표준 임펄스 전압, 전류 발생기를 연결하고 임펄스 전압과 전류를 관측하였다. 그 결과 그림 8에서 보여주는 바와 같이 임펄스 파형의 재현성이 양호하게 얻어졌다. 또 임펄스 전압, 전류 측정용으로 제작된 광신호처리부의 주파수 응답특성을 조사한 결

과 그림 9에서 보여주는 바와 같이 직류에서 10MHz 대역에 이르기까지 양호한 주파수 응답특성을 보여주었다. 이 결과로부터 임펄스 측정용 광전압, 광전류 센서가 우수한 주파수 응답특성을 가지며 임펄스 파형 재현성이 우수함을 확인하였다.

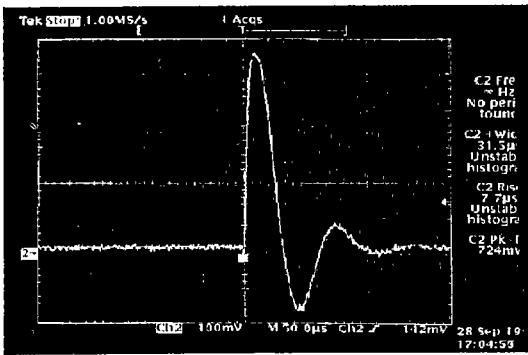


그림 8. 광전압, 전류 센서 출력 파형
Fig. 8. Output waveform of optical voltage and current sensor

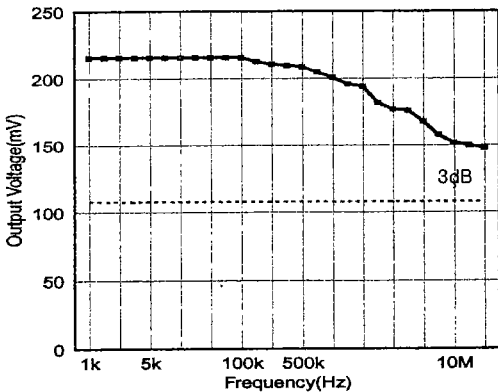


그림 9. 광전압, 전류 센서의 주파수 응답 특성
Fig. 9. Frequency response of optical voltage and current sensor

4. 결 론

본 논문에서는 온도특성이 우수한 BSO 소자를 Pockels 소자로 회로류 첨가 YIG 소자를 파라데이 소자로 이용하여 고주파 전압, 전류 측정용 광전압 센서와 광전류 센서를 구현하였다. 광섬유 섭동에 의한 출력 드리프트 영향을 줄이고 임펄스 전압, 전류 측정에 적합하도록 검광자 출력단에서 두 개

의 출력광(P_1, P_2)을 각각 검출하고, 두 출력 신호의 합과 차를 계산한 후 그 비를 취하는 새로운 신호처리 기법을 적용하였다.

실험 결과 상용주파 입력전압 0V에서 500V 범위에서 광전압 센서의 최대 측정오차는 $\pm 2.5\%$ 로 나타났으며, 상용주파 입력전류 0A에서 500A 범위에서 광전류 센서의 최대 측정오차는 $\pm 2.5\%$ 로 나타나 제작된 광전압, 전류 센서가 양호한 선형 특성이 있음을 확인하였다.

또 광센서를 항온조에 넣어 온도를 -20°C 에서 60°C 까지 변화를 주고 출력변동을 관측한 결과 20°C 때 출력을 기준으로 하여 광전압 센서의 최대 측정오차는 -10°C 일때 0.4%로 관측되었고, 광전류 센서의 최대 측정오차는 60°C 에서 1.4%로 나타나 비교적 양호한 온도 특성을 가짐을 확인하였다. 임펄스 파형관측 결과 설계 시스템의 파형 재현성이 우수하였으며, DC에서 10MHz 주파수 범위에서 광전압, 전류 센서가 양호한 주파수 응답 특성을 나타내었다.

참고 문헌

1. A. J. Rogers, "Optical Methods for Measurement of Voltage and Current on Power System," Opt. Laser Tech. pp. 273-283, 1977.
2. K. Kyuma, "Fiber Optic Current and Voltage Sensors using a BGO Single Crystal," Lightwave Tech., Vol. LT-1, No. 1, pp. 93-97, 1983.
3. Edward A. Ulmer, "A high-accuracy optical current transducer for electric power systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.2, April, 1990.
4. 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.
5. 김영수 외, " 광CT, PT개발 및 적용에 관한 연구," 한국전력공사 연구보고서, 1993.
6. 김영수 외, "Garnet film을 이용한 광전류 센서 구현," 한국통신학회논문지, 제20권, 제6호, pp. 249-255, 1995.
7. 김영수, 김요희, "광전류/광전압 센서의 일체화 설계에 관한 연구," 한국통신학회논문지, 제21권, 제6호, 1996. 6.