

광전류/광전압 센서의 일체화 설계에 관한 연구

正會員 金永洙, 金堯喜

A Study on Single Body Design of Optical Current Sensor and Optical Voltage Sensor

Young Soo Kim*, Yo Hee Kim* *Regular Members*

요 약

Verdet 상수가 큰 희토류 첨가 YIG와 온도특성이 좋은 비스무스 실리콘 옥사이드(BSO: $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)를 이용하여 AC 전류와 전압을 동시에 측정할 수 있는 광전류 및 광전압 센서를 하나의 모듈로 제작하였다. 실험 결과 광전류 센서의 최대 측정오차는 0A에서 400A의 전류 범위에서 7.5% 였고, 광전압 센서의 최대 측정오차는 0V에서 400V 전압 범위에서 0.87% 였다. 파형 관측 결과 일체화 광전류 광전압 센서가 양호한 파형 재현성을 가짐을 확인하였다. 인가 전압이 광전류 센서에 미치는 영향과 인가 자계가 광전압 센서에 미치는 영향을 조사한 결과 상호 간섭 없이 전류 전압의 선형적 측정이 가능하였다.

ABSTRACT

A single body type of fiber-optic current and voltage sensor using a rare earth doped YIG and a bismuth silicon oxide single crystal is proposed, which is used for simultaneous measurement of the AC electric current and AC electric voltage over the transmission lines. Experimental results showed that the fiber-optic current sensor has the maximum 7.5% error within the current range of 0A to 400A, and the fiber-optic voltage sensor has the maximum 0.87% error within the voltage range of 0V to 400V. The output waveforms of proposed fiber-optic sensor system has a good agreement with output waveforms of conductor current and voltage. Experimental results proved that the output of fiber-optic current sensor is not affected by the electric voltage applied to the fiber-optic voltage sensor, and also, that the output of fiber-optic voltage sensor is not affected by the electric current applied to the fiber-optic current sensor.

*韓國電氣研究所 光應用 시스템 研究팀
Applied Optical System Research Team, Korea
Electrotechnology Research Institute
論文番號: 96076-0228
接受日字: 1996年 2月 28日

I. 서론

현재 사용중인 계기용 변성기는 자기포화 현상에 의해 측정시 파형이 왜곡되고, 고조파 공진현상 때문에 측정오차가 발생한다. 또 시스템 전압의 크기에 따라 별도의 절연비용이 필요하고 무거워지며 특히 외부로부터 노이즈 및 서지가 침입하였을 경우 면역 기능이 없어 1차측과 2차측이 완전히 분리된 새로운 방식의 전류 센서와 전압 센서의 개발이 요구되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 수단으로 기존 전류 전압 검출 방식과는 전혀 방식이 다른 전기광학적 방법과 자기광학적 방법을 이용하여 전압, 전류를 검출하는 광전류 센서 및 광전압 센서에 관한 연구가 여러 연구자들에 의하여 시도되어 왔다.^{1)~6)} 그러나 지금까지 연구되어온 광전류 센서와 광전압 센서는 대부분이 별도의 모듈로 설계되어 고압부에 광센서 설치시 별도의 절연장치가 필요하게 되고, 센서 설계시 값비싼 광학 부품이 필요 이상으로 소요된다. 각종 사고의 감시 및 시스템의 제어를 위해서는 전류, 전압 파라미터를 동시에 측정할 수 있도록 하나의 모듈로 설계하는 것이 효율적이다.

전류, 전압을 동시에 측정하기 위한 연구는 크게 두가지의 흐름이 있었다.²⁾ 하나는 동일 광축에 파라데이 소자와 포켈 소자를 배치하고 레이저 광을 센서에 인가하면 인가 전류에 의한 파라데이 회전량과 인가 전압에 의한 위상차가 복합적으로 발생하게 되며 출력측에서 편광 회전량과 위상차를 상대적으로 분석함으로써 피측정 전류와 전압을 검출하는 방식이다. 다른 하나는 파라데이 소자와 Electro-gyration 효과 소자를 동일 광축상에 배치하고 전류에 의한 파라데이 회전량과 전압에 의한 편광면의 회전량(Electro-gyration 효과)이 복합적으로 발생하면 출력측에서 이를 분리하여 전류와 전압을 검출하는 방식이다. 전자와 후자의 방식에서는 두가지 파라미터를 분리하기 위한 신호처리 회로 구성이 복잡하고 정확한 측정을 요하는 센서 설계에는 한계가 있다.

본 논문에서는 상기의 방식에 비해 센서 구성 및 신호처리 방식이 간단하고 기존의 개별 광전류, 전압 센서의 특성을 그대로 유지할 수 있는 전류 전압 동시 측정용 광센서를 제안한다. 본 방식은 이미 발표한 바 있는 광전압 센서⁵⁾ 및 광전류 센서⁶⁾의 기본 특

성을 변화시키지 않고 전류, 전압을 동시에 검출할 수 있도록 하나의 센서 합체내에 제작하였다. 자계와 전기의 영향을 받지 않도록 광전류 센서와 광전압 센서의 광로가 직각이 되도록 구성한다. 파라데이 회전각이 큰 회도류 첨가 YIG를 파라데이 소자로, 온도특성이 우수한 BSO를 포켈 소자로 이용한다. 센서 제작 후 광전류 센서 및 광전압 센서의 선형특성과 파형 재현성을 조사한다. 전계가 광전류 센서에 미치는 영향과 자계가 광전압 센서에 미치는 영향을 조사한다.

II. 광센서의 원리

1. 광전류 센서

광학적으로 투명한 물질에 외부로부터 자계를 인가하고 인가자계의 방향과 동일 방향으로 선형 편광된 광을 통과시키면 외부 인가자계의 세기에 비례하여 편광면이 회전한다. 이러한 현상을 이용하여 전류를 측정하기 위한 광전류 센서의 구성을 그림 1에 나타낸다. 반도체 레이저 다이오드에서 출사된 광이 드렌즈를 통하여 선형 편광자(PBS: Polarizing Beam Splitter)를 통과한다. 이 선형 편광이 45°회전자와 파라데이 소자인 회도류 첨가 YIG를 통과한다. 외부에서 자계가 인가되지 않으면 편광면은 최대 광출력의 중간 위치인 45°지점에 위치하게 된다.

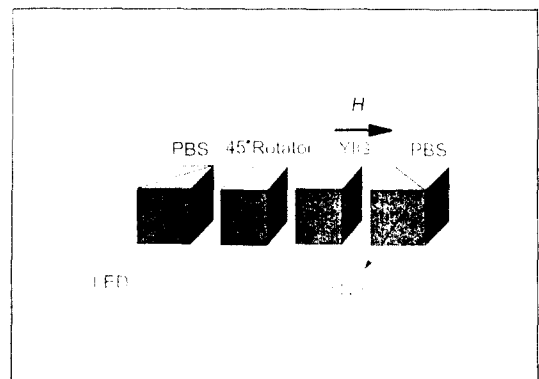


그림 1. 광전류 센서의 구성

Fig. 1. Configuration of fiber-optic current sensor

그림 1에서 도체에 전류가 흐르면 도체 주변에 자장이 형성되어 광전류 센서를 통과한 후의 편광면은

자계의 세기(전류)에 비례하여 θ 만큼 회전한다. 이 광이 검광자를 통과하면 회전각의 크기가 광강도 변조되어 광의 강약으로 출력된다. 수광소자와 신호처리 회로를 이용하여 파라데이 회전량을 검출하면 도체에 흐르는 전류량의 크기를 검출할 수 있다. 외부에서 인가한 전류량의 변화에 의한 파라데이 회전각 θ 는 아래 식(1)과 같이 표현된다.

$$\theta = VHl \tag{1}$$

V : Verdet 정수(min/Oe cm)

H : 인가자계의 세기(Oe)

l : 센서소자의 길이(cm)

그림 1의 광전류 센서 구성에서 편광자와 검광자의 방향을 45° 로 하고 Jones 행렬을 이용하여 변조광의 세기를 구하면 아래식 (2)와 같이 된다. 외부 인가자계의 세기(H)가 증가하면 광출력(P)도 커진다.

$$P = \frac{1}{2} (1 + \sin 2\theta) = \frac{1}{2} (1 + \sin 2VHl) \tag{2}$$

그림 2는 센서의 입출력 특성을 나타낸 것이다. 인가 전류가 증가하면 측정오차도 증가하지만 대부분의 경우 최대 피측정 전류를 파라데이 회전각이 1° 미만인 범위 안에서 설계하므로 측정 오차의 영향은 무시할 수 있다.

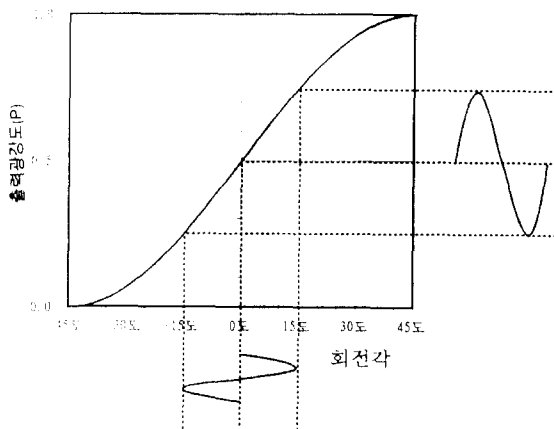


그림 2. 입력 전류대 출력 광파워
Fig. 2. Input current versus optical output power

2. 광전압 센서

전기광학 효과 소자인 BSO에 전계를 인가하고 편광된 빛을 통과시키면 직교성분의 광에 대한 굴절율이 변한다. 이러한 현상을 이용하여 전압을 측정하기 위한 광전압 센서의 구성을 그림 3에 나타낸다. 반도체 레이저 다이오드에서 출사된 광이 로트렌즈를 통하여 선형 편광자(PBS: Polarizing Beam Splitter)를 통과한다. 이 선형 편광이 1/4 파장판과 포켈 소자인 BSO를 통과한다. 외부에서 자계가 인가되지 않으면 원편광이 되어 최대 광출력의 중간 지점에 위치하게 된다.

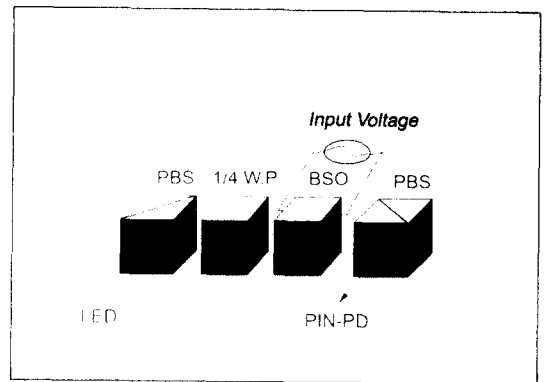


그림 3. 광전압 센서의 구성
Fig. 3. Configuration of fiber-optic voltage sensor

BSO 소자에 전계를 인가하여 x 축 방향으로 φ 만큼의 진상이 있을 경우에 위상차 φ 는 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 V_π 는 반파장 전압으로서 결정에 따라 고유의 값을 가진다.

$$\varphi = \frac{\pi V}{V_\pi} \quad (V_\pi = \frac{\lambda_0}{2n_o^3 r_{41}}) \tag{3}$$

n_o : 결정의 굴절율

λ_0 : 광의 파장

r_{41} : 전기광학계수

그림 3의 광전압 센서 구성에서 Jones 행렬을 이용하여 변조광의 세기를 구하면 아래식 (4)와 같이 된다.

$$P = \frac{1}{2} (1 + \sin \varphi) = \frac{1}{2} [1 + \sin(\frac{\pi V}{V_\pi})] \tag{4}$$

식(4)에서 인가전압 (V)가 변하면 출력광(P)도 증가한다. 이 관계를 도식적으로 나타내면 그림 4와 같은 입출력 특성이 얻어진다. 인가 전압이 증가하면 측정 오차도 증가하지만 최대 파측정 전압을 결정의 반파장 전압에 비하여 아주 작은 범위 안에서 설계하므로 측정 오차의 영향은 무시할 수 있다.

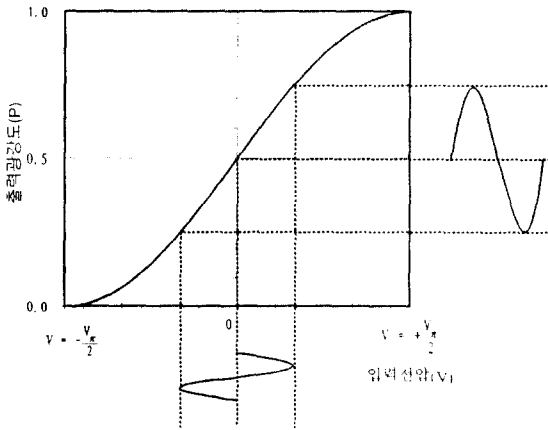


그림 4. 입력 전압대 출력 광파워
Fig. 4. Input voltage versus optical output power

III. 실험 및 결과 고찰

1. 센서제작

광전류 광전압 센서의 일체화 구성을 그림 5에 나타낸다. 아크릴판 위에 세개의 PBS와 세개의 셀폭 마이크로 렌즈(SML: Selfoc Micro Lens) 그리고 45°회전자, 전류센서(YIG), 1/4 파장판, 전압센서(BSO)를 배치한다.

광전류 센서부는 선형편광자(PBS1), 45°회전자, YIG, 검광자(PBS2)로 구성된다. LED에서 출사된 광은 선형 편광자를 통과한 후 광의 진로를 90°바꾸어 선형 편광으로 되고, 45°회전자와 파라데이 소자인 YIG를 통과한다. YIG를 통과한 광은 검광자에 의하여 광강도 변조되고, 광의 진로를 90°틀어 SML2에 의하여 수광용 광섬유로 가이드된다. 포토다이오드와 신호처리 전자회로를 이용 파라데이 회전량을 검출 외부 인가 전계의 세기를 측정한다.

광전압 센서부는 선형편광자(PBS1), 1/4 파장판,

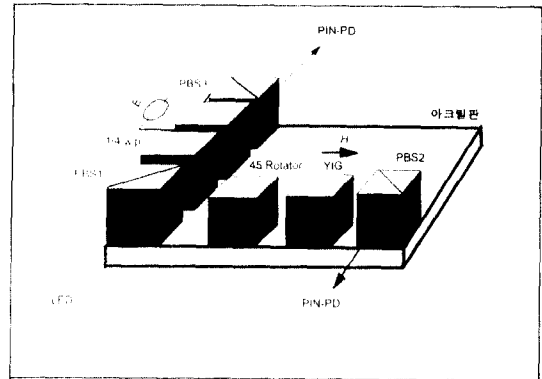


그림 5. 광전류·광전압 센서의 일체화 구성
Fig. 5. Single body configuration of optical current and optical voltage sensor

BSO, 검광자(PBS2)로 구성된다. LED에서 출사된 광은 선형편광자를 통과한 후 진로를 90°틀어 선형 편광으로 된다. 이 광이 1/4 파장판을 통과하면 서로 직교성분의 광파 사이에 $\pi/2$ 만큼 위상차가 발생한다. 이 광은 원형편광 이므로 어느 검광 각도에 대하여 광의 세기가 일정하다. BSO 포켈 소자에 전압을 인가하면 원편광이 타원편광으로 변한다. 이 타원 편광이 검광자(PBS2)를 통과하면 위상 변화량이 광의 강약으로 변조된다. 이 광은 집광렌즈(SML3)에 의하여 수광용 광섬유로 가이드된다. 포토다이오드와 신호처리 전자회로를 이용 위상 변화량을 검출하여 외부 인가 전계를 측정한다.

표 1은 희토류 첨가 YIG 소자의 특성을 나타낸다. 파라데이 회전각이 크기때문에 필름형태로 사용한

표 1. YIG 소자의 특성

Table 1. Characteristics of YIG

항 목	특 성
결정조성	(HoTbBi) ₃ Fe ₅ O ₁₂
Verdet 정수	7 deg/Oe • cm
삽입손실	< 5 dB (870 μ m)
소광비	> 37 dB
포화자계	80 kA/m (1,000 Oe)
온도의존성	0.06 deg/°C
두께	0.57 mm

다. 표 2는 BSO 소자의 특성을 나타낸다. BSO 소자의 양면에 투명 전극을 입혀 인가 전계가 결정 격자에 균등하게 가해지도록 하였다. 그리고 외부로부터 전압을 인가할 수 있도록 BSO 상부에 전압 인가 단자를 부착하였다.

표 2. BSO의 특성

Table 2. Characteristics of BSO

항 목	특 성
결정조성	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$
결정형태	23 (body centered cubic)
굴절율 (n_o)	2.45 (0.87 μm)
유전율(ϵ)	56 (100 KHz)
전기광학계수(r_{41})	4.35×10^{-12}
선광성	10.5°/mm (0.87 μm)
밀도	9.2 g/cm ³
비저항	1015 Ωm

2. 실험 및 결과 고찰

광전류·전압 센서의 일체화 구성을 그림 6에 나타낸다. 아크릴판 위에 센서소자를 배치하고, 센서모듈 외부에 LED 및 LED 구동부, PD1 및 신호처리부1, PD2 및 신호처리부2가 위치하고 있다. 송수광부와 센서모듈 사이에는 FC형 광콘넥터가 부착된 멀티모드 광섬유(코어/클래드경:100/140 μm) 코드로 연결하였다. 광콘넥터와 광센서 모듈 사이에는 SML을 부착하여 LED에서 출사된 광이 광섬유 끝단에서 출사된 후 퍼지는 광빔을 평행빔으로 해주고, 센서를 통과한 평행빔을 수광용 광섬유에 가이드할 목적으로 사용한다.

광전류 및 광전압 센서의 일체화 시스템을 구현한 후 광전류 센서부에 직류성분의 광을 입사시키고 상용주파(60Hz) 표준 전류를 0A에서 400A까지 50A 단위로 증가시키고 광전류 센서의 출력 특성을 조사하였다. 전류 측정 결과 광전류 센서의 최대 측정오차는 0A에서 400A의 범위에서 7.5% 였다. 광전류 센서의 오차가 큰 원인은 YIG의 감도가 높기때문에 전류가 증가함에 따라 선형영역을 벗어나기 때문에 발생한 오차로 추측된다. 한편 도체의 전압 변동이 광전

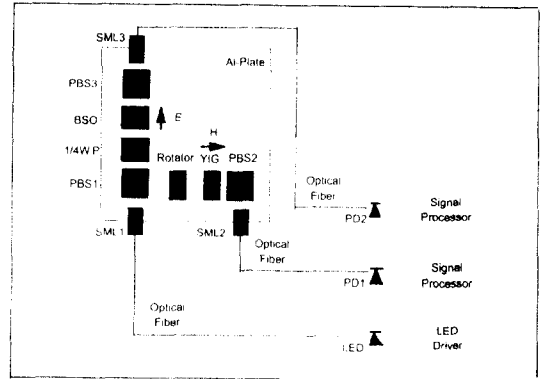


그림 6. 광전류 광전압 센서의 일체화 구성

Fig. 6. Single body configuration of optical current and voltage sensor

류 센서의 출력에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 광전압 센서부의 외부 전압 인가 단자에 상용주파 표준 전압을 각각 0V, 100V, 200V, 300V, 400V일때 광전류 센서의 전류 측정 실험을 반복하였다. 광전류 센서의 측정 결과를 표 3에 나타낸다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 어떠한 전압하에서도 광전류 센서의 출력은 항상 일정하게 유지하였다. 이로부터 일체화 광센서 시스템은 어떤 전압에 대하여도 영향을 받지않고 선형적인 전류 측정이 가능함을 알 수 있다.

마찬가지 방법으로 광전압 센서부에 직류성분의 광을 입사하고 상용주파 표준 전압을 0V에서 400V까지 50V 단위로 광전압 센서의 출력 특성을 조사하였다. 전압 측정 결과 광전압 센서의 최대 측정오차는 0V에서 400V 범위에서 0.87%로 나타났다. 광전압 센서의 경우 선형 특성이 아주 우수함을 알 수 있다. 도체 전류 변동이 광전압 센서의 출력에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 광전류 센서부에 상용주파 표준 전류를 각각 0A, 100A, 200A, 300A, 400A 일때 광전압 센서의 전압 측정 실험을 반복하였다. 그 결과 표4에 나타낸다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 어떠한 전류하에서도 광전압 센서의 출력은 항상 일정하게 유지하였다. 이로부터 일체화 광센서 시스템은 어떠한 전류에 대하여도 영향을 받지않고 선형적인 전압 측정 측정이 가능함을 알 수 있다. 결론으로 제안한 일체화 광전류 광전압 센서 시스템이 어떠한

전류나 전압하에서도 상호간에 간섭을 받지 않고 도체의 전류 전압을 선형적으로 검출할 수 있음을 입증하였다.

표 3. 여러가지 전압에 대한 광전류 센서의 입출력 특성 (Vc : 도체전압)

Table 3. Input current versus output voltage of fiber-optic current sensor in various conductor voltage

입력전류 $I_{max}(A)$	출력전압 $V_{rms}(V)$				
	(Vc=0)	(Vc=100)	(Vc=200)	(Vc=300)	(Vc=400)
50	0.524	0.524	0.524	0.524	0.524
100	1.076	1.076	1.076	1.076	1.076
150	1.601	1.601	1.601	1.601	1.601
200	2.116	2.116	2.116	2.116	2.116
250	2.612	2.612	2.612	2.612	2.612
300	3.096	3.096	3.096	3.096	3.096
350	3.552	3.552	3.552	3.552	3.552
400	4.004	4.004	4.004	4.004	4.004

표 4. 여러가지 전류에 대한 광전압 센서의 입출력 특성(Ic : 도체전류)

Table 4. Input current versus output voltage of fiber-optic voltage sensor in various conductor current

입력전압 $V_{max}(V)$	출력전압 $V_{rms}(V)$				
	(Ic=0)	(Ic=100)	(Ic=200)	(Ic=300)	(Ic=400)
50	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508
100	1.034	1.034	1.034	1.034	1.034
150	1.546	1.546	1.546	1.546	1.546
200	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064
250	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576
300	3.084	3.084	3.084	3.084	3.084
350	3.594	3.594	3.594	3.594	3.594
400	4.099	4.099	4.099	4.099	4.099

한편 광전류 센서와 광전압 센서의 입출력 특성을 그래프화 하여 선형 특성을 조사하였다. 그림 7은 광전류 센서의 입출력 특성을 나타낸다. 분석 결과 광전류 센서의 최대 측정오차는 7.5% 였다. 광전류 센서의 오차가 약간 큰 원인은 전류 센서인 YIG의 감

도가 높아 파라데이 회전량이 많음으로 인하여 발생한 오차로 추측된다. 따라서 측정하고자 하는 자계의 세기를 결정한 후 적절한 센서 두께를 결정하여 광전류 센서를 설계해주면 원하는 오차 범위내에서 전류 측정이 가능해진다. 실제로 배전 선로의 경우 도체 전류가 200A 이내이기 때문에 본 시스템으로도 적용이 가능하다. 그림 8은 광전류 센서의 입출력 특성을 나타낸다. 광전압 센서의 최대 측정 오차는 0.87% 였다.

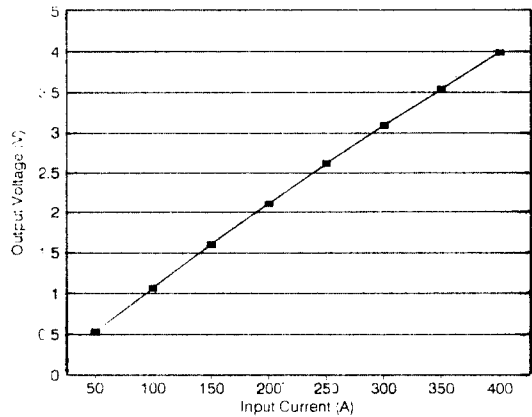


그림 7. 광전류 센서의 입출력 특성

Fig. 7. Input-output characteristics of fiber-optic current sensor

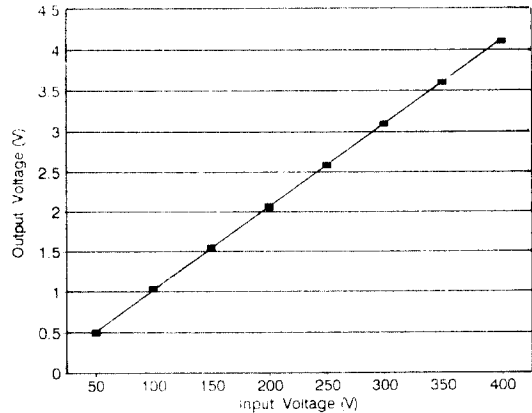
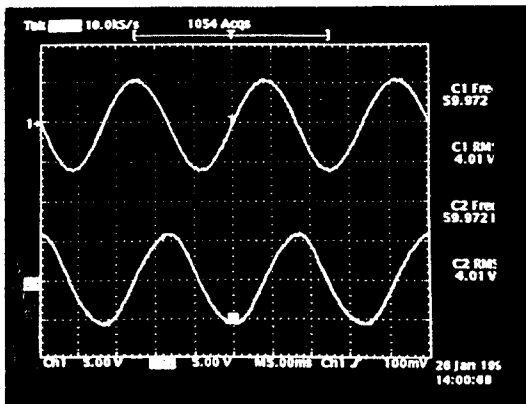


그림 8. 광전압 센서의 입출력 특성

Fig. 8. Input-output characteristics of fiber-optic voltage sensor

한편 일체화 광전류 전압 센서의 파형 재현성을 알아보기 위하여 도체전류를 400A, 도체 전압을 400V로 하고 광전류 전압 센서로 파형을 관측하였다. 그 결과 사진1에서 보여주는 바와 같이 사용주파 전류 전압 파형을 양호하게 검출할 수 있었다. 사진에서 상부의 파형은 전류 파형을 나타낸 것이고 하부의 파형은 전압 파형을 나타낸 것이다. 전류와 전압 파형의 위상차가 정확하게 90°임을 보여주고 있다.



상: 전류 센서 파형
하: 전압 센서 파형

사진 1. 광전류 전압 센서의 출력파형(Ic = 400, Vc = 400V)
Photo. 1. Output waveforms of fiber-optic current and voltage sensor

본 논문에서 제안한 광전류 및 광전압 센서의 일체화 설계 시스템을 이용하여 도체의 전류와 전압을 측정함에 있어 도체의 전류가 광전압 센서에 미치는 영향, 도체 전압이 광전류 센서에 미치는 영향을 실험적으로 측정 분석한 결과 일체화 광전류 광전압 센서 시스템이 어떠한 전류나 전압하에서도 상호간에 간섭을 받지 않고 도체의 전류 전압을 선형적으로 검출할 수 있음을 입증하였다. 본 논문에서 제안한 센서 시스템은 기존의 개별 광센서의 특성을 그대로 가지면서 동시에 전류 전압 측정이 가능하기 때문에 현장에 확대 적용시 경제적, 기술적, 구조적으로 파급 효과가 클 것으로 기대된다.

IV. 결 론

Verdet 상수가 큰 회토류 첨가 YIG와 온도특성이 좋은 비스무스 실리콘 옥사이드(BSO)를 이용하여 광전류 센서와 광전압 센서를 하나의 기판위에 일체화 설계하였다. 광전류 센서와 광전압 센서가 서로 다른 파라미터인 전압이나 전류에 의하여 영향을 받지 않도록 센서를 직각 방향으로 제작하였다. 시험 결과가 전계가 광전류 센서에 미치는 영향과 인가 자계가 광전압 센서에 미치는 영향을 조사한 결과 상호 간섭없이 도체의 전류 전압을 선형적으로 측정이 가능하였다. 광전류 센서의 최대 측정오차는 0A에서 400A의 범위에서 7.5% 였으며, 광전압 센서의 최대 측정오차는 0V에서 400V 범위에서 0.87%로 나타났다. 광전류 센서의 오차가 큰 원인은 YIG의 감도가 높아 전류가 약간만 증가해도 파라데이 회전량이 많아 선형영역을 벗어나기 때문에 발생한 오차로 추측된다. 도체 전류 및 전압 파형을 관측한 결과 양호한 파형 재현성이 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 센서는 구조가 간단하고 전류 전압 센서를 한개의 모듈로서 구성할 수 있기 때문에 현장에 확대 적용시에 설치 비용의 절감이 기대된다.

참 고 문 헌

1. A. J. Rogers, "Optical Methods for Measurement of Voltage and Current on Power System," *Opt. Laser Tech.*, pp. 273-283, 1977.
2. 竹下信也 外, "計測用光變成器研究開發の現況と動向," *電氣學會技術報告(II部)*, 第149號, pp. 52-53, 昭和58年.
3. K. Kyuma, et al., "Fiber Optic Current and Voltage Sensors Using a BGO Single Crystal," *Lightwave Tech.*, Vol. LT-1, No. 1, pp. 93-97, 1983.
4. T. Mitski, et al., "Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic Field Sensors," *IEEE SM 442-8*, 1986.
5. 김요희, 이대영, "EOM-BSO 소자를 이용한 광전압 센서에 관한 연구," *전자공학회 논문지 제27권*, 제11호, pp. 119-125, 1990.
6. 조홍근, 김영수, 정성종, "Garnet film을 이용한 광전류 센서 구현," *한국통신학회 논문지 제20권*, 제6호, pp. 249-255, 1995.



金永洙(Young Soo Kim) 정회원

1959年 1月 4日生

1982年 2月:전북대학교 전자공
학과(공학사)

1984年 2月:전북대학교 대학원
전자공학과(공학석사)

1994年 2月:전북대학교 대학원
전자공학과(공학박사)

1984年 3月~현재:한국전기연구소 선임연구원

※주관심 분야:광전자 응용, 광섬유 센서, 광센서 다
중화, 광변조기, 광신호처리



金堯喜(Yo Hee Kim) 정회원

1944年 10月 2日生

1992年:경희대학교 대학원 전자
공학과(공학박사)

1964年~1981年:한국전력공사 계
통운용부, 전자계
산소, 기술연구원

1981年~현재:한국전기연구소 전
력전자연구부장, 광
응용시스템 연구팀장

※주관심분야:광전자 응용, 광섬유 센서