벌크형 광 CT 센서 및 신호처리부 성능 개선 방안 연구

김영수*, 박병석**, 김명수**, 임용훈**
초당대학교 전자공학과*, 전력연구원 정보통신그룹**

A Study on Performance Improvement of Optical Current Transformer and Signal Processor

Young-Soo Kim*, Byung-Seok Park**, Myong-Soo Kim**, Yong-Hun Lim
Chodang University*, KEPRI**

Abstract - In this paper, some parameters are studied for the performance improvement of a bulk optical current sensor. The performance of optical current sensor is influenced by current measuring range, Verdet constant change due to temperature change, temperature variation of wave plate, signal to noise ratio of optical transmitter/receiver, optical bias mismatch. Two types of optical current sensors are implemented and tested in the current range from 10 ampere to 200 ampere.

1. 서 론

본 연구에서는 벌크형 광 CT 센서 및 수신 신호처리부 성능 개선을 위하여 센서의 성능에 영향을 주는 몇 가지 파라미터를 분석하고 광 CT 센서를 설계하고 특성을 분석하였다. 벌크형 광 CT의 성능 개선을 위한 분석 파라미터로 1)전류 측정 범위와 센서 재료 선택 2)버데 상수의 온도 특성 3) 파장판의 온도 특성 4) 광 송수신부 신호대 잡음비의 영향 5) 검광 방식의 영향 6) 광학 바이어스 부정합의 영향 등을 분석함으로써 광 CT의 성능 개선 방안을 제안하였다.
두 가지 모델 벌크형 광 CT 시작품 즉, 1/2 파장판을 사용한 벌크형 광 CT와 검광자를 45° 회전한 벌크형 광 CT를 제작하였다. 또 개선된 광원 구동부 회로 설계 및 수광 신호처리 회로를 설계 제작하였다. 제작된 벌크형 광 CT에 대한 시험 및 특성 평가를 하였다.

2. 본 론

2.1 벌크형 광 CT 성능 개선 방안

2.1.1 전류 측정 범위와 센서 재료 선택

레이저광을 투과시키고 외부에서 자계를 인가하면 자계의 세기에 비례하여 편광면이 회전한다. 이러한 현상을 파라데이 효과라 하는데 파라데이 효과를 갖는 물질은 아래와 같은 계열의 매질이 있다.

- 상자성제 혹은 반자성제 도핑 글라스 계열 (SF-6 glass, FR-5 glass)
- YIG($Y_3Fe_5O_{12}$: yttrium iron garnet) 계열
- TGG(Terbium gallium garnet) 계열
- Pb-글라스 계열
- BGO, BSO, ZnSe 단결정 계열

이들 매질에서 편광면의 회전은 광의 통과 방향에 평행한 자계의 세기에 비례한다. 편광면 회전각 θ는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta = VHL\cos\varnothing \qquad (1)$$

여기서 V는 버데상수(rad/AT), L은 광로 길이(m), H는 자계의 세기(AT/m), Ø는 광선과 자계가 이루는 각(rad)을 나타낸다. 회전각 θ를 크게 하기 위해서는 버데 상수가 큰 소자를 사용하거나, 파라데이 소자의 길이를 길게 해야한다. 버데 상수는 파라데이 효과의 크기를 나타내는 정수로서 반자성체를 제외하고는 온도 의존성을 갖고, 그 크기는 표 1에서 보여주듯이 파장에 따라 다르다.

표 1. Verdet 정수의 파장, 온도에 따른 관계

glass종류	파 장	온 도
상자성체	영 향	반비례
반자성체	영 향	무 관

한편, 반자성체의 버데 상수는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V = K\left(\frac{\lambda_0^2\lambda}{\lambda^2-\lambda_0^2}\right)^2 \qquad (2)$$

여기서, K는 물질의 굴절률과 원자수 등에 의해 결정되는 계수이고, λ는 흡수선 파장을 나타낸다. 반자성체의 버데 상수는 온도 변화에 비교적 안정되어 있다. 이것은 반자성체가 광 CT 설계에 유리하다는 것을 시사한다. 그러나 반자성체 재료는 버데 상수가 작아 소전류 측정을 위해서는 유효 광로 길이를 길게 해야한다. 반면에 상자성체 또는 강자성체 재료는 버데 상수가 크기 때문에 미소 전류 측정에 유리하다.

2.1.2 Verdet 상수의 온도특성

파라데이 효과를 갖는 물질중에서 반자성체가 상자성체나 강자성체보다 넓은 온도 범위에서 안정되어 있다.
버데 상수는 파라데이 효과 크기를 표시하는 계수로서 이 효과는 대체적으로 투명물질에서 나타난다. 버데 상수의 크기와 부호는 물질에 따라 다르며, 파장과 온도에 따라서 변한다. 광 CT 센서의 선정조건은 버데 상수가 크고 선광성이 없는 물질이 좋다. 이 값이 크면 센서로써 감도가 좋고 구성이 간단하기 때문이다. 그리고 버데 상수가 온도변화에 민감하지 않아야 한다. 파라데이 효과를 갖는 물질 중에서 반자성체가 상자성체나 강자성체에 비하여 넓은 온도 범위에서 안정되어 있다.
버데 상수의 온도 의존성은 아래 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{V}\cdot\frac{dV}{dt} = \frac{\frac{d}{dT}\left(\frac{dn}{d\lambda}\right)}{\left(\frac{dn}{d\lambda}\right)} = \frac{\frac{d}{d\lambda}\left(\frac{dn}{dT}\right)}{\left(\frac{dn}{dT}\right)} \qquad (3)$$

이 온도 의존성은 여러 가지 파장에서의 $dn(\lambda)/dT$의 데이터와 글라스류에서의 $dn/d\lambda$ 데이터를 이용하여 예

측할 수 있다. 벌크형 광 CT 설계 시 센서의 감도가 큰 **강자성체** 중에서 **온도특성이** 개선된 희토류 첨가 YIG를 **이용한** 광 CT 설계가 이루어지고 있다.
표 2에 파라데이 소자의 버데 상수와 온도 계수를 나타내었다. 비결정질 재료와 상자성체는 강자성체에 비하여 버데 상수가 작기 때문에 대전류 측정용 센서로 활용하는 것이 바람직하다.

표 2. 대표적인 파라데이 물질의 온도특성

재 료		버데 상수 min/Oe · cm	온 도 계 수
비결정질	납 glass	0.04	<±0.5%(-25~100℃)
	As_2S_3 glass	0.10	<±1%(-10~80℃)
	ZnSe	0.21	<±1%(20~120℃)
	$Bi_{12}SiO_{20}$	0.1	<±1%(-13~85℃)
	$Bi_{12}GeO_{20}$	0.188	<±1.5%(-25~85℃)
상자성체	FR-5 glass	0.11	<±15%(-25~85℃)
강자성체	YIG	9.0	<±8%(-25~85℃)
	$(Tb_{0.19}Y_{0.81})_3Fe_5O_{12}$	15.0	<±1.5%(-20~120℃)
	$(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$	19	<±0.5%(-20~80℃)

2.1.3 파장판의 온도 특성

광 CT 센서에서 변조소자 다음으로 중요한 광소자는 바이어스 소자인 파장판으로 식 (4)에서 보여주는 바와 같이 파장(λ)과 파장판의 두께(ℓ)을 정하여 적절한 위상차(δ_w)를 결정한다. 가장 일반적인 파장판은 복굴절형 파장판으로써 단축 결정의 광축에 평행한 빔은 n_o의 굴절률로, 광축에 수직인 빔은 n_o의 굴절률로 전파된다. 물질의 두께에 의해 주어진 파장에서 적절한 지연이 되도록 $n_O - n_e$를 결정하게 된다.

$$\delta_w = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)\ell = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot B\ell \qquad (4)$$

복굴절형 파장판에 사용되는 물질의 온도 의존성은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{d\delta}{dT} = \frac{1}{B}\frac{dB}{dT} + \frac{1}{\ell} \cdot \frac{d\ell}{dT} \qquad (5)$$

식 (5)에서 위상차(γ)는 상광선과 이상광선의 온도 변화 특성과 복굴절 매질의 온도 변화에 따른 길이 변화량에 관계하고 있음을 알 수 있다. 따라서 벌크형 광 CT의 온도 특성 개선을 위해서는 온도 변화에 대한 위상변화(γ)의 값이 작아야 한다. 표 3은 수정, MgF Mica 재료로 만든 복굴절형 파장판의 온도 및 각도 의존성을 나타내었다.

표 3. 복굴절 파장판의 온도의존성

Matcrial	γ
Quartz	-1.4×10^{-4}
MgF	-3.9×10^{-5}
Mica	-2.3×10^{-4}

2.1.4 신호대 잡음비 영향

파라데이 회전각 θ는 검광자에 의해 광의 강도로 변환되어 광전 변환 소자에 의해 전기신호로 변환된다. 증폭기 출력에서 신호대 잡음비(S/N)는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$S/N = \frac{4(P_r K_D)^2 V^2 N^2 I^2}{2M \cdot e \cdot P_r \cdot K_D \cdot R_{eq}} \qquad (6)$$

여기서, M은 수광기의 광전자 증폭율, R_{eq}는 수광기 출력 등가저항, e는 전자의 전하이다. 식 (6)에서 S/N = 1일 때 구하는 전류가 최소 측정 전류(I_{min})이다.

$$I_{min} = \frac{1}{VN} \cdot \sqrt{\frac{\hbar\omega B}{2\eta P_r}} \qquad (7)$$

여기서 V는 3×10^{-5}[rad/AT], N은 1, h는 10^{-34}Js, B는 10^6Hz(1μs), 측정대역폭 ω는 3×10^{15}, η는 0.01, $P_r = 10^{-3}$W 이라 할 때 $I_{min} \cong 12$A 정도이다. 따라서 최소 측정 가능 전류(I_{min})를 적게 하는 방법으로서는 버데 상수, 등가 쇄교 수, 수광 전력 등을 크게 하고 측정 대역폭을 적절히 제한할 필요가 있다.

2.1.5 검광 방식의 영향

파라데이 회전된 광은 검광자(PBS)에 의해 편광면이 서로 직각인 두 개의 선형 편광된 빛 (x 방향 성분과 y 방향 성분)으로 나누어진다. 센서부에서 나오는 두 개의 광 출력을 P_1 , P_2 라 하면 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = k_1 A \sin^2(\theta + 45^\circ) = (1/2)k_1 A (1 + \sin 2\theta)$$
$$P_2 = k_2 A \cos^2(\theta + 45^\circ) = (1/2)\cdot k_2 A (1 - \sin 2\theta)$$

여기서, A는 파라데이 소자로 입사한 광 강도이고 k_1 , k_2 는 출력 광섬유의 결합 계수이다. 두 개의 광섬유로부터 나온 광 출력은 전기 신호로 변환되어 자계의 세기(H)에 비례하는 출력 전압을 연산하게 된다. 증폭기의 출력 V_1 , V_2 는 광 입력 P_1 , P_2 에 비례하여 다음과 같이 된다.

$$V_1 = \beta_1 \cdot P_1 = \alpha_1 A(1 + \sin 2\theta)$$
$$V_2 = \beta_2 \cdot P_2 = \alpha_2 A(1 - \sin 2\theta)$$

여기서 β_1 , β_2 는 증폭 계수이고, α_1 , α_2 는 각각 k_1 β_1 , k_2 β_2 에 비례하는 비례 상수이다. β_1 , β_2 를 적당히 선택함으로써 α_1 이 α_2 와 같도록 결정할 수 있다. 이때 출력 전압 V_o는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} = \sin 2\theta \qquad (8)$$

식 (8)에서 θ가 매우 작을 경우에는 출력 전압은 식 (9)와 같이 근사식으로 표현 가능하다.

$$V_o \simeq 2\theta \qquad (9)$$

따라서 θ = VHL cosØ의 관계를 가지므로 출력 전압(V_o)은 인가 자계의 세기(H)와 비례하게 된다.
그러나 θ가 커지면 sin 2θ와 2θ의 근사 식에 의한 비 직선 오차(E)는 식 (10)에서 알 수 있듯이 증가하게 된다.

$$E = \frac{2\theta - \sin 2\theta}{2\theta} \qquad (10)$$

θ = 15° 일때 비직선 오차는 5%가 되기 때문에 측정 범위를 θ = 45° 까지 확대할 때에는 비직선 오차의 보정이 필요하다. 한편 피측정 자계를 교류 자계로 한정시키면 한 개의 광 출력만을 사용하여 광신호-전기 신호 변환한 후, 전자회로에 의해 교류 성분과 직류 성분을 분리하여 신호처리과정을 거치면 자계의 세기(H)에 비례하는 출력전압을 얻을 수 있다.

2.1.6 광학 바이어스의 영향

센서 제작 시 광학바이어스 점이 어긋날 경우 그림 1에서 보여주는 바와 같이 위상(Φ)의 변화로 나타나므로 전달함수의 영향은 다르게 나타난다. 즉, Φ의 변화는 전달함수를 x축으로 수평 이동한 것이므로 만약 DC를 측정하는 경우는 잔류편차가 나타나고 정현파 측정 시에는 입력과 출력사이에 위상 차가 나타난다. 따라서 센서 제작 시에 주의가 요망된다.

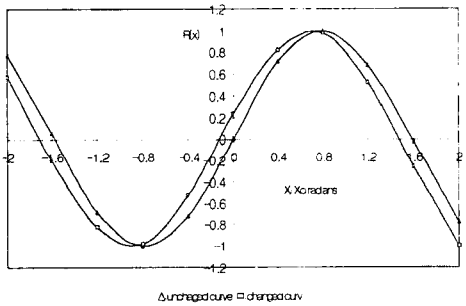

그림 1. Φ 값의 변화에 따른 전달함수의 영향

2.2 광 CT 센서 제작

2.2.1 파장판을 이용한 광 CT 센서

그림 2는 광학 바이어스 소자로 1/2 파장판을 사용하여 제작한 벌크형 광 CT 센서의 구성도 이다. 여기서 파라데이 소자는 온도특성이 양호한 RIG를 사용하였다. 그리고 편광자와 검광자는 입사 광과 출사 광을 90° 각도로 반사시킬 수 있는 편광빔스플리터(PBS) 광학소자를 사용하며 입출력 광의 효율적인 결합을 위해 FC 광 어댑터에 셀폭마이크로렌즈(SML)를 붙여 사용한다.

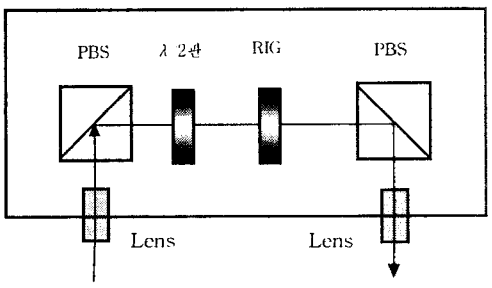

그림 2. 파장판을 이용한 광 CT 구성

2.2.2 검광자를 45° 회전한 광 CT 센서

그림 3은 검광자를 45° 회전한 벌크형 광 CT 센서의 내부 구성을 나타낸 것이다. 센서부 구성 소자는 입력부에 편광기인 PBS, 파라데이 소자인 YIG, 광학 바이어스 소자인 45° 회전자, 그리고 검광자인 PBS로 구성된다. 그리고 결합 효율을 높이기 위해 광 입출력 부에 렌즈가 장착된다. 앞서 선택한 광 소자 및 부품을 이용하여 벌크형 광 CT를 제작하였다. 한 개의 벌크형 광 CT에는 PBS가 두 개가 사용되는데 송광부 에서는 편광기로 수광부 에서는 검광기로 이용된다. SML은 송신측에서는 평행광 형성용으로 수신측에서는 집광용으로 이용되며 양면에 무반사 코팅 처리되어 있다. 광학 바이어스를 걸어주기 위하여 45° 각도로 PBS를 고정할 수 있도록 V홈을 만들어 제작하였다.

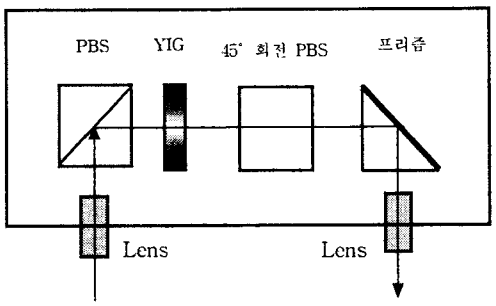

그림 3. 검광자를 45° 회전한 광 CT 구성

2.2.3 광 신호처리부

VCSEL은 850nm 파장대에서 1mW~2mW로 상당히 큰 광 출력을 낼 수 있는 광원이다. 변조지수(m)가 작은 경우 신호검출이 곤란하므로 고감도 포토다이오드를 사용해야 한다. 본 설계에서는 암전류가 10nA이고 감도가 0.4A/W인 PIN-PD를 사용하여 수광회로를 제작하였다. 신호처리 방식은 외부에서 인가한 전류가 없을 때 수신되는 직류성분과 외부 인가자계의 세기에 비례하여 변하는 교류성분을 분리하여 나누는 방식을 채택하였다. 광 CT 센서를 통과하여 수광소자로 되돌아오는 광의 직류성분을 P_0라하고 변조도를 m이라 할 때 출력광은 $P = P_0(1+m) = P_0 + mP_0$ 와 같이 표현할 수 있다. 어떤 외부 영향으로 인하여 광원의 광량이 변화를 일으키면 변화된 량의 직류성분과 함께 교류성분이 같은 비율로 변화하기 때문에 두 값을 나눔($mP_0/P_0 = m$)으로써 P_0에 무관하게 전류 측정이 가능하다.

2.3 벌크형 광 CT 시험 및 특성

전류 발생기로부터 60Hz 교류전류 10A에서 200A까지 인가하고 파장판을 이용한 광 CT의 입출력 특성을 조사하였다. 인가 전류의 크기에 따른 출력의 변화를 측정한 결과 그림 4와 같은 특성이 얻어졌다. 광 CT 센서의 인가전류에 대한 출력전압의 관계를 확인한 결과 10A에서 200A까지는 2.0% 이내의 선형성이 유지됨을 확인하였다. 한편 검광자를 45° 회전한 광 전류 센서에 대한 선형성을 측정하기 위해서 전류 발생기로부터 60Hz 교류전압을 10A에서 200A까지 인가하고 검광자를 45도 회전한 광 CT 센서의 인가 전류의 크기에 따른 출력 변화를 측정한 결과 그림 5와 같은 입출력 특성이 얻어졌다. 10A에서 200A까지 측정오차 ±1% 이내로서 양호한 선형특성이 얻어졌으며 포화특성은 관측되지 않았다.

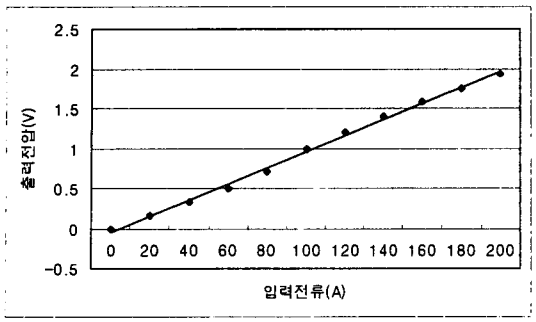

그림 4. λ/2판을 사용한 광 CT 입출력 특성

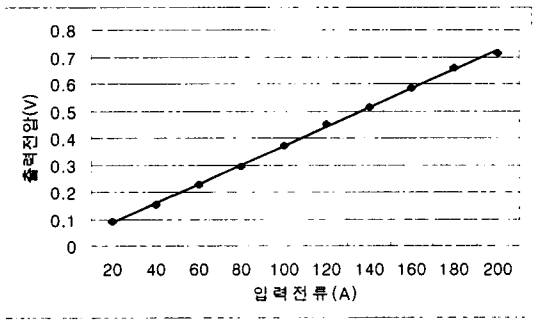

그림 5. 검광자를 45도 회전한 광 CT의 입출력 특성

3. 결 론

벌크형 광 CT 센서 및 수신 신호처리부 성능 개선을 위하여 여러 가지 설계 파라미터를 조사하였다. 두 가지 벌크형 광 CT를 제작 제작하고 광 CT 특성 시험을 행하였다. 1/2파장판을 사용한 광 CT 센서의 경우 10A에서 200A까지는 2.0% 이내의 선형성이 유지되었다. 45° 회전자를 사용한 광 CT의 경우에는 10A에서 200A까지 측정하여 측정오차 ±1% 이내의 양호한 선형성을 보였다. 보다 정확한 센서 성능 검증을 위하여 두 가지 센서 시스템에 대한 보완 시험을 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] 김영수, 임용훈, 현덕화, "고정도 광전류 센서 구현을 위한 파라미터 분석 연구" 2001년도 대한전기학회전기물성 · 응용부문회추계학술대회논문지pp. 265-267. 2001. 11.
[2] 김영수외 "벌크형 광 CT 성능 개선 방안" 한국전력공사 전력연구원 연구보고서 2002. 2.
[3] 김영수외 "벌크형 광 CT 시험 제작 및 성능 평가" 한국전력공사 전력연구원 연구보고서 2002. 2.
[4] EPRI EL-5431, Vol. 1, Project 2748 Final Report, Sept. 1987.
[5] EPRI EL-5431, Vol. 2, Project 2748 Final Report, Sept. 1987.
[7] H. Harms and A. Papp, "Magneto-Optical Current Transformer 3: Measurement", Appl. Opt. Vol. 19, No. 22, 1980.
[8] H. Harms and A. Papp, "Magneto-Optical Current Transformer 3:Measurement", Appl. Opt., Vol. 19, No. 22, 1980.
[9] T. Mitski, et al., "Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic field sensors", IEEE SM442-8, 1986.