

## 페러데이 효과를 이용한 특고압 직류전송용 광전류 센서 구현

김광택<sup>1,+</sup> · 정대원<sup>2</sup> · 김영수<sup>3</sup>

### Implantation of DC Optical Current Sensor Based on Faraday Effect for HVDC

Kwang Taek Kim<sup>1,+</sup>, Dae Won Chung<sup>2</sup>, and Young Soo Kim<sup>3</sup>

#### Abstract

We proposed and demonstrated DC(direct current) optical current sensor based on Faraday effect for HVDC(high voltage direct current). The RIG((Bi1.3Gd0.43Y1.27)Fe5O12) was adopted as Faraday device because of its high Verdet constant and good thermal stability. The differential amplification scheme for signal processing was present. The sensor showed high linear response for the input current. Measurement range of the sensor was 0~200A and measurement error was less than 1%.

**Keywords:** Optical current sensor, RIG, Faraday effect, HVDC

#### 1. 서 론

특고압 직류전송(HVDC)방식은 1998년도에 국내에서 제주도 와 내륙간 300MW용량으로 100 km 구간에 해저케이블 형태로 최초로 상업운전이 시작된 이후에 최근에 HVDC 송전 케이블의 유전체 손실이 거의 없고, 부하전류추종 특성이 우수한 장점을 살려 국내외 도서지역의 전력전송 수단으로 많은 관심과 연구가 진행되고 있으며, 전력전송에 따른 시스템 보호와 운영을 위해 필수적으로 수반되는 전류/전압 측정을 위한 센서의 특고압 직류(HVDC) 전력전송에서 적용을 위해서는 특고압 교류 전력(HVAC) 전송방식에 비해 극복되어야 할 기술의 난제가 남겨져 있다. 특고압 교류전력(HVAC) 전류측정 방식은 변압기 원리를 이용하는 방식이 상용화 되어 있다[1]. 권선 비에 해당되는 정격전류 및 전압으로 강하는 방식을 채택하기 때문에 대전류, 특고압 선로에서 요구되는 특고압 절연 문제와 전류/전압 비

문제는 크게 대두되지 않고 널리 활용되고 있다.

특고압 직류(HVDC) 전력전송방식에서는 교류(AC)전류/전압 측정에 사용되는 변류기(CT)와 변성기(PT)를 동일하게 적용할 수 없기 때문에 새로운 대안을 찾아야 하는데, 자기효과 홀소자 센서에 의한 전류측정 방식을 고려할 수 있다. 자기효과 홀소자 센서는 전류자기장에 의한 홀 효과(Hall effect)를 이용한 전류측정 방식으로 직류 및 교류 전류측정에 공통적으로 활용될 수 있으나, 측정원리상 외부에서 별도의 홀 소자에 전류공급이 필요하여 특고압 송전선로 특성상 홀 센서 전원 공급에 대한 특별한 고려가 필요하다[2-4]. 또한 자기 코어의 포화특성에 의해 측정전류의 선형화가 어렵고 대용량 전력장치에서 온도에 의한 측정오차의 증가와 자화 오차 등은 전력장치의 파손과 손실에 직접적인 영향을 가져오는 온도의 안정성과, 외부자기장과 간섭에 강한 선형화 특성이 우수한 자기코어 소재와 형상 기술의 난점을 극복해야 한다. 한편 광섬유의 자기광학효과를 이용한 전류측정방식이 있으나 광섬유의 자기광학효과가 작아 센서의 부피가 매우 크다는 단점이 있다[5-8]. 한편 자기 광학효과가 우수한 Bulk 소자를 이용한 광 전류센서에 대한 연구도 다수 진행되었으나 주로 교류 전류 측정에 적용되어 왔다.

HVDC 적용을 위해서 선결되어야 할 또 다른 기술적 과제는 전류 센서의 소신호 회로에서 특고압 선로에서 공통적으로 요구되는 고절연체 설계의 고절연체 신뢰도에 문제가 대두된다. 그러나 광 센서는 비접촉 방식으로 전압, 전류를 계측할 수 있어서 특고압 선로에서 요구되는 뇌 서지 절연에 대한 신뢰도를 전혀 떨어뜨리지 않고 계측할 수 있다[6-8]. 이러한 광 전류측정센서는 전력산업설비에서 적용될 뿐만 아니라 폭발 등의 위험 요소가 많은 철광화학 등 산업설비 안전 및 장치보호 분야

<sup>1</sup> 호남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Honam University)

#417, Eodeung-dearo, Gwangsan-gu, Gwangju, Korea

<sup>2</sup> 호남대학교 전기공학과(Department of Electric Engineering, Honam University)

#417, Eodeung-dearo, Gwangsan-gu, Gwangju, Korea

<sup>3</sup> 옴토파워(주)

#218, 226, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: [ktkim@honam.ac.kr](mailto:ktkim@honam.ac.kr)

(Received : Apr. 15, 2019, Revised : May. 27, 2019, Accepted : May. 29, 2019)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에서도 널리 활용되고 있다.

본 논문에서는 높은 자기광학특성을 가지는 RIG를 이용하여 직류 전류를 측정할 수 있음을 제안하고 실험으로 그 가능성을 타진하였다. 물론 RIG의 자기광학효과를 이용하여 교류 전류를 측정하는 방식은 이미 알려져 있지만 직류 전류에 적용한 사례는 알려져 있지 않다. 이 방식으로 직류와 교류 측정방식에서 광학적 방식은 유사하나 신호를 처리하는 방식에서 약간 차이가 있다. 교류 전류 측정 시 광 검출기 출력의 직류와 교류를 필터를 통해서 쉽게 분리가 가능하며 미소한 교류 신호를 증폭하여 원하는 전류 값을 찾을 수 있다. 하지만 직류 전류 측정 시 외부 전류가 가해지면 광 검출기 출력은 직류출력에 약간의 직류 값이 더해지는 출력이 나오는 형태가 된다. 즉 직류 전압에 직류가 더해져서 미소한 변화를 증폭할 수 없는 문제를 가진다. 본 논문에서는 전류를 인가하기 전의 광 검출기 출력과 전류를 가한 후 광 검출기 출력의 차이를 증폭하는 방식으로 신호처리 후 전류를 산출하는 방식을 도입하였다.

## 2. 광 전류센서 설계 및 제작

### 2.1 광 전류센서 원리

광 전류센서는 Faraday 자기광학효과를 이용한 것으로 전류에 의해 발생된 자계 중에서 Faraday 소자를 선형편광 된 레이저 광이 통과할 때 자계세기에 따라 회전된 각도를 검출하여 전류를 측정하는 원리이다. 측정 전류의 크기에 비례하는 편광 회전각은 출력 단에 검광기(analyzer)를 설치하여 이를 통과한 레이저 광신호의 크기변화로부터 측정할 수 있다. 전류의 크기는 Faraday 효과에 의하여 Faraday 회전각 형태로 변환되므로  $\rho$ 를 측정하여 전류 값을 측정할 수 있다.

여기서 각 파라미터의 정의는 아래와 같다.

$$\theta = VHL \cos \phi$$

V : Verdet 상수

L : 광로 길이

H : 자계

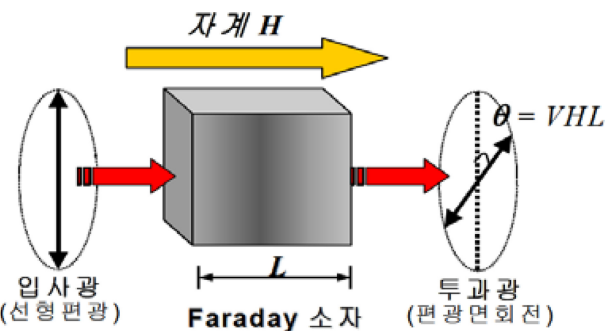


Fig. 1. Polarization rotation induced by Faraday effect in Faraday device.

$\phi$  : 광과 자계가 이루는 각

Fig. 1과 같은 광학적 기능을 달성한 광 전류센서의 구조는 Fig. 2와 같다. 그림 광 경로상에서 손실이 없다고 가정하면 편광기를 통해 나오는 광 출력( $P_s$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$P_s = P_{in} \sin^2(\theta + \pi/4) = (1/2)P_{in} (1 + \sin(2\theta)) \quad (1)$$

광검출기(PD)를 통해 전기 신호로 변환되어 자계의 세기(H)에 비례하는 출력 전압을 연산하게 된다. 광 검출기 출력 전압  $V_s$ 은 광출력  $P_s$ 에 비례하며 다음과 같이 된다.

$$V_s = (KP_{in} (1 + \sin(2\theta))) \quad (2)$$

여기서 K는 광 검출기 광전 변환 계수이다. 만일  $\theta$ 가 매우 작을 경우에는 출력 전압은 회전각( $\theta$ )에 비례하게 된다. 따라서  $\theta = VHL \cos \phi$ 의 관계를 가지므로 출력 전압( $V_s$ )은 인가 자계의 세기(H)와 비례하게 된다. 한편 피 측정 자계를 교류 자계로 한정시키면 한 개의 광 출력만을 사용하여 광 신호-전기 신호 변환한 후, 전자회로에 의해 교류 성분과 직류 성분을 분리하여 신호처리과정을 거치면 자계의 세기(H)에 비례하는 출력전압을 얻을 수 있다[9].

하지만 본 논문에서는 직류 자계를 측정하는 것이 목적이며 아래 광 검출기 출력 두 개의 성분이 모두 직류성분이기 때문에 분리하기 힘들다

$$V_s = KP_{in} + KP_{in} \sin(2\theta) \quad (3)$$

식3에서 두 번째 항은 첫째 항에 비해 매우 작은 신호이며 증폭이 필요하다.  $V_s$  신호를 그대로 증폭하면 첫째 항 성분에 의해 증폭범위가 제한된다. 본 논문에서는 첫째 항 신호를 제거하거나 줄여서 증폭하고 그림 2와 같이 광원출력 일부를 출력을 광 커플러(optical coupler)로 나누어 일부 광 출력을 광 검출기를 나온 전기신호를 통해 기준 신호( $V_{ref}$ )로 활용하였다. 즉 최종출력은  $V_s$ 와  $V_{ref}$ 를 차동 증폭하는 방식을 도입하여 식(3)의 첫 번째 항 성분을 제거 혹은 줄여서 증폭하는 방법을 도입하였다.

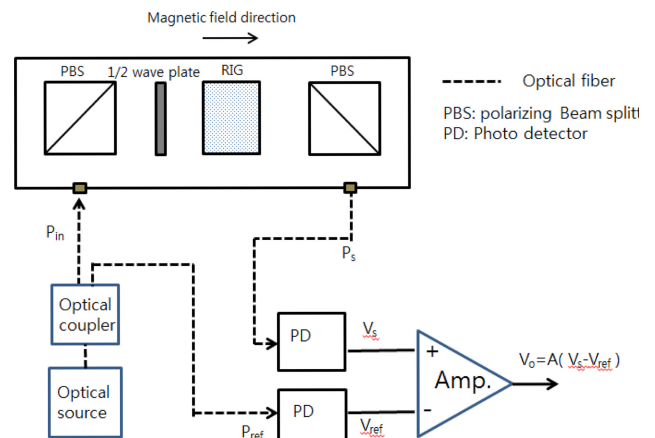


Fig. 2. Schematic structure of proposed optical current sensor.

### 2.2 광 전류센서 설계 및 제작

Fig. 3은 제작된 광 전류센서 사진이다. 광케이블 두 가닥 중 한 가닥은 센서 부에 광을 보내는 송신용으로, 나머지 한 가닥은 신호 광 검출기(photo detector)로 광을 내보내는 수신용으로 사용된다. 사용한 광섬유는 코어 반경이 62.5  $\mu\text{m}$  인 다중모드 광섬유이다. 광원은 850 nm 빅셀 광원을 이용하였다.

센서부에서 나오는 광 출력을 Ps 광섬유로부터 나온 광 출력은 전기 신호로 변환되어 자계의 세기(H)에 비례하는 출력이 나온다.

Table 1은 광 전류센서 제작에 사용된 부품의 재질과 기능을 나타내고 있다. Faraday 소자로 선택된 RIG는 Verdet 상수가 크고 온도 안정성이 우수한 새로운 재료인 강자성체 YIG 계열의 희토류 첨가 (BiGdY)3Fe5O12로 구성된 현존하는 Faraday 소자 중 가장 열에 안정적인 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

Figure 4는 두 개의 광 검출기로부터 받은 신호를 차동 증폭 및 신호처리 위한 회로도이다.

Figure 5는 제작된 소자의 특성을 평가하기 위한 장치도이다. 본 논문에서는 직류 200A까지 인가할 수 있는 Regulated DC power supply(BRP-5100)을 이용하여 제작한 광 전류센서 특성을 측정하였다. 인가전류에 대한 최종 출력 전압( $V_o$ )을 Table 2에 나타나 있다. 인가전류 0(A)부터 200(A)까지 범위에서 15(A) 간격으로 인가 전류와 출력전압 관계는 Figure 5로부터 알 수 있듯이 선형적인 관계를 보인다.



Fig. 3. Fabricated optical current sensor.

Table 1. Material and function of the optical devices

Item	Material and spec.	Remark
Faraday device	RIG((Bi1.3Gd0.43Y1.27)Fe5O12)	Garnet device
Polarizer and analyzer	Polarizing Beam Splitter	PBS
Wave plate	$\lambda/2$ Plate	Optical Bias
Lens	SLH-2.0 mm $\Phi$ , 0.25P	Selfoc Lens

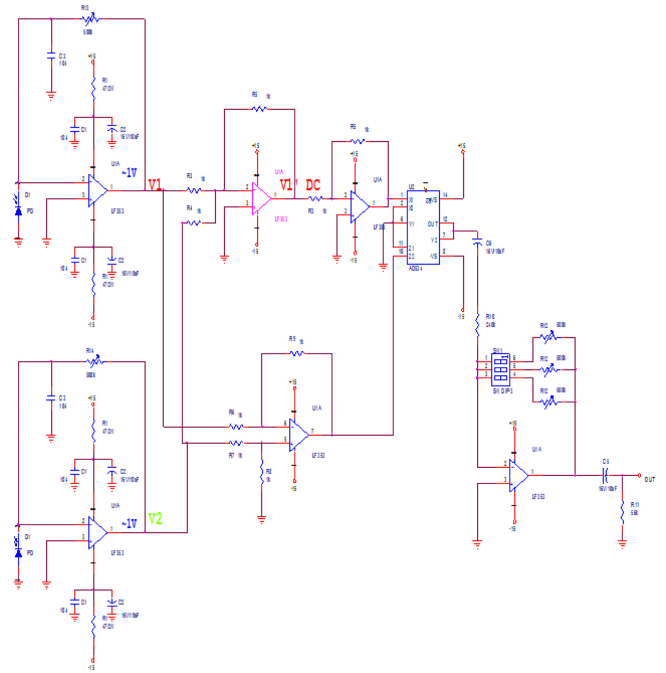


Fig. 4. Electronic circuit for signal processing.

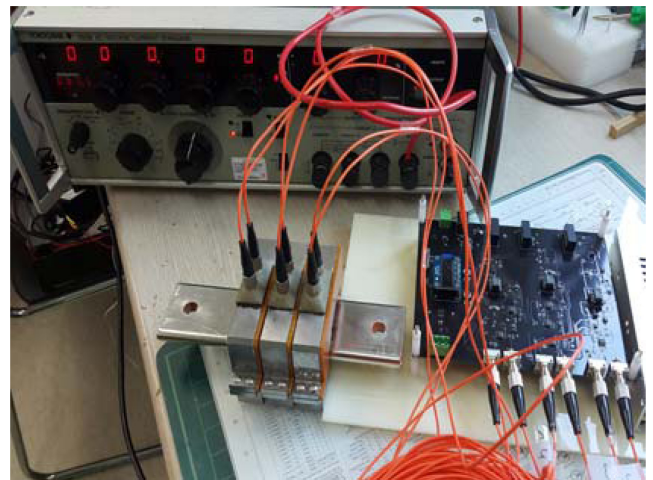


Fig. 5. Experimental set-up for measuring the performance of current sensor.

Figure 5. Applied DC current Vs. Output voltage ( $V_o$ ).

인가전류(x)와 출력 출력전압(y)의 관계는 다음과 같은 다항식으로 주어진다.

$$y = -2.8081x^2 + 177.15x - 413.99 \quad (4)$$

Table 2는 식(2)를 이용하여 광 검출기 신호와 인가관계식을 이용하여 산출하여 신호 처리부가 표시하는 전류 값을 비교한 결과를 보여주고 있다. 최대오차는 1% 이내임을 알 수 있다.

**Table 2.** Applied current Vs. acquired current value after signal processing.

Applied current(A)	Output voltage(V)	Displayed current(A)
0	2.430	0
15	2.520	15
30	2.620	31
45	2.710	46
60	2.790	59
75	2.890	75
90	2.990	91
105	3.080	106
120	3.166	120
135	3.257	134
150	3.355	150
165	3.450	165
180	3.545	180
200		

### 3. 결 론

본 논문에서는 HVDC 적용을 위한 Faraday 효과를 이용한 광 전류센서를 제작하고 가능성을 확인하였다. Faraday 효과를 이용한 AC전류 측정 사례는 보고되었지만 DC 전류 측정 사례는 처음보고 되는 사례라는 점에서 의미가 있다고 사료된다. 검광 방식은 기본 직류 광 성분에 추가로 변화된 직류 성분이 발생하므로 신호처리에서 기준신호와 차동 증폭으로 피 측정전류를 산출하여 계산함으로써 전류를 측정할 수 있는 방식이다. 실험 결과 제안된 방식으로 전류 0~200A까지 측정 가능함을 알 수 있었다.

본 논문을 통하여 DC 광 전류센서가 정상 동작하는 것을 확인하였지만, 그 특성이 광섬유 구부림에 의한 손실에 민감하게 작용하는 하는 만큼 이에 대한 보완이 향후 보완되어야 할 것으로 생각된다. 물론 본 논문에서는 장기간 신뢰특성을 분석하기 위한 반복 실험은 수행하지는 못하였다. 제안된 센서는 주위 온도 변화에 따라 출력광의 흔들림이나 소자의 특성이 온도에

따라 바뀔 수 있는 문제 등을 개선하여 추후 상용화 단계수준의 센서를 개발할 계획이다.

### 감사의 글

본 논문은 한국전력공사 사외공모 기초연구과제의 지원으로 수행 되었습니다. 과제번호[R17XA05-72]

### REFERENCES

- [1] <https://www.devicemart.co.kr/> (retrieved on May. 30, 2019)
- [2] J.-G. Park, G.-S. Cha, and M.-H. Ku, "Design and fabrication of a 300A class general-purpose current sensor", *J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc.*, Vol. 17, No. 6, pp. 1-8, 2016.
- [3] C. Antonio and D. Cara, "Hall effect current transducer characterization under nonsinusoidal conditions", *2009 IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, Vol. 2009, pp. 98-103, Singapore, Singapore, 2009.
- [4] C. Antonio, D. Cara, D. Emanuel, A. E. Nuccio, Salvatore, "Improvement of Hall Effect Current Transducer Metrological Performances in the Presence of Harmonic Distortion", *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, Vol. 59, No. 5, pp. 1091-1097, 2010.
- [5] C. Xiangxun "Fiber-optic current/voltage transducer for power system", *Precis. Electromagn. Meas. Dig. Conf.*, pp. 567-568, Braunschweig, Germany, 1996.
- [6] T. Mitski. K. Hosoe, H. Usami, and S. Miyamoto, "Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic field sensors", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 2, No. 1, pp. 87-93, 1987.
- [7] A. Papp and H. Harms, "Magneto-Optical Current Transformer", *Appl. Opt.*, Vol. 19, No. 22, pp. 3729-3734, 1980.
- [8] T. W. Cease and P. Johnston, "Magneto-Optical Current Transformer", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 5, No. 2, pp. 548-555, 1990.
- [9] N. Y. Jung, P. S. Chio, J. J. Eun, and H. S. Park, "A study on the fabrication of polarimetric fiber optic current sensor", *J. Inst. Electron. Eng. Korea*, Vol. 4, No. 6, pp. 443-451, 2004.