

**페러데이 효과를 이용한 광섬유형 전류센서**

양 창순, 송 민 호, 안 성 준\*, 박 병 석\*, 이 병 호\*\*  
 전북대학교 전자정보공학부, \*전력연구원 전력계통연구실, \*\*서울대학교 전기공학부

**Fiber Optic Current Sensor Using Faraday Effect**

C. Yang, M. Song, S.J. Ahn\*, B.S. Park\*, B. Lee\*\*  
 Chonbuk National University, \*KEPRI, \*\*Seoul National University

**Abstract** - Fiber-optic current sensor was developed using the Faraday effect to measure the electrical current on high-voltage lines. A twisted single-mode optical fiber was used as a sensor coil to suppress birefringence effect, enhancing performance against environmental perturbations. In this paper, we report the basic design considerations and the preliminary experimental results carried out in the 1000 A input current range.

데이 회전각  $\rho$  만큼 회전한다.

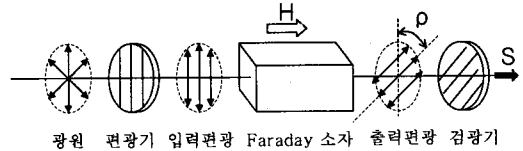


그림 1. 광전류센서의 원리.

**1. 서 론**

디지털 제어 및 통신기술 등을 이용하는 변전소의 자동화·무인화는 비용절감을 실현하고 동시에 전력계통의 전반적인 신뢰도를 높일 수 있다. 이와 관련하여 기존의 전자계식 센서와 달리 광학적 이론을 사용하는 광 전류센서에 대한 관심이 고조되고 있는데 이는 광 전류센서가 기존의 철심코어형 전자계식 전류계(CT, current transformer)에서 발생하는 자기포화 와 잔류자기 등에 따른 출력의 변화를 겪지 않기 때문이다. 또한 광섬유로 센서코일을 구성하는 경우 광섬유의 절연성에 의하여 센서구조의 소형·경량화가 가능하고, 페루프형 구조이므로 측정대상체 이외의 신호나 잡음 등에 따른 출력의 영향을 받지 않을뿐더러 센서코일의 회전수를 조절하여 측정범위와 민감도를 자유롭게 조절할 수 있는 등의 장점을 갖는다. 본 연구에서는 비틀린 광섬유와 FRM (Faraday rotator mirror)를 사용한 센서코일을 이용하여 온도나 진동 등의 환경적인 영향에 대해서 안정적으로 동작할 수 있는 광섬유형 전류센서를 구성하였고 기존 전류원을 사용하여 0~1000 A 입력전류 범위에 대한 전류측정 실험을 행하였다. 본 논문은 광 전류센서의 측정원리와 광섬유의 선형복굴절에 의한 출력의 변화, 그리고 이를 해결하기 위하여 시스템에 적용한 방법을 소개하고, 전류측정 실험에 대한 결과를 보고한다.

편광기와  $\pm 45^\circ$ 의 각을 이루는 검광기를 통하여 광신호를 검출하고 이를 신호처리할 경우, 다음과 같은 출력 S를 얻을 수 있다.

$$S = \sin 2\rho, \quad \rho = VHL \cos \theta = VnI$$

( $\rho$  = 페러데이 회전각,  $V$  = Verdet 상수,  $H$  = 자기장의 세기,  $L$  = 광섬유의 길이,  $\theta$  = 광신호와 자기장이 이루는 각,  $n$  = 센서코일의 회전수,  $I$  = 측정전류).

페러데이 회전각은  $\rho = VHL \cos \theta$  이나 광섬유를 페러데이 소자로 사용하여 페루프를 구성할 경우 암페어의 법칙에 의하여  $\rho = VnI$ 와 같이 단순화된다. 광섬유의 Verdet상수는 1310 nm 파장에 대하여  $V \approx 1 \mu\text{rad/A}$ 로 매우 작은 값이지만 센서코일의 회전수를 조절하여 민감도와 측정범위를 조절할 수 있다.

기술한 광 전류센서의 동작은 이상적인 상황을 가정한 것이며 실제의 경우에는 광섬유 내부의 선형복굴절과 진동 및 온도변화 등의 환경적 요인에 따라 그 출력이 크게 영향을 받게 된다. 그림 2와 같이 선형편광으로 입사한 입력광신호(a)는 Faraday 효과에 의하여 그 진동축이 회전하고(b) 이 회전각을 감지하여 전류를 측정하는 것이나 광섬유 내부의 선형복굴절로 인하여 선형편광이 유지되지 않으므로(c) 기술한 전류센서의 동작이 이루어지지 않게 된다.

**2. 본 론**

**2.1. 페러데이 효과와 선형복굴절의 영향**

자기장의 영향하에서 자성체 매질을 통과하는 빛은 자기장의 세기에 따라 편광의 진동축이 회전하게 되며 이를 페러데이 효과(Faraday effect)라 한다. 광섬유의 재료인 SiO<sub>2</sub>(silica glass)도 페러데이 현상을 보이는 데, 광섬유를 도선 주위에 감고 이를 통과한 편광의 진동축 변화를 검지하여 도선에 흐르는 전류의 양을 측정할 수 있다. 그림 1은 페러데이 효과와 이를 이용한 광 전류센서의 원리를 보인다. 광원으로부터 나온 빛은 편광기를 통과하여 선형편광 되어지며 페러데이 소자(광섬유)를 진행하는 동안 자기장의 영향으로 편광축이 페러

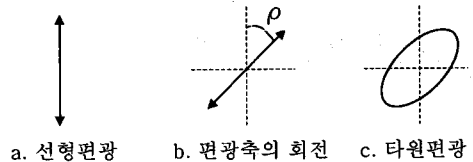


그림 2. 편광의 변화.

이와 같이 선형복굴절에 의하여 왜곡된 시스템의 출력은 다음과 같은 선형복굴절의 함수로 표현되며 환경적 요인에 의하여 선형복굴절의 양이 변화하는 경우 출력의 변화로 이어지게 된다.

$$S = 2\rho \frac{\sin\phi}{\phi}, \quad \phi = \sqrt{\delta^2 + (2\rho)^2}$$

( $\rho$ : 페러데이 회전각,  $\delta$ : 선형복굴절에 의한 위상지연) 따라서 안정된 센서출력을 얻기 위해서는 선형복굴절의 영향을 최소화하여야 하고 이를 위하여 광섬유 코일의 높은 온도로 열처리하는 방법<sup>(1)</sup>과 광섬유의 제조과정에서 원형복굴절을 유도시킨 스펀(spun)광섬유를 사용하는 방법<sup>(2)</sup> 등이 있다. 본 연구에서는 광섬유를 비틀어 높은 수치의 원형복굴절을 유도하는 방법<sup>(3)</sup>과 센서코일의 한쪽 끝에 FRM을 부착하는 방법<sup>(5)</sup>을 동시에 사용하여 선형복굴절에 의한 영향을 효과적으로 제거할 수 있게 하였다.

## 2. 2. 실험 및 고찰

그림 3은 구성된 광섬유형 전류센서의 개략도이다. 광원은 1310 nm 중심파장의 다중모드 레이저 다이오드(LD, laser diode)를 사용하였다. 광원으로부터의 빛은 선형편광기를 통과하여 선형편광 상태로 센서코일에 입사하고 센서코일 끝단의 FRM에서 반사된다. 반사된 빛은 센서코일을 다시 거친 후 입력 편광과  $\pm 45^\circ$ 의 각을 이루는 검광기(polarization beam splitter)를 통하여 두 개의 직교 편광성분으로 나뉘어 검출된다.

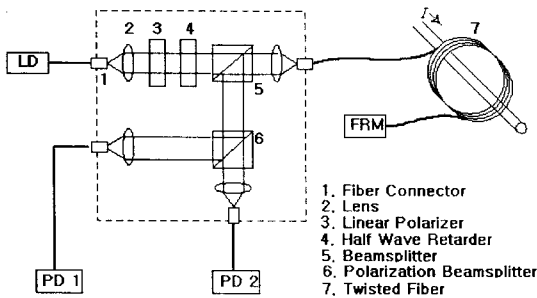


그림 3. 광섬유형 전류센서의 개략도.

표 1. 실험에 사용된 센서코일의 구성.

단일모드 광섬유	: 코어(10 $\mu\text{m}$ ), 클래딩(125 $\mu\text{m}$ )
센서코일의 회전수	: 50 turns
비틀림 정도	: 24 twists/m
센서코일의 지름	: 7 cm

표 1은 실험에 사용된 센서코일의 구성이다. 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 비틀어 제작하였으며 한 쪽 끝단에 FRM을 부착하였다. FRM은 코일을 왕복한 광신호의 직교 편광성분간 위상차를 제거하여 선형편광을 유지시키는 역할을 한다. 제작된 센서코일을 기준 전류원에 장착한 후 전류측정실험을 행한 결과로 그림 4와 같은 센서출력의 오실로스코프 파형을 얻었다. 그림에서 PD<sub>1</sub>, PD<sub>2</sub>의 두 신호는 180°의 위상차를 가지므로 이론적인 해석과 같이 페러데이 효과에 의한 편광변화에 따른 신호임을 알 수 있다. 두 신호를 아래와 같이 연산할 경우 페러데이 효과는 배가 되고 노이즈 성분은 서로 상쇄하여 출력의 신호대 잡음비를 증가시킬 수 있으며 또한 광원의 출력변화나 광 연결 손실의 변화 등에 따른 센서출력의 변화를 막을 수 있다.

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\rho \approx 2\rho$$

( $I_1, I_2 = \text{PD}_1, \text{PD}_2$ 에서 검출된 출력).

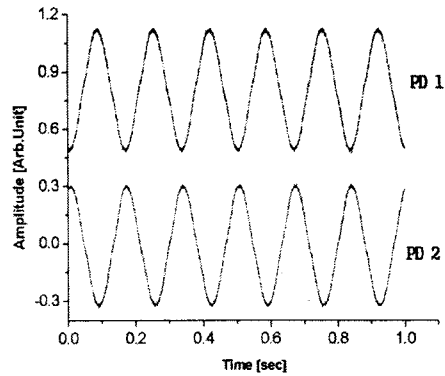


그림 4. 광 전류센서의 출력 파형.

그림 5는 이러한 신호처리를 통하여 얻은 광 전류센서의 최종 출력에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼이고 인가전류의 주파수 60 Hz가 복원됨을 알 수 있다.

그림 6은 0~100 Arms의 입력전류에 대한 센서출력과 이에 대한 linear fit의 결과이다. 측정범위에 대해서 매우 선형적인 특성을 보이고 있으며 약간의 오차는 전기적인 노이즈에 따른 측정오차에 의한 것이다.

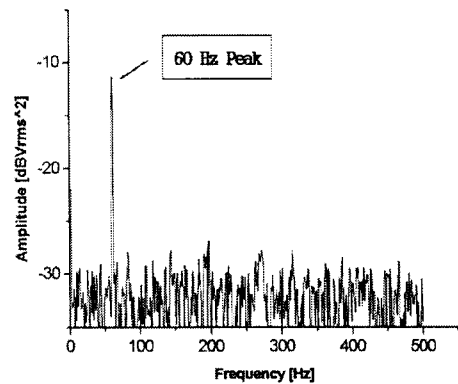


그림 5. 출력파형의 FFT 스펙트럼.

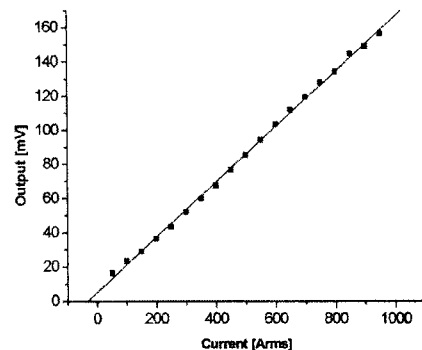


그림 6. 인가전류에 따른 출력의 변화.

### 3. 결 론

비틀린 광섬유로 제작한 센서코일을 이용하여 광 전류 센서를 구성하고 기준 전류원을 이용한 전류측정 실험을 행하였다. 0~1000 Arms 범위의 입력전류에 대하여 이론적인 해석과 동일한 실험결과를 확인하였으며, 비틀린 광섬유와 FRM의 영향으로 선형복굴절의 영향을 억제할 수 있음을 보였다. 현장적용을 위한 설계보완과 다양한 형태의 실험이 진행중이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day, and S. M. Etzel, "Annealing of linear birefringence in single mode fiber coils: Application to optical fiber current sensors," J. Lightwave Technol., vol. 9, no. 8, pp. 1031-1037, 1991.
- [2] R. I. Laming and D. N. Payne, "Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers," J. Lightwave Technol. vol. 7, no. 12, pp. 2084-2094, 1989.
- [3] S. C. Rashleigh and R. Ulrich, "Magneto-optic current sensing with birefringent fibers," Appl. Phys. Lett., vol.34, no. 11, pp. 768-770, 1979.
- [4] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," Appl. Opt., vol. 18, no. 13, pp. 2241-2251, 1979.
- [5] R. Ulrich, S. C. Rashleigh, and W. Eickhoff, "Bending-induced birefringence in single-mode fibers", Opt. Lett., vol. 5, no. 6, 1980.