Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.1, pp. 135~141 March 2004 논문 18-2-19

비틀린 광섬유 센서코일을 이용한 편광분석형 광섬유 전류센서

(Polarimetric fiber-optic current sensor system using a twisted fiber sensing coil)

김기혁 · 송민호*
(Kee-Hyuck Kim · Minho Song)

요 약

보호계전 시스템의 전류센서로 사용할 목적으로 편광분석형 광섬유 전류센서를 개발하였다. 광섬유의 선형복굴절에 의한 출력의 왜곡을 최소화하기 위하여 단일모드 광섬유를 미터 당 20회 이상 비틀고 그 끝단에 FRM(Faraday rotator mirror)을 부착하여 센서코일을 제작하였다. 광섬유 센서코일의 비틀림 정도를 달리하며 다양한 환경에서의 전류측정 실험을 행하였다. 실험결과로부터 광섬유 센서코일이 진동 등의 환경적 노이즈를 효율적으로 차단함을 알 수 있었으며 ±3% 이내의 시스템 출력안정도를 얻었다.

Abstract

We developed a polarimetric fiber-optic current sensor system for protective relaying usage. A fiber sensing coil that consisted of a length of twisted fiber and a FRM (Faraday rotator mirror) was used in order to suppress the linear birefringence effect. From the experiments with various sensing coil configurations and environmental conditions, the proposed current sensor system showed feasibility of suppressing environmental noises, and the obtained measurement stability was less than ±3% at rated primary current.

Key Words : Polarimetric fiber-optic current sensor, Twisted fiber, Linear birefringence

1. 서 론

현전력설비는 갈수록 대용량화, 자동화되는 추세이며 산업전반에 미치는 영향력이 매우 크므로 안정적인 전력공급을 위한 보호계전 시스템(system protection)의 역할은 매우 중요하다. 보호계전 시스템의 기본 목적은 전력계통의 운용 중에 발생하는 여러 형태의 자연적, 인적요인에 의한 계통사고를 신속히 감지하고 사고부분을 분리하여 전력공급이 중단되는 범위와 시간을 최소화하여 피해를 줄이는 것이다.

계통사고의 발생은 여러 가지 물리량의 변화를 가져오는데 과전류, 과전압 혹은 저전압 전력, 역률, 위상각, 전력 혹은 전류의 방향, 임피던스, 주파수, 온도, 압력 등이 그것이다. 이중 가장 흔한 증상은 갑작스럽게 매우 큰 값으로 증가하는 전류 치이며 이것이 과전류보호계전기가 가장 널리 사용되는 이유이다. 일반적인 보호계전시스템은 이상전류를 측정하는 전류센서와 두뇌역할을 하는 보호계전기(protection relay), 그리고 고장부위를 계통으로부터 분리하는 차단기(circuit breaker)로 이루어지는데, 전

* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 조교수
Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394
E-mail : msong@moak.chonbuk.ac.kr
접수일자 : 2003년 11월 13일
1차심사 : 2003년 11월 21일
심사완료 : 2003년 12월 11일

류센서는 보호계전 시스템이 제대로 동작하기 위한 정보를 제공하는 역할을 한다. 계통감시용 전류센서로서 가장 많이 사용되고 있는 전자계식 전류센서(CT, current transformer)는 철심 코어에 권선을 감아 2차 전류로부터 계통 전류를 측정하는 구조인데 오랜 기간 성공적으로 운용되어 왔으나 갈수록 고전압, 대용량화되는 추세에 비추어볼 때 기능적, 구조적인 약점을 갖는다. 첫째는 CT 철심코어(iron core)의 자속포화나 잔류자속에 의한 2차측 출력의 왜곡현상으로 정확하고 빠른 보호계전이 이루어지지 않는 장애요인으로 작용한다. 둘째는 고전압, 대전류가 될수록 CT의 절연을 위한 부대시설의 크기가 급격히 커지며 절연 gas나 oil 등에 의한 환경적인 문제가 대두되고, 취급의 편이성과 안전성, 운용의 경제성 등이 급격하게 저하된다는 것이다. 그러나 광학적 계측이론을 적용한 광섬유 전류센서는 광섬유의 절연성에 의하여 전류계측 시스템의 소형·경량화가 가능하여 절연 비용을 크게 줄일 수 있고 취급의 안전성, 편이성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 철심을 사용하지 않는 구조에 의하여 자기포화나 잔류자속 등의 문제에서 자유롭다[1].

광섬유 CT의 많은 장점에도 불구하고 실용화가 늦어진 것은 광섬유의 선형복굴절이 광신호의 선형편광을 변형시켜 안정적인 출력을 얻기가 어렵기 때문이며 이 영향을 최소화하기 위한 방안으로 광섬유 센서코일을 열처리하거나[2], spun 광섬유[3], Flint glass 광섬유[4] 등을 이용하여 코일을 제작하는 다양한 방법들이 발표되어 왔다. 본 논문에서는 광섬유 전류센서의 출력과 안정성에 영향을 미치는 선형복굴절 효과를 최소화하기 위하여 비튼 광섬유와 FRM (Faraday rotator mirror)을 이용하여 만든 센서코일로 광 CT를 제작하였으며 진동과 같은 환경적 노이즈를 가하면서 다양한 전류측정 실험을 행하였고 그 결과를 보고하고자 한다.

2. 동작 이론

광섬유 CT는 Faraday 효과를 검출하는 방식에 따라 편광분석형(polarimetric)과 간섭계형(interferometric)으로 구분할 수 있다. 편광분석형은 Faraday 회전각을 검광기를 통과한 빛의 세기변화로부터 알아내는 방식이며[5] 간섭계형은 Faraday 효과에 의하여 발생한 위상차를 Sagnac 간섭계를 이용하여 분석하는 방식이다[6]. 간섭계형은 광섬유 자이로스코프의 측정원리와 거의 동일하여 매우 정밀한 측정을 할 수 있으나 구성이 복잡하고 비용이 큰 반면 편광분석형은 간단한 구조로 대전류의 측정이 용이하므로 본 논문에서는 보호계전용에 적합한 편광분석형 광섬유 전류센서를 구성하였다. 그림 1과 같이 광섬유를 따라 진행하는 선형편광은 자기장에 의하여 그 진동축이 회전하게 되며 이 때의 Faraday 회전각은 다음 식 (1)과 같다.

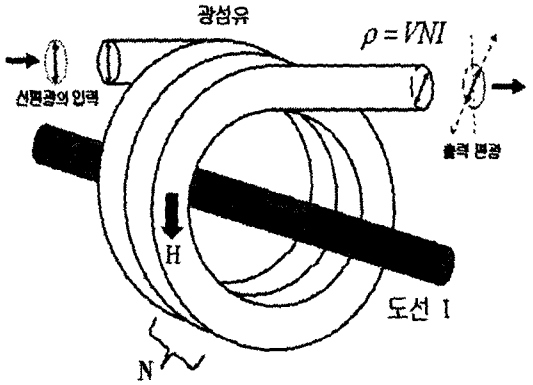

그림 1. 광섬유 CT의 기본 동작
Fig. 1. Fundamental Operation of fiber-optic CT

$$\rho_F = u_0 V \oint H \cdot dl = u_0 VNI \qquad (1)$$

(u_0: faraday 매질의 유전율, V: Verdet 상수,
N: 광섬유의 감은 수, I: 전류)

Vetdet 상수 u_0V(rad/A)는 광학 매질이 자기장에 반응하여 Faraday 효과를 일으키는 정도를 나타내는 값으로 일반적으로 V(rad/A)로 표현하며 광섬유의 재료인 실리카(SiO_2)는 1310[nm] 파장에서 약 1 urad/A 정도의 Verdet 상수를 갖는다. 따라서 Faraday 회전각은 매우 작은 값이지만 센서코일의 감은 수를 조절하여 원하는 민감도를 확보할 수 있다. 편광분석형의 경우 출력단에 검광기(analyzer)를 두어 이를 통과한 광신호의 크기 변화로부터 편광 축

회전각을 측정할 수 있다. 이 과정을 Jones Matrix를 이용하여 표현하면 식(2)와 같이 정리된다[7].

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = P(\theta)F(\rho)P(0)\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix},$$
$$P(0)=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F(\rho)=\begin{bmatrix} \cos\rho & \sin\rho \\ -\sin\rho & \cos\rho \end{bmatrix} \quad (2)$$
$$P(\theta)=\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

P(0), F(ρ), P(θ)는 각각 x축에 평행한 편광기, 광섬유에 의한 Faraday 효과, 입력편광에 대하여 θ의 각을 가지는 검광기에 대한 Jones Matrix 표현이다. 그림 2는 식 (2)에서 기술한 광 전류센서의 전달함수를 도시한 것으로 코사인 함수의 형태이므로 Faraday 회전각에 대해서 비선형적인 출력특성을 보이지만 입력 편광과 검광기의 각도 θ=±45°에서는 작은 크기의 편광각 변화에 대해서 거의 선형적인 출력과 교류전류에 Faraday 회전각이 변조되어 같은 주파수의 출력을 얻을 수 있으므로 이 각도에 동작점을 두어 출력을 얻게 된다.

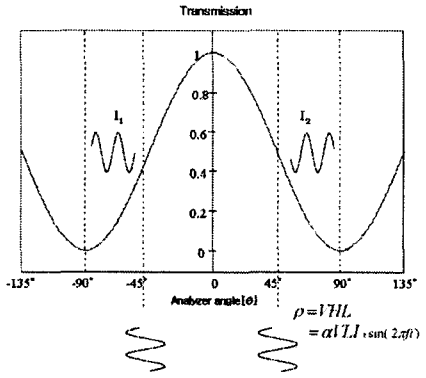

그림 2. 편광분석형 광 전류센서의 전달함수
Fig. 2. Transfer function of polarimetric fiber-optic CT

3. 선형 복굴절의 영향

광섬유 전류센서 실용화의 가장 큰 어려움은 광섬유의 선형 복굴절에 의한 출력의 왜곡과 안정성 저하이다. 광섬유 코어는 제조 시 발생하는 비등방성이나 구부림이나 온도, 진동 등의 외부적인 요인에 의하여 두 축의 굴절률 차를 가지게 되며 이에 따라 두 편광 축 간의 위상차가 식 (3)과 같은 크기로 발생한다.

$$\delta=\frac{2\pi}{\lambda} l\Delta n \quad (3)$$

(δ: 위상 지연에 의한 선형복굴절, l: 광 경로 길이, Δn: 두 축의 굴절률 차, λ: 중심파장)

선형복굴절의 영향으로 광 신호는 선형 편광을 유지하지 못하고 타원형이나 원형 편광으로 변하여 센서의 민감도를 저하시키고 출력신호를 왜곡시킨다. 선형복굴절이 없는 이상적인 경우의 Faraday 효과는 식 (2)의 F(ρ)와 같으나 선형 복굴절이 있는 경우는 다음 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$M=\begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}$$
$$A=\cos(\phi/2)+j\sin(\phi/2)\cos\chi, \quad (4)$$
$$B=\sin(\phi/2)\sin\chi,$$
$$\phi=\sqrt{\delta^2+(2\rho)^2},\ \tan\chi=2\rho/\delta$$

식(2)에 F(ρ)대신 M을 대입하고 입사편광과 검광기 사이의 각 θ=±45°를 대입하여 연산하면 다음 식과 같이 된다.

$$I_1(\theta=45^\circ)=\frac{E_{x,in}^2}{2}(1+\sin\phi\sin\chi), \quad (5)$$
$$I_2(\theta=-45^\circ)=\frac{E_{x,in}^2}{2}(1-\sin\phi\sin\chi)$$

편광 빛 가르개(PBS, polarization beam splitter)를 사용하면 θ=±45°에 해당하는 두 PD 신호 I1, I2를 동시에 얻을 수 있으며 간단한 연산을 통하여 식(6)

과 같은 출력을 얻는다.

$$S=\frac{I_1-I_2}{I_1+I_2}=2\rho\frac{\sin\phi}{\phi}, \qquad (6)$$
$$\phi=\sqrt{\delta^2+(2\rho)^2}$$

선형복굴절 δ의 값이 0일 때 이상적인 경우와 동일한 출력을 얻지만 δ의 값이 커질수록 그림 3과 같이 시스템의 출력은 sinc 함수의 형태로 변화하여 정확한 측정을 할 수 없게 된다.

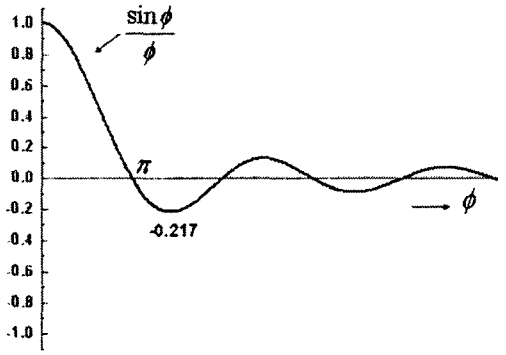

그림 3. 선형 복굴절에 의한 출력 왜곡.
Fig. 3. Output reduction according to linear birefringence.

따라서 선형 복굴절을 제거하는 것이 안정적인 전류센서 동작의 기본 조건인데 효과적인 방법으로는 광섬유 센서코일을 제작한 후 높은 온도로 열처리하는 방법(annealed fiber)[2], 광섬유의 제조 과정에서 높은 원형복굴절을 인가한 spun 광섬유[3], 광섬유에 납을 첨가하여 선형복굴절을 최소화한 flint glass 광섬유[4], 또는 광섬유 제조 시 코어의 비등방성을 최소화한 저복굴절(low-birefringence) 광섬유를 사용하는 방법들이 있다. 본 논문에서는 쉽게 구할 수 있는 일반 광통신용 단일 모드 광섬유를 비틀어 선형복굴절의 영향을 최소화하는 방법을 사용하였다. 광섬유의 비틀림은 스트레인에 의한 optical activity를 발생시켜 Faraday 효과와 같은 형태의 원형 복굴절을 일으킨다[6]. 식(6)에서 광섬유를 비틀어 높은 원형복굴절을 유도하면 ,즉 2ρ >> δ (선형 복굴절의 영향이 비틀림으로 유도된 원형복굴절에 비하여 무시할 만한 양이라면)이 되면 출력은 선형복굴절이 없는 경우와 같은 2ρ의 값으로 근사될 수 있다.

4. 전류측정 실험 결과 고찰

그림 4는 제작한 편광분석형 광섬유 전류센서의 개략도이다. 광원은 1310[nm] 중심파장을 갖는 Fabry -Perot 다중모드 레이저 다이오드(laser diode, 이하 LD)를 사용하였다. LD 출력은 선형 편광기와 반파장판을 통과시켜 검광기로 사용된 편광빛가르개와 ±45°의 편광각을 이루도록 조절하였다. 센서 코일은 미터 당 20회 비틀어 제작한 광섬유를 40회 감았으며 민감도를 높이고 광섬유내의 잔존 선형복굴절을 제거하기 위하여 코일의 한쪽 끝에 FRM(Faraday rotator mirror)을 부착하여 반사형으로 제작하였다.

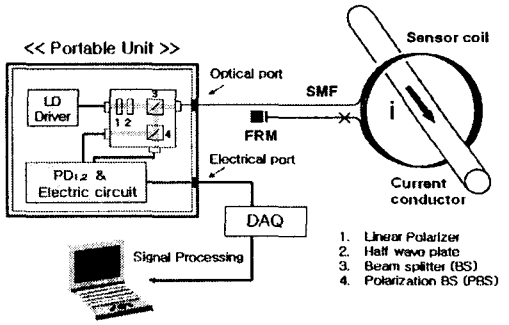

그림 4. 편광분석형 광섬유 전류센서의 개략도
Fig. 4. Configuration of Polarimetric fiber-optic CT

비틀림에 의하여 유도된 원형복굴절은 빛의 진행 방향에 따라 부호가 바뀌는 가역적 현상이고 Faraday 회전각은 빛의 진행 방향에 무관한 비가역적 현상이므로 반사형 센서코일은 원형복굴절의 영향을 상쇄시키고 Faraday 회전각은 배가 시킨다. 또한 FRM은 입사편광의 x, y축 성분을 뒤바꾸어 반사시켜 광섬유 내의 잔존 선형복굴절 영향을 제거하는 역할을 한다[9][10]. 그림 5(a)는 100 ~ 700 AT 범위의 입력전류신호에 대한 출력파형으로 60[Hz] 교류신호를 왜곡없이 재현하고 있음을 알 수 있다. 그

림 5(b)는 50 ~ 1000 AT 범위의 입력에 대한 광섬유 전류센서의 실효치 출력을 정규화(normalize)하여 도시한 그래프이다. 가해준 입력 전류 범위에서 linear fit 값과 실측값의 오차가 1% 이내의 선형성을 보였으며 입력전류가 매우 커질 경우 코사인 전달함수에 의하여 선형성이 저하될 우려가 있으나 센서코일의 감은 수를 조절하거나 별도의 신호처리 방법을 이용하여 해결할 수 있다. 50 AT 이하에서는 신호의 레벨이 낮아서 비교적 큰 선형성 오차를 보였는데 센서코일의 감은 수를 증가시켜 낮은 전류에서도 선형성을 유지시킬 수 있으나 보호계전용 전류센서의 경우 정상치를 크게 넘어서는 과도 전류가 주요 측정대상이므로 용도에 따른 적절한 범위에서의 선형성 확보가 중요하다 할 것이다.

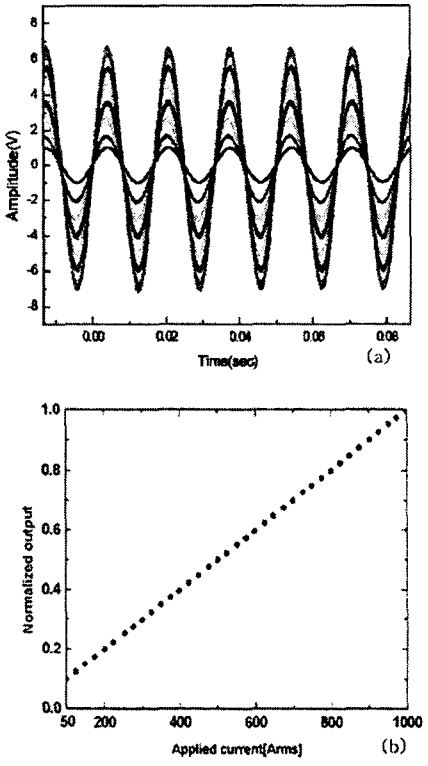

그림 5. 광섬유 전류센서의 출력 파형(a)과 출력의 선형성(b)

Fig. 5. Output waveform of fiber-optic CT(a), Linearity of Output(b)

기술한 바와 같이 선형복굴절의 영향을 최소화하기 위하여 비튼 광섬유를 이용하여 광섬유 센서코일을 제작하였으며 비튼 정도가 출력에 미치는 영향을 파악하기 위해서 그림 6과 같이 비틀림의 정도를 달리한 센서코일을 이용하여 실험을 하였다. 각각 미터 당 0회, 10회 20회씩 광섬유를 비틀어 센서코일을 만들고 전류의 세기를 50 AT 간격으로 1000 AT까지 증가시키며 출력의 변화를 측정하였다. 이론적으로 비틀림의 정도가 커질수록 광섬유의 원형복굴절이 커지며 이는 선형복굴절에 의한 편광변화를 방지하여 이상적인 경우에 근접한 출력을 얻을 수 있게 한다. 그림에서와 같이 비튼 횟수가 커질수록 보다 민감한 출력을 얻는 것을 확인할 수 있었으며 미터 당 100회 이상 비튼 광섬유로 센서코일을 제작하여 보았으나 20회 이상부터는 감도가 크게 나아지지 않았고 많은 비틀림은 광섬유에 스트레스를 주어 파손될 위험이 있으므로 본 실험에서는 미터 당 20회 비튼 광섬유로 센서코일을 제작하여 실험하였다.

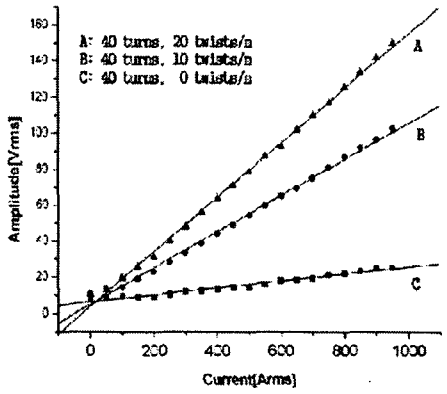

그림 6. 비틀림을 달리한 광섬유 센서코일의 전류측정 실험

Fig. 6. Current measurement with various twisted rate of sensing coils

계통보호용 전류센서가 적용되는 현장은 고압 교류전류에 의한 진동이 상시 존재하므로 광섬유형 전류센서는 진동에 의한 영향을 최소화할 수 있도록 설계되어야 한다. 센서코일의 한쪽 끝단에 부착한 FRM은 이론적으로 두 편광 축을 뒤바꾸어 반사시켜주므로 광신호가 코일을 왕복한 후 두 편광 축간

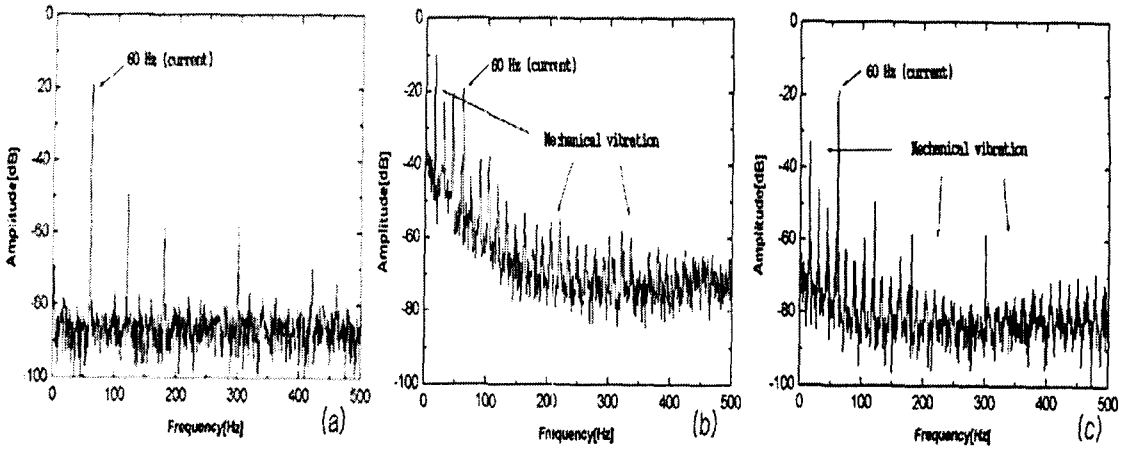

그림 7. 진동에 따른 출력 스펙트럼
(a) 진동이 없는 경우, (b) 15 Hz 진동(단순거울), (c) 15 Hz 진동(FRM)
Fig. 7. Output spectrum according to vibration
(a)no vibration, (b) 15Hz vibration (simple mirror), (c) 15Hz vibration (FRM)

위상차가 누적되지 않아 잔존 선형복굴절의 영향을 최소화하고 진동에 의한 선형복굴절의 변화에도 둔감하게 된다. 이러한 효과를 확인하기 위하여 각각 FRM과 단순거울을 부착하여 제작한 센서코일을 제작하여 도체 주위에 감은 후 다양한 전류측정 실험을 행하면서 그 출력을 비교분석하였다. 그림 7(a)는 진동이 가해지지 않은 상태의 출력을 주파수 분석한 스펙트럼이며 FRM과 단순거울의 경우 모두 60[dB] 이상의 신호 대 잡음비(SNR)를 보인다. 그림 (b)는 단순거울을 부착한 센서코일에 15[Hz]의 진동을 가한 경우의 스펙트럼으로 60[Hz] 전류신호보다 15[Hz] 진동 주파수 성분이 더 크고 전체적으로 노이즈 레벨이 많이 상승하였음을 알 수 있다.

그림 (c)는 반사경으로 FRM을 부착한 경우이며 (b)의 경우에 비하여 진동신호가 20[dB] 이상 작아졌으며 전체적인 노이즈 레벨도 단순거울에 비하여 크게 개선되었음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 광섬유 전류센서 실용화의 가장 큰 어려움인 선형복굴절을 최소화하기 위한 방법으로 비틀린 광섬유를 이용한 센서코일을 제작하였다. 또한 잔존 선형복굴절의 영향을 상쇄시키기 위하여 센서코일의 끝단에 FRM을 장착하고 다양한 환경에서 전류측정 실험을 행하였다. 실험결과로부터 50 ~ 1000 AT 범위 내에서 1% 이내의 선형성과 장시간 안정도실험을 통하여 ±3% 이내의 출력안정도를 얻을 수 있었으며 15[Hz]의 진동신호를 가하며 측정한 결과 FRM을 사용하는 경우는 단순거울을 사용하는 경우와 비교할 때 약 20[dB] 이상의 노이즈 억제 효과를 얻을 수 있었다.

이 논문은 2002년도 한국학술 진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-003-D00233)

References

[1] C. W. Day, K. B. Rochford, A. H. Rose, "Fundamentals and problems of fiber current sensors," Tech. Digest, 11th OFS Conf., Sapporo, Japan, pp. 124-129, 1996.
[2] 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.
[3] 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.
[4] K. Kurosawa, S. Yoshida, and K. Sakamoto, "Polarization properties of the flint glass fiber," J. Lightwave Technol., vol. 13, no. 7, pp. 1378-1384, 1995.

[5] A. J. Rogers, "Optical-fibre current measurement," Int. J. Optoelectronics, vol. 3. pp. 391-407, 1988.
[6] J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, "In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor," IEEE Transaction on power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 116-121, 1996.
[7] A. Yariv and P. Yeh, Optical Waves in Crystal, pp. 103, Wiley, New York, 1984.
[8] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," Appl. opt, vol. 18, No. 13, pp. 2241-2251, 1979.
[9] N. C. Pistoni and M. Martinelli, "Vibration insensitive fiber-optic current sensor," Opt. Lett., Vol. 18, No. 4, pp. 314-316, 1993.
[10] F. Briffod, L. Thevenaz, P.-A. Nicati, A. Kung, p. A. Robert, "Polarimetric current sensor using an in-line Faraday rotator," IEICE Trans. Electron, Vol. E83-C, No. 3. pp. 331-335, 2000.

◇ 저자소개 ◇

김기혁 (金基赫)
1980년 2월 7일생. 2003년 전북대 전자정보공학부 졸업. 현재 전북대학교 전자정보공학부 석사과정.

송민호 (宋民鎬)
1968년 8월 26일생. 1990년. 1992년 서울대학교 전기공학과에서 공학사. 공학석사를 취득하였으며 1997년 서울대학교 전기공학부에서 공학박사학위를 취득. 1997-2000년까지 Pennsylvania 주립대학의 Post-Doctor로 일하였으며 2000년 9월 이후 전북대학교 전자정보공학부 조교수로 재직.