

과전류 보호계전기용 광섬유 전류센서

Fiber-Optic Current Transformer for the Over Current Protection Relay

송민호*, 양창순*, 안성준**, 박병석**, 이병호***

Minho Song*, Changsoon Yang*, Seong Joon Ahn**, Byoung Seok Park** and Byoungho Lee***

초 록 과전류 보호계전기에 사용할 목적으로 광섬유를 센서헤드로 사용하는 광 전류센서를 구성하였다. 전류측정의 원리는 도체 주변에 감겨진 광섬유 코일을 따라 광신호의 선형편광축이 자기장에 의하여 회전하는 정도를 측정하여 이로부터 전류의 값을 산출하는 편광측정 방법이 사용되었다. 센서코일은 10/125 μm 규격의 일반 통신용 광섬유를 미터당 20회전 이상 비틀어 제작하여 온도나 진동 등의 환경적 영향을 최소화하였다. 코일의 한쪽 끝은 Faraday Rotator Mirror를 장착한 반사형으로 설계하여 계통을 해체하지 않은 상태에서도 센서의 탈·부착이 가능하고 코일의 회전수에 따라 센서의 민감도 조절이 용이하며 폐회로형 구조이므로 인근 신호원에 의한 간섭을 차단할 수 있다. 편광 빔가르개 등을 이용한 광학 신호처리부를 구성하고 표준 전류원을 이용한 전류측정 실험을 수행한 결과로 이론적인 해석과 동일한 형태의 출력을 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 구성된 광 전류센서의 이론적 모델을 기술하고 전류측정 실험의 결과와 이론치에 대하여 비교 분석한다.

주요어어: 전류센서, 편광, 페러데이 효과, 광섬유, 자기장, 복굴절

Abstract: A robust, accurate, broad-band, alternating current sensor using fiber-optics is being developed as a part of optical over current protection relay system. The sensor uses the Faraday effect in optical fiber and polarimetric measurements to sense electrical current. The current sensing coil consists of a length of twisted optical fiber and Faraday rotator mirror to suppress the linear birefringence effect. Due to its single-ended closed path structure, it can not only be easily installed to the target with great isolation from other fields in the vicinity, but the sensitivity can be increased by using multiple turns. This paper reports on the theoretical backgrounds of the sensor design and the preliminary experimental results.

Keywords: current transformer, polarization, Faraday effect, optical fiber, magnetic field, birefringence

1. 서 론

최근 계통보호 및 변전소의 제어 분야에서 디지털 기술을 이용한 자동화에 관한 관심이 크게 높아지고 있는데 그 이유는 디지털 제어 및 통신기술을 이용하여 변전소의 자동화·무인화를 달성함으로써 비용절감을 실현하

고 동시에 전력계통의 전반적인 신뢰도를 높이기 때문이다[1]. 이러한 변전소 자동화와 관련하여 기존의 전압 및 전류를 측정하는 방식과 다른 원리를 가지는 새로운 센서들이 주목을 받으며 활발하게 개발되고 있는데, 그 중 광학적 방법으로 계통의 전류를 측정하는 광 전류센서는 광통신 산업의 발달과 맞물려 그 실용화의 가능

성이 한층 고조되고 있는 계측분야이다. 전력계통에 흐르는 전류는 사고발생 시 정상상태의 수십 배에 달하는 전류가 흐르게 되며 보호계전기(Over Current Protection Relay)는 이러한 상황을 감지하여 사고부위를 신속하게 차단하는 역할을 한다. 전류센서는 보호계전기의 동작에 필요한 계통의 전류정보를 공급하는 역할을 하는데, resistive shunt, CT(Current Transformer), 그리고 Hall effect 센서 등이 상용화되어 왔으며 이 중 변류기로 불리는 CT는 전력회사의 대전류 검침용으로 가장 활발히 사용되어 왔다. CT는 Fig. 1과 같이 전력선 주위의 철심 코어에 2차권선을 감아 이로부터 발생하는 유도전류의 양으로 전력선의 전류크기를 측정하는 구조를 갖는다.

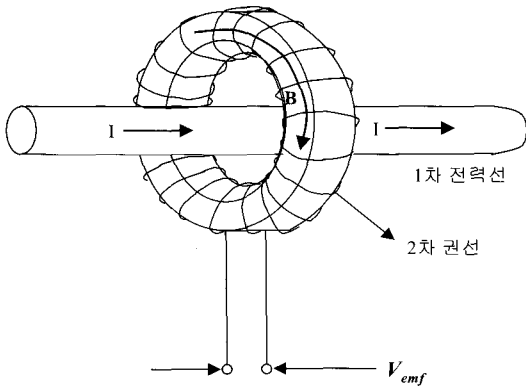


Fig. 1 Basic structure of CT (Current Transformer)

CT는 오랜 기간의 연구개발과 현장적용을 통하여 운용상의 신뢰도가 가장 높은 전류센서이지만 절연문제로 인하여 소형·경량화된 구조를 얻기 힘들고 CT의 회로가 개방되거나 부하가 일정 수준이상으로 증가할 경우 강자성체 코어에 포화가 일어나며, 1차측에서 전달되는 에너지에 의해 온도가 상승하고 심한 경우 코어가 파괴되는 등의 문제를 갖는다. 또한 코어내의 자기포화와 잔류자기 등에 따른 출력신호의 왜곡은 보호계전기의 신뢰도에 가장 큰 저해요인이다. 이러한 기존 변류기 CT의 약점을 해결할 수 있는 방안으로 광학매질 내에서 자기장의 세기에 따라 레이저 편광의 진동축이 회전하는 Faraday 효과[2]를 이용한 광학적 계측방식이 큰 관심을 얻고 있다. 이는 전기적으로 무유도성, 절연성, 안정성 등의 장점을 가지므로 소형·경량화 구조를 가질 수 있고 자기포화나 잔류자기 등의 영향이 없으므로 사고 발생시 대전류의 유입에 따른 출력신호의 왜곡이 없기 때문이다.

본 논문에서는 도체 주위에 비틀린 광섬유로 제작한 센서 코일을 설치하고, 출력 광신호의 편광축 회전정도를 감지하여 이로부터 전류의 크기를 측정하는 광 CT를 구축하였다. 제작된 광 CT의 동작을 이론적 모델링을 통하여 해석하였으며 표준 전류원을 이용한 전류측정 실험을 통하여 그 동작특성을 확인하였다.

2. 이 론

2.1. Faraday 효과와 편광해석

광을 이용한 전류의 측정은 광신호가 자성체 광 매질의 내부를 진행하는 경우 자기장의 영향에 의하여 편광(polarization)의 축이 회전하는 Faraday 효과를 이용하며, Fig. 2는 Faraday 효과에 의한 전류측정의 원리를 도시한 것이다.

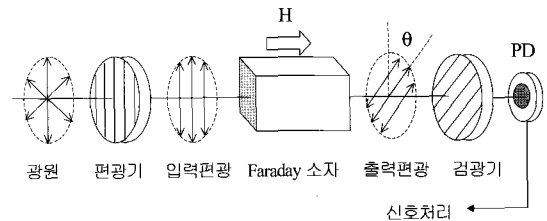


Fig. 2 Principle of optical CT

선형편광(linear polarization)된 광신호가 Farady 소자를 통과할 때 편광의 진동축은 식 (1)의 θ 만큼 회전한다.

$$\theta = VHL \cos \varphi \dots\dots\dots (1)$$

(V : Verdet 상수, H : 자기장의 세기, L : Faraday 소자의 길이, φ : 광신호의 진행방향과 자기장 사이의 각)

Verdet 상수는 각 Faraday 소자의 구성물질과 사용 광원의 파장에 따라 서로 다른 값으로[rad/A]의 단위를 갖는다. 식 (1)과 같이 편광축의 회전각은 자기장의 방향에 따른 벡터관계이므로 Faraday 소자의 방향과 도체로부터의 위치 등이 변할 경우 회전각도 따라서 변화한다. 이러한 불안정성은 광섬유를 Faraday 소자로 사용하여 쉽게 해결할 수 있다. 즉, 도체의 주위에 광섬유를 감아서 폐루프(closed loop)형 센서헤드를 구성할 경우 Ampere의 법칙(Ampere's circuital law)에 의하여 코일의 직경이나 형태, 또는 센서코일과 도체와의 거리등에 무관하게 항상

일정한 값을 갖고 측정대상도체 이외의 인근 신호원에 의해서는 영향받지 않는 장점도 갖게 된다. 광섬유 코일을 이용하는 경우 편광축의 회전각은 아래 식 (2)와 같이 단순화 된다.

$$\theta = Vn \oint H \cdot dl = VnI \dots\dots\dots (2)$$

(*n*: 광섬유의 회전 수, *I*: 전류의 크기)

실험에 사용할 실리카(SiO₂) 단일모드 광섬유(single mode optical fiber)의 Verdet상수는 1310 nm 파장대에서 대략 1 μrad/A 정도로 도체 주위에 한번 감은 광섬유에 의한 편광축 회전각은 1 KA의 전류에 대하여 10³ radian으로 매우 작은 값이지만 광섬유의 회전수를 늘려서 원하는 정도의 민감도를 확보할 수 있다. 전류신호에 따라 발생한 편광 회전각의 크기는 광 CT의 출력단에 검광기(analyzer)를 두어 이를 통과한 광신호의 크기를 측정하여 알 수 있으며 이 과정은 Jones Vector 표현을 이용하여 다음 식과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{out} = P(\rho)F(\theta)P(0) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{in} \text{ when,}$$

$$P(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, P(\rho) = \begin{bmatrix} \cos^2 \rho & \sin \rho \cos \rho \\ \sin \rho \cos \rho & \sin^2 \rho \end{bmatrix},$$

$$F(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

윗식에서 *P*(0), *P*(ρ), *F*(θ)는 각각 *x*축과 평행한 축을 갖는 선형 편광기, *x*축과 ρ의 각을 이루는 검광기, 그리고 θ의 회전각을 갖는 Faraday 소자의 Jones Vector 표현이며 *E_x*, *E_y*는 입력 광신호의 각 축방향 성분이다. 검광기의 각도 ρ를 편광기에 대하여 0°나 90°로 배치할 경우 출력신호는 사인함수의 정점을 중심으로 진동하는 비선형적 동작을 하게 되므로 ρ=±45°가 되게 하여 선형적인 출력특성을 얻는다. 식 (3)에 ρ=±45°를 대입하고 이로부터 PD(photodetector)의 출력을 구하면 다음 식과 같다.

$$I_{1,2} = |E_{x,out}|^2 + |E_{y,out}|^2 = \frac{E_{x,in}^2}{2} (1 \pm \sin 2\theta) \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)와 같이 PD의 출력은 전류신호에 의해서 진폭이 변조된 교류성분과 입력광의 크기에 비례하는 직류성분으로 이루어진다. 입력광의 크기가 변하거나 광연결 부위의 손실변화 등에 의한 PD 출력의 변화가 있을 경우 측정전류의 크기 변화로 오인될 소지가 있다. 이는 식 (4)의 두 가지 출력을 동시에 취득하고 다음 식과 같이 두 신호를 이용한 신호처리를 통하여 입력광의 세기에 무관한 출력을 얻음으로써 해결할 수 있다.

$$Output S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\theta \approx 2\theta \dots\dots\dots (5)$$

편광 빔가르개(polarization beam splitter, PBS)나 Wollaston 프리즘 등을 검광기로 이용할 경우 ρ=±45°인 두 가지 경우에 해당하는 출력을 동시에 얻을 수 있으며, 편광축의 회전각 θ는 측정전류범위에서 일반적으로 매우 작은 값이므로 sin2θ 출력은 별다른 신호처리 과정 없이 2θ로 근사할 수 있다.

2.2. 선형복굴절의 영향

광섬유 센서코일을 이용한 전류센서의 가장 큰 기술적 장벽은 광섬유 내부에 존재하는 선형복굴절(linear birefringence)의 영향이다. 광신호를 유도하는 광섬유 코어는 각 축방향 굴절률이 미세하게 다른 선형복굴절을 가지게 되는데 이는 광섬유 제조기술의 한계에 따라 코어의 형태가 약간 타원형태를 띠는 것과 광섬유 코일 제작 중 구부림에 따른 stress-optic 효과에 기인한다. 광 CT의 동작원리는 광신호가 선형편광 상태를 유지하는 것에 기초를 두고 있으나 선형복굴절이 있을 경우 두 편광모드(polarization mode)간의 상대 위상차이가 축적되어 선형편광이 유지되지 않으므로 식 (3)에서 기술한 동작이 이루어지지 않는다. 선형복굴절의 영향을 고려하고 Chebyshev's identity 관계를 이용하여 유도한 광섬유의 Jones Vector 표현은 다음 식과 같다.

$$F = \begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$A = \cos(\phi/2) + j \sin(\phi/2) \cos \chi, \quad B = \sin(\phi/2) \sin \chi$$

$$\phi = \sqrt{\delta^2 + (2\theta)^2}, \quad \tan \chi = 2\theta / \delta$$

윗식에서 δ 는 선형복굴절에 의한 편광모드간 위상지연이고 θ 는 Faraday 효과에 의한 편광축 회전각이다. 식 (6)을 식 (3)에 대입하여 식 (5)와 같이 신호처리한 출력은 다음 식과 같다.

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin \phi \sin \chi = 2\theta \frac{\sin \phi}{\phi} \dots\dots\dots (7)$$

즉, 출력은 선형복굴절을 고려하지 않은 경우와 달리 δ 의 크기에 따라서 변화할 수 있으며 δ 가 커질수록 출력은 감소한다. 한편 δ 는 광섬유의 굴절률 변화에 영향받으므로 온도나 진동 등에 의해서 그 크기가 변화하며 이에 따라 광 CT의 출력이 진류신호에 관계없이 변화할 수 있다. 따라서 환경적 요인에 대해서 안정적인 출력을 얻기 위해서는 선형복굴절의 영향을 효율적으로 제거하는 것이 필수적이다. 이를 위하여 광섬유 코일을 높은 온도로 열처리하는 방법[3]과 광섬유의 제조과정에서 원형복굴절을 유도시킨 스펜(spun) 광섬유를 사용하는 방법[4] 등이 있으나 본 연구에서는 광섬유를 비틀어 높은 수치의 원형복굴절을 유도하는 방법[5]을 사용하였다. 비틀림에 의해서 발생한 원형복굴절의 영향은 선형 편광축을 회전시키는 역할을 하므로 그 형태는 Faraday 효과와 동일하고 식 (6)의 θ 가 매우 커져서 δ 를 무시할 수 있게 하는 방법으로 δ 의 영향을 최소화하는 것이다. δ 의 크기가 무시될 경우 출력은 식 (5)와 동일하게 2θ 로 근사할 수 있다.

3. 실험

제작된 광 CT의 개략도는 Fig. 3과 같다. 광원은 1310 nm 중심파장을 갖는 Fabry-Perot 다중모드 레이저 다이오드(laser diode, 이하 LD)를 사용하였다. 일반적으로 사용 파장이 작을수록 Verdet 상수가 커서 광 CT의 민감도를 크게 하는 효과가 있으나 현재 1310/1550 nm 대역에서 광통신용 광섬유 및 광소자가 대량 생산되어 품질이 우수하고 가격 경쟁력이 뛰어난 것이 1310 nm 파장대역 선택의 배경이다. 또한 단일모드 광원에 비하여 광폭광원(broadband source)을 사용할 경우 각 파장성분의 영향이 서로 상쇄되어 온도변화에 따른 영향이 최소화된 출력을 얻을 수 있고, LED(light emitting diode) 등에 비하여 다중모드 LD의 출력이 매우 크기 때문이다. LD의

출력은 약 40 dB의 소광비(extinction ratio)를 갖는 선형 편광기를 거쳐서 선형편광이 되며 $\lambda/2$ 파장판을 거치면서 편광 빔가르개와 45°/45°의 각을 이루도록 조절된다. $\lambda/2$ 파장판을 회전시킬 경우 이를 통과한 편광축은 $\lambda/2$ 파장판 회전각의 2배만큼 회전하는 원리를 이용하는 것이다. 빔가르개를 통과하여 광섬유 센서코일로 입사한 광신호는 센서코일 끝단의 Faraday Rotator Mirror에서 반사되어 돌아오고 다시 빔가르개를 통하여 편광 빔가르개로 입사한다. 편광 빔가르개는 수직/수평 편광성분을 투과/반사시키는 특성을 가지므로 적절한 각으로 조절할 경우 투과/반사된 광신호는 각각 검광기를 입력 편광축에 대하여 45°/45°의 각으로 조절한 경우의 출력과 동일하다. LD와 센서코일, 그리고 PD간의 광연결은 광섬유가 아닌 벌크형으로 이루어졌는데 이는 광섬유로 연결할 경우 발생할 수 있는 편광왜곡을 방지하기 위함이며 편광기, $\lambda/2$ 파장판, 빔가르개 등을 통한 총 연결 광손실은 15 dB 이하이다.

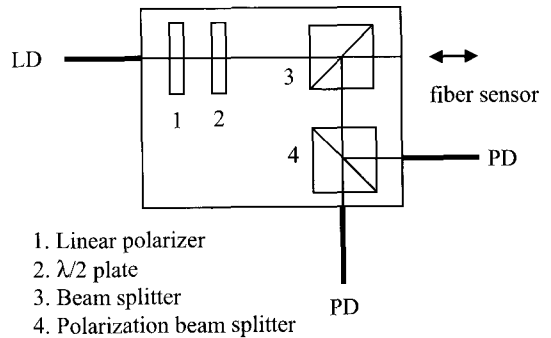


Fig. 3 Schematic of optical CT unit

센서코일은 10/125 μm 규격의 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 약 6 mm의 지름을 갖는 플라스틱 튜브에 삽입하고 미터 당 20회전 이상의 비틀림을 가한 후 양단을 예폭시로 고정하여 다양한 길이로 제작하였다. 기술한 바와 같이 비틀림에 의해 형성된 원형복굴절은 센서코일 내에서 선형편광을 유지할 수 있게 하지만 원형복굴절은 온도의 변화에 매우 민감하여 이에 따른 출력의 변화를 일으킬 수 있다. 따라서 코일의 끝단에 Faraday Rotator Mirror를 부착하였다. 원형복굴절의 영향은 광신호의 진행방향과 관계가 있으므로 거울에서 반사된 후 진행방향이 바뀌면 그 값이 상쇄되어 온도변화에 따른 출력변화를 제거하지만 Faraday 효과는 자기장의 방향에 관계하

므로 왕복 후 편광축의 회전각이 상쇄되지 않고 오히려 배가되어 출력의 신호대 잡음비가 개선되는 효과를 얻기 때문이다. 또한 Faraday Rotator Mirror에 의하여 광신호의 두 선형 편광모드는 90° 회전하고 이에 따라 코일을 왕복한 후 편광모드간 누적된 위상변화는 동일하므로 연결부위 광섬유에 존재하는 선형복굴절 등에 따른 출력의 변화 또한 효율적으로 제거할 수 있다[6,7].

편광 빔가르개에서 분리된 편광모드의 크기는 각각 다중모드 광섬유를 통하여 PIN 타입의 InGaAs PD로 검출된다. PD 신호는 12bit 해상도를 갖는 Data Acquisition Board를 이용하여 컴퓨터로 읽어들이고 후 Labview™ programming으로 식 (5)에 기술한 신호처리가 이루어졌다.

제작된 광 CT를 시험하기 위하여 0~240 V 슬라이더스와 220/5 V 변류비를 갖는 변압기, 그리고 인덕턴스 코일로 제작한 허부하 등을 이용하여 전류원을 구성하였다. 구성된 전류원은 최대 43 A의 실효치 전류를 발생하였고 이는 광 CT가 적용될 정상상태의 계통전류 100~200 A에 미치지 못하는 양이므로 슬라이더스와 변압기 사이의 도선을 4번 감고 그 주위에 광섬유 센서코일을 장착하여 160~170 A 실효치의 전류가 흐르는 상황을 가정하였다. 광 CT의 출력을 실제 전류값과 비교하기 위하여 도선의 한 부위에 1000 A 측정범위에서 $\pm 1\%$ 의 측정오차를 갖는 Hall effect 센서를 부착하고 그 출력을 기준값으로 사용하였다.

Fig. 4는 제작된 광 CT의 입력 편광축이 편광 빔가르개와 45° ~ 45° 의 각을 이루도록 $\lambda/2$ 파장판을 조정하는 과정에서 PD 출력을 도시한 것이다. Jones Vector를 이용한 이론적 해석과 동일한 형태임을 알 수 있으며 진폭의 차이는 각 PD의 수광효율 차이에 따른 것으로 광신호의 정렬이나 증폭회로의 조절 등으로 조정이 가능하다.

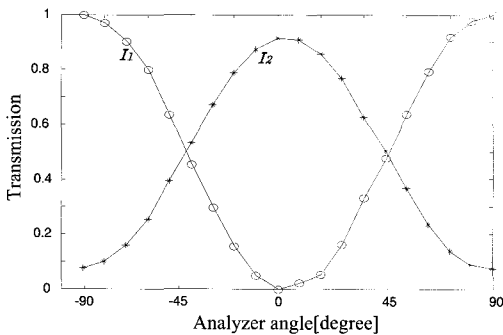


Fig. 4 PD outputs vs. analyzer angle

다. 두 곡선이 만나는 점이 광 CT의 동작점이므로 $\lambda/2$ 파장판의 회전각이 이 점에 맞추어졌다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 0~180 A 실효치 범위의 전류를 인가한 경우, 한 쪽 PD의 오실로스코프 출력을 전류의 크기에 따라 도시한 것이다. Fig. 6에서 표시한 바와 같이 인가전류의 크기에 따라 출력 교류성분의 크기가 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

기술한 이론에 따라 계산할 경우 180 A의 전류에 따른 40회전 센서코일의 Faraday 회전각 θ 는 $\sim 0.8^\circ$ 에 불과하므로 인가전류와 출력의 크기는 거의 선형적인 관계이다.

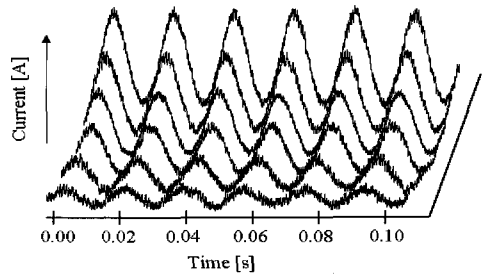


Fig. 5 Oscilloscope traces of the optical CT according to various current signals

Fig. 6은 약 10% 내외의 선형성 오차를 보이고 있으나 이는 PD에 도달하는 광신호의 크기가 작아서 측정과정의 오차에 기인한 것으로 광신호의 정렬과 전기회로의 최적화를 통하여 신호대 잡음비를 향상시킬 경우 보다 선형적인 결과를 얻을 수 있을 것이다. Fig. 7은 PD의 출력을 컴퓨터로 읽어들이고 후 Labview™ programming으로 신호처리한 결과를 보이며 두 PD의 출력과 이를 나누기 등의 신호처리를 통하여 교류성분만을 추출한 결과, 그리고 교류성분의 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼을 보인다. 필터링이나 평균연산 등을 거치지 않은 출력을 일정 간격으로 샘플링(sampling)하였기 때문에 노이즈에 의하여 출력의 형태가 완전한 사인파의 형태와는 달리 왜곡되어 있다.

FFT 스펙트럼에서는 500 Hz 범위 내에(사용된 샘플링 주파수는 1k Hz) 교류 주파수인 60 Hz와 이의 제2, 제3 고조파 성분만이 존재하는 것을 알 수 있기 때문에 노이즈의 원인은 광 CT 자체의 동작특성에 의한 것이 아니

라 LD나 PD 회로 등의 전기적인 부분에 있을 것으로 추정된다. 광 CT는 측정대상이 교류신호의 60 Hz 성분이기 때문에 간단히 필터링을 통하여 높은 주파수의 노이즈를 제거할 수 있으나 이럴 경우 매우 빠르게 일어나는 과도현상의 해석을 할 수 없기 때문에 광원과 수광부의 구동회로 최적화를 통하여 근원적인 해결을 하는 것이 바람직하다.

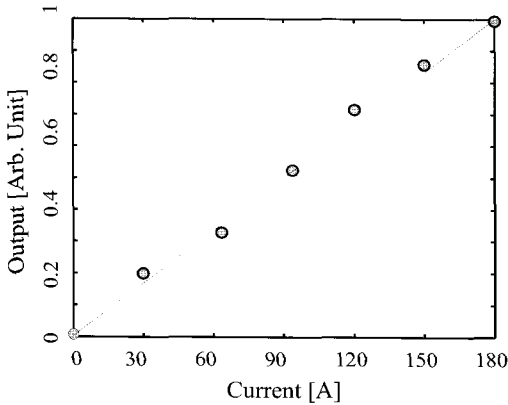


Fig. 6 Optical CT output vs. current

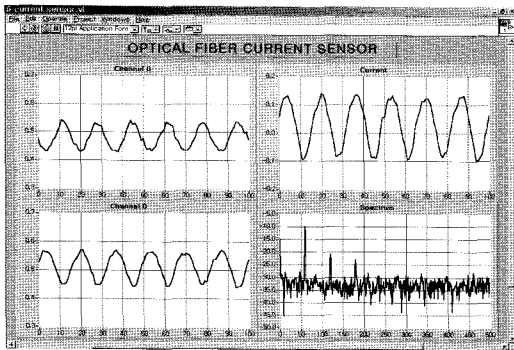


Fig. 7 PD outputs, processed output, and its FFT spectrum

비틀린 광섬유로 제작한 센서코일이 일반 광섬유를 이용한 경우에 비하여 갖는 장점을 확인하기 위하여 다양한 길이의 비틀리지 않은 광섬유를 전류원에 장착하고 동일한 실험을 행하였다. 수백 번 이상 광섬유를 감은 경우 비틀린 광섬유를 이용한 경우와 비슷한 출력을 얻을 수 있었으나 센서코일에 압력을 가할 때 출력이 크게 변화하였다. 또한 코일의 일부에 편광조절기(polarization

controller)를 장착하여 편광상태를 조절하는 경우에도 출력이 크게 변화하는 것을 확인하였고 이로부터 코일내의 편광상태가 선형을 유지하지 못하고 있음을 추정할 수 있다. 문헌상으로는[7] 대략 미터 당 20회 이상의 비틀림을 가한 경우의 실험 결과들을 확인할 수 있으나 최적화된 원형복굴절의 인기는 비틀린 정도를 달리한 센서코일로부터 방출되는 광신호의 편광분석 등을 통하여 결정되어야 한다.

현재까지 이루어진 실험은 개발의 초기단계이므로 실험실 환경에서 이루어졌고 실제로 광 CT가 현장에 적용되기 위해서는 오랜 기간의 현장적용 시험을 통하여 온도 및 진동 등에 따른 출력특성이 완전히 파악되어야 한다. 또한 광섬유내의 편광변화 과정 또한 다양한 환경아래에서 시험되어지고 그에 따른 자료의 해석을 통한 광 CT의 최적 설계가 도출되어야 한다. 현재 이와 관련된 다양한 실험이 활발히 이루어지고 있다.

6. 결 론

비틀린 광섬유를 이용하여 폐회로형 광 전류센서를 구성하였고 60 Hz 교류를 측정한 기초실험결과를 제시하였다. 제안한 시스템은 폐회로 형태이므로 인근 신호원에 영향받지 않고 대상도체의 전류만을 감지할 수 있으며 센서코일의 회전수를 조절하여 계측정밀도의 조절이 용이하다. 또한 센서코일의 한쪽 끝이 열린 형태이므로 대상도체를 해체하지 않고도 탈·부착이 용이하며 광섬유의 절연성에 의하여 복잡한 절연구조가 필요하지 않으므로 소형·경량구조로 제작할 수 있어 휴대형으로 개발이 가능하다. 후속연구에 의하여 광회로 및 전기적 신호처리를 최적화하고 현장실험을 거친 후 상시배전계통의 구간 전류를 측정하고 사고시 과도현상의 해석등에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] K.-P. Brand and C. G. A. Koreman, "Special Report for Group 34 (Power System Protection and Local Control)", CIGRE 2000, Paris, France, (2000)
- [2] A. Yariv and P. Yeh, Optical Waves in Crystal, p. 103, Wiley, New York, (1984)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," *Appl. Opt.*, Vol. 18, No. 13, pp. 2241-2251, (1979)
- [6] N. C. Pistoni and M. Martinelli, "Vibration insensitive fiber-optic current sensor," *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 4, pp. 314-316, (1993)
- [7] 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)