

Faraday 효과를 이용한 광 전류 센서

(Optical Current Snesor using Faraday Effect)

김수길
(Soo-Gil Kim)

호서대학교 전기공학부 정보제어전공

Abstract

The optical current transformer using Faraday effect is the sensor to measure current that flows in any conductor. This sensor doesn't undergo the magnetic saturation and effect of adjacent conductors. But this sensor using bulk-glass sensing element has crucial drawback. It is impossible that the sensor is mounted to conductor without breaking the closed-loop of light or conductor. So we developed the clamp-type optical current transformer and made an experiment.

1. 서 론

최근 전력설비의 대용량화로 인하여 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서 전력 계통의 운용 중에 발생하는 사고를 신속히 감지, 판별하여 사고부분을 신속히 분리시킬 수 있는 보호계전 시스템의 역할이 더욱 중요시되고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전자기장식 전류변류기(Current Transformer, 이하 CT)는 자기포화현상과 잔류자기 등에 의하여 전력계통의 단락고장시 정상상태의 수십 배에 달하는 전류의 크기를 효율적으로 측정할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 더욱이 송배전 전압의 초고압화에 따른 절연장치의 규모가 커질수록 절연 비용이 많이 들고 취급 등에 어려움이 많은 실정이다. 그래서 개발된 것이 광-전류 변류기(Optical Current Transformer, 이하 OCT)이다.

OCT는 기본적인 개념이 제안된 것은 매우 오래되었고 1980년대 이후 국내외적으로 활발한 연구가 이루어진 분야이다.

하지만 30여 년간의 이론적 발전에 비하여 그 기술적 완성도나 여건이 아직은 실용화 단계에 미치지 못하고 있다. 이는 OCT 시스템에 사용되는 광소자의 품질과 제조기술, 가격경쟁력, 그리고 기술인력의 확보 등 기반조건이 취약하였고, 실제 플랜트에 적용할 경우 겪게 되는 여러 가지 환경적 외란에 의한 노이즈와 안정성의 문제 등을 효율적으로 해결할 수 있는 최적 설계가 이루어지지 않았기 때문이다. 그러나 최근 광통신 산업의 발달에

힘입어 관련소자의 품질과 가격경쟁력이 향상되었고 유용한 기술인력의 수가 늘어남에 따라 과거 어느 때보다도 실용화의 가능성이 고조되고 있는 시점이다.

도체에 흐르는 아주 높은 전류를 측정하기 위해서 주로 사용되었던 기존의 방식인 CT는 도체 주변에 전류가 흐르게 되면 생기는 자기장을 이용, 도체 주변의 철심을 흐르는 전류를 측정함으로써 전류를 측정할 수 있었다. 하지만 이 방식은 공진현상과 자기 포화에 의하여 결과에 왜곡이 생길 수 있다. 또한 외부에서 발생한 자기장에 의해서도 결과에 오류가 생길 수 있어 정확한 측정을 요구하는 분야에서 사용하기에는 부적합한 면이 있다.[1,2]

그래서 새롭게 개발된 것이 광을 사용하는 OCT이다. OCT는 패러데이 효과(Faraday Effect)를 사용하여 전류에 의해서 생기는 자기장에 의해 빛의 성질이 달라짐을 이용한 변환기이다. OCT의 장점으로서는 절연성이 뛰어나며 또 광의 방향과 전류에 의해 생기는 자기장의 방향이 일치해야만 광의 성질에 변화가 생기므로 외부 자기장에 의해 결과가 왜곡이 되지 않는다.

OCT의 종류에는 먼저 광 루프를 광섬유(optical fiber)를 사용하여 만드는 광섬유형과 어떤 매질을 하나의 덩어리 형태로 만들어 광 폐루프를 만드는 형태인 벌크(bulk)형으로 나눌 수 있다. 광섬유형 OCT는 광섬유 내부에 존재하는 선형 복굴절(linear birefringence)과 광섬유를 휘 때 만들어지는 복굴절의 영향을 해결해야 하는 어려움이 있다.

그에 반해 벌크형 OCT는 광을 여러 번 반사를 시켜야 하므로 광 정렬(optical alignment)이 어렵고 센서 헤드(sensor head)를 설치할 때 전류가 흐르는 도체를 파괴하지 않고서는 설치를 할 수 없다는 단점이 있다. 그래서 이런 벌크형의 단점을 보완하기 위해서 클램프형 광 전류 변환기(Clamp-type Optical Current Transformer, COCT)를 만들게 되었다.[2]

일반적으로 부피형 광전류 센서는 전류를 측정하기 위한 센서 헤드가 유리이므로 절연성이 좋고 페러데이 효과(Faraday Effect)에 의해 주변의 도체에 흐르는 전류에 의한 영향도 없다. 그러나 기존의 부피형 OCT는 광의 폐경로를 만들기 위해서는 센서 헤드를 도체 주변에 삽입할 때 도체, 또는 센서헤드를 파괴해야 하는 문제점이 있었다. 이런 문제점을 해결하기 위해 클램프형 구조의 센서 헤드를 제작하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 기본 원리

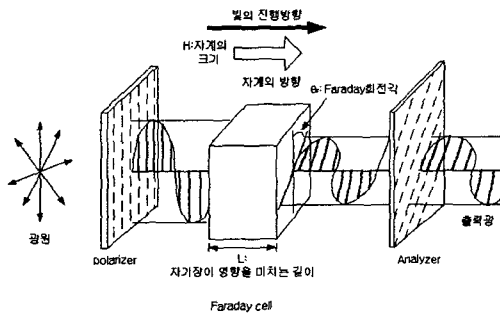


그림 1. 광 전류변류기의 기본원리

일반적으로 OCT는 페러데이 효과(Faraday Effect)를 이용하여 어떤 도체에 흐르는 전류의 양을 측정한다. 어떤 도체에 전류가 흐르게 되면 그 주변에는 오른 나사의 방향으로 자기장이 생기게 된다. 이 자기장의 방향과 같은 방향으로 선형 편광된 빛이 입사되면 이 빛의 편광면은 자기장의 세기에 비례하여 회전하게 된다.

$$\theta_F = VHL \quad (1)$$

θ_F : Faraday 회전각

V: Verdet 상수

H: 자기장의 크기

L: Faraday cell의 길이

여기서 전류의 법칙에 의해 자기장 H 가 영향을 미치는 길이, 즉 Faraday cell의 길이만큼 선적분을 해주면

$$\begin{aligned} \theta_F &= V \cdot \oint H \cdot dL \\ &= V \cdot I \end{aligned} \quad (2)$$

가 되어 페러데이(Faraday) 회전각 θ_F 는 전류에 비례하게 된다. 이 회전각에 따른 광세기를 광검출기로 측정함으로써 도체에 흐르는 전류를 측정하는 것이 가능하다.

2.2 센서헤드의 구조 및 반사와 위상의 관계

본 연구에서 제작한 센서 헤드의 구조는 두개의 동일한 bulk-glass의 조각을 사용하여 하나의 센서 헤드를 구성하였으며, 그림 2와 같다.

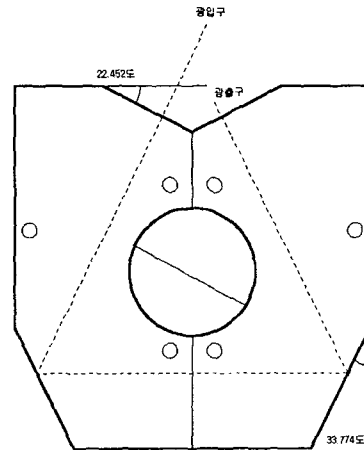


그림 2. clamp형 센서헤드

사용된 유리는 FD10으로서 굴절률은 1.799이며 633nm의 파장에서 버벳(Verdet)상수는 2.23×10^{-5} rad/A이며 임계각은 33.774° 이다. 임계각은 빛이 반사시 입사면에 평행한 편파와 수직인 편파간에 위상차가 발생하지 않도록 하는 조건이다. 그림 2에서 선형 편광된 빛은 입력면을 통해서 첫 번째 조각의 광입구면으로 입사되어진다. 입사된 빛은 한번의 반사를 거쳐 두 번째 조각으로 입사되고, 두 번째 조각으로 입사된 빛은 반사된 후 광출력면을 통해서 나가게 된다. 센서 헤드 안으로 입사된 빛은 센서헤드에 있는 두 개의 반사면에서 반사가 일어나게 되며 위상이 바뀌게 된다. 이때 일어나는 위상의 변화는 다음의 Fresnel식을 이용하

여 설명할 수 있다.

$$T_{\parallel} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} A_{\parallel} \quad (3)$$

$$T_{\perp} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} A_{\perp} \quad (4)$$

$$R_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} A_{\parallel} \quad (5)$$

$$R_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} A_{\perp} \quad (6)$$

Fresnel의 법칙에 따라 위의 식은 서로 다른 굴절률을 가진 두 매질을 통과하는 빛에서 일어나는 편광면의 위상의 변화를 나타내는 식이다. 여기서 T_{\parallel} 와 R_{\parallel} 은 입사면에 평행하며 한 매질에서 다른 매질로 전파되어지는 투과파와 반사파이며 T_{\perp} 와 R_{\perp} 는 입사면에 수직하며 한 매질에서 다른 매질로 전파되어지는 투과파와 반사파이다. 마찬가지로 A_{\parallel} 는 입사면에 평행한 입사파를 A_{\perp} 는 입사면에 수직한 입사파를 나타낸다. 그러한 관계는 그림 3을 보면 잘 알 수 있다.

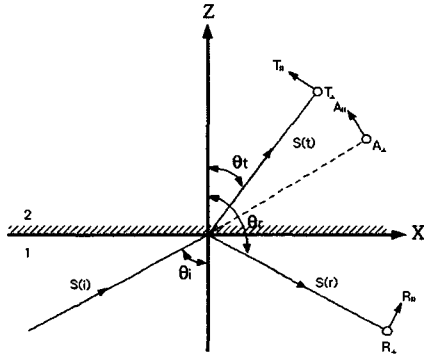


그림 3. 평면파의 굴절과 반사

Fresnel식을 이용하여 입사면에 평행한 입사파 (A_{\parallel})와 반사파(R_{\parallel}) 및 입사면에 수직인 입사파(A_{\perp})와 반사파(R_{\perp})를 표현하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.[3]

$$R_{\parallel} = \frac{n^2 \cos \theta_i - i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{n^2 \cos \theta_i + i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}} A_{\parallel} \quad (7)$$

$$R_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i + i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}} A_{\perp} \quad (8)$$

여기서, θ_i 는 입사각이다. n 은 n_2/n_1 이며 n_1 은 공기의 굴절률을 나타며 n_2 는 물질의 굴절률을 나타낸다. 위의 식을 통해서 반사파와 입사파의 크기는 같음을 알 수 있다. 그러므로 입사파와 반사파의 위상의 변화는 다음 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{R_{\parallel}}{A_{\parallel}} = e^{i\delta_{\parallel}}, \quad \frac{R_{\perp}}{A_{\perp}} = e^{i\delta_{\perp}} \quad (9)$$

식 (7), (8)과 식 (9)로부터 다음 식이 유도된다.

$$\tan \frac{\delta_{\perp}}{2} = -\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{n^2 \cos \theta_i},$$

$$\tan \frac{\delta_{\parallel}}{2} = -\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i} \quad (10)$$

입사면에 평행한 편파와 수직인 편파사이의 위상차를 식 (11)과 같이 정의하면,

$$\delta = \delta_{\perp} - \delta_{\parallel} \quad (11)$$

이 되고, 식 (11)에 대하여 식 (10)을 다시 표현하면 식 (12)와 같다.

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{(\frac{1}{n^2} - 1) \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i}}{1 + \frac{\sin^2 \theta_i - n^2}{n^2 \cos^2 \theta_i}}$$

$$= \frac{\cos \theta_i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\sin^2 \theta_i} \quad (12)$$

위 식을 통해서 입사면에 평행한 편파와 수직인 편파가 반사후에 위상차가 발생하지 않기 위해서는 입사면에 평행으로 입사되거나 임계각으로 입사되어야 한다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 인해 제작된 센서헤드는 전반사가 일어나면서 위상차가 발생하지 않도록 임계각을 고려하여 제작되었다.

3. 실험 결과

본 연구에서 제작된 센서헤드가 앞에서 이론적으로 언급된 것처럼 도체에 흐르는 전류를 정상적으

로 측정할 수 있는 지를 검증하기 위해 그림 4와 같은 간단한 실험시스템을 구축하였다.

그림 4에서 약 86A가 흐르는 도체를 20번 감아 최대 약 1700A까지 흐를 수 있도록 만들었다. 센서헤드에 입사되는 광원은 출력이 35mW인 633nm He-Ne 레이저를 사용하였다. He-Ne레이저에서 입사된 빛은 센서헤드의 임계각으로 반사되도록 정렬되었고, 센서헤드에서 나온 빛은 검광기를 지난 후에 광세기를 광 검출기에 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

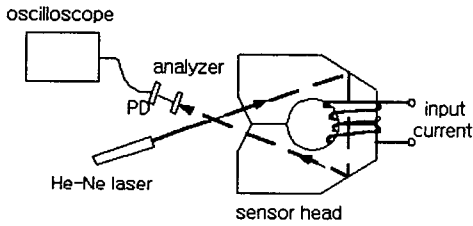


그림 4. 실험배치도

도체에 흐르는 전류값을 0A에서부터 1600AT까지 실험하였으며, 그림 5는 입력 전류가 400AT, 800AT, 1200AT, 1600AT일 때 오실로스코프에 나타나는 파형을 겹쳐놓은 그림이다. 위 그래프에서 알 수 있듯이 모두 일정한 주파수를 가지고 있음을 알 수 있다. 실험에 사용하는 전류원은 상용 주파수 전류를 트랜스를 거쳐 증폭시켜 얻어낸 값이다. 그러므로 상용 교류 전류의 주파수 60Hz가 광전류변류기의 파형에 나타남을 알 수 있다. 위의 그래프를 살펴보면 주기는 약 16000 μ sec이다. 그러므로 주파수는 $1/16000 \mu \text{sec} \approx 60\text{Hz}$ 로써 입력 전류의 주파수를 나타낼 수 있다.

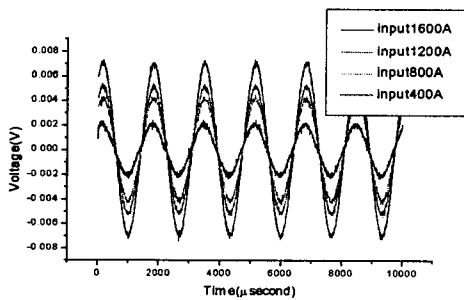


그림 5. 오실로스코프의 출력파형

그림 6은 도체에 흐르는 전류를 200AT부터 1600AT까지 변화시키면서 측정한 전압의 파형을

실호치로 나타낸 그래프이다. 빛이 광입구의 평면에 90°로 입사할 때(즉, 반사면에 임계각으로 입사할 때) 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

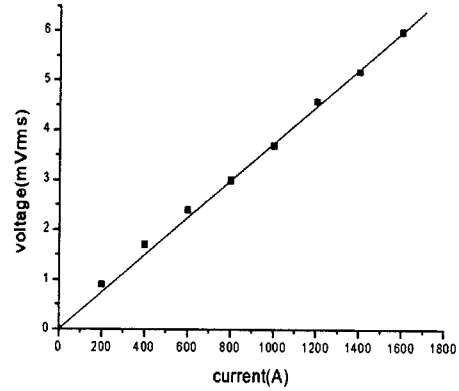


그림 6. 200AT부터 1600AT까지의 전류를 측정한 실험결과

최대 오차는 도체에 흐르는 전류가 200AT일 때 약 최대 17%였으며, 오차는 전류값이 커질수록 작아지는 것을 측정결과로 확인할 수 있었다. 전류값이 작을 때는 파장이 일정할 때의 verdet 상수로 인해 생기는 빛의 편광면의 회전정도가 작고, 전류값이 클 때는 편광면의 회전정도가 커짐으로써 측정결과에서의 오차가 작아지는 것이라고 생각된다. 따라서, verdet상수가 큰 센서헤드를 사용하거나 반대로 verdet가 작지만 센서헤드가 큰 것을 이용하여 전류를 측정하면 전류값이 작은 경우에도 측정오차는 작아지라 생각된다.

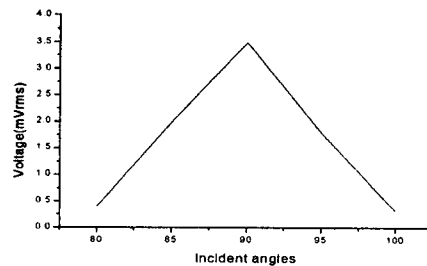


그림 7. 입사각과 출력의 관계

그림 7은 입사각에 따른 출력의 변화를 보여준다. 입력면에서의 입사각은 80도~100도까지 변화 시키가며 실험을 해보았다. 본 논문에서 실험한 센서

헤드는 입사면에 90도로 입사할 때 반사하는 면에 임계각으로 입사하도록 설계된 센서 헤드이다. 그러므로 그림 7과 같이 90도일 때 가장 좋은 결과를 얻으며 90도에서 1도가 벗어나면 실효치가 약 0.3mV씩 줄어들음을 알 수 있다. 또한 입사각이 90도에서 ± 10 도를 벗어나면 출력을 얻지 못함을 알 수 있는데 이는 광경로가 생기지 않기 때문이다.

그림 8을 보면 입사면에 들어오는 빛의 입사각에 의해 센서의 감도에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 80도 일 때는 거의 반응이 일어나지 않는 것을 볼 수 있으며 85도보다는 90도일 때가 약 6배 가까이 감도가 뛰어난 것을 볼 수 있다.

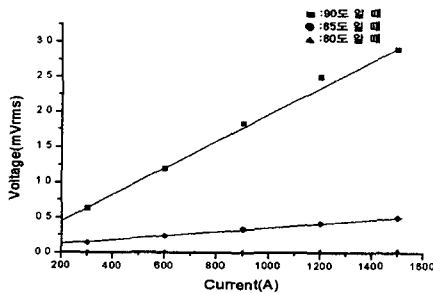


그림 8. 입사각이 다를 때의 결과

4. 결 론

실험을 통하여 대전류를 위한 클램프형 센서헤드의 성능을 증명하였다. 제안된 센서헤드는 먼저 선형적인 특징을 나타내고 있으며 오차는 전류의 값이 커질수록 줄어들고 있으므로 대전류의 측정에 적합할것이라 생각된다. 또한, 중요한 점은 빛이 센서헤드의 광입구에서 입사하는 각을 맞추어야 한다. 입사각이 90°일 때 감도는 최대가 되는 것을 볼 수 있었다. 향후 과제는 주변 온도에 따른 측정결과와의 영향과 입사각에 대한 감도의 변화 그리고, 수mA에서 수십 kA까지의 전류범위에 대한 실험을 통하여 본 연구에서 제작된 센서헤드의 성능을 테스트하고 분석하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] N. Itoh, et al., "Bi-Substituted Rare-Earth Iron Garnets for Fiber Optic Current Sensors", Technical Digest of the 11th Sensor Symposium, pp83-86, 1992.
- [2] Y. N. Ning and D. A. Jackson, "Faraday effect optical current clamp using a bulk-glass sensing element,"

- Opt. Lett., Vol. 18, no. 10, pp. 835-837, 1993.
 [3] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, (Wiley-Interscience, 1991)pp. 203~210.