

고정도 광 전류센서 구현을 위한 파라미터 분석 연구

김 영 수\*, 임 용 훈\*\*, 현 덕 화\*\*

\*초당대학교 전자공학과, \*\*한전 전력연구원 전력계통연구실

A Study on the Parameter Analysis for High Precision Optical Current Sensor Implementation

Young-Soo Kim\*, Young-Hoon Lim\*\*, Duck-Hwa Hyun\*\*

\*Chodang University, \*\*Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - In this paper, some optical parameters which have effects on the measuring precision and sensitivity of optical current sensor are analyzed. Each parameter occurs changes of specific characteristics of optical sensor system. The influences of performance and characteristics variation of optical current sensor are described in accordance with the changes of optical output power, optical bias point which is called phase difference, and a specific constant related to sensor material and wavelength of light source.

1. 서 론

전력계통에서 절연물 내를 전파하는 레이저광은 절연층 면에서 가장 이상적인 정보매체이고 송·배전선에서 나타나는 각종의 전자유도에 의한 장애를 받지 않는 특성을 가지고 있다. 특히 광은 단순한 정보매체만이 아닌 전계·자계와의 상호작용을 통하여 직접 전기량 및 자기량으로 변환하는 변조방식이 가능하다. 그리고 센서가 설치되는 도체 가까운 곳에 능동소자 또는 별도의 전원 등이 불필요하므로 신뢰성 높은 계측시스템을 구축할 수 있다. 이러한 광계측 방식은 절연 및 EMI 장애에 강할 뿐만 아니라, 「비접촉」, 「고감도」, 「병렬처리」, 「소형경량」 그리고 「방폭 안전성」 등에서 장점이 있기 때문에 새로운 계측 미디어로서 기대되고 있다.<sup>[1]</sup>

그러나 광섬유 센서기술은 광의 다양한 파라미터 즉 「진폭, 파장, 위상, 편파면」들과 「반사, 흡수, 굴절, 분산, 산란, 간섭, 회절」 등의 여러 현상과 효과들을 복합하는 기술로서 실제로 주변 환경에 강한 효용성 있는 센서시스템을 구성하는 데에는 어려움이 많다. 또한 앞으로 전력수요가 증가함에 따라 전력계통은 내용량화, 고압화 되고 있어 더욱 문제시되고 있고 전력종합계측시스템을 구축하려는 움직임 등으로 이에 적합한 계측방식의 개발이 요구되고 있다.

광학적인 전류계측 방식에서 초창기 방식은 고압부분에 변류기를 설치하고 트랜스듀서 등으로 변환하여 이를 부호화하고 광변조해서 요구하는 장소에 무선전송할 수 있는 방법 등이 검토되어 왔으나 절연 문제는 해결되었지만 고압부분에 다수의 능동소자를 필요로 하므로 신뢰성 및 유지보수에 어려움이 따른다. 이후로 광CT 연구 방향은 자기광학 효과를 갖는 파라데이 소자들을 고압부에 설치하고 레이저 광을 이용하여 공간전송 함으로써 자계에 따른 광 변환량을 측정하는 방식을 채용하였다. 그러나 이들 방식도 역시 고압부에 능동소자를 설치할 필요가 없고 비접촉형, 고절연 등 장점은 있으나 공간전송에 의한 신뢰성, 정확도면에서 문제가 제기되었다.

1970년대 후반 저손실의 광섬유가 개발되면서 전송로를 광섬유로 이용할 수 있게 되었고 편광성분을 유지하면서 센싱과 전송로를 이용한 순수한 광섬유만을 이용하는 센서에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 전류를 측정

하기 위해서는 낮은 고유 복굴절을 가져야 하고 제조상 열적 응력(Thermal stress) 및 코어의 타원성에 의해 위상지연이 생기게 되어 실용성에 어려움이 따른다.

결정 이외의 전송매체는 광섬유가 개발되면서 저손실 광섬유를 사용하여 공간 전송방식에서 탈피하게 되었고 광원은 초기에 가스 레이저 등을 사용하였으나 콤팩트한 전자회로와 결합하기 위해서는 통신용으로 개발된 단파장대 LED가 주로 이용되어 왔다. 그리고 최근에는 특성이 좋은 광부품 및 주변기기들이 개발되면서 더욱 정밀하고 신뢰성이 높은 시스템을 구축하려는 연구가 활발히 진행중이다.<sup>[2]-[5]</sup>

본 연구에서는 벌크형 광CT 센서 성능 개선을 위하여 광센서 소자의 광학적 특성을 조사한다. 센서의 성능에 영향을 주는 파라미터를 도출하며 센서의 전달함수를 구하여 측정정도에 영향을 주는 여러 가지 파라미터를 분석할 필요가 있다. 이를위해 광 전류 센서의 일반 전달 특성 식을 구하 후, 광원의 출력 광파워 변동, 바이어스 점의 변화에 기인한 위상 변화, 센서 재료 및 파장 변화에 따라 결정되는 상수의 변화가 광 전류 센서의 성능과 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 센서 전달특성

광학센서의 측정 정확도를 파악하기 위해서는 측정하고자 하는 물리량 즉 피 측정 량과 센서의 출력과의 관계를 전달함수로 표시하여 이를 정량적으로 분석하고 전달함수에 관련된 변수들의 변화에 대한 센서의 감도(sensitivity)를 분석할 필요가 있다. 이상적인 센서라면 입력력 관계는 선형함수이며 다음과 같은 선형 전달 특성을 갖는다.

$$R(x) = kx \tag{1}$$

여기서 R(x)는 센서출력, x는 측정 결과이고 k는 상수이다. 그러나, 광 센서 중 식(1)과 같이 완전한 선형 전달함수를 가지는 경우는 없다. 편광소자와 검광소자를 사용하는 자기광학 변조기의 경우 입력력 광 강도 관계를 표현하는 결과 식은 sine 함수의 형태를 갖지만, 수식을 약간 변형하면 식(2)와 같이 항상 양의 값을 갖는 비 선형인 전달함수로 표현 가능하다.

$$R(x) = A \sin^2(x/x_0 + \phi) \tag{2}$$

단, R(x) : 전계 및 자기장에 대한 순시 출력 값

x<sub>0</sub> : 센서의 재료 및 파장에 관계된 정수

A : 센서의 광 출력 및 광 손실에 따른 상수

φ : 센서 구조에 따른 상수

따라서 측정오차를 적게 하기 위해서는 식(2)의 일부

구간에서 선형적으로 근사화하여 사용해야 한다.  
 식(2)에서 여러 가지 위상  $\phi$  ( $\phi = 0, \pi/2, \pm\pi/4$ )에 대한 광 센서 전달 특성을 그림 1에 나타내었다.

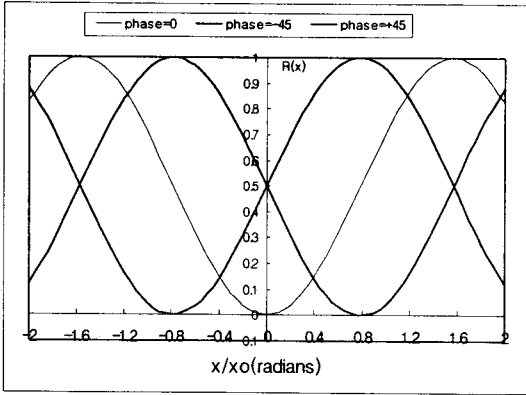


그림 1. 식(2)에 대한 전달 특성

그림 1에서 알 수 있듯이 입력이 0인 부근에서 보면 식(2)의 광 센서의 입력력 관계에서 시스템이 최대의 감도(즉  $dR/dx$ 의 최대치)와 선형성을 유지하기 위해서는  $\phi = \pm\pi/4$ 로 선택하는 것이 바람직하며 만약 큰 직류 신호를 측정하려면  $\phi = 0$  또는  $\phi = \pi/2$ 로 정하는 것이 선형적인 계측시스템 구성면에서 유리하다. 그러나 입력  $x$ 가 양수와 음수인 경우 모두를 측정하기 위해서는 또다른 형태의 전달함수를 사용하는 것이 편리하다. 따라서 식(2)를 이용하여  $\phi = \pi/4$ 와  $\phi = -\pi/4$ 의 차를 계산하고 그 결과를 사용하여 센서 입력력 관계식을 계산하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R(x) = A \sin[2x/x_0 + 2(\phi - \pi/4)] \quad (3)$$

식(3)의 출력함수는 그림 2에 보인 바와 같이 원점 부근에서 가장 좋은 선형성을 가지고 있고, 교류신호(음수 및 양수)를 측정할 수 있기 때문에 일부 선형특성을 갖는 구간에서는 이상적인 센서와 거의 동일한 특성을 갖는 시스템 구성이 가능하다. 즉, 식(3)의 함수가 교류 신호 검출용 광 전류센서의 전달함수로 가장 적합하다고 할 수 있다.

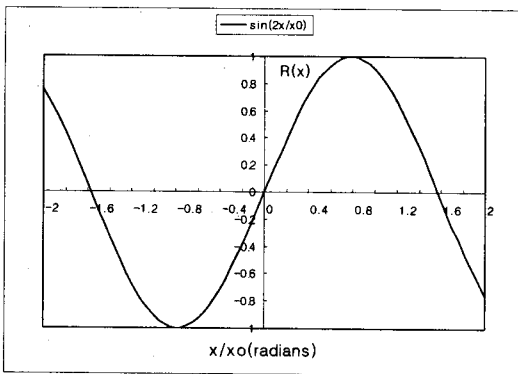


그림 2. 식(3)에 대한 전달 특성 ( $\phi = \pi/4$ )

## 2.2 전달함수의 감도

여기서는 전달 함수를 이용하여 전달함수에 관계된 변수들이 변할 때 센서 시스템의 측정 정확도에 대해서 살펴보고자 한다.

먼저 입력 파형이 정현파 라고 가정하고 이 정현파에

대한 센서출력의 실효치가 각 변수에 대해서 어떻게 변하는지를 조사하였다.

이때 그림 3은 식(3)의 전달함수에 대한 교정 곡선을 나타낸 것이다.

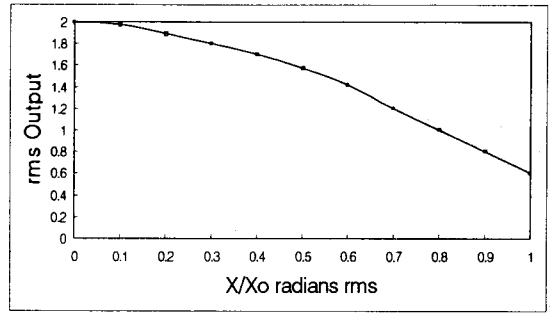


그림 3. 식(3)의 특성을 갖는 센서의 보정 곡선

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 입력  $x/x_0$ 가 커짐에 따라 광 센서 출력의 실효치가 감소하고 있다. 만일 이상적인 센서라면 교정 곡선이  $x/x_0$  축에 평행하게 일정한 값을 가질 것이다. 따라서 사용하고자 하는 상대오차 범위에 따라 입력신호의 최대 라디안 범위가 정해진다.

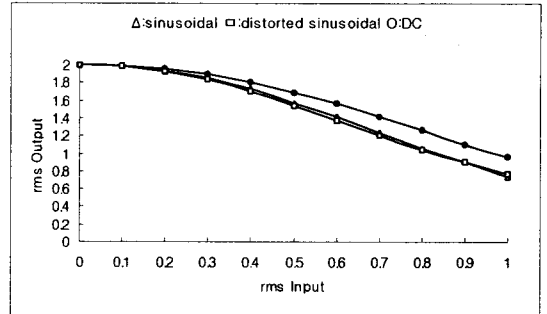


그림 4. 세 가지 파형에 대한 보정곡선

그림 4는 센서 입력 파형이 약간 변했을 때 완전한 정현파와 약간 변형된 파형, 직류 파형에 대한 교정 곡선을 나타낸 것으로 상대오차가 적은 범위 내에서 사용하면 약간의 파형 왜곡은 측정 신호 검출에 비교적 작은 영향을 미친다. 그러나 측정 영역이 너무 크면 측정오차 범위도 증가하기 때문에 적합한 입력 전류의 선택을 하여 그 선택된 영역 내에서만 사용하도록 설계해야 한다.

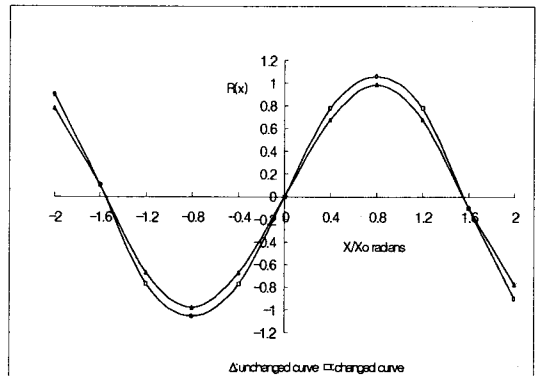


그림 5. A 값의 증가에 따른 전달함수의 영향

만약 전달함수에서 변수 A가 그림 5와 같이 약간 변했다고 하면 교정곡선은 y축 방향으로 수평 이동하기 때문에 선형성에 미치는 영향은 작지만 측정의 정확도를 높이기 위해서는 피측정 범위 내에서는 일정하게 유지되는 것이 필요하다. 그리고, 그림 6에서와 같이  $x_0$ 가 변하는 경우에는 원점부근에서 부호의 기울기가 변하게 되므로  $x_0$  또한 선형성 보다는 측정 정확도 측면에서 일정하게 유지되는 것이 바람직하다.

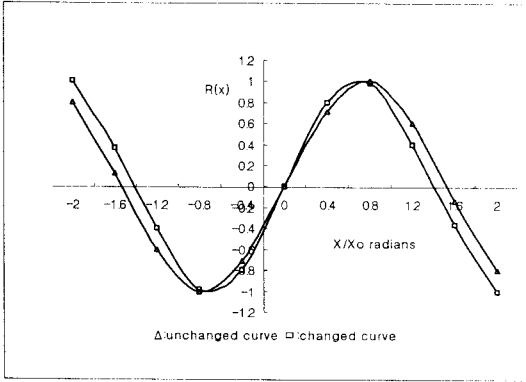


그림 6.  $x_0$  값의 증가에 따른 전달함수의 영향

그러나 그림 7에서 보여주는 바와 같이  $\Phi$ 의 변화에 따라 전달함수의 영향은 다르게 나타난다. 즉  $\Phi$ 의 변화는 전달함수를 x축으로 수평 이동한 것과 같은 영향을 주기 때문에 만약 직류를 측정하는 경우에는 잔류편차(Offset)가 출력으로 나타나고, 정현파를 측정하는 경우에는 입력과 출력사이에 위상 차가 나타나게 된다.

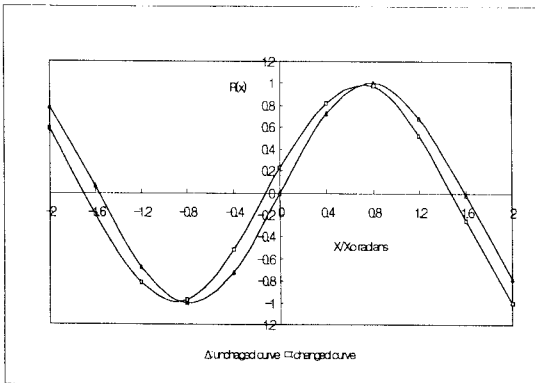


그림 7.  $\Phi$  값의 변화에 따른 전달함수의 영향

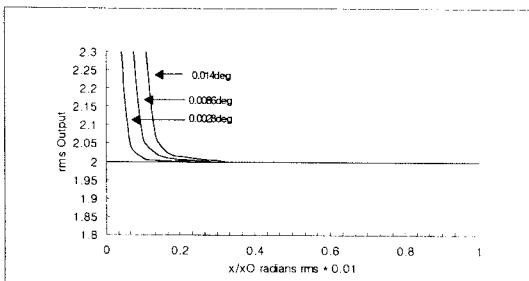


그림 8. 정현파 신호의 교정곡선에서  $\Phi$ 의 미소 변화의 결과

그림 8은 위상  $\Phi$ 가 약간 변했다고 가정했을 경우 그에 대한 교정곡선을 나타낸 것으로 원점 부근에서는 선형성과 정확도 모두 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서  $\Phi$ 의 변화에 대한 센서 출력의 영향은 상당히 크기 때문에 주어진 측정 정확도를 만족하기 위해서는 바이어스 점의 변화를 허용 오차 범위 내에서 유지되도록 해야 한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 고정도 광 전류 센서 구현을 위하여 광 전류 센서의 전달 특성을 구하고 광 파워 변동, 위상 변화, 센서 재료 및 파장 등 센서의 정도와 선형성에 영향을 주는 광학적 파라미터 변화에 따른 광 전류 센서의 특성 변화를 분석하였다.

분석 결과 광 파워(A)가 약간 변할 경우 선형성에 미치는 영향은 비교적 작게 나타났으나 센서의 측정 정도를 높이기 위해서는 측정 구간에서 광원의 출력 파워를 일정하게 유지시키는 전자회로가 반드시 필요하다. 센서 재료 및 파장에 관련된 상수  $x_0$ 가 변할 경우에는 원점 부근에서 기울기가 변하므로  $x_0$  또한 선형성 보다는 측정 정도 측면에서 일정하게 유지되는 것이 바람직하다. 바이어스 점( $\Phi$ )의 변화에 따른 전달함수의 영향은 원점 부근에서 선형성과 측정정도 모두 크게 영향을 받으므로 직류를 측정하는 경우 잔류편차가 나타나고 정현파 측정할 경우 입력과 출력사이에 위상 차가 나타난다. 따라서 측정 정확도를 만족하기 위해서는 바이어스 점의 변화량을 측정 시 허용오차 범위 내로 유지해야 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Detlef Gloge, "Optical Fiber Sensor Technology", IEEE Press, 1975.
- [2] C. K. Kao, "Optical Fiber Sensor Technology II", IEEE Press, 1981.
- [3] T. Mitski, et al., "Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic field sensors", IEEE SM442-8, 1986.
- [4] H. Harms and A. Papp, "Magneto-Optical Current Transformer 3: Measurement", Appl. Opt., Vol. 19, No.22, 1980.
- [5] Y. N. Ning, Z. P. Wang A. W. Palmer, and K. T. V. Grattan, "Recent progress in optical current sensing techniques," Rev. Sci. Instrum., Vol.66, No.5, May 1995.