

보호계전 측면에서의 광 CT와 기존 CT간의 성능 비교

박병석, 안성준, 장문종, 우희곤
한국전력공사 전력연구원

Performance Comparison of Optical CT and legacy CT
in aspect of protective relaying

Byung-Seok Park, Seung-Joon Ahn, Moon-Jong Jang, Hee-Gon Woo
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 전력계통에서 전류를 측정하는 변류기는 주요 전력 설비와 연계되어 보호 및 감시에 있어 중요한 역할을 수행한다. 그러나 기존방식의 전류 변성기는 자기포화에 의한 파형 왜곡과 써지나 잠음 등의 전기적 장치가 갖는 구조적 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 방법으로 전류에 의해 형성된 자계에 의해 광신호의 편광(polarization) 회전을 발생시키는 Faraday 효과를 가지는 광센서를 이용하여 보호계전 분야에 적용 가능한 전류측정기술을 개발하였다. 본 논문에서 기존 전류변성기의 계통 보호에서 발생하는 문제점을 PSCAD/EMTDC 시스템을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 아울러 동일 조건에서 광 CT의 동작 특성을 산출하여 기존 전류변성기와 비교 분석하였다. 분석 결과들로부터 광 CT는 기존 전류변성기가 자기포화되는 상황에서도 정확한 1차 전류의 측정이 가능함을 보였다.

같다[1]. 여기서 Faraday 회전각 θ 는 자계의 세기를 H, 광센서에서 광 경로의 길이는 L, 광의 전파방향과 자계와의 각도를 α 라고 Verdet 상수를 V로 표시할 때,

$$\theta = V \cdot H \cdot L \cos \alpha \quad (1)$$

가 된다. Faraday 소자가 갖는 고유 물성치인 Verdet 상수에 의해 편광의 회전각도가 달라지며, 시스템의 설계에 있어 온도 의존성이나 삽입 손실 등의 특성들과의 관계를 고려하여 광 전류센서를 설정하여야 한다. Faraday 효과를 광 전류센서의 중요 파라메타는 verdet 상수와 온도 의존성 등을 들 수 있으며, 전류량의 정확한 측정을 위해서는 신뢰성 있는 신호처리가 중요하다[2].

1. 서 론

최근 전력설비의 현대화로 미터링 또는 보호계전을 위하여 많은 부분에 디지털 형태의 계측 장치가 사용되고 있다. 이제까지 주로 사용되어 오고 있는 전자계식 전류 변성장치는 대 전류가 흐르는 1차측에서는 도체에 코일을 감아 자계 유도형태로 전류를 감지하고, 2차측에서는 일정비율로 축소된 전류를 사용하여 과전류 보호계전기 코일을 직접 여자 시키거나 전압으로 바꾸어 정지형 또는 디지털형 신호처리에 사용하고 있다. 기존방식의 전류 변성기는 경년에 따른 열화 등에 의해 성능이 저하되면 각종 전기고장의 원인이 되며, 아울러 자기포화에 의한 파형 왜곡과 써지나 잠음 등의 전기적 장치가 갖는 구조적 문제점을 가지고 있다. 더욱이 송배전 전압의 초초고압화에 따른 절연 장치의 규모가 커질수록 절연 비용이 많이 들고 취급 등에 어려움이 많은 실정이다. [1,2]

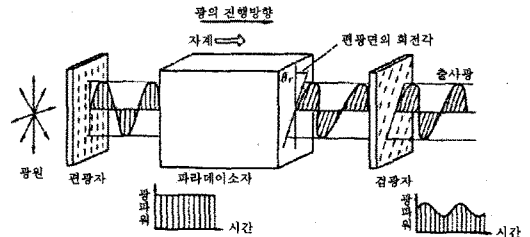


그림 1. 광 CT의 동작 원리

이러한 문제점을 개선하기 위하여 계통 보호 시스템에서의 전류 감지에 있어서 전류에 의해 형성된 자계에 의해 광신호의 편광(polarization) 회전을 발생시키는 Faraday 효과를 가지는 광 전류센서[3,4]를 이용하여 보호계전 기술을 개발하였다.

본 논문에서는 광 전류 센서의 동작 특성을 해석하고 이를 기존의 CT의 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다. 우선 광 CT의 기본 원리 및 동작 특성 해석을 수행하였으며, 다음으로 기존 CT의 시뮬레이션 모델 및 관련 파라메타를 설정하였다. 최종적으로 광 CT의 분석 결과 및 기존 CT의 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 광 CT의 원리

광 CT의 기본 원리는 광의 편광을 회전시키는 성질을 가지는 Faraday소자를 이용하는 것으로 그림 1과

2.2 광 CT의 성능 분석

만약 광이 지나가는 선상의 자장이 일정하다면 수식 1은 다음과 같이 간단히 된다.

$$\theta = V \cdot B \cdot L \quad (2)$$

광 CT는 그림 1과 같이 편광자, Faraday 소자 및 검광자로 이루어져 있으며, 실제 구현에서는 Faraday 소자의 선형성이 우수하도록 광축과 45°가 되는 광학 바이어스를 Rotator를 이용하여 잡아 주는데, 광학 성분을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$|\vec{E}_1| = |\vec{E}_0| \cos(45^\circ \pm \theta) \quad (3)$$

여기서, \vec{E}_1 : 출력광의 전기 성분

\vec{E}_0 : 입력광의 전기 성분

광의 세기는 전기 성분의 진폭을 2승한 것과 같으므로

$$P_1 = P_0 \cos^2(45^\circ \pm \theta) \quad (4)$$

여기서, P_1 : 출력광의 세기(Intensity)

P_0 : 입력광의 세기

이며, 삼각함수의 성질을 이용하여 간략히 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$P_1 = \frac{P_0}{2}(1 \pm \sin 2\theta) \quad (5)$$

가 된다. 이와 같은 결과는 Jones Vector를 이용한 해석(4)을 하여도 같은 결과를 얻을 수 있다.

도체에서 r(m)만큼 떨어진 지점에서 자계의 세기 H는 다음의 식과 같이 형성되며, 그림 2에 거리에 따른 자계의 세기를 나타내었다. 여기서 a는 전력선의 반지름이다.

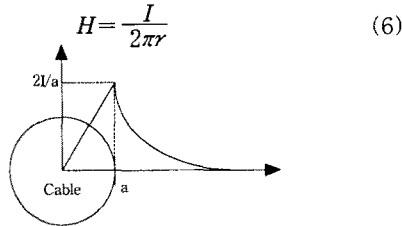


그림 2. 도체에서 r만큼 떨어진 곳의 자계의 세기

광 센서의 위치는 전력선외부에 부착되어지므로(즉, $r \geq a$ 인 경우) 자계의 세기는 전류에 비례하고 거리에 반비례하게 된다. 이상의 관계를 정리하면 광센서의 입력 광에 대한 출력광의 회전각은 전류에 대한 함수로 나타내어지며, 다른 변수들은 시스템 구현상에서 모두 상수로 결정된다.

전력선 전류에 대한 광 CT의 반응은 수광소자와 증폭 회로를 거치면 전압 값으로 나타낼 수 있으며 1H(A/m)가 $4\pi \times 10^{-3}$ Oe인 것을 고려하여 수식 5에 수식 2와 수식 6을 대입하면 결과식은 다음과 같다(+ 부호의 경우만 취함).

$$V_e = A(1 + \sin(2 \times 4\pi \times 10^{-3} \times VL \frac{I}{2\pi r})) \quad (7)$$

위의 최종식에 대입할 각 상수들은 전력선 중심과 광 센서간의 거리 10cm로 설정하고 광 전류센서의 규격으로부터 참조하면 다음과 같이 정해진다.

표 1. 광 센서관련 파라미터

상수 명	수 치	단 위
전력선 중심으로부터		
광센서의 위치(r)	10	cm
광전류 센서의 두께(L)	50	μ m
광 전류 센서의 Verdet 상수(V)	7	deg/Oe · cm

비례상수 A는 광전변환 소자의 특성에 의해 결정되거나 시스템의 증폭단에 의해 조정되므로 자세한 검토는 생략하고 적정 수치를 임의로 설정하였다. 이상의 수치들을 대입하여 정리하면 광 CT의 반응도인 출력전압은 전력선 전류 I에 의해서만 결정되며 다음과 같이 정리되어진다.

$$V_e = A(1 + \sin(1.4 \times 10^{-4} I)) \quad (8)$$

출력 광의 회전각은 수식 8에서 삼각함수의 특성을 고려할 때, 대략 포화시점인 $\pm 70^\circ$ 의 변화를 갖도록 허용한다면 전력선의 측정가능 전류는 50kA까지이며 광 전류센서의 두께(L)를 얇게 하거나, 광 센서와 전력선간의 거리(r)를 멀리하면 더욱 증가할 수 있음을 수식 7에서 알 수 있으나, 반면에 소전류에 대한 측정감도가 떨어진다. 그림 3에 광 CT의 반응 곡선을 나타내었으며, 전류가 커질수록 점차 포화됨을 볼 수 있다. 그림 3은 실험실의 제한된 전류원에서 광 CT의 포화 특성을 잘 관찰하기 위하여 근접된 거리에서 원형 철심을 사용

하여 측정하였다.

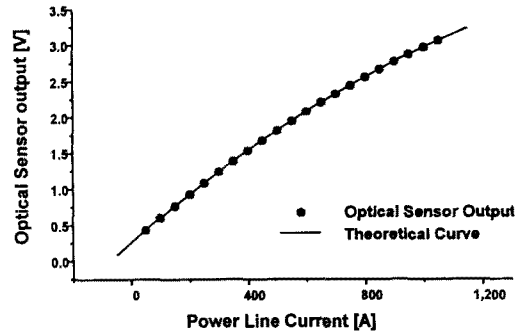


그림 3. 광 CT의 특성 곡선

2.3 기존 CT의 시뮬레이션

기존의 변류기의 성능을 시험하기 위하여 PSCAD/EMTDC시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기본적인 계통의 구성은 154kV 송전 계통을 대상으로 그림 4에 나타내어진 것과 같이 두 변전소 사이의 송전 선로상에서의 지락사고를 가정하여 변류기의 포화 현상을 시뮬레이션하였다. 송전선로는 ACSR480mm를 가정하였으며, 송전 선로의 시뮬레이션 관련 주요 변수값들을 표 2에 나타내었다.

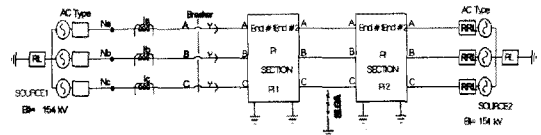


그림 4. 전력계통의 CT 시뮬레이션 모델

표 2. 선로의 주요 임피던스

선로 임피던스	크 기
정상분 저항	0.0436 + j0.3445/km
정상분 리액턴스	0.28133 + j0.4328/km
정상분 캐패시티브 리액턴스	1.6074 + j0.84398/km

아울러, 변전소의 모선등가 임피던스는 정상분이 $4.147 \angle 82.61^\circ (\Omega)$ 이며, 영상분은 $10.286 \angle 79.50^\circ (\Omega)$ 으로 설정하였다. 변전소에 설치된 변류기의 주요 파라미터는 전형적인 변류기를 모델로 설정하였으며 표 3에 나타내었다.

2.4. 시뮬레이션 결과 비교 분석

시뮬레이션은 사고지점의 거리를 1km, 5km로 변화시키며, 사고시 전류의 위상을 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 로 각기 변화시키며 수행하였다. 사고시 1차 전류에 대한 광 센서와 CT의 출력 파형을 비교하기 위하여, 전력선전류, 변류기의 출력 전류와 광 센서의 출력 값의 크기가 동일하도록 정규화 시키고, 사고 거리 1km, 위상 0° 에서의 파형을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 정상 동작 시에 3가지 파형이 모두 일치하나, 사고 발생에 의한 사고 전류에서는 1차 전류에 기존 변류기나 광 센서의 출력 파형이 모두 불일치함을 알 수 있다. 그러나, 광 센서의 경우, 앞에서 설명한 수식 8에서의 sin곡선 형태의 전달함수에 의하여 발생하는 정상적인 동작 결과이나 기존

변류기는 자기 포화에 의해 파형이 왜곡되어 일그러진 출력 결과를 나타냄을 그림 5에서 확인할 수 있다. 기존 변류기의 자기 포화에 의한 출력 왜곡은 현재 정규화된 방법에 의해 1차 전류의 역환산 방법이 개발되지 않은 상태이며, 단지 변류기의 출력 파형의 주파수 영역에서의 분석에 의해 2차 고조파 이상의 성분들의 크기가 이상(異狀) 증가하는 것에 따른 변류기의 포화를 추정할 수 있는 정도이다. 반면 광 센서의 출력 불일치는 수학적 방법 즉 전달 함수의 역함수인 \sin^{-1} 함수를 광 센서의 출력에 적용하면 원래의 1차 전류가 그대로 복원될 수 있으며, 복원된 결과를 그림 6에 도시하였다. 그림 6에서 광 센서의 복원 파형과 1차 전류의 파형이 서로 겹쳐져서 구분되지 않음을 알 수 있다. 따라서 광 전류 센서를 이용하여 전력 계통의 보호 및 감시에 적용할 경우에 어떠한 상황에서도 정확한 1차 전류의 측정이 가능하여 신뢰성 높은 전력 계통 시스템을 구축할 수 있음을 알 수 있다.

표 3. 변류기의 파라메타

파라메터	크기	단위
Cross Sectional Area	5000	mm ²
Path Length	0.887	mm
Primary Side Resistance	0	Ω
Secondary Side Resistance	0.534	Ω
Secondary Side Inductance	0	mH
Burden Series Resistance	2.5	Ω
Burden Series Inductance	11.485	mH
Turn Ratio	1200/5	

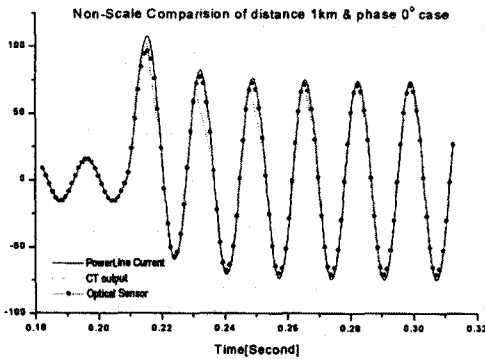


그림 5. 광 CT와 기존 CT의 출력 특성 비교

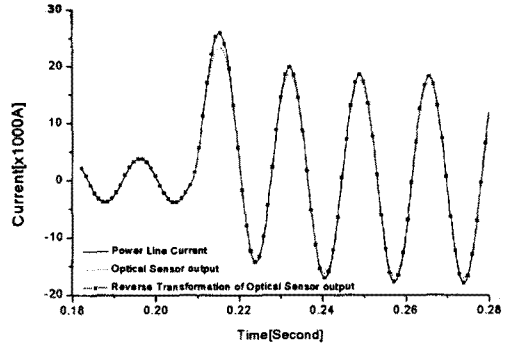


그림 6. 광 CT의 1차 전류 복원 특성

3. 결 론

지금까지는 철심 형태의 변류기를 이용하여 전류 계측과 보호 계전을 수행해 왔으나, 과대 전류가 흐르는 경우에 발생하는 변성기의 포화, 개폐 썬지나 낙뢰 또는 대지 전압 상승에 의해 발생하는 전자유도장해(EMI) 및 변성기의 열화나 고장시 폭발 위험성 등의 문제점을 가지고 있어, 이를 해결하기 위해서는 근본적인 방식의 전환이 요구되고 있는 실정이다.

따라서 이러한 요구에 적극 대처하기 위해 광 전류 센서와 광섬유 전송로를 이용하여 광 CT를 구성하면 광기술의 장점인 소형, 경량, EMI에 강한 면역 특성을 활용하여 전력기기를 계측, 제어하는데 가장 적합한 기술이 될 것이다.

본 논문에서는 기존 CT와 광 CT의 성능 분석을 통하여, 전력계통의 고장 시 기존 변성기는 자기 포화에 의한 출력신호를 왜곡시키는데 반하여 광 CT는 간단한 변환 처리를 통하여 1차 고장 전류를 간단히 복원할 수 있음을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 박해수, "과전류 계측을 위한 광자계센서의 구현," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1871 - 1873, 7월 21, 1997.
- [2] Jun Song, "Development of Magneto-optical Current Transducers for Power Systems", Thesis for the degree of Ph. D, Univ. of Manitoba, Jan. 1996.
- [3] 布下正雄, 久間和生, "光ファイバセンサ(基礎と應用)", 情報調査會, 1986.
- [4] 조홍근, 김일동, 박병석의 2인, "광전자식 보호계전방식 및 신호처리기술연구(중간보고서)", 전력연구원, 3월, 1999.