

# 광 CT를 이용한 전류측정

송민호 <전북대학교 전자정보공학부 조교수>

## 1 서론

CT(Current Transformer)는 전류계를 이용하여 직접 측정하기 어려운 대전류를 측정이 용이한 수준의 2차 전류(주로 1A 또는 5A)로 변환시켜주는 기기이며 주로 고전압, 대전류 환경의 전력계통에서 사용된다. 주된 용도는 metering과 보호계전(Protection)인데 예를 들어 시스템의 인입구에 CT를 설치하여 정확한 전기사용료를 부과하거나 주차단기나 변압기, 또는 모터에 설치하여 과전류에 의한 계기나 계통의 손실방지를 꾀하는 것이 metering 응용 예이며, 계통사고에 의한 이상전류를 정확히 감지하고 이를 보호계전기(Protection relay)에 전달하여 조속하게 차단기를 트립시키거나 재투입하게 하는 것이 보호계전의 응용예이다. 그림 1은 흔하게 사용되는 링(ring)타입의 CT로서 철심(iron core)에 2차 권선을 감고 정격전류가 흐르는 도체를 중심부에 관통시켰을 때 1A(또는 5A)의 2차 출력이 나오도록 권선비를 조정한 자기유도방식의 단순한 구조이다. 측정대상 계통의 전압이나 전류의 크기, 또는 용도에 따라 CT의 크기나 형태, 동반되는 절연설비의 규모 등이 달라지지만 기본적인 원리는 대동소이하다.

이러한 철심형 CT는 구조와 신호처리가 단순하고 저렴하며 오랜 기간의 운용신뢰도를 확보하여 현재에

도 가장 많이 사용되고 있으나 자속포화라는 기술적

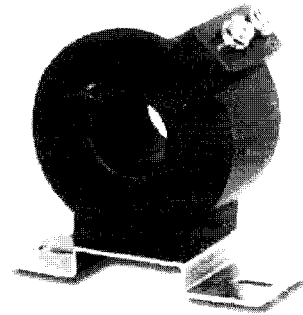


그림 1. Ring type CT

취약점을 가지고 있다. CT의 철심은 지락과 같은 계통사고가 발생하여 정상상태의 수십, 수백배의 전류가 흐르면 자속포화현상을 일으키며 그림 2와 같이 왜곡된 2차 출력을 발생시키며, 계통이 정상상태가 된 후에도 잔류자속이 남아 신속한 계통복원을 어렵게 만든다. 그 외에도 히스테리시스에 의한 출력의 비선형성과 응답속도의 제한에 따른 과도현상해석의 제약 등도 약점으로 꼽을 수 있다. 이러한 기술적 문제들을 해결하기 위하여 기존 CT를 다양하게 변형한 Rogowski Coil, Zero Flux CT(ZCT), Hall Effect CT 등이 개발되었으며 지속적으로 그 적용범위를 넓혀가고 있는 중이다. 한편 전자기 유도 현상과는 전혀 다른 개념의 광학적 현상을 이용한 전류측정

## 기술해설

이 오래 전부터 시도되어 왔는데 최근 광산업의 발전과 더불어 상용화가 활발하게 이루어지고 있으며 초고압화, 자동화되어가는 차세대 전력계통에 적용할 신기술로 관심이 집중되고 있는 상황이다. 본 기술해

설에서는 광 CT의 동작원리, 기존 CT에 대한 기술적 우월성, 실용화과정의 난제 및 국내외 기술동향에 대해서 기술하고자 한다.

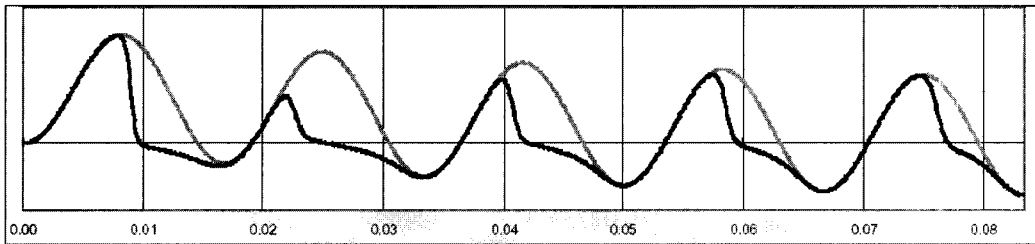


그림 2. 자속포화에 의한 CT 출력의 왜곡

## 2. 광 CT의 원리

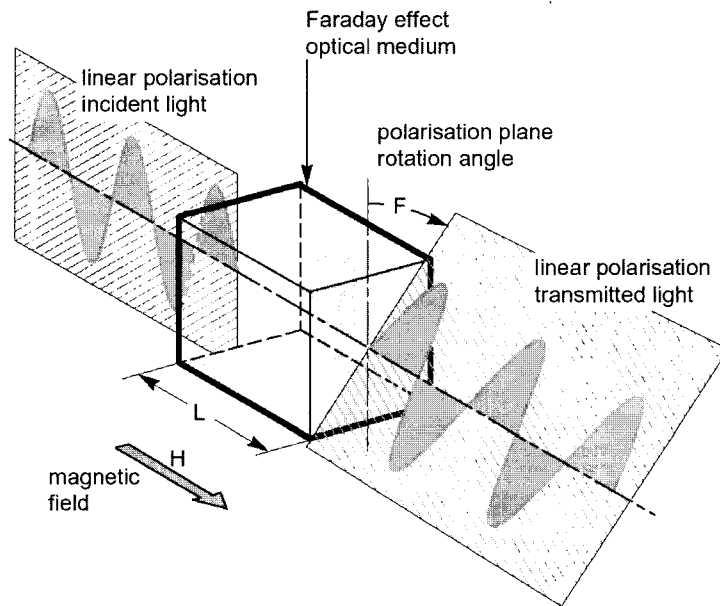


그림 3. Faraday 효과

광 CT의 동작원리는 자기광학(magneto-optic) 현상인 Faraday 효과(1845년, Michael Faraday)에 근거한다. 대부분의 광학매질은 자기장

에 의하여 광학적 특성이 일부 변화하는 자성체이며 이러한 변화는 그림 3과 같이 입력편광을 변화시킨다. 즉, 도체 주변에 전류에 의한 자기장이 형성되고

그 영향아래 놓인 광학매질(Faraday 소자)은 자기 광학효과에 의하여 자신을 통과하는 선형편광의 진동축을 회전시키는 것이다. 이때 편광축의 회전각  $F$ 는 아래 식과 같이 자기장, 즉 전류에 비례하는 값을 가진다.

$$F = V \int H \cdot dL$$

윗식에서  $V$ 는 Verdet 상수로서 광학매질의 자기광학효과 크기를 나타내는 상수이다. 따라서 회전각  $F$ 를 정밀하게 측정하면 전류의 값을 알아낼 수 있게 되는 것이다.  $F$ 를 측정하는 방법에 따라 편광분석형(polarimetric)과 간섭계형(interferometric) 광 CT로 구분하는데, 편광분석형은 Faraday 소자의 후면에 검광기(analyzer)와 PD(photodetector)를 두어 회전각에 따라 PD 출력의 크기가 변화되게 구성한 것이다. 간섭계형은 광섬유형 Faraday 소자에만 적용할 수 있으며 Faraday 효과에 의하여 진행속도가 달라진 두 원형편광성분의 위상차이를 간섭신호로부터 얻어내며 복잡한 구조와 신호처리를 요구하지만 편광분석형에 비하여 정밀도가 높은 것이 특징이다.

### 3. 광 CT의 형태에 따른 구분

Faraday 소자의 형태에 따라 광 CT를 벌크(bulk)형, 폐회로 벌크형, 광섬유형으로 구분할 수 있다. 벌크형은 구조와 신호처리가 간단하여 저가의 소형구조로 적합하며 Faraday 소자로는 주로 Verdet 상수가 매우 큰 RIG(Rare-earth doped Iron Garnet)를 사용한다(예: YIG, Yttrium Iron Garnet). RIG 계열의 소자는 광섬유나 일반 유리에 비하여 수천배 이상 큰 Verdet 상수를 가지지만 투과 특성 등이 나빠서 주로 박막형태로 가공되어 사용된

다. 일본의 Matsushita 전기가 1990년대 중반 벌크형 광 CT를 상용화한 것으로 알려져 있으며 단점은 폐회로형이 아니므로 도체와의 간격이 변할 경우 출력이 변동하며 측정대상체 이외의 다른 신호원에 의해서도 영향받을 수 있다는 것이다.

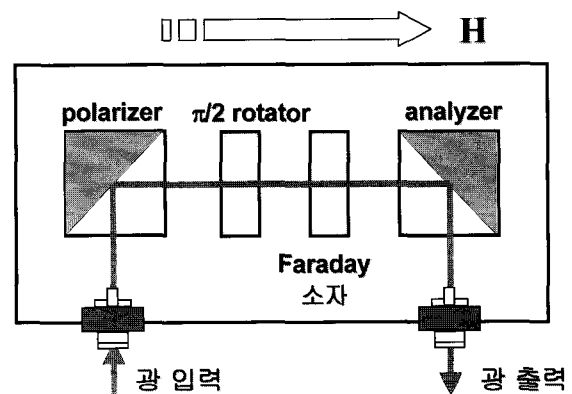


그림 4. 벌크형 광 CT

그림 5는 벌크형 광 CT의 약점을 보완하기 위하여 벌크소자가 도체를 감싸도록 구성된 폐회로 벌크형 광 CT의 개념도이다. 폐회로형이므로 도체와의 간격이나 외부 신호원에 의한 출력변화가 없어서 보다 정밀한 측정이 가능한 것이 장점이나 벌크형에 비하여 복잡한 구조와 광정렬의 어려움으로 비용과 취급의 용이성 측면에서는 벌크형에 뒤진다 하겠다. 그림 6은 광섬유형이며 도체주위에 감은 광섬유가 센서와 도파로 역할을 동시에 하므로 벌크형에 비하여 광정렬이나 손실에 따른 어려움이 크게 감소한다. 또한 폐회로형 센서의 구성이 쉽고 센서코일의 턴(turn)수에 출력의 세기가 비례하므로 측정 정밀도와 범위를 조절하기가 매우 용이하다. 그러나 광섬유는 굴절률이 축에 따라 다른 정도를 나타내는 선형복굴절의 양이 벌크형 소자에 비해서 매우 커서 온도나 진동에 매우 민감한 출력변화를 나타내는 문제를 갖고 있다.

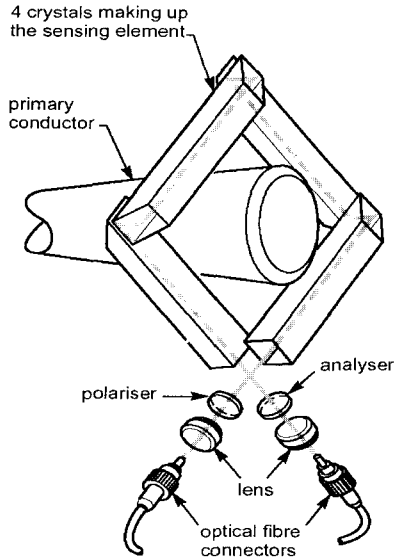


그림 5. 폐회로 벌크형 광 CT

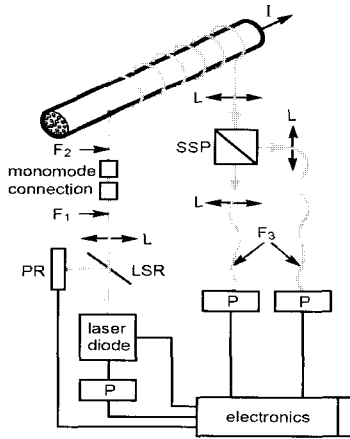


그림 6. 광섬유형 광 CT

#### 4. 광섬유의 선형복굴절 영향 극복 방안

광섬유형 CT는 벌크형에 비하여 기능과 편리성, 경제성에서 보다 높은 가능성을 가지지만 기술한 바와 같이 선형복굴절에 의하여 현장적용에 어려움을 겪게 된다. 따라서 최근 20여년간 많은 연구가 이러한 선형

복굴절의 영향을 극복하는 문제에 집중되었으며 그 중 효율적으로 알려진 몇 가지 방법은 다음과 같다.

- A. Fiber Annealing: NIST 연구진이 개발한 방법으로 광섬유 센서코일을 높은 온도로 열처리하여 코일의 스트레스를 제거하므로써 선형복굴절의 수치를 낮추는 방법이다.
- B. Low Stress-Optic Coefficient Fiber: 납을 많이 첨가한 Flint glass로 광섬유를 제조할 경우 진동이나 온도변화에 따른 스트레스, 또는 구부림 등에 의하여 발생하는 선형복굴절의 영향을 크게 줄일 수 있다.
- C. Fiber Twisting: 일반 광섬유를 비틀면 원형복굴절이 유도되는데 이는 선형복굴절에 의하여 편광의 형태가 변화하는 것을 억제하는 효과가 있다.
- D. Spun Fiber: 모재를 회전시키면서 광섬유를 제조한 것으로 광섬유를 비트는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있으며 취급의 용이성을 크게 향상시킨다
- E. 기타: FRM(Faraday rotator mirror)을 한쪽 끝에 장착하여 반사형 센서코일을 만들거나 리본 모양으로 센서코일을 감거나 신호처리를 이용하는 등 다양한 방법들이 제안되어 왔다.

#### 5. 광 CT의 장점

광 CT는 철심을 사용하지 않으므로 기존 CT의 기술적 단점인 자속포화, 잔류자속, 비선형성의 문제로부터 자유롭다. 뿐만 아니라 센서코일이 광섬유와 같은 절연체이므로 고전압환경에서도 절연설비의 필요성이 크게 감소하여 전체적인 시스템의 부피와 무게가 기존 CT에 비하여 현저히 감소하게 되며 그에 따른 안전성의 향상과 유지보수 비용의 절감이 크게 기대된다. 그림 7의 화살표로 표시된 부분이 유럽의 업체에서 현장적용 시험을 한 광 CT의 사진이다. 측면의 7,000(kg)에 달하는 절연설비로 구성된 500(kV)급 기존 CT와는 달리 100(kg) 내외의 매우 작고 가벼

운 구조로 되어 있어 자속포화와 관련된 성능상의 장점은 차치하더라도 설치와 유지보수의 편리성 증대 및 비용의 감소가 매우 클 것임을 쉽게 짐작할 수 있다.

- 자속포화, 잔류자속, 히스테리시스 없음
- 절연의 필요성 감소
- 경량, 소형 구조
- 빠른 응답특성
- 조절이 용이하며 폭넓은 측정범위
- 취급의 안전성(2차 개방등의 위험 없음)
- 경제성(초고압시스템)

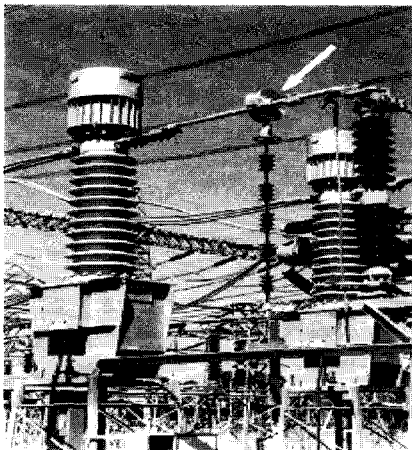


그림 7. 광 CT의 현장적용

## 6. 광 CT의 세계적 개발동향 및 경향

광 CT에 관한 연구는 1894년에 그 첫 사례를 찾을 수 있을만큼 오랜 역사를 가지고 있으며 현재의 벌크형과 광섬유형 광 CT의 기본적인 형태는 1967년과 1971년 발표된 미국특허에서 찾을 수 있다. 이후로 미국과 일본, 영국, 스위스, 독일 등 전력계통 선진국의 대학과 연구기관, 전기설비업체 등을 중심으로 이루어진 연구결과의 예는 매우 다양하며 국내에서도 몇 군데의 대학과 전기연구소, 전력연구원 등이 10여년간 광 CT 연구를 수행한 예를 찾을 수 있다.

그러나 광 CT의 상용화는 아직은 초기단계이며 현재 구체적인 시장규모와 생산업체를 파악하기는 어렵다. 그림 8은 인터넷을 통하여 접할 수 있는 광 CT 제품들이며 (a)는 국내업체에서 개발한 벌크형, (b)는 유럽의 전기설비업체인 ABB에서 개발한 폐회로 벌크형, 그리고 (c)는 캐나다 Nxtphase의 광섬유형 광 CT이다. Merlin Gerin이나 Square D 등의 업체에서도 상용화 단계의 광 CT를 찾을 수 있는데 대부분 성능이 metering의 경우 IEC Class 0.2, 보호계전용은 IEC Class 5P 수준이며 하나의 CT를 이용하여 metering과 보호계전을 동시에 수행할 수 있다고 한다. 그림 9는 CT의 정밀도에 관한 IEC(International Electrotechnical Commission) 185 표준을 도식화한 것으로 그림과 같이 CT의 Class는 정격전류에서의 %크기오차와 위상오차를 통합하여 얻어진 총오차의 수준에 따라 결정된다. 예를 들어 IEC Class 0.2의 경우 1차 정격전류에 대한 2차측 출력의 오차는  $\pm 0.2\%$ , 위상오차는  $\pm 10^\circ$  이내로 유지가 되어야 한다. 보호계전용 Class인 IEC 5P의 경우는  $\pm 1\%$ , 위상오차는  $\pm 60^\circ$  이내가 되어야 한다.

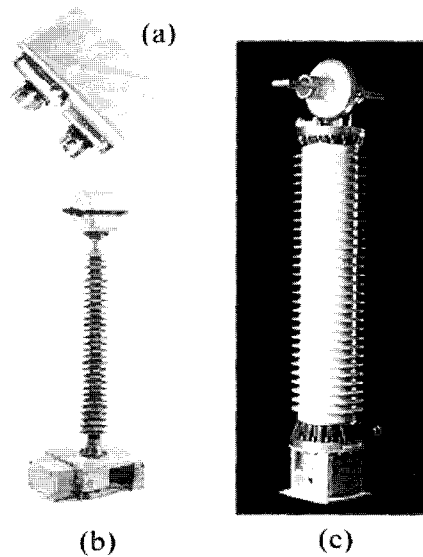


그림 8. 상용화된 광 CT의 예

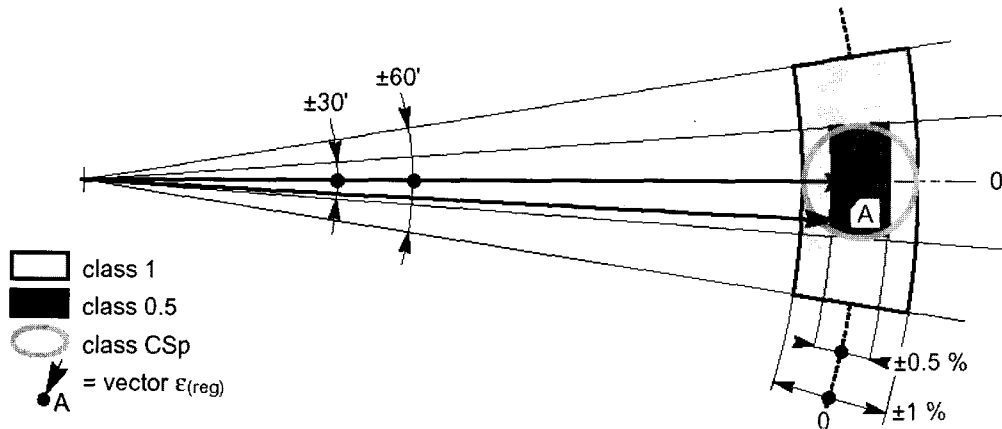


그림 9. IEC 185 표준에 따른 CT의 정밀도

표 1은 기존 CT와 이를 변형한 Rogowsk Coil, Zero Flux CT, 그리고 광 CT를 몇가지 기준에 따라 비교한 것이다. 광 CT는 성능과 성장성 측면에서 가장 높은 가능성을 가지고 있으며 경제성에서도 초고전압 시스템의 경우 안전 및 유지보수 비용의 절감에 따라 기존 CT에 비하여 비용적 우월성을 가질 수 있다.

으나 최근 광기술의 발전으로 성능과 비용측면에서의 경쟁력을 확보하였고 또한 갈수록 고전압, 대용량화, 디지털화 되어가는 전력계통의 경향을 고려할 때, 광 CT가 빠른 속도로 적용범위를 넓혀갈 것임을 짐작하기는 어렵지 않은 일이다.

표 1. 각종 CT의 비교

	기존 CT	Rogowski Coil CT	ZCT	광 CT
성능	△	◎	○	◎
호환성	◎	○	△	△
경제성	○	◎	×	○
성장성	△	○	×	◎

## 7. 결론

광 CT의 장점은 크게 두가지로 요약된다. 첫째는 자속포화에 따른 여러 가지 기술적인 제약이 없다는 것이며 둘째로는 구조적인 특성으로 취급, 유지보수가 간편하고 안전성이 증대될 수 있다는 것이다. 오랜 연구와 이론적인 장점에도 불구하고 실용화가 늦어졌

## ◇ 저자 소개 ◇



송민호(宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학부 졸업(박사). 1997-2000년 Pennsylvania 주립대학교 Post-Doctor. 2000년 6-8월 기초전력공학공동연구소 전임연구원, 2000년 9월-현재 전북대학교 전자정보공학부 조교수, 본 학회 총무이사.