

배전용 광계측장치 구현에 관한 연구

오상기\*, 김요희\*, 김인수\*, 박해수\*, 변우봉\*, 강욱\*, 양승국\*\*  
 한국전기연구원\*, 한국해양대학교 전자공학과\*\*

A study on the implementation of optical measuring sensor for distribution system

Sangki Oh\*, Yohee Kim\*, Insoo Kim\*, Haesoo Park\*, Woobong Byun\*, Uk Kang\*, Sungkuk Yang\*\*  
 KERI\*, Korea Maritime University\*\*

**Abstract** - 최근 배전계통에서는 전력공급 신뢰도 향상을 위해서 평상시 및 사고시의 전압/전류를 신속하고, 정확하게 계측할 수 있는 광계측 방식의 적용이 적극적으로 진행되고 있다.

본 논문은 이러한 것을 배경으로 하여 배전용 광 CT 및 PT의 국산화 모델의 선정, 시제품 제작 및 특성시험의 결과에 대해서 기술하였다.

1. 서 론

최근 광 CT 및 PT는 외국의 전력회사들이 가장 관심을 가지고 연구 개발하고 있는 분야로서 일부 전력기기용 광센서는 실용화 시험 중에 있다. 이러한 광센서는 고압부에 능동소자 및 전원 등이 포함되지 않기 때문에 구성이 간단하고 절연성능이 우수하며 전자유도에 영향을 받지 않은 계측시스템을 구축할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 배전자동화 개폐기와 같은 전력기기에 적용하기 위한 배전용 광 CT 및 PT를 개발하기 위한 연구로서 적정 모델을 선정하여 시작품을 설계 제작하였다. 그리고 성능을 확인하기 위해서 특성시험을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 광센서의 특성

2.1.1 광전류 센서

레이저광의 투과시 자계에 의해서 편광면이 회전하는 광학소자 즉 Faraday 효과를 일으키는 매질은 상자성체 혹은 반자성체를 도핑한 Glass(Schott SF-6 glass 등) 류, 강자성체인 YIG 및 TGG, Pb-glass, 비결정질인 BGO, BSO, ZnSe 단결정 등이 있다.

이러한 매질에서 편광면의 회전은 광파의 통과 방향과 평행한 자계 성분에 의해서 일어나게 되는데 이때 편광면 회전각  $\theta$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 V는 Verdet 상수(rad/AT), L은 광로장(m), H는 자계(AT/m),  $\varphi$ 는 광선과 자계의 각(rad)이다.

배전용 광전류 센서는 옥외에서 사용되기 때문에 극히 안정된 온도 특성 및 고정도가 요구되고 있어 새로운 결정인  $(YS_mLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$ ,  $(BiGdY)_3Fe_5O_{12}$  등이 개발되고 있다. 이러한 광학 소자는 고감도의 YIG 결정을 기본 조성으로 하여 온도 특성에 대한 단점을 개선한 것이다.

본 연구에서는 포화 자속밀도가 1,000Oe(80kA/m) 정도이고 온도 의존성이  $-0.06\text{deg}/^\circ\text{C}$ 로 매우 우수한 특성을 가지고 있는 RIG( $BixGdyY_{3-(x+y)}Fe_5O_{12}$ )를 광전류 센서로 선정하였다.

표 1은 RIG( $BixGdyY_{3-(x+y)}Fe_5O_{12}$ )에 대한 광학적 특성을 나타낸다.

표 1. RIG의 광학적 특성

항 목	종 류	RA78	RA83
파 장( $\mu\text{m}$ )		0.78	0.83
삽 입 손 실(dB)		<2.4	<3.8
Wavelength Dependence(deg/nm)		-0.24	-0.17
Faraday Angle(deg)		$45 \pm 2$	
Verdet Constant (deg/Oe · cm)		9	7
두께( $\mu\text{m}$ )		550	570
포화자속 kA/m(Oe)		80(1,000)	
Temperature Dependence(deg/ $^\circ\text{C}$ )		-0.06	

2.1.2 광전압 센서

배전용 광전압 센서로 선정된 BSO ( $Bi_{12}SiO_{20}$ )는 전계가 인가된 상태에서 광이 결정을 통과하면 2개의 x, y축 방향으로 진동하는 광파에 위상차가 발생한다. 이러한 복굴절 현상은 굴절률의 온도 의존성이 편광성분에 따라 달라지기 때문에 광학 바이어스 제어에 영향을 준다. 이러한 BSO의 위상차( $\Gamma$ )는 식 (2)와 같으며, 식 (3)은 BSO의 반파장 전압( $V_\pi$ )으로 약 6.8kV 정도가 된다.

$$\Gamma = \frac{2\pi \gamma_{41} n_0^3 V_z}{\lambda} \quad (V_z = E_z l) \quad (2)$$

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2\gamma_{41} n_0^3} \quad (3)$$

본 연구에서 광전압 센서로 채택한 BSO( $Bi_{12}SiO_{20}$ )는 Pockels 효과를 이용하여 1차 적으로 전계를 측정하고 이것을 매개로 하여 전압을 측정한다. 이러한 전기광학소자는 Czochralski 법에 의해서 성장시키는데 표 2에 BSO와 BGO( $Bi_{12}GeO_{20}$ )의 특성을 나타낸다.

표 2. 광전압 센서의 광학적 특성

항 목	종 류	$Bi_{12}SiO_{20}$	$Bi_{12}GeO_{20}$
비저항		$5 \times 10^{13} \Omega \text{cm}$	$8 \times 10^{10} \Omega \text{cm}$
전송범위		0.45~0.9 $\mu\text{m}$	0.45~0.9 $\mu\text{m}$
밴드갭		3.15~3.25eV	3.15~3.25eV
전기광학계수		$5 \times 10^{-10} \text{cm/V}$	$3.4 \times 10^{-10} \text{cm/V}$
Loss Tangent		0.0015	0.0035
굴절률		2.45	2.41

## 2.2 광계측장치 설계 및 제작

### 2.2.1 광 CT

그림 1은 자계 및 전류 센서의 설계 및 구성도로서 Faraday 소자는 RIG를 사용하고 최적의 광학 바이어스를 걸어주기 위해서 1/2 파장판을 채용하여 입력광과 출력광이 평행하도록 설계하였다. 그리고 편광자와 검광자는 입사광과 출사광을 90° 각도로 반사시킬 수 있는 PBS 광학소자를 사용하였으며 입력측 광의 효율적인 결합을 위해 FC-Mini BNC 어댑터를 채용하였다. 여기서 외부 자계에 의한 회전각  $\theta$ 는 검광자에 의해 광각도로 변환되고 광케이블을 통해 신호처리부에 전송된다.

그리고 광전류 센서에서 측정전류의 확대 방안으로 소전류 영역에서는 공극의 거리를 작게 하는 것이 유리하고 대전류 영역에서는 포화 자속밀도가 높은 코어의 재질을 선정해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 전류(자계) 검출의 효과를 증가시키고 다른 상의 전류영향을 줄이기 위해서 비투자율이 큰 순철 코어를 사용하였다.

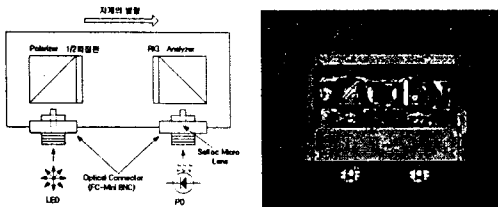


그림 1. 광 CT의 설계 및 구성도

### 2.2.2 광 PT...

일반적으로 옥외 및 단독으로 사용되는 전압 계측용 센서는 광학소자에 균등 전계를 가하기 위해서 BSO 양단의 ITO 전극에 전압을 인가하여 사용한다. 이러한 구조는 인가전압의 취득 및 분압이 용이한 설비에서 이용되는 방식으로 BSO의 경우 선형성이 유지되는 최대전압이 약 500V 정도로서 이것은 ITO 전극간의 거리가 5mm이기 때문에 전기광학소자 내부에 100kV/m의 전계가 형성되게 된다.

본 연구에서 설계 제작한 광전압 센서는 개폐기 내부에는 공간이 협소하기 때문에 3상 도체의 주위에는 강한 동전위가 형성되어 있기 때문에 적당한 위치에 보조전극을 설치하면 전압이 유지되는 현상을 이용하여 BSO의 ITO 전극에 전압을 인가하는 방식으로 설계하였다. 그리고 전압 계측을 위해서는 송수광부와 멀티모드 광파이버(100/140 $\mu$ m)로 연결하게 되는데 이러한 광전송을 위해서 FC-Mini BNC 어댑터에 평행빔을 집광하기 위한 Selfoc Micro Lens(SML)를 수용하여 접속 단자를 설계 제작하였다. 또한 외부 함체에 광학소자 및 전압센서를 설치함으로써 먼지, 습기 및 충격에 견딜 수 있도록 그림 2와 같이 설계 제작하였다.

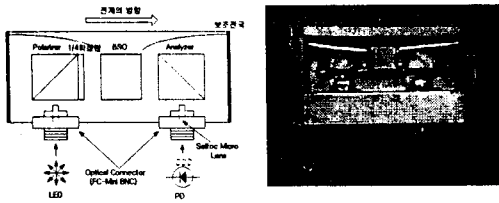


그림 2. 광전압 센서의 설계 및 구성도

### 2.2.3 광원 및 신호처리부

배전용 광센서에 사용되는 광원은 온도에 의한 출력광의 안전성과 선형성을 고려하여 발광 다이오드를 선정하

였다. 특히 배전자동화 개폐기에서는 접속점 및 굴곡 요소가 많아 고출력의 LED가 필요하며 광신호의 전송이 용이한 구조로 제작하는 것이 필수적이다. 그래서 본 논문에서는 전송로 및 광센서 전송손실을 고려하여 광파이버 접속이 용이하도록 SC커넥터가 부착된 LED를 채용하여 LED에 흐르는 전류가 약 100mA일 때 광파이버에 결합된 출력이 약 600 $\mu$ W 정도가 되도록 E/O 변환기의 회로를 설계 제작하였다.

광신호 처리부는 검광자를 통해 출사된 빔이 자계의 세기에 비례하여 변조된 신호가 기본 광량에 실려 나타나는 광학적 신호를 외부의 환경변화에 영향을 받지 않도록 하여 전기적 신호로 바꾸어주는 회로로서 배전선의 전압 및 전류의 세기에 따라 진폭 변조된 광신호를 검출하는 방법으로 광신호가 기본적으로 가지는 직각성분과 외부 전기적 신호에 의해 변조되는 교류성분을 분리하여 계산하는 방식을 채택하여 설계 제작하였다. 그림 3은 광원, 수광 회로 및 신호처리 회로의 사진을 나타낸다.

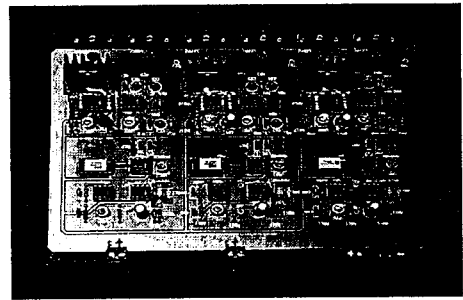


그림 3. 광원 및 신호 처리부의 PCB 사진

### 2.2.4 시제품의 구성

본 연구에서는 기존의 배전자동화 기능은 유지하면서 고전도의 전력량 계측을 실현하여 정확한 구간 부하를 산정할 수 있는 고절연 신뢰도를 갖는 광계측 자동화 개폐기를 개발하기 위한 것으로 그림 4는 일반적인 구성도를 나타낸다.

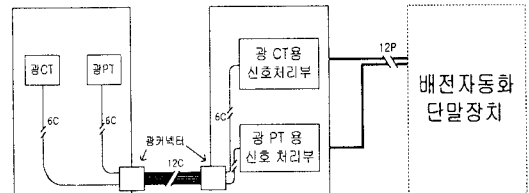


그림 4. 시제품의 일반 구성도

이러한 광전압 및 전류 계측시스템은 광신호 처리함의 LED 광원에서 출력된 광이 광케이블을 통해 개폐기 내부에 설치된 광센서에 전달된다. 광센서에서 수신된 광신호는 전계 및 자계에 의해 변조가 되는데 이 변조된 광신호를 검광자에 의해서 검출한 후 수신용 광케이블을 통해 광신호 처리부의 수광회로에 전송한다. 그리고 광신호 처리함의 신호처리회로에 의해서 전압 및 전류값으로 환산하여 기존의 배전자동화 단말장치에 전송하여 표시하게 된다.

## 2.3 특성시험

### 2.3.1 온도 특성 시험

BSO의 온도 특성 시험은 YEW-2558을 1000V에 놓고 상온 20°C를 기준으로 하여 10°C 상승/하강시 출력전압의 변동율을 측정하였다. 측정 결과는 -20°C부터

60°C까지의 범위에서 1% 이내의 오차가 있음을 확인할 수 있었으며 -10°C에서 0.53%의 최대 오차가 나타났다. 그리고 광전류 센서의 RIG의 온도 특성을 측정하기 위해서 항온조에서 -20~60°C 범위까지 전류값을 변화시키면서 측정한 결과는 오차가 약 0.5% 정도로서 양호한 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다

### 2.3.2 선형성 시험

가. 광전압 센서

BSO를 이용한 광전압 센서에 대한 선형성을 측정하기 위해서 배전자동화용 개폐기 A, B, C상에 고전압 발생기로부터 60Hz 교류전압을 6.6kV에서 19.8kV까지 인가했다. LED 광원으로부터 직류 성분의 광을 광전압 센서부에 입사하면 교류 전압의 변화에 따라 변조된 광출력이 얻어진다. 이렇게 강도 변조된 광출력은 전기신호로 변환되고 신호처리회로에 의해서 증폭된 후 전압 신호가 출력되는데 그림 5는 이에 대한 결과이다.

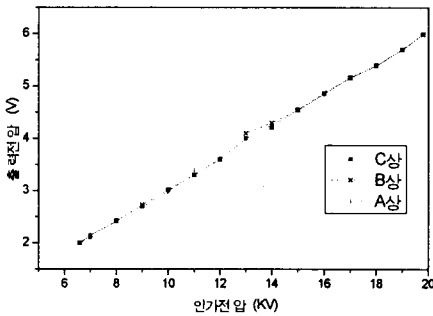


그림 5. 광전압 센서의 출력전압 레벨

한국전력공사 배전자동화 시스템 규격에서 6.6kV에서 2V, 13.2kV에서 4V, 19.8kV에서 6V 출력을 제공하도록 규정되어 있는데 광전압 센서의 인가전압에 대한 출력전압의 관계를 확인한 결과 B상의 광전압 센서가 13.2kV에서 최대의 오차인 2.5%가 나타났다. 그외의 영역에서는 1% 이하의 아주 양호한 오차 특성을 가지고 있으며 실제 적용이 가능한 것으로 판단된다

나. 광전류 센서

GIG를 이용한 광전류 센서에 대한 선형성을 측정하기 위해서 배전자동화용 개폐기 A, B, C상에 전류 발생기로부터 60Hz 교류전압을 20A에서 1,000A까지 인가했다. LED 광원으로부터 직류 성분의 광을 광전류 센서부에 입사하면 교류 전류의 변화에 따라 변조된 광출력이 얻어진다. 강도 변조된 광출력은 PIN-PD에서 전기신호로 변환되고 신호처리회로에 의해서 증폭된 후 전압 신호가 출력되는데 그림 6은 측정된 광전류의 결과이다.

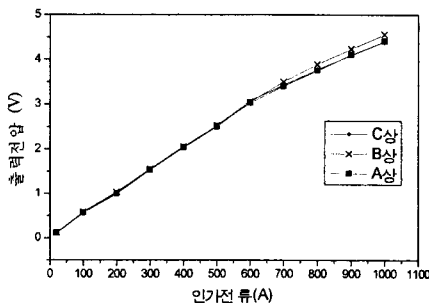


그림 6. 광전류 센서의 출력전압 레벨

광전류 센서에서 300A 1.5V, 600A에서 3V 900A에서 4.5V의 전압이 출력되도록 조정하였는데 광전류 센서의 인가전류에 대한 출력전압의 관계를 확인한 결과 20A에서 700A까지는 2.5% 이내의 선형성이 유지되나 800A 이상에서는 오차가 커지고 선형성이 포화형태를 나타내고 있다. 이러한 원인은 자속을 집속시키기 위해 사용한 순철 코어가 800A의 고전류에서는 자속밀도가 포화되기 때문이다. 그러나 현재 배전계통의 정격전류는 400A로서 일반적으로 그 이하인 200A 정도로 운전하고 있기 때문에 실제계통의 전류를 계측하는데 별다른 문제점이 없다고 판단된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 배전용 광 CT 및 PT의 국산화를 실시하고, 이러한 광계측 기술을 전력기에 적용하는 것을 주요 연구 목표로 하여 고정도 및 고절연 신뢰도를 실현하기 위한 광 CT 및 PT 내장형 배전자동화 개폐기를 개발하는 것으로 주요 연구 결과는 다음과 같다.

i) 최적의 광전류 센서를 개발하기 위해 YIG 계열인 RIG를 선정하여 높은 전류까지 선형성을 유지시키고 다른 상의 전류에 대한 유도현상을 최소화 하기 위해 순철 코어를 사용하여 RIG 광전류 센서를 일체화시켜 설계 제작하여 1% 이하의 온도 변화에 대한 오차를 확인할 수 있었다.

ii) 광전압 센서는 콘덴서 분압에 의한 공간전계 방식을 채택하여 고절연 신뢰도를 유지하도록 BSO 소자를 사용해 설계 제작하였다. 그 결과 양호한 선형성 및 절연 특성을 얻을 수 있었으며, 1% 이하의 온도 변화에 대한 오차를 확인할 수 있었다.

iii) 시작품의 성능을 평가하기 위한 선형 특성 시험에서 광 PT는 6.6kV에서 19.8kV까지 거의 변동 오차가 1% 이내로 양호한 선형성 특성을 나타냈다. 그리고 광 CT에 있어서 인가 전류에 대한 선형 특성은 20A에서 700A까지는 변동 오차 2.5% 이내의 선형성이 유지되나 800A 이상에서는 코어 자속의 포화에 의해 선형성이 떨어지는데 향후 이러한 문제 해결에 대한 연구가 필요하다.

### (참 고 문 헌)

- [1] M.G. Miteve, S.V. Miridonov, "Anisotropic properties of volumn holograms in Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub> mono-crystals" Optical and Quantum electronics 19, pp.37-43, 1987
- [2] "Low-Cost Fiber Optic Transmitter and Receiver Interface Circuits" HP Application Bulletin 73.
- [3] 氏原稅雄 외 "BSO센서를 이용한 폴토포타용 서지受信裝置의 實證試驗" 昭和 60 年 電氣學會全國大會
- [4] 森田和實, "코아형 광CT의開發" 電氣學會 計測研究資料, IM-81-10, 1981
- [5] 김영수 외, "광 CT, PT개발 및 적용에 관한 연구", 한국전력공사, 1993
- [6] 오상기 외, "국산 배전자동화 시스템 실제용 실증연구", 전력연구원, 1997
- [7] 박해수 외, "광전자식 보호계전방식 및 신호처리기술에 관한 연구", 한국전력공사, 1999