

전력용 광 전류, 전압 센서 연구 동향 조사

김 영 수*

*초당대학교 전자공학과

Survey of Optical Current Sensor and Optical Voltage Sensor for Electric Power Systems

Young-Soo Kim*

*Chodang University

Abstract - In this paper, some of optical current transformers and optical potential transformers for extra high voltage system are introduced. The optical current transformer and optical potential transformer will be adopted in the near future, because of increasing demands of high accuracy and good reliability of current transformer and potential transformer. The application cases of optical current transformers and optical potential transformers are also introduced.

1. 서 론

전력수요가 급격히 증가하면서 전력설비의 초고압화 및 대용량화가 요구되고 있고, 한편으로는 전력의 안정적인 공급과 효율적인 이용이 절실히 필요하다. 이에 따라 현재 대부분 송전 시스템은 345KV급으로 계통이 운용되고 있으나 가까운 장래에 765KV급 송전계통이 주종을 이룰 것으로 예상된다. 이와 같이 송전전압이 초고압화되는 경우 전류, 전압의 정확한 계측은 전력계통의 제어 및 보호상 점점 중요시되고 있다. 초고압 환경에서 전류 전압의 정확한 계측을 위해서는 기존 기술의 확장에 의한 콘덴서형 계기 변압기 및 권선형 변류기는 절연특성, 기계적 강도, 내진성, 경제성 등의 많은 문제점을 안고 있다. 더욱이 고전압이나 대전력 환경하에서는 각종 임펄스성 전압, 전류 그리고 자연계의 기상 변화에 의한 뇌 서지 등이 직접경로를 통해서나 간접적인 정전유도나 전자유도에 의해서 각종 발전소의 계측·제어 장치에 직간접으로 악영향을 주고 있다.

이러한 문제를 해결할 수 있는 기술이 최근 각광을 받고 있는 광기술을 이용한 센서 기술이다. 광기술을 이용한 광센서 기술은 광통신이 실용화되면서 주목을 받기 시작한 기술로서 광이 가지는 여러 가지 장점, 즉, 광대역, 저손실, 고절연성, 무유도성, 방폭성, 광응용 기술과의 정합성 등이 초고압용 전력 기기에 적용하기에 최적의 기술로 평가되고 있다.

여러 가지의 광섬유 센서 중에서도 전력시스템에 가장 많은 활용도가 기대되는 센서가 광CT(Optical Current Transformer)와 광PT(Optical Potential Transformer)이다. 따라서 국내·외적으로 많은 연구자들이 초고압용 광CT, 광PT 개발에 초점을 두고 실용화 연구를 추진하고 있다. 70년대 이후로 짧은 연구 기간 동안 광CT, PT에 대한 연구가 활발히 진행되어 만족할만한 연구 성과와 결과를 얻은 것으로 보고되고 있으며, 최근에는 전력계통 실 선로에서 실증시험과 신뢰성 시험 등이 진행되고 있다.

본 연구에서는 광CT, PT에 대한 활발한 실용화 연구가 진행되고 있는 시점에서 실용화가 기대되는 광CT, PT의 외국 적용사례를 조사 분석함으로써 앞으로의 광CT, PT의 연구개발에 대한 방향을 제시하고자 한다. 이를 위해 국내·외에서 많은 연구가 진행되었던 광CT,

PT의 적용분야와 함께 몇 가지 실용화 모델을 조사하여 그 결과를 분석 기술한다.

2. 본 론

2.1 전력용 광센서의 적용분야

전력분야에서 광을 이용한 전류 및 전압 센서를 적용하기 위한 개발을 실시할 경우에는 광계측 기술의 특징을 살린 시스템의 설계와 개발할 시스템에 대한 수요측의 요구를 충분히 반영하는 것이 중요하다. 현재 개발되었거나 개발이 진행중인 전력용 광전류 및 전압 센서에 대한 자료를 근거로 하여 적용분야를 나누면 전력설비 진단용과 계측용으로 대별할 수 있는데 표 1은 이에 대한 적용범위를 나타낸다.

진단용 광센서는 전력설비의 신뢰도 확보 차원에서 상시에는 설비에 대한 운전상태의 안정적 유지 및 예방, 고장 시에는 고장개소의 조기 발견 및 복구 등을 목적으로 설치되기 때문에 비교적 설치가 용이하고 전력설비에 미치는 영향이 없는 고신뢰성의 시스템이 요구된다. 그리고 계측용 광센서는 계측된 데이터를 근거로 전력 기기를 제어하여야 하기 때문에 온도 의존도에 의한 비오차 등의 측정 정도가 높아야 한다. 또한 계측 시스템의 성능을 좌우하는 감도, 동작범위, 고속 응답 등에서 고 성능 및 고 신뢰도화가 요구된다.

표 1. 광전류 및 전압 센서의 적용분야

구분	분 야	내용 및 범위
전력설비 진단용	고장 검출 시스템	- 가공 송전선 고장 검출용 - 지중 케이블 고장 검출용 - 가공 배전선 고장 검출용
	송전 계통	- GIS 정상 및 과도 상태 - 송전선 서지(Surge) 전압 - 송전선 검전 확인용
전력설비 계측용	배전 계통	- 구간 전압 및 전류 측정용 - 배전 자동화 개폐기용 - 배전 계통 고조파 측정용
	전력설비 보수	- 애자 분담 전압 측정용 - 공간 전계 분포 측정용 - 변압기 내부 단락 측정용 - 사이리스터 동작 감시용
	직류 계통	- 직류 전압 측정용 - 직류 전류 측정용
	기 타	- 정전기 검출

2.2 전력용 광센서의 연구 동향

2.2.1 광전류 센서

영국의 과학자 Roger에 의해 1973년에 광전류 계측기 설이 제안된 이후 많은 연구가 수행되고 있다. 현재 연

구가 진행되고 있는 광전류 센서는 사용되는 전류계측 소자에 따라 i) 광섬유를 이용한 광전류 센서, ii) Bulk 글라스를 이용한 광전류 센서, iii) 혼합형 광전류 센서, (iv) 자기광학 소자에 의한 광전류 센서로 분류할 수 있다.

광섬유를 계측소자로 사용하는 광전류 센서는 20년 이상의 연구 역사를 가지고 있으나 광섬유의 복굴절 현상이 문제점으로 대두되어 이것을 극복하기 위한 소수의 시험 결과만이 보고되고 있을 뿐 실용화에 대한 것은 발표되지 않고 있다.

Bulk 글라스 센서는 복굴절에 의한 영향이 적으며 높은 Verdet 정수를 갖는 광학 글라스이기 때문에 고감도의 실현이 가능하여 전류계측 소자로 선택되고 있으며 혼합형 광전류 센서는 계측소자를 기존의 CT를 채용하기 때문에 기존 CT의 문제점을 완전히 피할 수 없다. 자기광학 소자인 자계 센서를 전류 센서로 사용할 때는 유도 자계에 의한 영향을 받기 쉽다는 문제점이 제기되고 있으나 YIG 및 회도류 첨가 YIG 등의 자기광학 소자는 Bulk 글라스에 비해 고감도의 광전류 계측시스템을 구성할 수 있기 때문에 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

(1) 광섬유를 이용한 광전류 센서

광섬유를 센서로 사용하는 광전류 센서는 광섬유 내를 전송하는 직선편광의 편광면이 자계에 의해 회전하는 파라데이 효과를 이용해서 이 회전각을 측정하여 전류를 계측하는 장치이다. 그림 1은 전류가 흐르는 도체에 수직의 광섬유를 감고 이를 통과하는 직선 편광의 파라데이 회전각을 측정하여 전류를 계측한다.

개발한 광섬유 전류 센서의 특성시험 결과 JEC 1201에서 정한 오차 규격 1PS 급인 장격 전류에 대해서 $\pm 1\%$ 이내의 비오차를 달성했다. 또 피크치 150kA에 가까운 단락 대전류도 정확히 측정함으로써 계기용 변성기 규격을 충분히 만족했다. 그리고 이중 코팅된 광섬유의 채용에 의해 $-40^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 복굴절의 온도에 의한 변화는 $\pm 1^{\circ}$ 이하가 되는 것을 확인할 수 있었다.

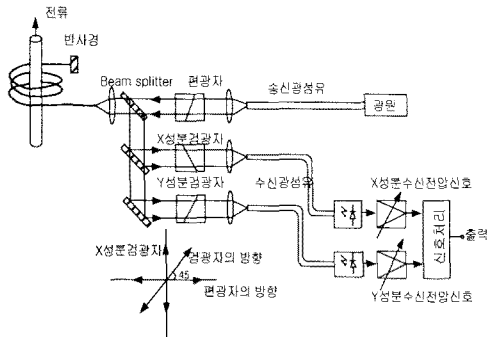


그림 1. 광섬유 전류 센서의 구성도

(2) Bulk 글라스를 이용한 광전류 센서

1982년에 일본의 Sato 등이 Bulk 글라스 전류 계측 소자에 관한 특허를 신청한 후 지속적인 연구가 실시되어 많은 연구 결과가 발표되었다.

최근에 영국의 Jackson에 의해 조사된 보고서에 의하면 Bulk 글라스의 전류계측 소자 형태는 정방형, 삼각형, 개방형, 링형의 설계가 제안되고 있는데 정방형의 Bulk 글라스 광전류 센서는 1983년 Tadachi 등에 의해 최초로 제안되었다. 이러한 여러 가지 방식 중에서 그림 2는 3개의 반사 코너를 갖는 정방형 계측소자의 구성도로서 반사에 의한 위상차는 2중 반사에 의해서로 상쇄된다. 이러한 구조의 광전류 센서는 다양한 분야

에서 현장 시험이 실시되었는데 시험 결과는 기존의 CT에 비해 아주 우수한 성능을 나타내었다.

(3) 혼합형 광전류 센서

그림 3은 비교적 균등 자계를 발생하기 위한 발생시키기 위한 자계 집속기의 겹에 파라데이 계측소자가 설치된 혼합형 광전류 센서의 구성을 나타낸다. 도체에 흐르는 전류에 의해 발생된 자계에 거의 밀접된 구조로 구성이 가능하다. 출력광의 회전은 자계 및 계측소자의 길이에 비례하기 때문에 대응하는 전류는 출력광의 회전을 측정함으로써 산출할 수 있다. 이러한 구성형태의 감도를 향상시키기 위해서 간접계형 검출 방법이 개발되었으며 레이저의 빔이 계측소자 내에서 다중 반사가 일어날 수 있도록 높은 Verdet 정수를 갖는 센싱 글라스가 제작되었다.

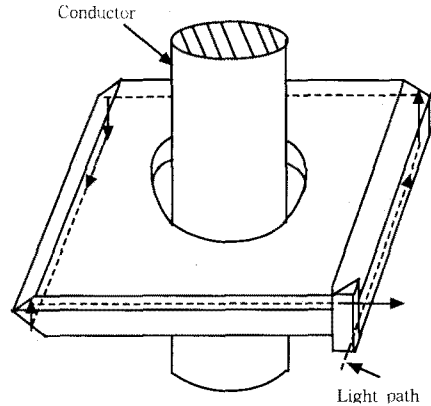


그림 2. Bulk 글라스 센서의 구성도

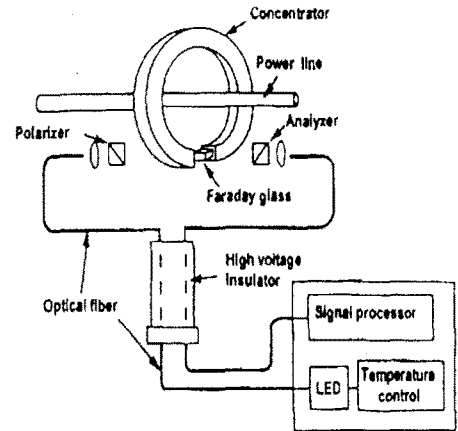


그림 3. 혼합형 광전류 센서의 구성도

(4) 자기광학 소자를 이용한 광전류 센서

자기광학 소자를 이용한 광전류 센서의 주요 동작 특성은 파라데이 효과이다. 작은 전류에 의해 발생하는 자계를 측정하기 위해 아주 큰 파라데이 회전각을 발생시킬 수 있는 광학 재료는 광학 글라스, 반자성체 첨가 글라스, 상자성체를 첨가한 회도류 글라스가 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 광학 글라스는 Schott Glass SF6, Dysprosium Alumina Silicate Glass 및 Hoya Glass FR-5로서 Verdet 정수는 $10^5 \sim 10^6 \text{ rad/Gcm}$ 정도이다.

반자성체 첨가 글라스 중에서 근적외선 영역에서 투명

성을 갖는 YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$)가 가장 유용한 상업화된 결정이다. 이러한 파라데이 소자인 YIG 결정에 다른 요소를 치환함으로써 파라데이 회전각은 $1.15\mu\text{m}$ 파장에서 $240^\circ/\text{cm}$, 온도 계수는 $-20^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 $\pm 7.0\%$ 까지 향상시킬 수 있다. 그러나 이중 치환 YIG에 있어서 파라데이 회전각은 같은 파장에서 $2200^\circ/\text{cm}$ 이고 온도 계수는 같은 온도 범위에서 $\pm 2.5\%$ 정도가 된다. 그리고 Gd를 치환함으로써 온도 계수를 $\pm 0.5\%$ 까지 향상시킬 수 있다. 그림 4는 지락전류 검출을 위해 파라데이 소자를 사용한 광전류 센서의 구성도로서 600A의 최대 부하전류와 0.1A의 최소 영상전류의 측정이 가능하다고 보고되었다.

Epitaxial Thin Film으로 구성할 수 있는 Garnet Film은 상자성체를 첨가한 회도류 글라스에 포함되는데 이러한 계층 소자는 파라데이 회전각이 대단히 크고 고주파 응답특성이 좋기 때문에 지락전류 검출(Δ 계통)과 같은 응용에서 매우 유용하게 이용할 수 있다.

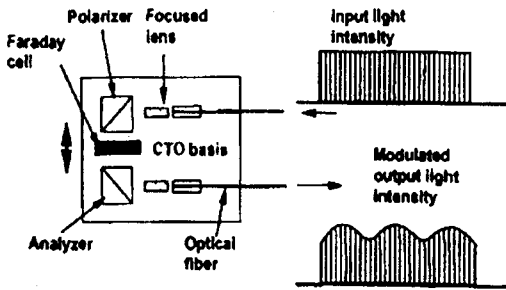


그림 4. 파라데이 소자를 이용한 광전류 센서 구성도

2.2.2 광전압 센서

전력분야에서 광계측 기술의 가능성이 발표된 이래 지난 20여년 동안 광전압 센서를 전력계통에 적용하기 위한 다양한 방식들이 제안되었는데 현재 운전 중이거나 현장시험을 실시하고 방식은 BSO나 BGO와 같은 포켈스 소자를 이용한 광전압 센서로서 향후 성능 향상 및 고신뢰도를 위한 새로운 기술 개발이 기대되고 있다.

(1) 포켈스 소자를 이용한 광전압 센서

그림 5는 포켈스 소자를 이용한 광전압 센서의 일반적인 구성도로서 이러한 방식은 일본의 도시바, 미쯔비시, 스미토모 등이 10여년 전에 자체 개발하여 현재 상품화되었다.

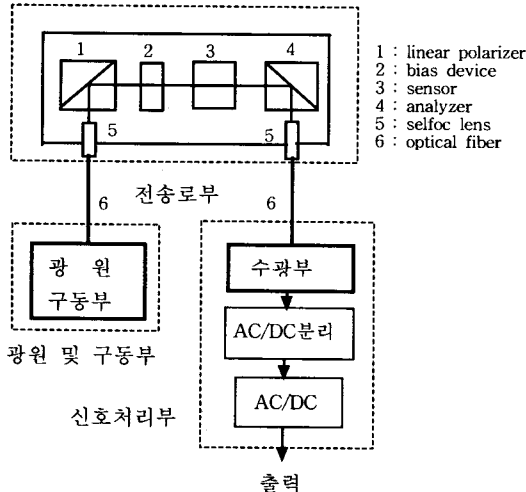


그림 5. 포켈스 소자를 이용한 광전압 센서 구성도

(2) 서지 전압 검출용 광전압 센서

BSO와 같은 광전압 센서의 주파수 특성이 7MHz까지 가능하기 때문에 주파수 특성이 양호한 센서를 이용하여 서지 전압 검출시스템의 개발 의욕이 고조되었다. 그림 6은 GIS의 내부 전극에서 서지 전압을 측정 가능한 수백 볼트 정도의 저전압으로 변환한 후 광전압 센서로 출력신호를 검출하여 디지털 파형 기록계에 기록하는 시험 시스템으로 중부전력에서 특성시험을 실시하였다.

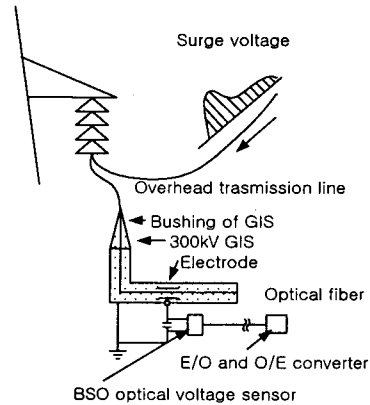


그림 6. 서지 전압 검출용 광전압 센서

3. 결 론

본 연구는 광CT, PT에 대한 활발한 실용화 연구가 진행되고 있는 광CT, PT의 연구사례를 조사 분석한 결과이다. 광CT, PT의 실용화를 위해서는 계측 시스템의 성능, 신뢰성, 경제성 등을 충분히 고려하여 설계가 이루어져야 한다. 광전류 및 광전압 센서는 구성형태에 따라 여러 종류가 있으므로 전류의 크기 및 적용 환경에 따라 적절한 방식이 선정되어야 한다. 현재 가장 많이 연구 개발된 광전류 센서는 Verdet 정수 큰 YIG를 이용한 광전류 센서가 주류를 이루고 있다. 광전압 센서 역시 다양한 방식이 연구되고 있는데 BSO, BGO와 같은 포켈스 소자를 이용한 광전압 센서가 주류를 이루고 있다. 현재 국내 여러 기관에서 광전류 및 광전압 센서가 개발되고 있고, 앞으로 송전전압이 초고압화 됨에 따라 광CT, PT가 송배전 계통 및 계측 설비분야에 있어서 핵심 센서로서의 역할이 기대된다.

(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] A.J. Rogers, "Optical technique for measurement of current at high voltage", Proc. IEE.120, pp261-267, 1973.
- [4] Y. N. Ning and D. A. Jackson, "Faraday effect optical current clamp using a bulk-glass Sensing element", Opt.Lett., 18, pp835-837, 1993.
- [5] T. Mitski, et al., "Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic field sensors", IEEE SM442-8,1986.
- [6] H. Hirsch, D. Peier and U. Stietzel, "Magento-optic current sensor using a double twist fiber", Int. J.Optoelectron., 8, pp737-742, 1996.

- {7} 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.