

Laser CT 및 PT의 원리와 현황

韋相烽* · 金堯喜* · 韓民九**
(韓國電氣研究所* · 서울大 工大**)

■ 차 례 ■

- 1. 서 론
 - 2. 측정의 기본 원리
 - 3. 광 Fiber의 이용
 - 4. DATA Recorders
 - 5. System 구성
 - 6. 외국의 개발 현황
 - 7. 결 론
- 참고문헌

I 서 론

기존 전선형의 potential transformer (PT)와 current transformer (CT)는 전력 시스템의 보호 및 제어를 위한 전압, 전류측정에 사용되어 왔다. 그러나, 최근 전력 수요의 증가에 따라서 송전전압의 상승으로 절연 이격거리가 증가하게되어 기존의 CT, PT의 경우 그 크기가 매우 커지고 보호 system이 digital化하는 경향이 나타나 전압 및 전류 측정 system에서 전자유도 장애(EMI)의 제거가 필요하게 되었다. 또한 광 케이블이 통신용 데이터 전송뿐만 아니라 계측 분야에도 그 사용이 점차 증가되어 1990년 경에는 광 케이블 생산량의 1/3정도가 각종 물리량(온도, 습도, 속도, 전압, 전류 등)의 측정에 사용될 것으로 전망되고 있다.

1970년대 초부터 광을 이용한 전압 및 전류 측정 sensor의 연구가 시작되었으나 그중의 대부분의 연구는 sensor에 대한 기초적인 연구가 진행되었을 뿐 실제적인 전력계통에의 적용은 80년대 초반까지도 거의 전무하였다. 그러나 광 케이블의 생산량 증가 및 가격 하락, 전력 통신망의 digital化 및 광 케이블 사용 증대, laser 및

laser diode의 신뢰도 증가, 전자 증폭회로의 신뢰도 및 정밀도의 향상 등에 의하여 실제로 전력 계통에의 적용이 가능할 것으로 전망됨에 따라서 G.E., Westinghouse, Hitachi, Siemens, BBC 등에서 그 실용화 연구가 최근 진행중에 있다. 또한 가격면에서 초기에는 345 KV이상의 초고압 분야에서만 광 CT 및 PT가 기존의 CT, PT보다 경제성이 있는 것으로 생각되었으나, 최근에는 배전 계통의 중·저전압에서도 양질의 전력 공급이 요망됨에 따라서 배전 자동화를 위한 정보 전송망에 연계시키는 말단 부하의 sensor로서도 그 적용 가능성이 활발히 연구되고 있다.

II 측정의 기본 원리

전압, 전류, 전계의 sensor를 이용한 측정 원리는 크게 2 가지로 분류된다. 첫째는 광학 효과(optical effect)를 이용하는 방법으로서, 전계 및 자계가 직접 sensor의 원자, 분자, 전자에 작용하여 물질의 광학적 굴절율을 변화시키는 것이고, 둘째는 기계적인 효과(mechanical effect)로서 측정하려는 물리량이 sensor에 기계적인 변형을 가하므로써 sensor의 opt-

ical transmittance가 변하는 방법이다.

1) 광학 효과(Optical Effects)

현재 개발중인 여러 종류의 광학적 측정 system은 Faraday effect, Pockel effect, 또는 Kerr effect¹⁾⁻⁵⁾를 그 원리로 하고 있다.

가. Faraday 효과

Faraday 효과는 자기 광학 효과로서, 이러한 효과를 나타내는 물질이 자계중에 위치하면 그 물질의 굴절율(index of refraction)이 변화하는 효과이다. 그림 1-a에서 보는 바와 같이 빛이 자계중에 놓인 물체를 통과하면 굴절율에 따라서 그 통과된 빛의 양이 변하게 된다.

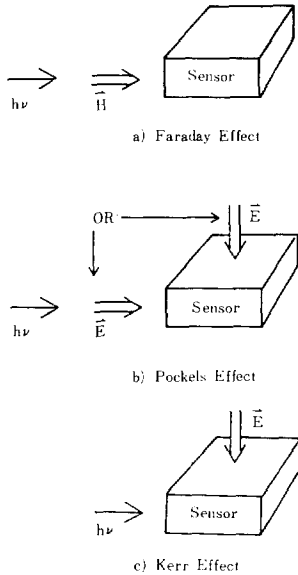


그림 1. 전기 및 자기 광학 효과의 매질 배치도

Faraday 효과의 기본식은

$$n_r - n_e = \lambda V H / \pi \tag{1}$$

여기서, n_r 은 우측 원편광(right circularly polarized) 물체의 굴절율이고, n_e 는 좌측 원편광(left circularly polarized) 물체의 굴절율이다. λ 는 통과된 빛의 파장이고, V 는 Verdet 상수로서 물체에 따라 고유하다. Faraday 효과를 갖는 물질은 두 가지로 분류되는데 반자

성체(diamagnetic)와 상자성체(paramagnetic)이다. Faraday 효과를 이용한 sensor는 일반적으로 보다 큰 Verdet상수를 필요로 하는데 이는 대개 상자성체에 반자성체를 소량 doping시켜서 사용한다.

나. Pockels 효과

Pockels 효과는 전기 광학 효과(electro-optical effect)로서 물체에 전계가 인가되면 굴절율의 변화가 전계의 세기에 비례하는 현상이다. 그 기본식은 아래와 같다.

$$\Delta n = n^3 r_{ij} E \tag{2}$$

r_{ij} 는 물질의 dielectric 특성을 표시하는 tensor이고 n_o 는 외부 전계가 없을 때의 굴절율, E 는 인가되는 전계의 세기이다. Pockels 효과는 tensor 형태로 주어지므로 인가전압, 빛의 통과 방향, 물질의 결정축 방향간의 상대적인 위치가 중요하다. 그림 b)에서는 빛의 방향과 전계의 방향이 각각 평행, 수직인 예를 표시한다. 출력 광의 응답은 물질의 결정 구조 및 전계와 빛의 방향과의 각도 그리고 결정의 대칭축에 의하여 결정된다.

다. Kerr 효과

Kerr 효과는 굴절율의 변화가 외부 전계의 제곱에 비례하는 현상으로서 이 효과를 이용하는 system은 보통 액체 상태이며 그림 c)는 빛의 방향과 인가된 전계를 표시한다. 기본식은,

$$n_{\parallel} - n_{\perp} = \lambda B E^2 \tag{3}$$

과 같으며, 여기서 n_{\parallel} 은 전계에 평행한 굴절계수 성분, n_{\perp} 은 수직 성분이고, B 는 Kerr 상수, E 는 외부 전계의 세기이다. Kerr 효과는 낮은 주파수에서 빛을 쏘인 액체 분자들이 외부 전계에 따라 규칙적으로 배열되는 현상이며, 이러한 액체 분자의 배열이 굴절율의 등방성(isotropy)을 만든다. 따라서 분자의 분극(dipole) 방향과 각각 평행, 수직으로 편광된 빛은 서로 다른 속도로 매질을 통과한다.

라. 기계적 효과

기계적 효과는 빛이 통과하는 매질의 물리적인 변형에 따라서 출력의 세기가 변화하는 현상

이다. Nelson³⁾은 이러한 현상을 elasto-optic effect 라고 총칭하였으며, 비교적 잘 알려진 효과로서는 photoelastic 효과, piezooptic 효과, electrostrictive 효과, magnetostrictive 효과 등이 있다.

전력 산업의 응용면에서는, 기계적 광학 효과는 전기 자기 광학 효과보다 그 응용범위가 협소한데, 그 이유는 전자의 효과는 원자 또는 분자의 위치 변형에 의한 것이고 후자의 효과는 전자의 배열이 변형되는 현상이므로 bandwidth 가 더 넓기 때문이다. 그러나, 실제로 빛을 매질에 쬐어 그 응답을 측정하는 경우는 여러 가지의 광학효과가 혼합되어 있는 경우도 있으며 pockels cell의 경우를 예로들면 전기 광학 효과와 기계적 효과가 주파수 영역에서 동시에 일어나며(약 1MHz 이하), 그 이상의 주파수에서는 전기 광학 효과만 일어난다. 따라서, 실제 적용 system에서는 이러한 mixed mode를 고려하여 우리의 용도에 맞게 calibration 하는 것이 필요한데, 주파수 응답, 입사광의 파장 변화에 따른 응답 및 온도에 의한 영향 등을 예측하기는 매우 어렵다.

[3] 광 Fiber의 이용

전력 system에 있어서 광 파이버의 이용은 주로 통신용 전용으로 이용되어 왔으나 광 파이버 자체가 광 효과가 있는 점에 착안하여 파이버 자체를 sensor의 매질로 사용하는 연구가 활발하다. 앞 장에서의 식 (1), (2), (3)에서 보듯이 전계 및 자계는 매질을 통과하는 빛의 편광 상태를 변화시킨다. 따라서 파이버를 sensor로 사용할 필요가 없는 경우(통신선에서와 같이 빛의 세기만 전달하는 경우는) 편광 상태에 영향을 주지 않는 파이버를 사용해도 된다. 多重 모드(multimode) 파이버가 이 경우에 해당되며, 전송선에서는 빛의 편광을 유지할 수 없다. 따라서 다중 모드 파이버를 사용하는 경우는 편광되지 않은 상태로 광원에서 전송되어진 빛을 sensor전단에서 편광시키고 그 편광된 빛이 sensor에서 외부의 전계 및 자계에 의하여 편광상태를 바꾸

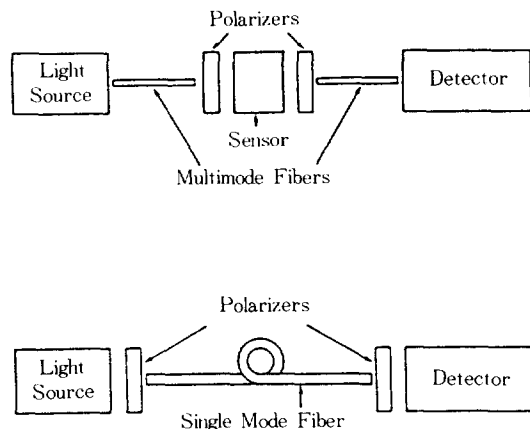


그림 2. Multimode 및 Singlemode 광 fiber CT 구성도

고 다시 2차 편광기에 의하여 편광시켜서 intensity modulated된 빛을 detector로 전송시킨다. 이러한 형식의 system이 그림 2의 상단의 경우이다.

단일 모드(single-mode)의 경우는 파이버가 편광 상태를 유지할 수 있으므로 직접 sensor로 사용이 가능하며 파이버가 다중 모드의 경우와는 달리 편광된 빛을 전송하게 된다. 이 경우가 그림 2의 하단의 경우인데 구조가 간단하고 가격이 저렴하므로 초고압뿐만 아니라 배전 선용의 CT로서도 사용될 전망이다.

단일 모드 파이버를 sensor로 이용하는 경우 실제 적용상의 문제점은 외부의 기계적 충격 때문에 생기는 기계적 광학효과에 의한 빛의 복굴절 및 이상 굴절현상이다. 일반적으로 이러한 응력에 따른 birefringence는 광학적으로 보상할 수 있다.

[4] Data Recorders

변조된 광으로부터 측정하고자 하는 전압, 전류치를 재생하기 위하여 파형 기록기와 연결된 광 다이오드와 같은 광 sensor를 이용한다. 파형 기록은 Analog Oscilloscope일 수도 있고 파형이 digital 처리되어 저장될 수도 있다.

5) System 구성

1) 전류 또는 자장 측정

첫 번째 방법은 sensor로 도체 주위를 둘러싸고 그 sensor에 편광된 빛을 통과시키는 것이다. 암페어 법칙에 따라서

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu I \tag{4}$$

이고, 물질의 Verdet 상수를 알고 sensor의 도체로부터의 거리를 알면 전류 측정이 가능하다. 두 번째 방법은 한 점에서의 자계를 측정하기 위하여 미소한 sensor를 국부적으로 설치하여 전류를 구하는 것으로서, 미리 알고 있는 전류로부터 이를 calibration하여 사용된다. sensor는 그림 3에서 보는 바와 같이 bulk glass 또는 광 파이버의 형태로 사용한다. 파이버 sensor는 CT로 사용되는 경우 두 가지의 다른 원리를 이용한다. 하나는 자기 광학 효과이고, 다른 하나는 기계적 효과인 magnetostriction

효과이다.

Faraday 효과는 파이버에서 관측하기가 용이하나, 같이 일어나는 magnetostrictive 효과를 관측하기에는 그 범위가 너무 미소하기 때문에 magnetostrictive 효과가 큰 Nickel과 같은 물질을 coating시켜서 사용한다. Magnetostrictive 효과는 Faraday 효과에 비하여 보다 큰 sensitivity를 갖는다. 그림 3의 CT는 submicrosecond, megampere pulse 측정용 CT이며, 일반 변전소의 CT도 비슷한 구조로 설계가 가능하다. Bulk sensor의 경우는 고정되어 있는 강체이므로 천둥과 같은 acoustic shock wave에 의한 기계적 손상을 입지 않도록 설계해야 한다. optical 파이버의 경우 이러한 손상에 민감한 편은 아니며, 기계적으로 유도되는 birefringence를 완화시키는 연구가 계속되고 있다.

2) 전계 또는 전압측정

전계, 전압의 측정은 Pockel 또는 Kerr 효과를 이용하는데 Pockel 효과는 그 다양성 때문에 많이 연구되고 있다. Pockel cell로는 초기에는 LiNbO₃, KDP에 의한 연구가 활발하였으나, 요즘은 BSO(bismuth silicon oxide) single crystal 또는 BGO(bismuth germanium-oxide) crystal이 고온에서의 안정도 특성 및 저온에서의 sensitivity 특성이 양호하기 때문에 실제 system에 이용하는 연구가 진행되고 있다.

실제 실험실에서 사용한 cell의 크기를 예로 들면 1.9×1.2×0.9cm이며, cell의 크기와 공간 전하를 무시하는 경우 전계와 전압사이의 관계 $E = \frac{V}{d}$ 에서 E를 알면 V를 구할 수 있다. Pockels cell은 변전소내의 분압 콘덴서의 갭내에 설치된다. 하나의 문체점은 코로나가 도체내에 국부적인 전계를 만들고 그 주위에 공간전하를 생성함에 의하여 sensor가 에러를 유발할 가능성이 있는 것으로서 이에 대한 연구가 계속 진행중이다. Kerr 효과는 주로 변압기의 기름내부의 전계분포와 공간 전하 분포의 측정을 위해 연구되고 있다.

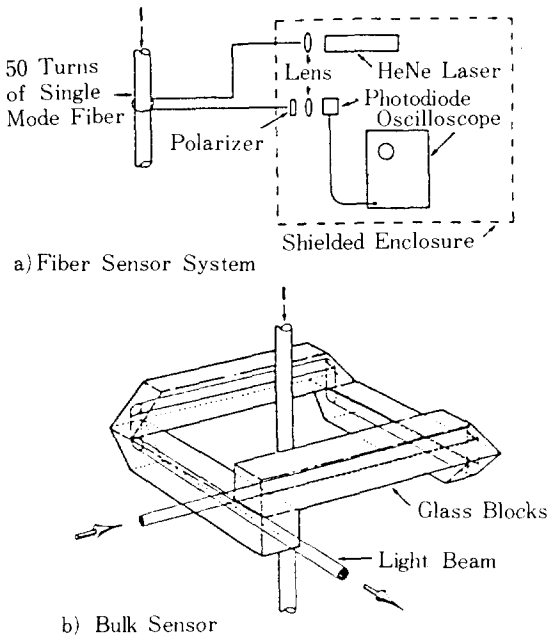


그림 3. a) fiber를 이용한 CT
b) 유리막대기로 도체를 둘러싼 형태의 CT

⑥ 외국의 개발 현황

일본의 Hitachi에서 연구중인 system의 예를 들면 CT의 경우 단락 전류 $30\text{KA}_{\text{peak}}$ 에서 $150\text{KA}_{\text{peak}}$ 의 4% 정도의 오차를 나타내고 PT의 경우 70KV급 GIS (gas insulated switch-gears) 내에 설치하는 system으로 비선형 error는 $\pm 0.4\%$, 온도 변화에 대한 안정도는 $\pm 1\%$ 이내 정도이다.

일본 전력 중앙 연구소에서 연구중인 system은 배전용 광 CT, PT로서 PT는 6KV 고압 배전선의 상 전압 및 영상 전압 측정용이고, CT는 단락 전류 및 상시부하 전류 측정용으로 최대 17.5KA까지 측정이 가능하고, 영상 전류(최소 30~60mA) 측정 CT로 연구가 진행되고 있다.

⑦ 결 론

전력 부하의 측정에 광을 이용하는 기술은 선진국에서 연구가 활발히 진행중이고, 일부는 기초연구가 끝난 상태로 실제로 적용시키기 위한 reliability test가 이루어지고 있다. 광과 광 파이버를 이용하는 측정 system은 compact하고, 통신선이 점차 광 케이블로 대체됨에 따라서 control system의 main computer와 말단 부하의 측정기와와의 직접적인 결합이 요구되는 시점에서 그 응용범위가 확대되고 있다. Laser 장치 및 laser diode의 신뢰도 증가에 의하여 가격 및 성능이 향상되므로써 광을 이용한 CT, PT는 조만간 실제로 전력 산업에 응용될 것이다. 우리로서도 이에 대한 기초 연구와 산업계의 응용연구가 시급히 요청된다.

참 고 문 헌

- 1) R. E. Hebner, R. A. Malewski, and E. C. Cassidy, "Optical Methods of Electrical Measurement at High Voltage Levels," Proc. IEEE, vol. 65, pp. 1524-1548, 1977.
- 2) R. E. Hebner, "Electro-optic Measurement Techniques," Proc. NATO Advanced Study Institute: Fast Electrical and Optical Diag-

- nostic Principles and Techniques, in Press.
- 3) D. F. Nelson, "Electric, Optic, and Acoustic Interactions in Dielectrics," (J. Wiley: New York), 1979.
- 4) G. C. Baldwin, "An Introduction to Nonlinear Optics," (Plenum: New York), 1969.
- 5) J. E. Thomson, "Electro-optical Pulsed Voltage Measurements," in Measurement of Electrical Quantities in Pulse Power Systems, R. E. Hebner, eds., Mat. Bur. Stand. (U. S.) Spec. Publ. 628, pp. 1~19, 1982.
- 6) H. T. Jessop and F. C. Harris, "Photoelasticity Principles and Methods," (Dover Publications Inc.: New York), 1960.
- 7) J. Chang, "Data Acquisition Systems and Sandfa," Proc. NATO Advanced Study Institute: Fast Electrical and Optical Diagnostic Principles and Techniques, in Press.
- 8) E. F. Kelley and R. E. Hebner, "Electro-optic Measurement of the Electric Field Distribution in Transformer Oil," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-102, pp. 2092-2097, 1983.
- 9) E. F. Kelley and R. E. Hebner, "Electro-optic Electric Field Measurement near Oil-press-board Interfaces," Proc. 1984 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, pp. 311-314, 1984.
- 10) W. Caton and J. Katzenstein, "An Absolute Electric Current Probe," J. Research Nat. Bur. Stand. (U. S.), in Press.
- 11) K. Shiraishi, S. Sugaya, and S. Kawakami, "Fiber Faraday Rotator," Appl. Opt., vol. 23, pp. 1103-1106, 1984.
- 12) B. T. Neyer, J. Chang, and J. A. Foesch, "Measurement of Large Currents with Optical Fibers," Proc. 1984 International Conference on Plasma Physics, St. Louis, in Press.
- 13) T. G. Giallorenzi, et al., "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE J. Quant. Elec., vol. QE-18, pp. 626-665, 1982.
- 14) D. C. Erickson, "The Use of Fiber Optics for Communications, Measurement and Control within High Voltage Substations," IEEE Trans. Power Appar. and Syst., vol. PAS-99, pp. 1057-1065, 1980.

15) IEEE Microwave Radio Subcommittee and Power Systems Communication Committee, "Fiber Optic Applications in Electrical Substations," Paper No. 83 WM 025-4 (IEEE Service Center: Piscataway, NJ), 1983.

16) Y. Hamasaki, H. Gotoh, M. Katoh, and S. Takeuchi, "OPSEF: An Optical Sensor for

Measurement of High Electric Field Intensity," Electronics Lett., vol. 16, pp. 406-407, 1980.

17) "Fiber-optic transducers of Physical Parameter (Review)," Sov. J. Quantum Electron, Jan., 1984.

(P.27에서 계속)

35-7-5 : 電流注入式 能動電力필터를 위한 最適注入方法의 解析
 朴旻鎬 · 崔圭夏

電流注入式 能動 필터는 高調波 補償電流를 系統으로 직접 注入하여 高調波를 除去한다. 이러한 能動 필터는 電流源을 반드시 內포하여야 하고 電流源으로부터 出力되는 直流는 필터내의 電流形 인버터에 의해 PWM形態로 변환된다. 변환된 PWM

補償電流는 인버터의 制御方式에 따라 달라지는 高調波成分들을 갖는다. 따라서 PWM電流의 各 필스폭을 적절히 定하면 電流源을 除去시킴과 동시에 주어진 條件에서 最大로 高調波를 제거시킬 수 있게 된다. 본 論文에서는 이러한 두 條件을 동시에 만족하는 最適注入方法을 제시하고 그 特性을 理論적으로 解析하였다. 그리고 본 注入方法의 타당성을 입증하기 위해 Z-80마이크로 컴퓨터를 사용하여 能動 필터를 실제로 制御하였다.