

광섬유의 photoelastic효과를 이용한 전류및 전압의 측정에 관한 연구

최도인, 김창현, 김호성
중앙대학교 전기공학과

A study on the measurement of the current & voltage using Photoelastic effect of Optical Fiber

Doin Choi, Changhyun Kim, Hoseong Kim
Dept. of Electrical Eng. Chung Ang Univ.

Abstract. A method using photoelectric effect of a single-mode optical fiber, with a 632.8nm He-Ne laser, has been developed for the simultaneous measurement of current and voltage. The magnetic stress for the current and the piezoelectric effect for voltage are utilized. It is found that the detector output voltage is proportional to the square of the applied current and the frequency of the output is twice of that of the applied current.

을 위한 기초 실험을 하였다.

1. 서 론

최근의 전력계통은 대용량화로 되어가고 있으며 그에 따라 고전압, 대전류를 측정할수 있는 변압기(PT), 분압기(PD), 그리고 변성기(CT)에 대한 요구가 증가하고 있다. 그러나 종래에 사용되던 권선형 또는 커패시터형 기기는 절연의 문제와 전자유도장애(Electro-magnetic Interference)문제로 인하여 그 크기가 커질수 밖에 없으며, 유지 보수가 어렵게되었다. 이러한 문제를 해결하기위해 80년대에 들어 EMI에 강한 빛의 특성을 이용한 광 CT, PT에 대한 연구가 활성화 되었고 발전전소등의 제어, 보호 시스템에 광신호를 사용한 LAN시스템이 적용되어 감에 따라 광 CT 및 PT에 대한 연구가 더욱 활발해져 왔다. 그러나 현재까지 개발된 대부분의 광 CT, PT등은 결정체의 Faraday Rotation 효과 또는 Pockels효과 [1]를 이용한 것이기 때문에 그러한 효과가 큰 결정체를 성장시키는 문제와 광소자의 광축 정렬문제는 제작시 양산성의 저해와 S/N비의 감소, sensitivity의 감소, 측정오차의 증가등의 문제등을 유발하게 된다. 그러므로 사용되어지는 광소자의 수를 감소시켜 광 측정법을 용이하게 할수 있고 저렴한 가격의 광 CT, PT의 개발이 필요하게 되었다.

2. 이론해석 및 실험 방법

가. 광섬유의 Photoelastic 효과

일반적으로 사용되는 Single-Mode 광섬유를 통하여 빛이 진행할때 두가지의 수직하고 독립된, 그리고 축퇴된(degenerate) 모드가 존재한다. 이 두 모드가 진행할때 기계적인 힘이 광섬유에 가해지는 경우 두 수직모드간의 굴절률차가 생겨 복굴절 현상(birefringence) [2]이 일어나게 된다. 이러한 복굴절현상을 일으키는 힘에는 광섬유의 단면을 타원형으로 왜곡시키는 측면에서 가해지는 힘(lateral stress), 광섬유를 구부러지게 하는 힘(bending stress), 그리고 광섬유를 비틀어지게 하는 힘(twisting stress)이 있다.

일반적으로 twist에 의한 복굴절과 광섬유자체의 불순물에 의한 복굴절은 미세하므로 여기서는 무시할수 있으며 또한 설계시 광섬유의 Bending에 유의한다면 이것에 의한 복굴절 또한 무시할수 있다. 그러므로 본 연구에서는 광섬유에 대해 측면으로 작용하는 힘에 의한 복굴절만을 고려하였다.

광섬유에 측면방향 (x 또는 y)의 힘 (F)이 가해질때의 복굴절은 다음과 같다. [3]

$$\beta_f = 8Cf / \lambda r \dots\dots\dots (1)$$

f: 광섬유 단위길이당의 힘 (f = F/L, L은 광섬유의 길이)
λ: 진공중에서의 파장 r: 광섬유의 반지름 C: 광섬유 재료의 특성

C는 stress-optic 상수로서 다음과 같이 주어진다. [3]

$$C = n^3(P_{11} - P_{12})(1 + \nu) / 2E \dots\dots\dots (2)$$

n: 광섬유 코어의 굴절률
P₁₁, P₁₂: elasto-optic tensor의 요소
ν: Poission's ratio
E: 광섬유 재료의 Young's modulus

이에 본 연구에서는 결정체를 사용하는 대신 광섬유를 사용하는 광CT 및 PT를 제작, 실험하였다. 즉 광섬유의 Photoelastic효과 [2]에 대한 이론적 연구를 통하여 측정 가능한 광출력을 얻기 위한 기계적 힘의 크기와 그 힘을 얻기 위한 전압, 전류의 세기를 예측하고 그 결과를 이용하여 광 CT 및 PT 개발

본 연구에서 사용한 광섬유는 fused silica이며 632.8nm에서 $n=1.4616$, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.27$, $\nu = 0.17$, $E = 7.3 \times 10^{10} N/m^2$ 이다. 이 경우 가해진 힘과 평행한 축의 방향으로 편광된 빛이 더 빠르게 진행 (fast axis) 하고 힘과 수직인 방향은 더 느리게 진행 (slow axis) 되므로 서로 수직인 두 편광모드의 빛은 위상차를 갖게 된다.

마그네틱 코아에서 전류에 의해 발생한 힘은 다음과 같다 [4].

$$F_c \approx \frac{s\mu_o(\mu_r N i)^2}{2l_m^2} \quad [N] \dots\dots\dots (5)$$

- μ_r : 마그네틱코아의 relative permeability (2500)
- N: 마그네틱 코아의 권선수 (50회)
- s: 마그네틱코아의 막대 단면적 ($15.5 \times 15.5 \text{ mm}^2$)
- l_m : 마그네틱경로길이 (44.5mm)
- μ_o : permeability constance (1.26 $\mu\text{H/m}$)
- i: 입력전류

piezoelectric crystal에서 전압에 의해 발생한 힘은 다음과 같다 [5].

$$F_v = \frac{s_p e}{g_{33}} \quad [N] \dots\dots\dots (6)$$

- s_p : piezoelectric-crystal의 단면적
- e: piezoelectric crystal에 가한 전기장의 세기
- g_{33} : piezoelectric crystal의 g coefficient

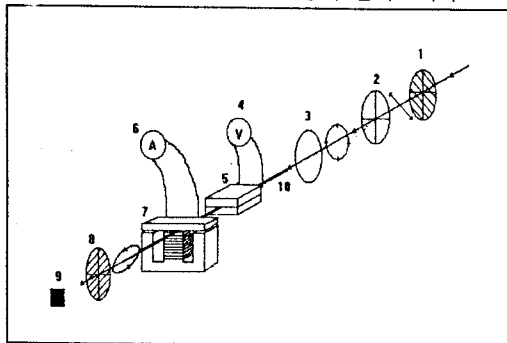
만일, 가해진 전류와 전압이 각각 $i = I \sin(\omega t - \phi)$, $e = E \sin(\omega t)$ 라고 할때 이들에 의해 야기되는 광섬유안에서의 두 수직모드간에 위상차는 식 (5)와 식 (6)을 식 (1)에 대입함으로써 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = A I^2 - A I^2 (\cos 2(\omega t - \phi) + D E \sin(\omega t)) \dots\dots\dots (7)$$

A와 D는 상수로서 $A = \frac{2Cs\mu_o\mu_r^2 N^2}{\lambda r l_m^2}$, $D = \frac{8Cs_p}{g_{33} r \lambda}$ 이다.

나. 실험 방법

그림 1은 본연구의 실험 장치 블럭도이다.



1.Polarizer 2.λ/4 Plate 3.렌즈 4.전압원 5.Piezoelectric Crystal 6.전류원 7.마그네틱코아 8.Analyzer 9.Detector 10.Singlemode 광섬유

- 그림1: 본연구를 위한 시스템의 블럭도 -

그림1에서 보는 바와 같이, λ/4 waveplate의 광축에 대해 45도 각도로 입사된 직선편광파($E_0 e^{j\omega t}$)는 λ/4 waveplate를 통과하면서 원형편광파로 바뀌게 된다. 이 빛이 single-mode 광섬유를 통해 진행할때 광섬유의 외부에 힘이 가해지면 광섬유의 Photoelastic effect에 의해 가해진 힘의 방향에 대해 빛의 편광상태가 평행한 성분과 수직인 축성분간에 위상차가 생겨나게된다. 이 위상차는 원형편광파를 가해진 힘의 방향에 45도 방향의 광축을 가진 타원형편광파로 변화시킨다.

위와 같은 과정에서 직선 편광된 빛 $E_0 e^{j\omega t}$ 는 서로 수직인 편광모드로 나누어 진행하면서 λ/4 waveplate에 의한 위상차 $\pi/2$ 와 축면힘에 의한 위상차 β 를 갖게 된다. 두 수직편광파는 각각 $E_0 e^{j\omega t} / \sqrt{2}$, $E_0 e^{j(\omega t + \pi/2 + \beta)} / \sqrt{2}$ 이며 polarizer 편광방향에 대해 90도방향의 편광방향을 갖는 analyzer를 통과할시 두 수직편광파가 $E(e^{j\omega t} + e^{j(\omega t + \pi/2 + \beta)}) / \sqrt{2}$ 로 합쳐지면서 간섭이 일어나게 된다. 이때 일어나는 빛의 세기변화를 광detector의 출력전압으로 측정할수 있다. 여기서 빛의세기와 광detector출력전압 V_d 와의 관계는 [3],

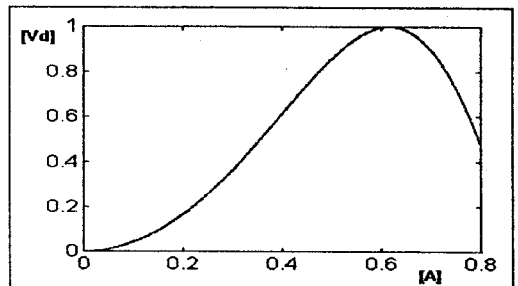
$$V_d \propto E^2(1 + \sin \beta) \dots\dots\dots (8)$$

와 같이 나타낼수 있다. [9] 식(8)에서 교류성분만 측정한다고 하고 식(7)에서 β 가 작은 값이라고 가정하면 $\sin \beta \approx \beta$ 이므로 V_d 는 β 에 비례하게 되고 β 는 식(7)에서 보는 바와 같이 전압의 세기 E와 전류의 세기 I의 제곱에 비례하게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

가. Simulation

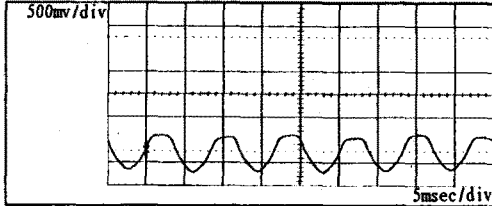
아래 그림2는 piezoelectric crystal에 전압을 가하지 않고 전류만을 마그네틱코아에 가했을때 나타나는 빛의 세기의 변화를 이론적인 수식상에서 예상해본것이다. 그림에서 보는것과 같이 전류의 세기가 약 0.65A까지 출력전압이 증가되는 것을 볼수있다. 또한 전류의 제곱에 비례하여 증가하는 출력값을 얻으려 한다면 전류의 세기가 0A부터 약0.5A까지 가능 할것이다.



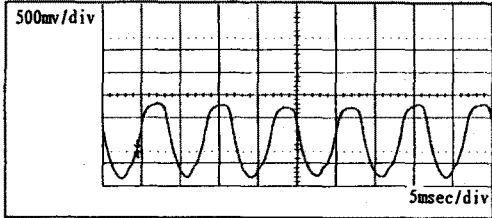
- 그림2 : 권선수가 50회 일때 전류의 증가에 따른 빛의 세기의 변화 -

나. 실험결과

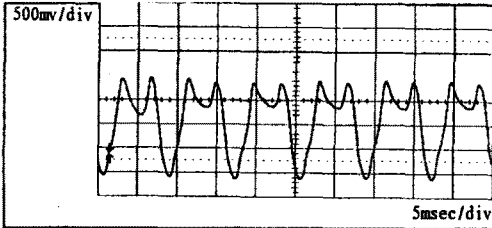
그림3에서는 piezoelectric crystal에는 전압을 가하지 않고 단지 주파수가 60Hz인 0.8A, 1.2A, 1.6A의 교류전류를 권선수 50회인 마그네틱코아에 가했을때 나타나는 광detector의 출력전압의 변화를 차례로 보여주고 있다. 이론해석에서와 같이 출력전압의 주파수는 입력전류의 2배인 120Hz이며 약 1.5A에서 부터 상한 Peak부근의 파형모양이 왜곡되면서 파형의 RMS값이 감소함을 알수 있다.



a. 0.8A의 교류전류를 가했을시



b. 1.2A의 교류전류를 가했을시

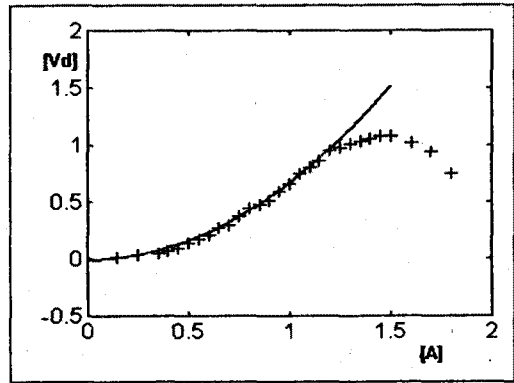


c. 1.6A의 교류전류를 가했을시

-그림3: 마그네틱코아에 교류전류를 가했을때 광detector의 출력전압파형-

그림4는 광detector의 출력전압을 mulimeter의 AC모드에서 측정한 결과와 curve fitting을 보여준다. 여기서 보는 바와 같이 그림4의 측정치는 그림2의 simulation결과와 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 출력전압은 약 1.4A까지 증가하는 값을 갖는데 이는 이론상으로 계산된 그림2에서의 0.65A와는 차이를 나타내고 있다. 이는 마그네틱코아에서의 누설 flux와 같은 요인의 해 힘이 누설되어 없으므로 이론상으로 가능한 모든힘이 100% 광섬유에 가해지지 않기 때문으로 예상된다. 그림4에서 실선으로 나타낸 그래프는 0.68 β^2 의 곡선이며 보는 바와 같이 약 1.25A까지는 실험 결과치에 거의 가까운 곡선을 보이고 있다. 이는 실험결과가 이론 해석에서 설명된 것처럼 β 가 작은 값에 대해서는 $\sin\beta \approx \beta$ 이고 전류의 제곱의 함수로 간략화할수 있음을 보여준다.

전압측정에 관한 실험은 현재 수행중이다.



+ : 측정치 -- : fitting curve

-그림4: 교류전류를 증가함에 따른 광Detector출력전압의 변화-

4. 결 론

본 연구에서는 전압과 전류를 측정하기위한 기초실험을 수행하였다. 실험결과에서 보는 바와 같이 광섬유를 사용하여 전압과 전류를 측정할때 광detector의 출력전압은 측정할 전압의 주파수와 같게되고 전류의 경우엔 측정할 전류의 2배가 되므로 주파수를 필터를 사용한다면 쉽게 두 주파수를 분리할 수 있을 것이다. 또한 측정할 전압과 전류가 작은 경우 간단한 수식으로 측정치에 대한 예상을 쉽게 할수 있었다. 이를 응용하여 상용화하기까지는 더 많은 연구와 실험이 뒷받침되어야 할것이다. 마그네틱코아와 piezoelectric crystal에서의 진동문제를 해결해야 하며 항상 일정한 출력값과 높은 sensitivity유지하기 해서는 광섬유를 비롯한 여러 장치가 안정하게 장착될수 있어야하는 기술적인 문제가 남는다. 이를 위한 방법중에 하나는 마그네틱코아와 piezoelectric crystal의 구조를 본 장치에 가장 적합하게 설계하는 것이며 piezoelectric crystal의 경우 광섬유에 직접코팅하여 사용할수 있을 것이다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동 연구소 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] B. E. A. Saleh "Fundamentals of Photonics" (Wiley, 1991)
- [2] Brian. Culshaw "Optical_Fiber_Sensors: volum1, 2" (ArtechHouse, 1989)
- [3] A. Bertholds & R. "Dandliker High-resolution photoelastic pressure_sensor using low birefringence fiber" (1986, Appopt vol125 340-343)
- [4] F. C. Moon "Magneto_Solid_Mechanics" (Wiley, 1984)
- [5] A. J. Moulson "Electroceramics" (CHAPMAN&HALL, 1990) chapter6