

패브리페로 간섭계를 이용한 광섬유 전압센서의 구현

김 정익, 전 진홍, 김 광수
한국전기연구원

Voltage Sensor using Fiberoptic Fabry-Perot Interferometry

J. I. Kim, J. H. Jeon and K. S. Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - A noble fiberoptic voltage sensor system utilizing an interferometric transducer has been introduced for high voltage measurement. The sensor system employs a fiberoptic Fabry-Perot interferometric strain sensor to convert voltage to displacement in an auxiliary movable electrode. The operating mechanism is based on the fact that the electrostatic force acting on the electrode system by the applied voltage results in strain variation on the Fabry-Perot interferometry. The experiment results show that the proposed voltage sensor has the potential to be extended to very high voltage system with appropriate auxiliary electrodes.

1. 서 론

고전압을 광학적으로 측정하고자 하는 연구는 수십년 전부터 시도되어 왔으나, 광섬유를 이용한 전압측정은 장치구현의 어려움 때문에 연구가 시작된 것은 그리 오래지 않다. 광섬유의 연면방전특성과 같은 기술적인 제약과 표면전계강도로부터 전압을 환산할 때 근접효과에 의해 발생하는 심한 비선형성 및 공간전계강도의 경우 발생하는 전계의 왜형과 같은 원리적인 문제 때문에 광섬유 전류센서와는 달리 다양한 모델이 발표되진 않았지만, 광섬유 전압센서는 소형 경량일 뿐 아니라 절연이 용이하고 전자과간섭을 받지 않아 전력기기 내장형 특히 가스절연변전소의 계기용 변압기 또는 고전압 측정용 분압기나 계통모선감시용 전압측정장치으로 그 개발에 대한 요구가 늘고 있다. 지금까지 전력계통에 적용 가능한 여러 가지 형태의 광섬유 전압센서가 제안되어 왔지만, 주류를 이루고 있다고 볼 수 있는 포켈스효과를 이용한 광 전압센서는 BSO(Bi₁₂SiO₂₀)나 BGO(Bi₁₂GeO₂₀)와 같은 고가의 광결정을 사용하여야 하고 다소 간편한 마하젠더 간섭계형 전압센서는 양쪽 광로의 조금씩 어긋나는 편광을 제어하기가 힘들기 때문에 실용화에 부담이 되고 있다(1).

본 논문에서는 정전력과 스트레인의 관계를 이용하여 광섬유만으로 전압을 측정할 수 있는 전 광섬유 전압센서(all fiber voltage sensor)를 제안하였으며, 고전압 측정을 위한 기초실험인 교류전압 0-1000Vrms에서의 결과로부터 그 타당성을 입증하였다. 즉 교류 고전압과 인접 보조전극간 또는 접지전극간의 정전력에 의한 변위 이동을 광섬유 패브리페로(Fiberoptic Fabry-Perot) 간섭계로 구성된 초정밀 스트레인센서로 읽어내어 보조전극 및 그 지지부의 보안을 통한 고해상도 광섬유 전압센서의 가능성을 보여 주었다.

2. 본 론

2.1 광섬유 패브리페로 스트레인센서

광섬유 패브리페로 간섭계는 그림 1과 같이 단모드 광섬유(single mode fiber) 및 두 개의 부분 반사체(partial mirror)가 수 mm에서 수십 mm 간격으로 설치된 광섬유 공진기로 구성되어 있다. 각 반사체는 광섬유 단면(cleaved end)에 유전체 SiO₂를 진공중착시킨 것으로 용융접착(fusion splicing)방식을 사용하여 반사율(reflectivity)을 조정한다.

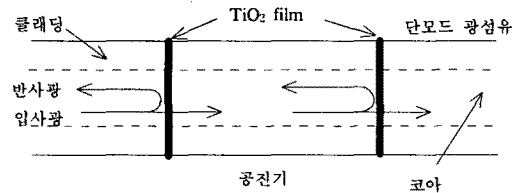


그림 1. 광섬유 패브리페로 공진기.

그림 1에서 공진기의 손실이 없다고 가정했을 때 입사광 쪽으로 되돌아가는 광파워(optical power)는 식 (1)과 같이 정규화된 값인 반사율로 표현된다.

$$R = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi} \quad (1)$$

여기에서 R₁, R₂는 공진기 양쪽 반사체의 반사율이고, φ는 입사광이 광섬유 공진기 내를 왕복한 후, 즉 두 번째 반사체(R₂)로부터 되돌아가는 광과 첫 번째 반사체(R₁)로부터 되돌아가는 광 사이에 발생하는 위상차(round-trip phase shift)로서 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2)$$

여기에서 n은 광섬유심선의 굴절률, L은 공진기 길이, λ는 레이저 광의 파장이다. 이 반사율 관계식이 결국 신호처리부 입력신호가 되므로 센서로 동작시키기 위해서는 전 위상영역에서 감도의 최대최소값의 범위를 조절할 필요가 있다. 전달함수를 단순화시키고 동작범위를 늘리기 위해 양쪽 반사체의 반사율을 동일한 값(R₀)으로 제작하고 5% 정도의 값을 취하도록 설계하면 식 (1)은 식 (3)과 같이 단순화되고 전형적인 광섬유 패브리페로 간섭계의 전달함수가 된다(2).

$$R \approx 2 R_0 (1 + \cos \phi) \quad (3)$$

광섬유내의 온도변화가 없고 횡방향 스트레인은 무시

할 수 있다고 가정하면 축방향 스트레인($\Delta L/L$)에 의한 위상변화, $\Delta\phi$, 는 식 (2)와 광스트레인 효과로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\phi = 0.78 \times \frac{4\pi n L}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

여기서, 계수 0.78은 굴절률 1.46의 실리카 광섬유 고유의 광스트레인(strain-optic) 계수로부터 산출된 값이다[3,4]. 광원부와 센서부의 온도를 제어할 경우 식 (4)에서 광파장과 굴절률이 상수이므로 선형관계가 된다.

2.2 광섬유 정전력-스트레인 변환센서

정전계에서 평행판이 공기 중에 놓여 있다면 두 전극간에 발생하는 정전력 F 는 잘 알려진 정전계의 관계식으로부터 다음과 같이 주어진다[5].

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 V^2 \frac{A}{d^2} \quad (5)$$

여기에서, V 는 인가전압, A 는 전극면적, d 는 극간거리이다. 전극면적과 극간거리를 고정시키면 이 전극계에는 인가전압 제곱에 비례하는 정전력이 작용한다. 이 정전력은 매질 또는 지지물에 스트레스를 가하므로 이 시스템에 적당한 정전력-스트레인 변환센서(transducer)를 적용하면 인가된 전압을 스트레인센서로부터 읽어낼 수 있다.

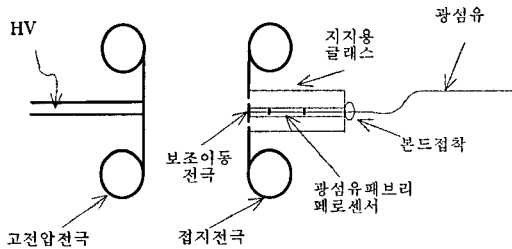


그림 2. 광섬유 정전력-스트레인 변환센서.

그림 2는 광섬유 패브리페로간섭계를 이용한 정전력-스트레인 변환센서의 개념도를 나타낸다. 변환센서의 설치 위치에 따라 다양한 형태가 가능하나 그림 2와 같이 접지 전극을 이용하는 경우가 가장 간편하다. 그림에서 고전압전극에 전압이 인가되면 두 전극 간의 정전력은 접지전극 중심에서 스프링과 같은 탄성이 있는 지지물에 의해 지지되고 있는 보조 이동전극(auxiliary moving electrode)의 축방향 변위를 변화시키고 이 힘은 곧 광섬유 스트레인센서에 전달된다. 고전압 전극계의 정전력(F)과 보조전극의 변위와의 관계에 기여하는 힘 중 가장 영향력이 큰 것은 스프링의 작용력과 유사하므로 보조전극계를 중심으로 하는 힘의 평형식은 다음과 같이 Hooke's law로 표현될 수 있다.

$$F = k \cdot \Delta L \quad (6)$$

여기에서, k 는 실험으로부터 구해야 할 비례계수이고, ΔL 는 보조전극의 축방향 변위의 변화량으로서 간섭계가 읽어내야 할 양이다. 식 (4)-(6)으로부터 온도와 레이저의 파장(λ)이 충분한 정도로 제어된다고 가정할 때 간섭계의 위상변화($\Delta\phi$)와 인가전압(V)과의 관계는 다음과 같은 비선형식으로 간단하게 표현된다.

$$\Delta\phi = \phi_0 + K \times V^2 \quad (7)$$

여기서, K 는 시스템 상수이다. 식 (7)은 광섬유 전압센서 간섭계의 위상은 인가전압의 제곱에 비례하여 변해야 하는 것을 보여 주고 있으나 실제 실험 결과는 이보다는 더 선형적으로 나타났다.

2.3 광섬유 패브리페로 전압센서

그림 3은 본 실험에 사용된 광섬유 전압센서 전체 시스템의 구성도를 보여주어 주고 있으며, 여기서 LD(Laser diode)는 1.3 μ m의 DFB(Distributed feedback) 반도체 레이저이고, PD(Photodiode)는 Ge계의 PIN타입을 사용하였다. 변조펄스는 frequency chirping 효과를 고려하여 400ns로 하였고, LD와 coupler 사이에 DFB 레이저의 안정을 위해 광격리기(isolator)를 두었다. 길이 10mm의 공진기, 반사율 4.6%의 반사체로 구성된 광섬유 패브리페로 간섭계가 스트레인센서로 사용되었으며, 80V이하에서는 데이터의 불확도가 심하여 시스템의 offset 전압을 80V로 하였다.

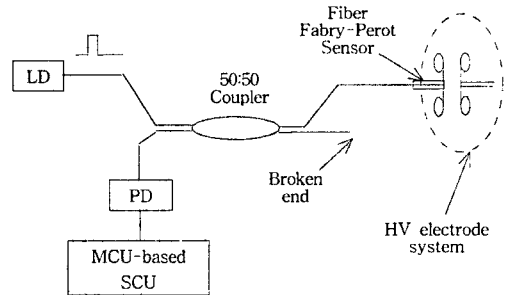


그림 3. 광섬유 전압센서의 구성도.

그림 4는 전압이 고전압 전극에 인가되었을 때 PD출력을 오실로스코프로 본 파형이며, 상부는 80V시 약 반 주기의 차이가 있는 하부는 250V시 위상변화에 의한 chirping현상을 보여 주고 있다. 상부 파형보다 하부파형에서 랜덤노이즈가 더 많이 보이는 것은 전압이 상승함에 따라 패브리페로 간섭계의 공진시스템을 교란하는 외부영향이 증가하기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 노이즈는 평균화 기법에 의해 쉽게 제거될 수 있다.

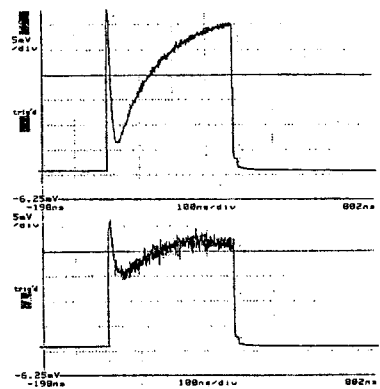


그림 4. 광섬유 전압센서의 광신호.

그림 5는 그림 3에서 도시한 광섬유 전압센서 구성도로부터 측정된 데이터를 기준으로 한 센서시스템의 특성 곡선을 나타내고 있으며, 80V의 경우를 위상의 초기치로 하여 전압을 상승해 가면서 위상변화를 관측하였다. 패브리페로 간섭계는 모든 실험에서 10mm를 사용하여

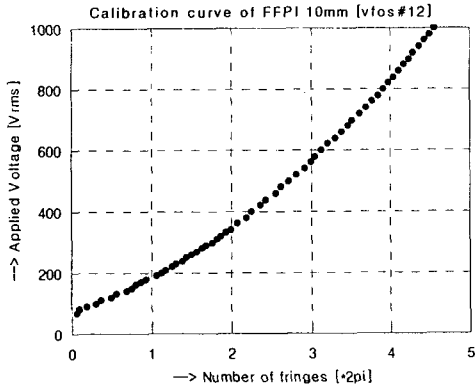


그림 5. 광섬유 전압센서의 특성곡선.

고정도 전압센서의 실현을 목표로 하였으나, 접속각의 영향, 본드접합부와 보조전극 지지부의 완충효과 때문에 예상보다 해상도가 떨어져 그림 5에서처럼 평균 200V/fringe의 결과를 보여주고 있다. 또한, 특성곡선은 식 (7)에서 예측한 것과는 달리 선형성이 강하였으며, 다소 비선형적인 부분의 원인은 정전력과 인가전압의 관계식에서보다는 보조전극과 스트레인센서의 취부구조에 기인하는 것으로 예상된다.

3. 결론

정전력과 인가전압과의 관계 및 정전력과 스트레인과의 관계를 이용하여 광섬유만으로 전압을 측정할 수 있는 광섬유 패브리페로 간섭계형 전압센서를 구현하였으며, 교류전압 1000V까지의 기초실험을 통하여 광대역 소형 경량 광섬유 전압센서의 가능성을 보여 주었다. 제안된 광섬유 전압센서는 온도보상문제, feedback노이즈와 같은 광섬유센서 고유의 문제와 극간거리의 고정, 광섬유의 보강, 보조전극계의 최적설계와 같은 문제가 아직 남아 있지만, 광섬유만으로 센서가 구성되어 있기 때문에 광대역 초소형 센서시스템이 가능하여 전력기기의 소형화 특히 가스절연변전소의 PT대용으로 적합하며, 또한 광통신망 접속 및 다중화가 용이하여 전력계통의 광통신망과 연계된 계통모션감시시스템의 전압측정장치로서의 향후 전망이 밝다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김광수 외 2인, "전력기기용 광섬유센서의 연구동향", 제4회 초고압 전력기기 심포지움, 1999
- [2] C.E. Lee et al. "Metal-embedded fiberoptic Fabry-Perot sensors", Optics Letters Vol. 16, pp1990-1992 1991
- [3] G.B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature", Applied Optics Vol. 18 No. 9, pp1445-8, 1979
- [4] C.D. Butter and G.B. Hocker, "Fiber optics strain gauge", Applied Optics Vol. 17 No.18, pp2867-2869, 1978
- [5] A.J. Schwab, High-Voltage Measurement Techniques, M.I.T. Press, 1972