

Telemetría de alto voltaje con alta sensibilidad por medio de un sensor de campo eléctrico basado en fibra óptica y un cristal fotorefractivo

Francisco G. Peña-Lecona¹
César Castillo-Quevedo²
Jesús Muñoz-Maciel¹
Víctor M. Duran-Ramírez¹
Francisco J. Casillas-Rodríguez¹
Jaime G. Rodríguez-Zavala¹
Gilberto Gómez-Rosas³
Miguel Mora-González¹

¹Universitario de los Lagos, Lagos de Moreno Jal., México, C.P. 47460, Universidad de Guadalajara.

²Centro Universitario de la Ciénega, Ocotlán Jal., México C.P. 47810, Universidad de Guadalajara.

³Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Guadalajara Jal., México C.P. 44430, Universidad de Guadalajara. MÉXICO.

correo electrónico: plecona@culagos.udg.mx,
castillocq@yahoo.com, jeshua@culagos.udg.mx,
humboldt6@hotmail.com, fjcasirod@msn.com,
jgrz2010@yahoo.com.mx, gomezrg@hotmail.com,
mmora@culagos.udg.mx

Recibido el 11 de mayo de 2007; aceptado el 10 enero de 2008.

1. Resumen

Un sensor de fibra óptica (SFO) para telemetría de alto voltaje es propuesto. El SFO está constituido por 100 metros de fibra multimodal unida a un elemento transductor basado en el efecto electro-óptico con una configuración de doble paso de la onda luminosa a través de un cristal fotorefractivo de $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO). Para garantizar el doble paso, un prisma retroreflector con alta estabilidad a cambios ambientales de temperatura es incorporado al elemento transductor. La doble reflexión de la onda luminosa en el prisma permite al BTO trabajar en una amplia región lineal de la función de transferencia. Para pro-

bar la factibilidad de este SFO, una onda periódica de AC y un evento transitorio, ambos de alto voltaje, aplicados a un tubo de aluminio fueron medidos desde una distancia de un metro. Se demuestra que el sensor propuesto es robusto, lineal, estable ante las variaciones de temperatura y de alta sensibilidad para aplicaciones de telemetría de alto voltaje.

Palabras clave: sensor de fibra óptica, alto voltaje, fenómeno electro-óptico, efecto Pockels.

2. Abstract

A fibre optic sensor (SFO) for high voltage telemetry is proposed. SFO is made up of 100 m of multimodal fibre joined with a transducer element based on the electro-optical effect with a double pass light wave configuration via a photo-refractive crystal of $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO). To guarantee the double pass, a retro-reflector prism with high stability in environmental temperature changes is incorporated into the transducer. The double reflection of the light wave in the prism allows BTO to work in a wide linear region of its transfer function. To test the feasibility of this SFO, a periodic AC wave and a transitory event, both of high voltages, applied to an aluminium tube, were measured at distances of up to one meter. It was shown that the proposed sensor is robust, linear, stable in temperature changes, and highly sensitive for high voltages telemetry applications.

Key words: fibre optic sensor, high voltage, electro-optical phenomena, Pockels effect.

3. Introducción

Dentro de la tecnología que se usa actualmente para la automatización de procesos industriales, se encuentra la telemetría de magnitudes físicas tales como la presión, la temperatura, la humedad, etc., y las magnitudes eléctricas tales como la corriente, el voltaje, la potencia, etcétera [1].

En la industria eléctrica, la medición y el monitoreo constante de alto voltaje es importante para las pruebas, el mantenimiento

y la detección de fallas en materiales aislantes y en líneas de transmisión de energía eléctrica, en donde se destaca el uso de las técnicas tradicionales para lograr dicho objetivo.

El uso del fenómeno electrostático como técnica tradicional para mediciones de alto voltaje, incluye entre otros, la medición directa mediante los voltímetros de Abraham, la medición por medio de la descarga producida por la abertura entre esferas y finalmente, los transformadores o divisores de potencial. Sin embargo, las técnicas tradicionales de medición directa tienen la desventaja de que no pueden medir extra-altos voltajes (arriba de los 200 kV) con riesgo de choque eléctrico para los operarios; son de difícil construcción además de que perturban el campo a medir ya que hacen uso de elementos conductores por lo que también suelen sufrir del efecto corona. Por otro lado, el método de medición por descarga entre la abertura de esferas es usado comúnmente para propósitos de calibración y requieren una gran exactitud en la medición de la separación de las esferas usadas, por lo que no son recomendables para mediciones de rutina. Finalmente, los métodos que emplean transformadores y divisores de potencial son robustos y con poca precisión debido a las corrientes indeseables producidas por los campos magnéticos [2].

A parte del fenómeno electrostático, actualmente se dispone del fenómeno electrofísico como una alternativa para medición de voltaje. Se entiende por fenómeno electrofísico, los cambios que sufre un material debido a que es sometido a un campo eléctrico [3]. Este fenómeno es usado para la medición de voltaje aprovechando las propiedades de ciertos materiales y haciendo pasar luz a través de ellos, usando fibra óptica como elemento transductor o simplemente como canal de comunicación. Los sensores que hacen uso de alguno de los fenómenos electrofísicos en conjunto con la fibra óptica son mejor conocidos como sensores de fibra óptica (SFO)[4].

Los SFO ofrecen grandes ventajas sobre las técnicas tradicionales para la medición de diferentes magnitudes físicas[5-10]. La ausencia de elementos conductores nos permite obtener dispositivos con aislamiento eléctrico e inmunidad a interferencia electromagnética. Además, estos dispositivos pueden ser manufacturados con dimensiones pequeñas y pueden ser usados para monitorear campos eléctricos de manera remota sin el riesgo de choques eléctricos. Actualmente, los SFO basados en el fenómeno electrofísico incluyen los efectos tales como el piezoeléctrico [11-13], electrostrictivo [14-18], el efecto Kerr electro-óptico [19,20] y el efecto Pockels electro-óptico [21-46], de los cuales se destaca el uso del efecto lineal electro-óptico o efecto Pockels debido a que los dispositivos basados en este fenómeno son de fácil construcción y además existen una gran cantidad de materiales disponibles que presentan este fenómeno.

El efecto Pockels ya ha sido demostrado hace mucho tiempo para hacer el primer sensor de alto voltaje reportado [47] y posteriormente, usando este efecto al considerar fibra óptica como línea de transmisión. Desde entonces, diversos autores han propuesto diferentes configuraciones para sensores de campo eléctrico, entre ellos, el uso de moduladores electro-ópticos longitudinales de simple y doble paso [42-46].

Ya se ha propuesto previamente un sensor de campo eléctrico basado en un modulador longitudinal Pockels con doble paso usando un cristal de $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ con buena sensibilidad y estabilidad térmica [42-46]. La comparación de la sensibilidad entre dos clases de cristales fotorefractivos tales como el $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) y el BTO ha demostrado que es preferible usar el BTO en una configuración de doble paso debido a que la sensibilidad del BSO decrece significativamente durante la actividad óptica. El cristal BSO tiene una alta actividad óptica intrínseca ($22\text{ }^\circ/\text{mm}$ @ 633 nm) comparado con el cristal BTO ($6.3\text{ }^\circ/\text{mm}$ @633 nm), sin embargo, ambos poseen aproximadamente la misma constante electro-óptica r_{41} (5×10^{-12} m/V para el BSO y 5.17×10^{-12} m/V para el BTO) [48].

Ensamblamos el sensor de campo eléctrico basado en la configuración de doble paso usando el cristal de BTO y lo alojamos dentro de una cubierta cilíndrica no conductora con dimensiones de 39 milímetros de largo por 13 milímetros de diámetro (véase figura 1), acoplando a ella, 100 metros de doble fibra multimodal forrada.

En este trabajo, se reporta el sensor de campo eléctrico basado en el uso de fibra óptica y el efecto Pockels electro-óptico para la aplicación en telemetría de alto voltaje en la industria eléctrica. En la Sección 2 se establecen los fundamentos del sensor utilizado para este objetivo, en la sección 3 se descri-

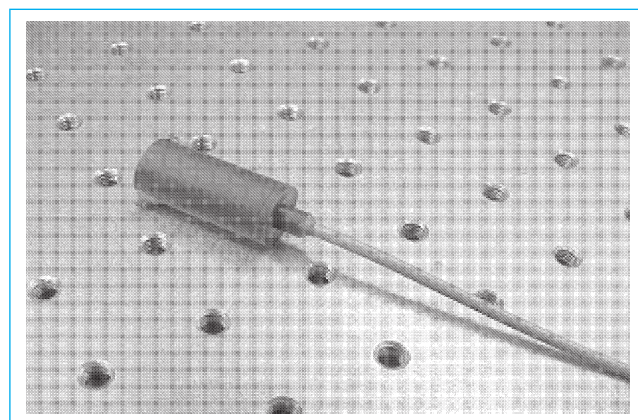


Fig. 1. Foto del ensamble del sensor de fibra óptica para aplicaciones de telemetría.

ben los detalles experimentales junto con los resultados de estos experimentos y finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones. Nuestro objetivo es demostrar que este sensor exhibe una buena respuesta en sensibilidad, con un comportamiento lineal y además que este sensor es confiable para la telemetría de alto voltaje en aplicaciones de automatización industrial.

2. Fundamentos del sensor

La figura 2 muestra el esquema del sensor de campo eléctrico y el camino óptico usado para este experimento. Cuando la luz entra a la cabeza sensora, la intensidad de la luz pierde la mitad de su potencia y viene a ser linealmente polarizada después de pasar por el prisma polarizador. El estado de polarización de la luz después de añadir el prisma polarizador está alineado a 45 grados con respecto a los ejes del campo eléctrico que es inducido por la birrefringencia del cristal. La luz polarizada linealmente pasa a través de un cristal cúbico como el BTO, esto es, consideramos un cristal uniforme sin alguna birrefringencia lineal intrínseca. Mientras tanto, si aplicamos un campo eléctrico externo \mathbf{E} al cristal, el cristal BTO pasará a ser uniaxial. El valor de la birrefringencia lineal inducida es proporcional al campo eléctrico impuesto \mathbf{E} y por lo tanto el retardo en la fase entre las ondas rápida y lenta queda linealmente relacionada a \mathbf{E} . De esta forma, la luz que se propaga en el cristal será considerada como una combinación lineal de dos ondas: la primera para un «eje rápido» y la otra para un «eje lento». Esto es, dos ondas con diferente velocidad de grupo. El retardo de fase relativo entre esas ondas es proporcional a la birrefringencia lineal inducida, esto es, cuando

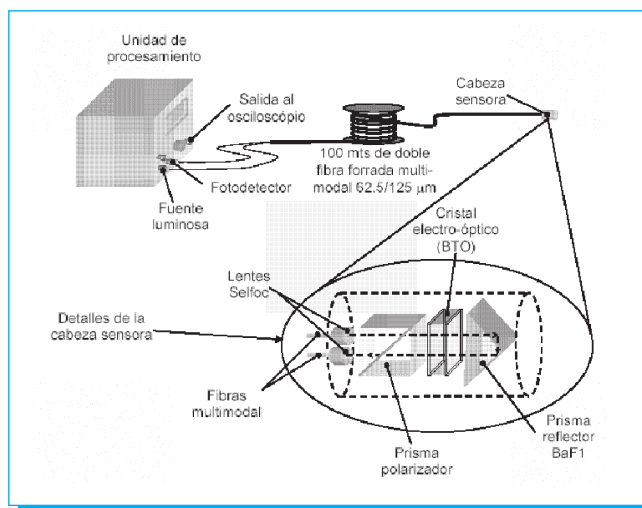


Fig. 2. Estructura del sensor de fibra óptica (SFO).

el cristal es expuesto a un \mathbf{E} , el índice de refracción cambia debido al efecto Pockels y el cristal viene a ser linealmente birrefringente. Luego, la sensibilidad para este sensor está dada por la razón entre el retardo en la fase y la magnitud de \mathbf{E} .

Por lo tanto, para obtener la mayor cantidad de retardo por unidad de campo eléctrico para este cristal BTO de $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, el campo eléctrico y el camino óptico se han seleccionado normal al plano cristalográfico (100). Luego, la luz polarizada regresa al cristal después de dos reflexiones en la superficie del prisma retroreflector, de esta forma, añadiendo una diferencia de fase de $\pi/2$ para obtener polarización circular. Para la onda reflejada, el prisma polarizador actuará ahora como un analizador, esto es, cambia la modulación de la polarización en modulación de intensidad regresando la onda luminosa por la segunda fibra acoplada con una lente Selfoc. Finalmente, la luz es recolectada por un fotodetector alojado dentro de la unidad de procesamiento.

Cabe destacar 3 aspectos relevantes:

1) Se usa el ángulo de incidencia y el índice de refracción del prisma retroreflector para determinar la diferencia de fase entre las polarizaciones S y P basadas en la reflexión total interna. Así que, se puede calcular el índice de refracción del prisma retroreflector usando la diferencia de fase Δ entre las polarizaciones S y P de la interfaz vidrio-aire del prisma retroreflector bajo reflexión total interna de la siguiente manera [49]:

$$\tan(\Delta/2) = \frac{(n_1/n_0)[(n_0/n_1)^2 \sin^2 \varphi - 1]^{1/2}}{\sin \varphi \tan \varphi} \quad (1)$$

donde φ es el ángulo de incidencia, n_1 y n_0 son los índices de refracción del aire y del prisma de vidrio, respectivamente. Usando la ecuación (1), $n_1 = 1$ y $\varphi = \pi/4$, podemos obtener el índice de refracción del prisma retroreflector:

$$n_0 = \left| \frac{2}{1 - \tan^2(\Delta/2)} \right|^{1/2} \quad (2)$$

La diferencia de fase total Δ deberá ser pues igual a $\pi/4$ para obtener polarización circular del haz después de dos reflexiones consecutivas en las caras del prisma. Por lo tanto, de esta condición, el índice de refracción fue calculado a 1.553773974.

2) El prisma retroreflector que usamos para esta configuración del sensor fue hecho con el vidrio BaF1 (ruso) con $n_0 = 1.575819$ a una $\lambda = 670\text{ nm}$, para obtener una alta estabilidad en temperatura. Además, este elemento de fase es acromático, proporcionando la máxima profundidad de modulación para todas las componentes espectrales de la fuente luminosa.

3) El uso de electrodos no es necesario en este caso para detectar el campo eléctrico en comparación de un modulador electro-óptico para medir voltaje directamente, además de que no es necesario aplicar el voltaje a media onda (conocido como V_{π}) requerido para trabajar en la región lineal de la función de transmisión. En lugar de V_{π} se toma provecho de la doble reflexión en el prisma retrorreflector.

La función de transmisión del sensor puede obtenerse usando el formalismo de las matrices de Jones para cada elemento de la cabeza sensora, de tal forma que: [50]

$$T = | P \times R(-45^\circ) \times W_{ref} \times R(45^\circ) \times R(-45^\circ - \vartheta) \times \Pi \times R(45^\circ + \vartheta) \times R(-45^\circ) \times W_{inc} \times R(45^\circ) \times E |^2 \quad (3)$$

donde, E denota el vector de Jones de la luz a la entrada del cristal después del polarizador, $R(\dots)$ es la matriz de rotación, W_{inc} es la matriz de Jones del cristal de BTO para la luz incidente, Π es la matriz de Jones para el prisma retrorreflector, W_{ref} es la matriz de Jones del cristal BTO para la luz reflejada, P es la matriz de Jones del analizador y ϑ es el ángulo de la rotación de la polarización debido a la actividad óptica del cristal.

Es fácil demostrar que el resultado de la ecuación (3) tiene una gráfica sinusoidal (altamente no lineal) como se muestra en la figura 3. Donde podemos ver la función de transmisión del sensor y la diferencia de fase debida al prisma retrorreflector. Nótese que es necesario trabajar el sensor en la parte lineal de la función de transmisión que es una función no lineal. De esta forma, nosotros obtendremos un excelente comportamiento en la respuesta del sensor. También se muestra en la figura 3, la parte donde la intensidad de la luz está siendo modulada por el campo eléctrico impuesto al cristal. Como se mencionó anteriormente, se usa la configuración de doble paso propuesta en Peña-Lecona *et al.* [46] para lograr una alta sensibilidad.

Finalmente, definimos la sensibilidad del sensor S como la razón de la salida del voltaje del sensor V_s en mV a la señal de voltaje medido en kV_{rms} como sigue [4]:

$$S = \frac{V_s \text{ [mV]}}{V_m \text{ [kV}_{rms}\text{]}} \quad (4)$$

donde V_s es la salida filtrada y amplificada del fotodetector cuando el voltaje es sentido por la cabeza sensora, dada en milivoltios y V_m es el voltaje real aplicado dado en kilovoltios.

3. Detalles experimentales y resultados

Como fuente de iluminación, se hizo uso de un diodo emisor de luz superluminiscente (SLED) SUPERLUM™ SLD-26-HP

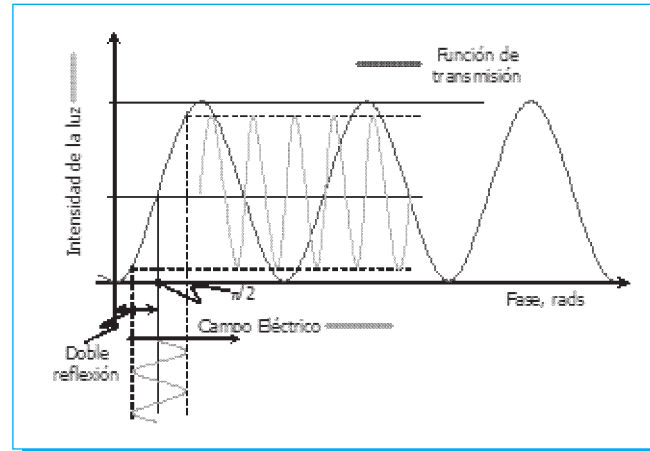


Fig. 3. Función de transmisión del sensor y la modulación de la luz debido al campo eléctrico aplicado a la cabeza sensora.

con su respectivo controlador de corriente y temperatura PILOT-2™ ambos alojados en la unidad de procesamiento. La longitud de onda de la luz de salida es de 670 nm con un ancho a la mitad del pulso (FWHM) de 30 nm y una potencia eficaz de 5 mW. El haz de luz es guiado a través de una fibra multimodal (100 m de longitud y 125 μm de diámetro) acoplada a la cabeza sensora por medio de lentes tipo Selfoc. La irradiancia de salida es guiada de regreso mediante un sistema idéntico (Selfoc-fibra óptica) a la unidad de procesamiento.

Los experimentos están divididos en dos partes, la primera consistió en las mediciones realizadas a una onda periódica de campo eléctrico de 60 Hz y la segunda para una onda de impulso. La máxima sensibilidad es obtenida cuando la superficie circular de la cabeza sensora (plano $x - y$) es perpendicular al campo eléctrico.

La respuesta de la cabeza sensora depende de la variación del ángulo de incidencia sobre el plano $x - y$ definido previamente. Éste se grafica en la figura 4 donde podemos notar que la mayor cantidad de modulación eléctrica es obtenida usando incidencia normal del campo eléctrico al plano $x - y$. Esto es obvio si consideramos que el modulador óptico fue diseñado para trabajar como un modulador electro-óptico longitudinal [50].

Las mediciones fueron llevadas a cabo a un elemento conductor $V(t)$ constituido de un tubo de aluminio de 15 centímetros de diámetro con un alto voltaje aplicado sobre él y desplazando la cabeza sensora en un plano vertical/horizontal con la consideración de la incidencia del campo eléctrico como se mencionó anteriormente.

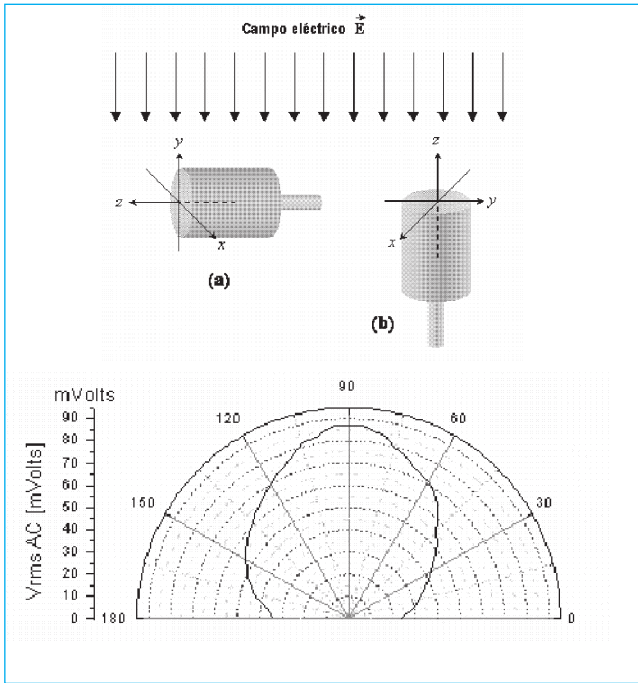


Fig. 4. Gráfica de la respuesta del sensor para un ángulo de incidencia del vector E sobre la cara plana del sensor, desde 0 (a) a 90 grados (b).

Antes de explicar los resultados experimentales, definimos el plano horizontal como el plano paralelo a la tierra física que incluye el elemento sensor y el elemento de voltaje $V(t)$, y definimos el plano vertical como el plano perpendicular a la tierra física que incluye el elemento sensor y el elemento de voltaje $V(t)$ (véase figura 5).

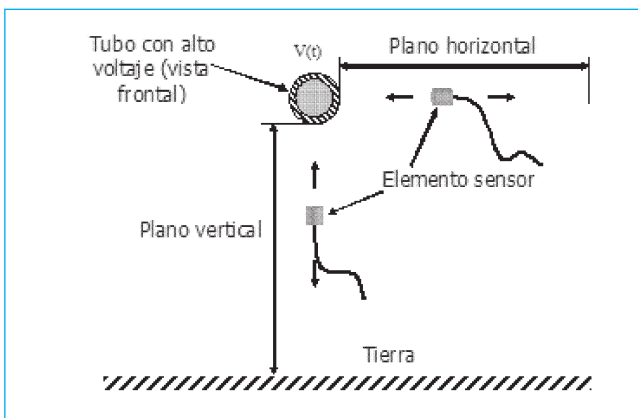


Fig. 5. Vista esquemática de los planos definidos para los experimentos de medición.

3.1 Experimentos para onda eléctrica continua

Como se mencionó previamente, las mediciones fueron realizadas para cada 10 centímetros, moviendo el sensor en el plano horizontal/vertical alejándose del elemento de voltaje y variando el voltaje para cada posición además. Nosotros visualizamos la señal proveniente de la salida amplificada de la unidad de procesamiento con un osciloscopio y conociendo el voltaje aplicado al elemento de voltaje, nosotros podemos obtener fácilmente el valor para la sensibilidad a cada punto.

La sensibilidad del sensor S para el plano horizontal/vertical puede ser calculada y se muestra en la figura 6. Haciendo una aproximación con un ajuste de mínimos cuadrados de los puntos y con un error menor que 0.011 %, la sensibilidad del sensor en el plano horizontal/vertical está dado por la siguiente ecuación de calibración [51]:

$$S = 10^{-6} \times \left(0.941 + \frac{0.083}{d^2 [\text{m}]} \right) \quad (6)$$

La curva de sensibilidad aproximada (curva de calibración) en la ecuación 6 corresponde a la línea continua y la curva de la medición de la amplitud del voltaje, ambas para los planos horizontal y vertical están mostrados con puntos (figura 6).

Podemos observar que la sensibilidad es muy similar para los planos vertical y horizontal (curvas punteadas). Esto es porque el sistema tiene una simetría cilíndrica para el campo eléctrico originado por el elemento de voltaje [52]. Por lo tanto, las

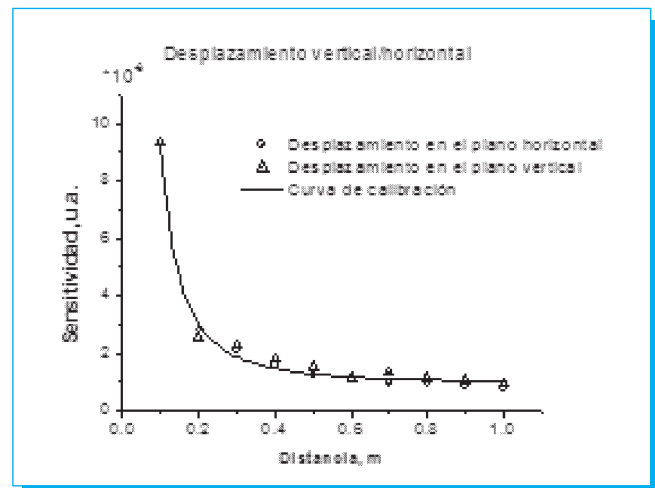


Fig. 6. Gráfica de la sensibilidad del SFO; los puntos y triángulos representan dos direcciones mutuamente perpendiculares; la línea continua representa la ecuación de calibración.

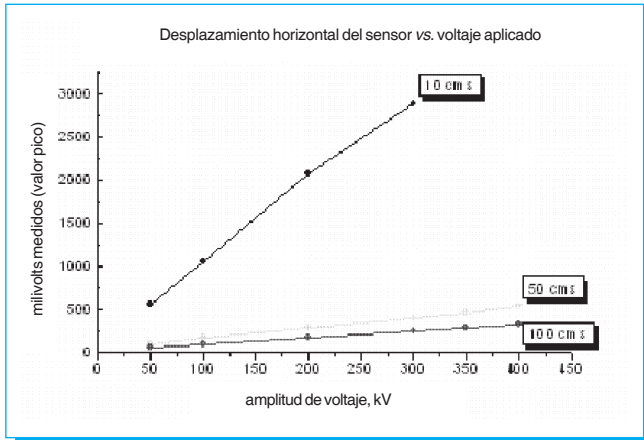


Fig. 7. Respuesta del sensor con la variación de la distancia horizontal (10, 50 y 100 cm) al elemento de voltaje y con respecto al voltaje aplicado.

mediciones hechas con este sensor nos aseguran que estas pueden ser tomadas solamente con la consideración que el plano $x-y$ debe ser perpendicular al campo eléctrico a ser medido.

Por lo tanto, el voltaje medido para un desplazamiento vertical/horizontal directamente resulta de la ecuación 6:

$$V_{\text{measured}} [\text{kV}] = 10^6 \times \frac{V_{\text{sensor}} [\text{V}]}{\left(0.941 + \frac{0.083}{d^2} [\text{m}]\right)} \quad (7)$$

La respuesta del sensor es lineal para cada señal en amplitud de voltaje. La figura 7 muestra las variaciones de la señal de salida para las distancias desde 10, 50 y 100 centímetros desde el elemento de voltaje $V(t)$ en el plano horizontal, donde las mediciones están representadas por puntos y la ecuación de calibración en línea continua; podemos ver la curva para cada medición y la dependencia con la distancia para mediciones de intensidad en el rango de 50 kV a 450 kV a 60 Hz.

Por otro lado, para los desplazamientos verticales, considerando que la sensibilidad del sensor tiene un comportamiento similar que el plano horizontal, tomamos las mediciones al elemento de voltaje $V(t)$ para un rango de 10 a 100 centímetros desde el elemento de voltaje en el plano vertical. Esto es graficado en la figura 8, la ecuación de calibración en línea continua y las mediciones en puntos.

3.2. Experimentos para campo eléctrico pulsado

La respuesta transitoria del sensor fue demostrada satisfactoriamente mediante el siguiente experimento: La

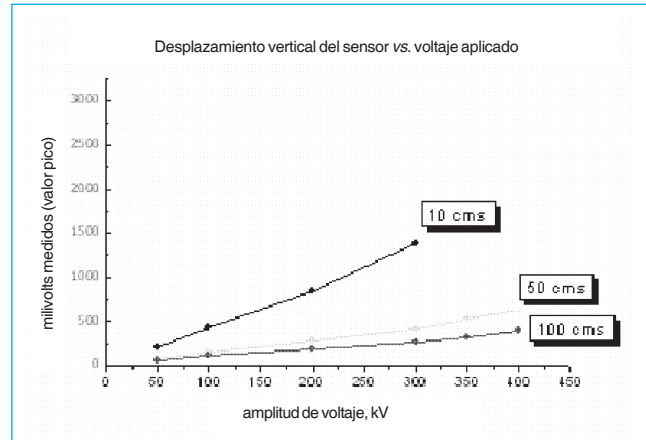


Fig. 8. Respuesta del sensor con la variación de la distancia vertical (10, 50 y 100 cm) al elemento de voltaje y con respecto al voltaje aplicado (en vista desplazada).

cabeza sensora fue colocada a un metro de distancia desde el elemento conductor $V(t)$ con la superficie circular del sensor en posición perpendicular al campo eléctrico y fueron aplicados impulsos de alto voltaje desde 500 kV hasta 1100 kV al elemento de voltaje (véase figura 9).

A continuación, efectuamos las mediciones espectrales de la respuesta del sensor. Conectando un analizador de espectro ANDO^{MR} AQ 6312B a la salida amplificada de la unidad de procesamiento se puede observar la resolución de la sensibilidad de la cabeza sensora para esos impulsos cortos (véase figura 10).

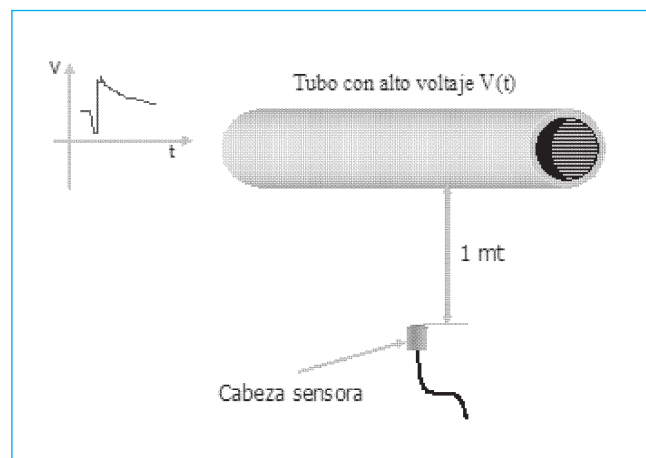


Fig. 9. Vista esquemática del arreglo para la medición de impulsos de alto voltaje.

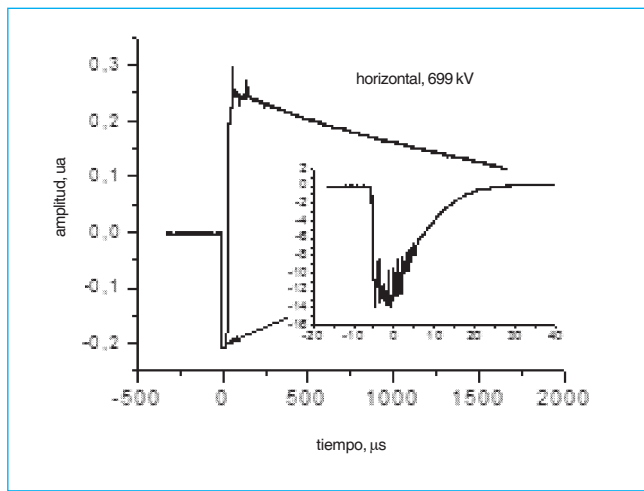


Fig. 10. Detalles del impulso detectado por la cabeza sensora.

La parte negativa que se observa en el eje del tiempo, en la gráfica de la figura 10, es simplemente porque estamos tomando como punto de referencia inicial el momento en que se genera el alto voltaje; de hecho se puede observar cómo la amplitud tiene un pico negativo (que tiende a $-\infty$) y que es debido al propio mecanismo del generador de impulsos eléctricos basado en la carga y descarga de capacitores.

Tomando la señal con un retraso de 1 ms en el tiempo, son graficados los valores y en ella podemos observar la linealidad de la medición de los impulsos por parte del

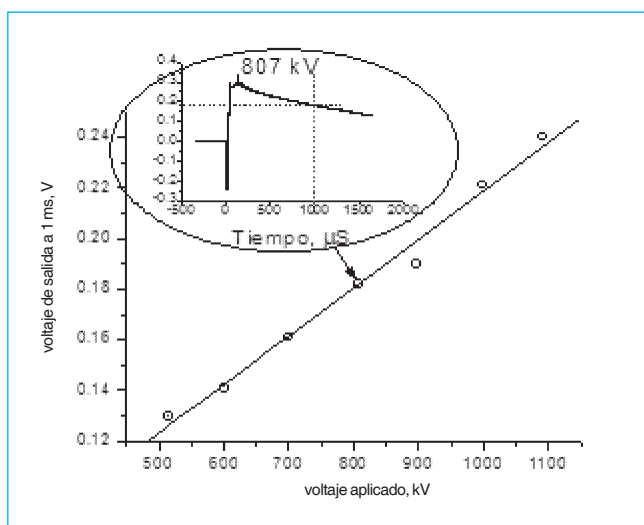


Fig. 11. Respuesta lineal de la cabeza sensora para los impulsos de alto voltaje.

elemento sensor. La respuesta del sensor se muestra en la figura 11 para diferentes intensidades de los impulsos (desde 500 kV hasta 1100 kV). Se hizo un ajuste por mínimos cuadrados para obtener la ecuación de calibración, la cual es graficada en línea continua.

4. Conclusiones

Un sensor remoto de fibra óptica para telemetría de alto voltaje fue propuesto. El SFO está basado en el uso de una configuración de doble paso, lo cual permite incrementar la sensibilidad del mismo.

Por otro lado el uso del cristal BTO y el prisma retrorreflector hecho con vidrio BaF1 garantizan una alta estabilidad ante las variaciones de temperatura. Estas ventajas permiten el uso del SFO en procesos de automatización y ambientes industriales donde se requiere un monitoreo continuo y sin riesgo de choque eléctrico para los operarios. Adicionalmente, SFO es robusto, no requiere un mantenimiento especial y presenta una alta rapidez de respuesta con respecto a las técnicas tradicionalmente empleadas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) su apoyo técnico.

5. Referencias

- [1] Fraden J., *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 2nd edn., New York, Springer Verlag, 1996.
- [2] Lucas J. R., *High Voltage Engineering*, revised edn., Open University of Sri Lanka, 2001, capítulo 6.
- [3] Krohn D. A., *Fibre Optic Sensors, Fundamentals and Applications*, 1st edn, Instrument Society of America, 1998, capítulo 11.
- [4] López-Higuera J. M., *Handbook of optical Fiber Sensing Technology*, 1st edn. London, John Wiley & Sons, LTD, 2002, capítulos 1 y 27.
- [5] Rogers A. J., «Optical fibers in communications and measurement», *CEGB Research*, (BINITI No. 12), pp. 3-17, (1984).
- [6] B. Lee, «Review of the present status of optical fiber sensors», *Opt. Fiber Technol.*, No 9, pp. 57-79, (2003).
- [7] H. J. M. Hulshof, W. R. Rutgers, A.H. V.D. Wey, «Optical Voltage Sensors: Applications in Electric Power Systems», *Proc. SPIE on Fiber Optic Sensors II*, vol. 798, pp. 266-269, (1987).
- [8] Thomas Bosselmann, «Magneto and Electrooptic Transformers meet expectations of Power Industry», *from the 12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, *Opt. Soc. Am.*, vol. 16, pp. 111-114, (1997).
- [9] Allen H. Cherin, *An introduction to optical fibers*, New York, Mc Graw-Hill, 1985, capítulos 7-9.
- [10] Frederick C. Allard, *Fiber Optics Handbook for Engineers and Scientists*, New York, Mc Graw-Hill, 1989, capítulo 4.

- [11] Klaus M. Bohnert, Jadran Kostovic and Pascal Pequignot, «Fiber Optic Voltage Sensor for 420 kV electric power systems», *pt. Eng.*, Vol 39, No. 11, pp. 3060-3067, (2000).
- [12] Hoseong Kim and Jinwoo Jun, «Fiber optic voltage sensor based on the photoelastic effect in a single-mode optical fiber», *Opt. Eng.*, vol. **39**, No. 12, pp. 3281-3284, (2000).
- [13] Huang Yongling, Feng Dejung, Xu Zhaowen, Tong Zhengrong, Kai Guiyun and Dong Xiaoyi, «A voltage sensor utilizing all-fiber Mach-Zehnder interferometer», *Proc. SPIE on «Fiber Optics and Optoelectronics for Network Applications»*, vol. **4603**, pp. 188-191, (2001).
- [14] Sandeep T. Vohra, Frank Bucholtz and Alan D. Kersey, «Fiber Optic de and Low-Frequency Electric Field Sensor», *Opt. Lett.*, vol. **16**, No. 18, pp. 1445-1447, (1991).
- [15] Sandeep T. Vohra and Frank Bucholtz, «Fiber Optic ac Electric Field Sensor Based on The Electrostrictive Effect», *Opt. Lett.*, vol. **17**, No. 5, pp. 372-374, (1992).
- [16] Larry Fabiny, Sandeep T. Vohra and Frank Bucholtz., «High Resolution Fiber Optic Low Frequency Voltage Sensor Based on the Electrostrictive Effect», *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. **5**, No.8, pp. 952-953, (1993).
- [17] Larry Fabiny, Sandeep T. Vohra, Frank Bucholtz and Anthony D. Dandridge, «Three Channel Low-Frequency Fiber Optic Voltage Sensor», *Opt. Soc. Am. (Opt. Lett.)*, vol. **19**, No. 3, pp. 228-230, (1994).
- [18] Larry Fabiny, Sandeep T. Vohra and Frank Bucholtz, «Ultra Low Drift, Sub Microvolt Low Frequency Fiber Optic Voltage Sensor», *Proc. SPIE on «Tenth Optical Fiber Sensors Conference»*, vol. **2360**, pp. 45-48, (1994).
- [19] G. R. Allen, H. P. Davis, B. T. Neyer, D. J. Muron and J. Chang, «Electro-Optical Kerr Effect Voltage Measurements On Multi-Megavolt Pulsed Power Accelerators», *SPIE on Fiber Optic and Laser Sensors III*, vol. **566**, pp. 223-226, (1985).
- [20] Wang Zhaobing, Liao Yanbiao, Lai Shurong, Zhao Huafeng, «Fiber Sensor for Simultaneous Measurement of Current and Voltage by single Lo-Bi fiber», *Proc. SPIE*, vol. **2895**, pp. 26-32, (1996).
- [21] Catherine H. Bulmer, W. K. Burns and R. P. Moeller, «Linear Interferometric Waveguide Modulator for Electromagnetic-Field Detection», *Opt. Lett.*, vol. **5**, No. 5, pp. 176-178, (1980).
- [22] Kunhiko Hidaka and Hiroyuki Fujita, «A New Method of Electric Field Measurements in Corona Discharge Using Pockels Device», *J. Appl. Phys.*, vol. **53** No. 9, pp. 5999-6003, (1982).
- [23] Christian Duchet, «Integrated Electro-Optic Modulators With High Sensitivity For Remote Voltage Sensing», *Proc. SPIE on Fiber Optic Sensors*, vol. **586**, pp. 45-50, (1985).
- [24] Christian Duchet, P. Fabre, M. DiMaggio, «Thermal Stability of LiNbO₃ Electro-Optic Waveguide Modulators for Remote Voltage Sensing», *Proc. SPIE on Fiber Optic and Laser Sensors V*, vol. **838**, pp. 39-43, (1987).
- [25] Catherine H. Bulmer, «Sensitive, Highly Linear Lithium Niobate Interferometers for Electromagnetic Field Sensing», *Appl. Phys. Lett.*, vol. **53** No. 24, pp. 2368-2370, (1988).
- [26] Sang Shin Lee, Min Chel Oh, Sang Yung Shing and Kwang Hee Keh, «Integrated Optical High Voltage Sensor Using a Z-Cut LiNbO₃ Cutoff Modulator», *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. **5**, No. 9, pp. 996-999, (1993).
- [27] Nicolas A. F. Jaeger and Farnoosh Rahmatian, «Bias Integrated Optics Pockels Cell High-Voltage Sensors», *Proc. SPIE*, vol. **2072**, pp. 87-95, (1994).
- [28] David H. Naghski, Joseph T. Boyd, Howard E. Jackson, S. Sriram Stuart A. Kingsley and J. Latess, «An Integrated Photonic Mach-Zehnder Interferometer with No Electrodes for Sensing Electric Fields», *J. Lightwave Technol.*, vol. **12** No. 6, pp. 1092-1098, (1994)
- [29] Yong-Sik Yim and Sang Yung Shin, «Lithium Niobate Integrated-Optic Voltage Sensor with Variable Sensing Ranges», *Opt. Soc. Am., from the 12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. **16**, pp. 108-110, (1997).
- [30] Osamu Ogawa, Tomohiro Sowa and Shinichi Ichizono, «A Guided-Wave Optical Electric Field Sensor with Improved Temperature Stability», *J. Lightwave Technol.*, vol. **17**, No. 5, pp.823-830, (1999).
- [31] H. J. M. Hulshof, W. R. Rutgers, A.H. v.d. Wey, «Optical Voltage Sensors: Applications in Electric Power Systems», *SPIE on Fiber Optic Sensors II*, vol. **798**, pp. 266-269, (1987).
- [32] Allen H. Rose and Gordon W. Day, «Optical fiber voltage sensors for broad temperature ranges», *Proc. SPIE*, vol. **1580**, pp. 95-103, (1992).
- [33] Osamu Kamada and Kazuhiko Kakishita, «Electro-Optical Effect of Bi₄Ge₃O₁₂ Crystals for Optical Voltage Sensors», *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. **32**, No. 9B, pp. 4288-4291, (1993).
- [34] Josemir Coelho Santos, Muslum Cengiz Taplamacioglu and Kunhiko Hidaka «Optical High Voltage Measurement Using Pockels Microsingle Crystal», *Rev. Sci. Inst.*, vol. **70**, No. 8, pp. 3271-3276, (1999).
- [35] Xiaojun Zeng and Haiqing Chen, «Electro-optical measurement of highly intense electric field with high frequency», in *Optical Sensing, Imaging and Manipulation for Biological and Biomedical Applications*, *Proceedings of SPIE*, vol. **4082**, pp. 298-304, (2000).
- [36] Kazuo Kyuma, Shuichi Tai, Masahiro Nunoshita, Noboru Mikami and Yoshiaki Ida, «Fiber-Optic current

- and voltage sensor using a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single crystal», *J. Lightwave Technol.*, vol. **LT-1(1)**, pp. 93-97, (1983)
- [37] Y. Koruda, Y. Abe, H. Kuwahara and K. Yoshinaga, «Field Test of Fiber-Optic Voltage and Current Sensors Applied to Gas Insulated Substation», *Proc. SPIE on Fiber Optic Sensors*, vol. **586**, pp. 30-37, (1985).
- [38] Y. Kuhara, Y. Hamasaki, A. Kawakami, Y. Murakami, M. Tatsumi, H. Takimoto, K. Tada and T. Mitsui, «BSO/Fiber-Optic Voltmeter with Excellent Temperature Stability», *Electron. Lett.*, vol. **18**, No. 24, pp. 1055-1056, (1982).
- [39] John P. Dakin and M. C. Holliday, «A Passive All Dielectric Field Probe for R.F. Measurement Using the Electro-Optic Effect», *Proc. SPIE on Fiber Optics '84*, vol. **468**, pp. 237-240, (1984).
- [40] M. Norimatsu and M. Shirasaki, « $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal application for voltage sensor in optical fibers», *Ferroelectrics*, vol. **75**, pp. 189-196, (1987).
- [41] J. Niewisch, Peter Menke, P. Krammer, Thomas Bosselmann, «Temperature Drift Compensation of a Potential Transformer using a BSO Pockels Cell», *Eleventh International Conference on Optical Fiber Sensors, Jpn. Soc. Appl. Phys.*, vol. **WE 1-5**, pp. 152-155, (1996).
- [42] Valery N. Filippov, Andrey N. Starodumov, Yuri O. Barmenkov and Vladim V. Makarov, «Fiber Optic Voltage Sensor Based on a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal», *Appl. Opt.*, vol. **39**, No. 9, pp. 1389-1393, (2000).
- [43] Valery N. Filippov, Andrey N. Starodumov, Alexander V. Kir'yanov, Yuri O. Barmenkov and Vladimir P. Minkovich, «Optical voltage sensing: The influence of photoconductivity on a sensor parameters», In applications of Optical Fiber Sensors, *Proceedings of SPIE*, vol. **4074**, pp. 412-418, (2000).
- [44] Valery N. Filippov, Andrey N. Starodumov, Vladimir P. Minkovich and Francisco G. Peña Lecona, «Fiber Sensor for Simultaneous Measurement of Voltage and Temperature», *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. **12**, No 11, pp. 1543-1545, (2000)
- [45] Francisco G. Peña Lecona, Valery N. Filippov, Andrei N. Starodumov and Alexander V. Kir'yanov, «Fiber Optic Voltage Sensor with Optically Controlled Sensitivity», *Opt. Comm.*, vol. **1**, No. 187, pp. 135-140, (2001).
- [46] Francisco G. Peña Lecona, Juan Francisco Mosiño, Valery N. Filippov, René A. Martínez Celorio and Oracio C. Barbosa García, «An electro-optic fiber sensor with double pass configuration for measuring high AC voltage», *Meas. Sci. Technol.*, Vol. **15** pp. 1129-1132, (2004).
- [47] Susumu Namba, «High voltage measurement by ADP crystal plate», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **27 A**, No. 5, 336, (1956).
- [48] <http://www.issp.ac.ru/materials/BGO.en.shtml>
- [49] R. M. A. Azam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, (1977)
- [50] Amnon Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, 1st Ed., New York, John Wiley & Sons, capítulos 1-8. (1984)
- [51] Ernest E. Doebelin, *Sistemas de Medición e Instrumentación*, Mc Graw Hill, México, pp. 41-53. (2005)
- [52] Savéliev I. V. (1984), *Curso de Física General*, Moscú, MIR, tomo 2, capítulos 1-3.

DIGITAL DOT

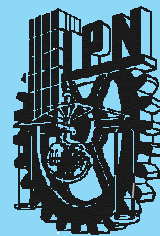
SERVICIOS DIGITALES

ELECTRÓNICOS INTEGRALES

Producción y posproducción en audio y video

5339 5880 / 5339 5474

Científica



Es una revista trimestral que ha cumplido 10 años de publicación sin interrupciones.

Se distribuyen en el ámbito nacional aproximadamente 600 ejemplares en universidades, instituciones y centros de investigación públicas y 150 revistas en instituciones educativas privadas.

Llegan más de 100 ejemplares a diferentes industrias de la República.

Llega también de manera constante a instituciones de Estados Unidos, Japón, Argentina, Chile, Cuba, España, Rumania.