

Nuevas tendencias en la medida de intensidades



Guillermo Robles Muñoz

Ingeniero Industrial de I.C.A.I., en la especialidad de Electrónica en 1993. Antes de incorporarse a la Universidad Pontificia de Comillas como estudiante de doctorado en 1998, trabajó para varias empresas. En la actualidad está desarrollando su tesis en el campo de los sensores magneto-ópticos e impartiendo clases en el Departamento de Electrónica y Automática.

Introducción

Medir la intensidad que circula por un conductor permite, entre otras cosas, conocer las condiciones de funcionamiento de los equipos conectados a la línea, detectar y prevenir fallos, optimizar el flujo de energía, cerrar el bucle de control de dispositivos y establecer un baremo en la facturación sobre el consumo de energía. Debido al riesgo que existe en la manipulación de elementos de alta tensión en los que se pueden producir sobretensiones o por los que circulan intensidades elevadas, se desestima el uso de amperímetros que vayan conectados en serie con la línea a medir. Es necesario, entonces, utilizar medios indirectos que midan magnitudes proporcionales a la intensidad. Los métodos convencionales de medida de grandes corrientes son los transformadores de intensidad y las sondas de efecto Hall. Sin embargo, aunque dominan el mercado de los sensores de intensidad, presentan ciertas limitaciones.

Estas limitaciones, en el caso de los transformadores, son:

- No pueden medir corriente continua.
- Puede haber problemas de aislamiento entre el primario y secundario.
- Se saturan con picos de corriente debidos a faltas.
- Tienen problemas de histéresis y en consecuencia problemas de calentamiento.
- La tensión en sus bornes es muy alta cuando se encuentran en vacío debido a la relación de espiras.
- Se ven influidos por interferencias electromagnéticas.

La principal desventaja de las sondas de efecto Hall es que tienen limitado su ancho de banda al del circuito electrónico de compensación. Medir frecuencias que no superen los kHz limita sus aplicaciones; por ejemplo, picos bruscos de corriente no serían detectados por estas sondas.

Recientemente se han presentado sensores de corriente basados en anillos de Rogowski. Están basados en la ley de inducción de Faraday y necesitan un integrador para obtener la intensidad que circula por el primario. Su principal atractivo es que pueden medir altas frecuencias. Sin embargo, al integrar la fuerza electromotriz inducida, no pueden medir corriente continua. Se está trabajando sobre un sensor mixto que recoge las ventajas de las sondas de efecto Hall y las ventajas de los anillos de Rogowski.

La búsqueda de métodos alternativos ha dado como resultado el aprovechamiento de las propiedades ópticas de los materiales influidos por campos magnéticos. Son los sensores magneto-ópticos. En 1845, Michael Faraday anotó en su cuaderno de laboratorio "Este hecho puede llegar a ser extremadamente fértil y poseer un gran valor..." refiriéndose a la relación que existía entre la polarización de una onda electromagnética a la entrada y la polarización de la onda a la salida de un material imanado. Más de cien años después, en 1973, A.J. Rogers propuso un método para la medida de corriente mediante un método óptico. Desde entonces se han sucedido las publicaciones utilizando diferentes técnicas y tipos de materiales para el desarrollo y la mejora de los sensores. Al final de este documento se proporciona una amplia bibliografía.

Sensores magneto-ópticos Estado actual

Es indudable que la mayor ventaja de medir campos magnéticos que son proporcionales a intensidades es que se puede hacer a distancia. Si a esto le sumamos que es la luz quien transmite la información de la medida, se garantiza un aislamiento total entre el primario y el secundario. Además, los sensores magneto-ópticos no tienen problemas de saturación en condiciones de falta y su ancho

de banda es prácticamente ilimitado, incluyendo la corriente continua.

Desafortunadamente tienen dos desventajas importantes. Por un lado su sensibilidad es baja. La magnitud medida, que como se verá más adelante es el ángulo de rotación del plano de polarización de la luz, experimenta pequeñas variaciones y es necesario diseñar amplificadores con una gran ganancia para obtener una medida aceptable. Por otra parte, las propiedades ópticas del material y, en concreto, su constante de Verdet, dependen de la temperatura en mayor o menor medida atendiendo a la composición química del sensor. No obstante, su campo de aplicación es muy amplio y puede resultar interesante conocer más en profundidad su funcionamiento.

Efectos magneto-ópticos

A continuación se explica brevemente la base teórica de dos efectos magneto-ópticos, el efecto Faraday y el efecto Kerr:

EL EFECTO FARADAY

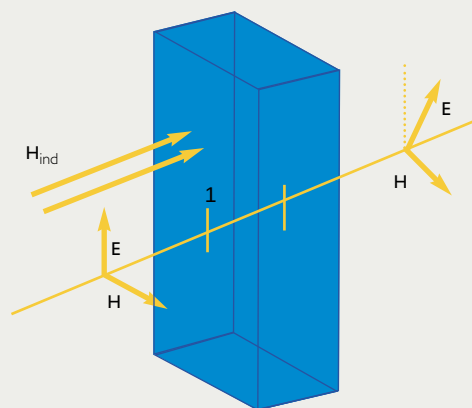
Un campo magnético es capaz de cambiar las propiedades ópticas de un material. El efecto Faraday es una birrefringencia inducida por un campo magnético $\mathbf{H}$ paralelo a la dirección de la luz. Es decir, los índices de refracción del material dependen del campo magnético y del eje de simetría que consideremos. Cuando una luz linealmente polarizada atraviesa el material, el plano de polarización rota un ángulo proporcional al campo magnético. Mediante un polarizador es posible traducir ese ángulo a variaciones de intensidad luminosa y posteriormente ser detectadas por un sensor óptico.

Para poder medir un campo magnético y la intensidad que lo crea con el Efecto Faraday, se necesita una luz polarizada. La luz es una onda electromagnética, son dos campos, uno eléctrico y otro magnético que varían en el tiempo y en el espacio de una manera senoidal. Por definición, la luz polarizada es la que tiene su vector de campo eléctrico en un plano. Si la polarización es lineal, el vector oscila en una recta.

Cuando una luz polarizada atraviesa un material que tiene un índice de refracción distinto en cada eje de simetría, el plano de polarización cambia, gira un ángulo θ .

En el caso de los materiales magneto-ópticos, el índice de refracción depende del campo magnético que afecta al material, por lo que θ , será proporcional al campo magnético.

Figura 1



Representación esquemática del efecto Faraday. La polarización de la luz, representada por los campos magnéticos y eléctricos $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$, gira al atravesar un material imanado por un campo $\mathbf{H}_{ind}$. El espesor del material es l .

El ángulo de rotación depende además de la longitud del camino de la luz dentro del material, l , y de sus propiedades magneto-ópticas incluidas en la constante de Verdet V , sus dimensiones son grados de giro del plano de polarización por cada Tesla y por cada centímetro. La siguiente ecuación recoge todos estos parámetros:

$$\theta = V \int \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

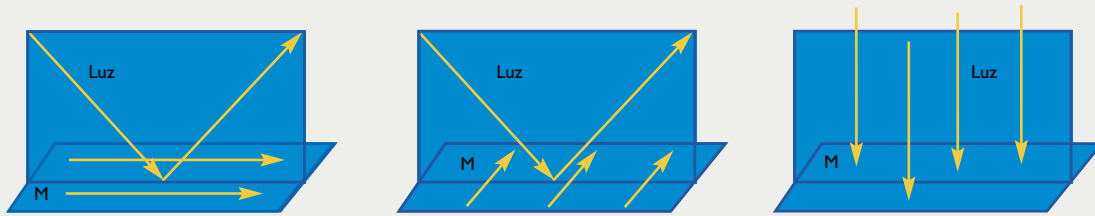
En definitiva, el ángulo girado es proporcional al campo magnético, a la distancia recorrida por la luz dentro del material y a las propiedades magneto-ópticas del sensor. Si conocemos estos dos últimos parámetros, y el giro, la obtención del campo magnético es inmediata.

EL EFECTO KERR

La relación entre el campo eléctrico de una onda electromagnética incidente en una muestra y el campo eléctrico de la onda reflejada, depende de la orientación e intensidad del campo magnético al que está sometida dicha muestra.

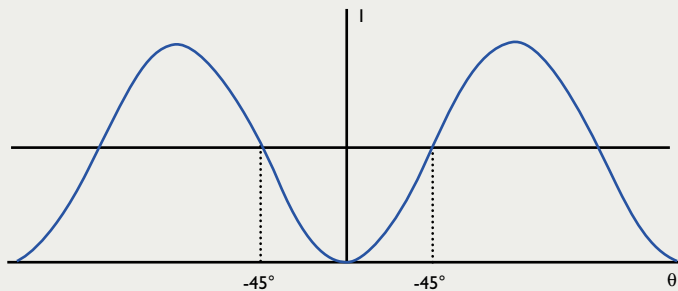
Cuando una luz polarizada linealmente se refleja en un material magneto-óptico, la onda reflejada está elípticamente polarizada o ha cambiado su intensidad luminosa dependiendo del efecto Kerr que se considere. En la figura 2 se representan los tres tipos de efecto Kerr: el primero es el Kerr longitudinal, el campo magnético imana al material con una dirección paralela al plano de incidencia de la luz. El material es fácil de saturar

Figura 2



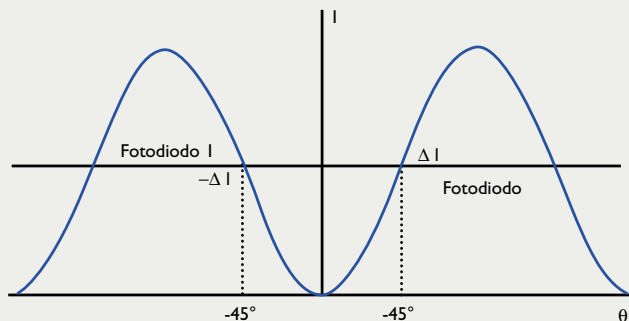
Los distintos tipos de efecto Kerr que se pueden encontrar: Kerr longitudinal, Kerr Transversal y Kerr Polar.

Figura 3



Función que relaciona la potencia luminosa con el ángulo de polarización relativo entre dos polarizadores. Notar que la máxima linealidad entre el ángulo y la intensidad luminosa es a 45° . Variaciones del ángulo relativo alrededor de 45° se corresponden con variaciones de potencia luminosa.

Figura 4



Para un incremento del ángulo relativo entre los polarizadores, inducido por el material magneto-óptico, se tiene un incremento de intensidad luminosa y un decremento idéntico.

porque la imanación se encuentra en el eje fácil de la muestra, luego el resultado obtenido es un ciclo de histéresis. Al no haber linealidad, este el Kerr longitudinal no es adecuada para nuestra aplicación.

En el segundo caso, Kerr transversal, la imanación M es perpendicular al plano de in-

cidencia. La peculiaridad de este efecto es que no hay un cambio de polarización, sino una variación en la intensidad luminosa recogida en el sensor. Es más complicado saturar la muestra, pero sigue sin ser el caso ideal para medir campos magnéticos.

Por último, cuando la imanación es paralela a la dirección de la luz y perpendicular a la muestra, se habla del efecto Kerr polar. La saturación del material en este caso es muy difícil, existe un campo desimanador muy grande debido a la geometría de la muestra y la relación entre giro del plano de polarización y el campo magnético, es lineal.

Es importante resaltar que el efecto Kerr ocurre cuando la luz es reflejada por el material, mientras que el efecto Faraday es en transmisión, la luz debe atravesar la muestra. Este hecho se debe tener en cuenta al diseñar la geometría del sensor y el guiado de la luz desde el emisor al receptor o fotodiodo.

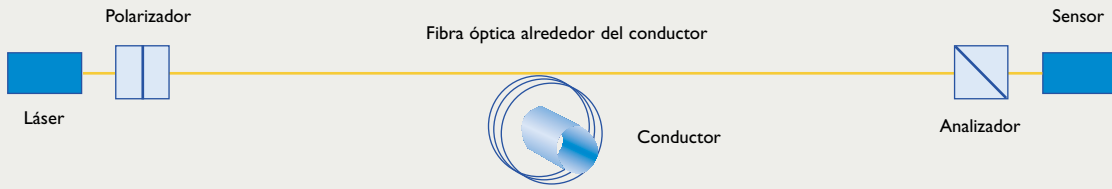
Metodos de medida

La cuestión más importante al hacer mediciones con un método magneto-óptico, es hacer que los cambios de la variable medida sean proporcionales a cambios en la intensidad de luz.

En nuestro caso, se trata de medir un cambio en la polarización de la luz. Para poder analizar el giro del plano de polarización, éste debe ser proporcional a variaciones de luz. Para ello se hace uso de dos polarizadores lineales. Un polarizador no es nada más que un material que orienta el campo eléctrico de la onda electromagnética en una determinada dirección. La función de transferencia que relaciona la potencia luminosa a la entrada del primer polarizador con la potencia luminosa a la salida del segundo es:

$$F = A \cos^2 \varphi$$

Figura 5



Esquema de medida de campos magnéticos utilizando una fibra óptica enrollada al conductor.

Donde A es una constante que depende de la intensidad luminosa de la fuente y ϕ es el ángulo relativo entre los dos polarizadores. Es decir, cuando los polarizadores tienen la misma dirección, ϕ es 0 y tenemos la máxima transmisión de luz. Cuando ϕ es 90° , los polarizadores están cruzados y no pasa la luz.

F , es una función no lineal, muy común en óptica, que puede ocasionar cierta incomodidad. Es posible linealizar la función con suficientes garantías en la zona en que la pendiente es máxima. Si se observa la figura 3, cuando los polarizadores tienen un ángulo relativo entre ellos de 45° , la función $\cos^2$ se puede considerar lineal para pequeñas variaciones del ángulo relativo.

Es importante resaltar que la función F relaciona potencia luminosa con ángulo relativo entre dos polarizadores. Si situamos nuestro material magneto-óptico entre los dos polarizadores, los cambios que haya del ángulo de polarización debidos a un campo magnético, serán convertidos a cambios de potencia luminosa a la salida del segundo polarizador. A este polarizador se le suele llamar analizador.

Las ventajas de colocar dos polarizadores a 45° son mayor linealidad y máxima sensibilidad, la desventaja es que introducimos una señal de luz indeseable de valor $A/2$. Es decir, la señal de interés está superpuesta a una componente continua.

Un método muy elegante para eliminar esta señal es dividir en dos el haz de luz a la salida del material magneto-óptico, figura 4. Uno de los haces se polariza a 45° y el otro a -45° . De esta manera, para un mismo ángulo de giro de polarización inducido por el material magneto-óptico, en un haz se tiene una variación positiva sobre la continua y en el otro haz, una variación negativa. Restando las dos señales, se dobla la señal de interés y se cancela la continua.

Esta disposición es la que se utiliza en la gran mayoría de los montajes estudiados.

Clasificación de los sensores magneto-ópticos

La siguiente clasificación de los sensores magneto-ópticos de corriente basados en el efecto Faraday es la comúnmente presentada en los numerosos artículos que se han escrito sobre el estado del arte.

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN EL EFECTO FARADAY

Existen dos tipos de sensores que utilizan fibra óptica atendiendo a la manera de obtener la información contenida en la luz.

Diseños polarimétricos

El esquema básico está representado en la figura 5. Consta de un emisor de luz, una fibra óptica, un detector y los dos polarizadores explicados en la sección anterior.

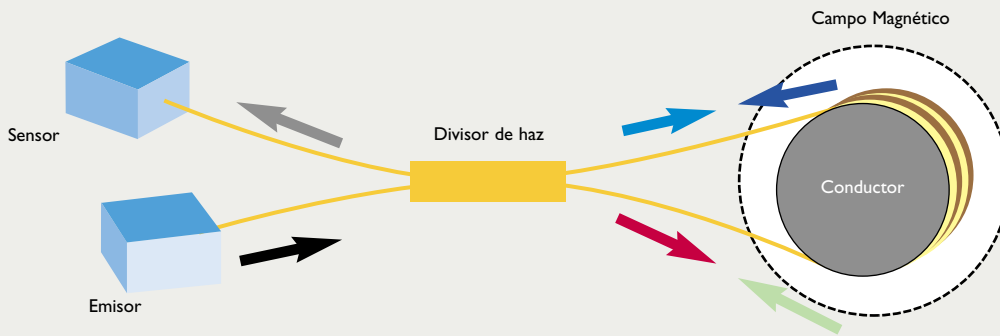
El campo magnético creado por un conductor infinito es circular:

El uso de fibra óptica enrollada en la línea permite establecer un camino en la dirección del campo magnético. La propia fibra óptica, sílice fundida, es el material magneto-óptico. Tiene una constante de Verdet es muy pequeña, pero es posible maximizar el camino recorrido por la luz en el campo magnético si se guía el haz alrededor del conductor. De tal modo que la ecuación de Faraday quedaría $\theta = NVHl$, siendo l la longitud de una espira y N el número de espiras.

Diseños interferométricos

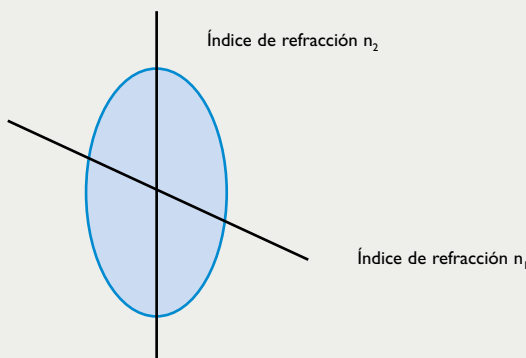
El más conocido es el interferómetro de Sagnac, figura 6. Una fibra óptica, que actúa como material magneto-óptico se enrolla alrededor de un conductor igual que en el caso anterior. La luz entra al enrollamiento a través de un acoplador de fibra óptica que la divide en dos haces. Cada uno de ellos tiene la luz polarizada en un sentido. Si por el conductor no circula intensidad, la luz que se recupera en el sensor es la misma que la que emite la fuente. Si por el contrario, el conductor lleva una intensidad, se crea un cam-

Figura 6



Interferómetro de Sagnac. La luz emitida por la fuente –flecha negra– se divide en dos haces con polarizaciones diferentes –flechas roja y azul. El campo magnético modifica las polarizaciones de manera subtractiva en el caso de la flecha azul y aditiva en el caso de la roja. Al recomponerse el haz en el divisor, la luz resultante –flecha gris, incluye el giro debido al efecto magneto-óptico dos veces. Las flechas naranja y azul claro representan los haces de luz con giro de polarización debido al campo magnético.

Figura 7



Corte transversal de una fibra óptica. La birrefringencia es la diferencia que existe en los índices de refracción de cada uno de los ejes de simetría y que provoca un error en la medida.

po magnético que lleva la misma dirección que la fibra y sentidos contrarios o iguales a la circulación de la luz, dependiendo del haz que se considere. Como el efecto Faraday es no recíproco, es decir, depende del sentido del campo magnético, los desplazamientos de fase en la fibra tienen distinto signo. Cuando los haces se recomponen de nuevo en el acoplador de la fibra, la luz tiene la fase desplazada con respecto al emisor. La relación matemática es también una senoidal al cuadrado.

Ventajas e inconvenientes de la fibra óptica utilizada como material magneto-óptico

Al ser la fibra óptica un dieléctrico, puede estar en contacto con el conductor sin que exista ningún problema de aislamiento. Sin embargo, presenta ciertas desventajas que

hay que superar para poder diseñar un sensor magnetóptico con garantías de funcionamiento satisfactorio. A saber, la constante de Verdet del SiO_2 es muy pequeña, del orden de 2.6 grados/(T·cm), es necesario, entonces, que el número de vueltas alrededor del conductor sea grande para que se aprecie un giro en el ángulo de polarización.

Por otra parte, la fibra óptica tiene una birrefringencia intrínseca debida a la elipticidad de su núcleo y a tensiones asimétricas y una birrefringencia inducida al ser doblada alrededor del conductor. Recordemos que la birrefringencia es un doble índice de refracción en los dos ejes de un corte transversal del material, figura 7. Estas birrefringencias afectan a la medida y modifican el ángulo de polarización. Es posible disminuir o incluso eliminar este error de la medida con diferentes técnicas. Las más utilizadas son las dos siguientes:

- Si se retuerce la fibra óptica, se induce una birrefringencia circular conocida y dependiente de la tensión a la que se somete a la fibra. Al ser mucho mayor que la birrefringencia lineal ésta termina por desaparecer y el sensor solo está afectado por la circular. El efecto Faraday es una birrefringencia circular por lo que se superpone a la que se ha creado dando una medida válida.
- Si la fibra se calienta a una temperatura de entre 800-900 °C durante 24h y se enfría lentamente la birrefringencia también desaparece. Este procedimiento puede debilitar la fibra y eliminar la capa de material que protege el núcleo y el recubrimiento de la fibra.

SENSORES MAGNETO-ÓPTICOS UTILIZANDO MATERIALES VOLÚMICOS BASADOS EN EL EFECTO FARADAY

En este caso, el material magneto-óptico deja de ser una fibra óptica y pasa a ser estructura cristalina o amorfa en forma de filtro óptico que es atravesada por el haz de luz cambiando el ángulo del plano de polarización. Se llama volúmico en contraposición a las láminas finas de materiales ferromagnéticos que tienen espesores del orden de decenas de Angstroms.

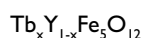
Características

Este tipo de materiales tienen una constante de Verdet mayor que la fibra óptica. Los mayores valores se encuentran en los materiales paramagnéticos o ferrimagnéticos. Sin embargo, en éstos la constante de Verdet varía significativamente con la temperatura afectando a la medida y haciéndolos inútiles para algunas aplicaciones. En los diamagnéticos la constante de Verdet es menor aunque tienen la ventaja de que su dependencia con la temperatura también lo es.

Otra característica interesante es el coeficiente óptico de tensiones o tensor óptico de tensiones en el caso de estructuras cristalinas. Este coeficiente define la variación de las propiedades ópticas del material en función del esfuerzo al que esté sometido.

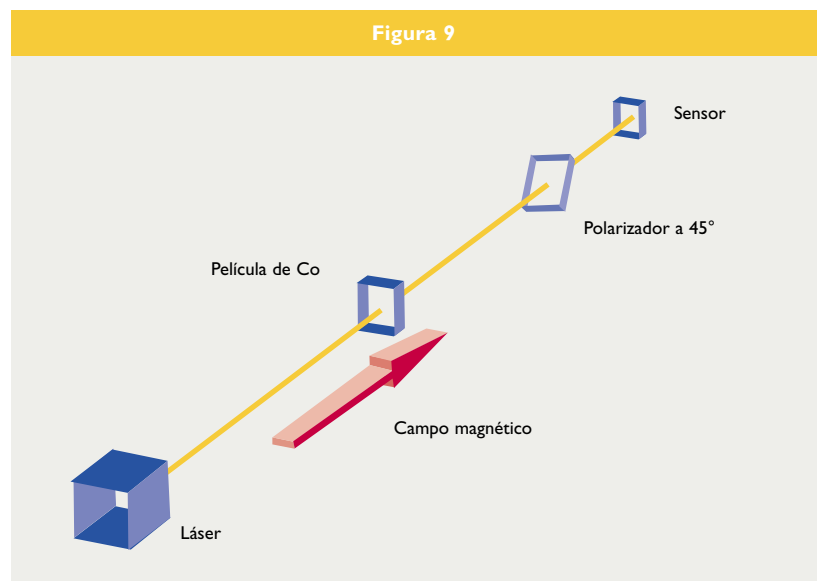
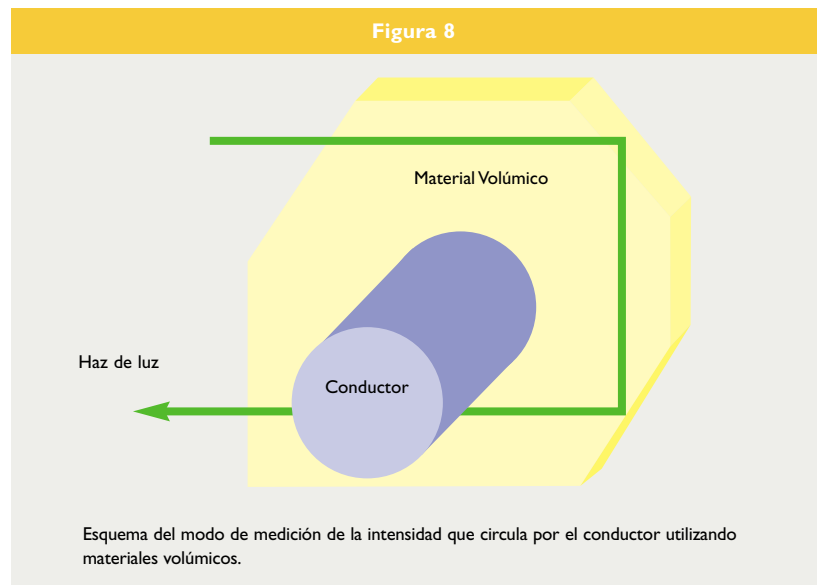
La elección del material sólido se debe hacer atendiendo a estas dos características. Por ejemplo, la estructura policristalina del ZnSe es una buena elección para obtener una sensibilidad aceptable. Es un material diamagnético con una constante de Verdet de 67 grados/(T·cm) y una variación con la temperatura comparable con la de la fibra óptica; sin embargo sus propiedades ópticas al ser sometido a una tensión son sustancialmente peores.

Quizá los materiales más utilizados y más estudiados sean la familia de los granates de hierro. Dentro de éstos los más desarrollados son el granate de hierro e ytrio (YIG- Yttrium Iron Garnet), el granate de hierro y terbio (TIG- Terbium Iron Garnet) y la unión entre ellos dos:



Configuraciones

El material volúmico debe estar influido por el campo magnético creado por la corriente que se desea medir. La configuración más utilizada es la que se muestra en la figura 8. Sin embargo, el material puede adoptar cualquier



forma geométrica con la condición de que permita un giro alrededor del conductor.

El problema de los materiales volúmcicos es que se deben incorporar reflexiones dentro del material para que el camino recorrido por la luz sea el mayor posible. Cada vez que el haz es reflejado, parte de la luz es absorbida por el material y se produce un desplazamiento en la fase de la onda. Este desplazamiento se traduce en un cambio del estado de polarización de la luz que afecta a la medida.

El error inducido por las reflexiones se puede evitar de dos maneras. Se pueden utilizar capas de dieléctrico en los ángulos donde la luz se vaya a reflejar. O se pueden introducir reflexiones complementarias de tal modo que la fase de la onda no se vea afectada. Si en la onda incidente el campo eléc-

Tabla I

Material	Constante de Verdet grados/(T·cm)
Fe	$3'5 \cdot 10^5$
Co	$3'6 \cdot 10^5$
Ni	$7'5 \cdot 10^5$
YIG	240
GdlG	2500
CrBr ₃	2·10 ⁵
EuSe	$1'4 \cdot 10^5$
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	16'5
ZnSe	67'6
SiO ₂	2'1

Constantes de Verdet para distintos materiales.

trico es paralelo al plano de incidencia, en la reflexión complementaria el campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia.

SENSORES MAGNETO-ÓPTICOS BASADOS EN LÁMINAS FINAS

Por último se presentan las láminas finas de materiales ferromagnéticos como materiales magneto-ópticos.

Los estudios se han basado en láminas de Níquel, Hierro y Cobalto depositados sobre vidrio con espesores que no superan los 300 Angstroms. Láminas más gruesas atenúan excesivamente la señal de luz impidiendo su transmisión.

La muestra de material se sitúa perpendicularmente a la intensidad de campo magnético que se desea medir y se hace pasar un haz de luz polarizada paralelo al campo magnético.

La necesidad de que el espesor de las muestras de material sea tan pequeño puede ser una gran desventaja porque uno de los parámetros de la ecuación de Faraday es precisamente la longitud de material que atraviesa el haz de luz. Sin embargo, la constante de Verdet de estos materiales es altísima compensando con creces su limitación en espesor. En la Tabla I, se muestra una comparación entre las constantes de Verdet de distintos materiales a temperatura ambiente.

Los materiales ferromagnéticos tienen una alta temperatura de Curie, es decir, se necesita una temperatura muy alta para eliminar la característica ferromagnética del material, por lo que la variación de la constante de Verdet con la temperatura es muy pequeña para valores que rondan la temperatura ambiente.

Conclusiones

Se ha presentado un resumen de los métodos de medida magneto-ópticos. Las ven-

tajas e inconvenientes del uso de este tipo de sensores, su base teórica, los materiales magneto-ópticos más utilizados y las configuraciones de medida más extendidas.

Grandes fabricantes de equipos de medida de alta tensión como son Siemens, ABB y Alstom en el mercado internacional y Arteche en el mercado nacional, han desarrollado prototipos e incluso poseen equipos terminados y homologados, basados en este tipo de sensores. Los errores debidos a la variación de la medida con la temperatura y los problemas de vibraciones que pueden distorsionar la señal óptica, están ampliamente superados. El gran interés que despierta un sensor que permite medir grandes magnitudes eléctricas sin problemas de aislamiento y con un ancho de banda limitado exclusivamente por la electrónica del sensor, está haciendo que las grandes multinacionales empleen parte de su capacidad investigadora y desarrolladora para abrir un mercado completamente nuevo en el campo de la instrumentación. ■

Referencias bibliográficas

- Marvin J.Freiser. "A Survey of magneto optic effects" *IEEE Transactions on Magnetics*, junio 1968.
- A.J. Rogers "Optical technique for measurements of current at high voltage" *IEE*, volumen 120, páginas 261-267, 1973
- G.W. Day and A.H. Rose. "Faraday Effect Sensors: The State of the Art" *Fiber Optic Laser Sensors VI*, volumen 985 páginas 138-150, SPIE 1988.
- G.W. Day, P.H.Hale, M.Deeter, T.E. Milner, D.Conrad y S.M. Etzel. "Limits to the precision of electro-optic and magneto-optic sensors". *Technical note 1307. US Dept of Commerce. National Bureau of Standards*, marzo 1987.
- G.W.Day, M.N.Deeter y A.H.Rose "Faraday Effect sensors: A review of recent progress" *Advances in Optical Fiber Sensors*, 1992.
- R.Carey, D.M.Newman y B.W.J. Thomas "Linear magnetic birefringence in thin cobalt films". *Thin solid films* (78):59-62, 1981
- G.Robles y R.Giannetti "Frequency response of a thin cobalt film magneto optic sensor" *IEEE IMTC 2001 Proceedings*
- G.Robles y R.Giannetti "Magneto-optic Faraday Effect current sensor based on thin cobalt films". *IEEE IMTC 2000 Proceedings*
- G.Robles, J.R.Sendra, J.L.Costa, F.Briones, A.Cebollada y R.Giannetti "Caracterización de los efectos Faraday y Kerr en películas finas de cobalto para el diseño de un sensor magneto-óptico". *SAAEI 1999*
- Opto-electronic sensors. A new generation of instrument transformers. *Nota informativa de Alstom Transmission & Distribution*
- M.Willsch, P. Menke y T. Bosselmann. "Magneto-optic current transformers for applications in power industry" *Siemens AG Corporate Research and Development*.
- A.Ibero "Transformadores de medida no convencionales". *Nota Técnica. Electrotécnica Arteche, S.A.*
- "Digital Optical Instrument Transformers" *Nota Informativa ABB Switch Gear*.