

MODELAMIENTO TÉRMICO Y VIBRATORIO DE UNA CÁPSULA PARA SENSORES DE FIBRA ÓPTICA ADAPTABLES A MEDICIONES EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

THERMAL AND VIBRATION MODELING OF A CAPSULE FOR FIBER OPTICS SENSORS ADAPTIVE TO MEASURING ON ELECTRIC POWER SYSTEMS

MAURICIO AGUIAR

Grupo de Investigación en Fotónica y Optoelectrónica, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

JORGE GÓMEZ

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, jogolo@une.net.co

PEDRO TORRES

Grupo de Investigación en Fotónica y Optoelectrónica, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

Recibido para revisar febrero 29 de 2008, aceptado Mayo 15 de 2008, versión final septiembre 10 de 2008

RESUMEN: En este trabajo se presenta un modelamiento térmico y vibratorio que permite diseñar cápsulas con alta conductividad térmica y aislamiento mecánico para sensores de temperatura basados en redes de Bragg en fibra óptica, con miras a su aplicación en sistemas eléctricos de potencia (SEP). Una de las variables de mayor relevancia en la operación de los componentes de un SEP es la temperatura, ya que su monitoreo en tiempo real permite predecir el estado del sistema y generar acciones de mantenimiento predictivo que garanticen la calidad y continuidad en el servicio. El modelado de la capsula dieléctrica se dividió en dos partes fundamentales: *i*) un análisis mecánico mediante el método de elementos finitos para establecer la respuesta de la capsula ante vibraciones del orden de las reportadas en la literatura para generadores y transformadores de potencia; *ii*) un análisis térmico, a través de un modelo analítico que permite establecer la velocidad de respuesta del sensor ante variaciones de temperatura. Los resultados encontrados muestran un gran potencial en el material que se propone para la fabricación de la capsula, el cual no se ha reportado en este tipo de aplicaciones.

PALABRAS CLAVE: Cápsula dieléctrica, Redes de Bragg en fibra óptica, Sistema eléctricos de potencia, Monitoreo térmico.

ABSTRACT: In this work is presented a thermal and vibration modeling that allows the design of high-thermal conductivity, mechanical isolating capsules for inserting Fiber Bragg Gratings (FBG) based temperature sensors for applications on electric power systems (EPS). One of the most relevant variables in EPS component operation is temperature, because its real time monitoring allows predicting the state of the system and generating predictive maintenance actions that guarantee quality and continuity in its service. The modeling of the dielectric capsule is divided in two fundamental parts: *i*) a mechanical analysis using the finite element method for establishing the capsule response to vibrations in the regime reported in literature for generators and power transformers; *ii*) a thermal analysis using an analytical model that allows to establish the sensor's response speed due to temperature changes. The results that were found show a great potential on the material proposed for the fabrication of the capsule, which is not reported in this kind of applications.

KEYWORDS: Dielectric capsule, Fiber Bragg grating, Power electric system, Thermal measuring.

1. INTRODUCCIÓN

La operación de máquinas eléctricas puede verse afectada por las altas temperaturas que se alcanzan en ciertos puntos de su devanado, conocidos en la literatura como “hot spot” [1]. El devanado de una máquina eléctrica se envuelve usando derivados de la celulosa, que son susceptibles a distintas reacciones químicas que conllevan al deterioro y que son aceleradas por el calor [2]. Cuando este aislante se deteriora, es necesario realizar en la máquina un mantenimiento preventivo que proteja tanto la integridad de ese elemento específico como la del conjunto del sistema, velando, así, por la calidad y continuidad en el servicio.

De esta forma, para poder aprovechar al máximo el rendimiento de una máquina eléctrica en el interior de un sistema de potencia y minimizar, en lo posible, su deterioro, se requiere un monitoreo de las condiciones térmicas en su interior, más específicamente en su devanado. Con este fin, y debido a la dificultad de realizar una medida directa, se han desarrollado protocolos que pretenden establecer estas condiciones críticas de operación a partir de mediciones indirectas tales como mediciones de temperatura en el aceite refrigerante [3-5], mediciones externas sumadas a modelos dinámicos de las máquinas [6-11], y modelos combinados [12]

Como ya se mencionó, con la medición directa de la temperatura del devanado de una máquina eléctrica se puede tener información de primera mano sobre su estado; pero hacer esto con sensores electrónicos convencionales puede ser difícil, si no imposible, teniendo en cuenta que el ambiente electromagnético allí presente altera el desempeño de un sensor de este tipo [13].

Como solución a esta necesidad se ha venido incorporando en el mundo técnicas de medición ópticas, ya que por su naturaleza no se ven perturbados por altas fuentes de interferencia electromagnética EMI [5]. En esta categoría se destaca el uso de los sensores de fibra óptica, los cuales, por la naturaleza dieléctrica de la fibra (Dióxido de Silicio), por su tamaño (125 μm de diámetro), y por las características intrínsecas de

las señales lumínicas, se convierten en elementos atractivos en este tipo de aplicaciones [14]. Estos métodos pueden dar información de primera mano sobre el estado de la temperatura “hot spot” en el interior de máquinas eléctricas y, con un monitoreo correcto, se puede tener información en tiempo real sobre el estado del devanado.

Uno de los tipos de sensor de fibra óptica que más se ha popularizado en los últimos años, por sus ventajas frente a otros tipos de sensores de su clase, son los basados en redes de Bragg (FBG por su sigla en inglés) [14]. Una FBG es una alteración periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra del orden de milímetros que actúa como un filtro pasa banda en reflexión [15]. En la Figura 1 se muestra un esquema de una FBG, cuya respuesta espectral puede ser alterada directamente tanto por perturbaciones mecánicas (tensión longitudinal a través de la fibra contenedora) como térmicas [15].

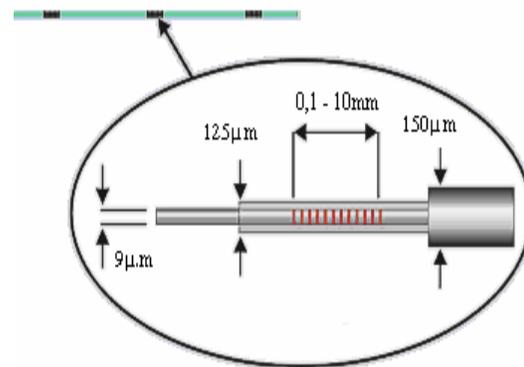


Figura 1. Detalle básico de una red de Bragg inscrita en una fibra óptica

Figure 1. Basic detail of a fiber Bragg grating inscribed on a fiber optic cable

Como las FBG están grabadas en la propia fibra, es necesario generar estructuras que protejan mecánicamente la red y que a su vez no alteren su respuesta ante la perturbación que se desea monitorear. En el caso de mediciones térmicas, se requiere aislar la FBG de perturbaciones mecánicas con el fin de que cualquier cambio medible en el espectro de la señal de luz sea producto únicamente de variaciones térmicas [15].

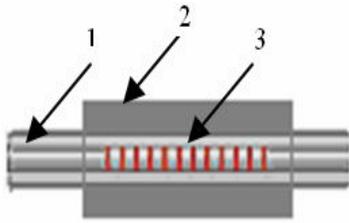


Figura 2. Aproximación propuesta para aislar la FBG de tensiones externas, en la figura, 1: Fibra óptica, 2: Cápsula, 3: Red de Bragg

Figure 2. Proposed approximation for isolating the FBG from external strain; on the figure: 1: Fiber optic cable, 2: Capsule, 3: Fiber Bragg Grating

Una cápsula compacta y sólida puede permitir que cualquier tensión en la fibra se equilibre en los extremos de ella, mientras que la zona donde se encuentra la FBG está al mismo nivel de tensión [16]. Un esquema de la propuesta se presenta en la Figura 2.

2. ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE LA CÁPSULA

2.1 Generalidades

Para el diseño de la cápsula, lo primero que se tuvo en cuenta es la selección del material para fabricarla. Su carácter dieléctrico es vital para evitar tanto las fallas que generaría en la máquina un material conductor como también efectos indeseados en la propagación de luz en la fibra óptica.

El material a usar debe tener, además de una baja reactividad química, una buena capacidad tanto dieléctrica como de conducción térmica (κ). Se revisaron varios materiales dieléctricos con valores relativamente altos de conductividad térmica; en este análisis también se consideró la facilidad para formar la cápsula. La Tabla 1 resume la lista de los materiales escogidos. Como se puede observar, el Carburo de Silicio (SiC) es el que ofrece una mayor conductividad térmica, una naturaleza dieléctrica y una baja reactividad química. Un repaso de las propiedades de este material se muestra en la Tabla 2 [17], con lo cual se confirmó su selección.

Tabla 1. Materiales dieléctricos seleccionados para analizar la conveniencia de cada uno de ellos para formar la cápsula

Table 1. Selected dielectric materials for analyzing the convenience of each one of them for creating the capsule

Material	Naturaleza	κ (W/m K)	Temp. (K)
Carburo de Silicio (SiC)	Cerámico	114	293
Nítruros	Cerámico	170	
Acrílico	Polímero	0,21	293
Resinas (epóxicas)	Polímero	0,3	298
Cuarzo	Mineral	9,5 (c) 6,1 (⊥ c)	300

Tabla 2. Propiedades relevantes del SiC

Table 2. Relevant properties for SiC

Propiedad	κ (20°C)	Cof. expansión térmica (20°C)	Potencial de ruptura
Valor	114W/mK	$1.13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\approx 5 \times 10^6 \text{ V/m}$

El valor de κ varía de una tabla a otra debido a la temperatura a la que se registra el valor. En la Tabla 1 se registra a 873 K mientras que en la Tabla 2 se registra a $\approx 300 \text{ K}$

La disposición de la cápsula, su contacto con las fuentes de calor (devanado) y su construcción, también son factores a tener en cuenta en el diseño. Se propone una forma cilíndrica como satisfactoria en estos tres aspectos. Con la forma de la cápsula ya definida, se procede a analizar cuál es su comportamiento mecánico y térmico.

2.2 Análisis mecánico

Con el fin de determinar a qué frecuencias es sensible una cápsula de este material, teniendo en cuenta que las máquinas eléctricas pueden vibrar en un rango amplio de frecuencias, se realizó un análisis de modos de vibración con el programa comercial ANSYS®.

La simulación se realizó en un rango de frecuencias de 1 a 2000 Hz, aplicando cargas de desplazamiento en los puntos de contacto de la cápsula con dos alambres de radio $r_1 = 5 \text{ mm}$ como se muestra en la Figura 3. Vale decir que para este análisis, ANSYS® utiliza el método de elementos finitos, que consiste, básicamente, en una discretización del sistema para hacer una aproximación al comportamiento del sistema continuo, como se detalla en la Figura 4.

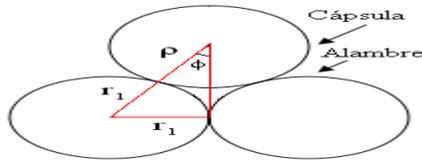


Figura 3. Disposición de la cápsula (arriba) sobre dos alambres del devanado, siendo r_1 el radio de los alambres, ρ el radio de la cápsula y ϕ el ángulo de contacto

Figure 3. Placement for the capsule (above) on two winding wires, being r_1 the radius of the wires, ρ the capsule radius and ϕ the contact angle

Las alteraciones mecánicas más frecuentes en una máquina eléctrica se dan, principalmente, por la magnetostricción del núcleo en el caso de los transformadores [18], cambios súbitos de carga, fallas, etc. Estas vibraciones se dan a bajas frecuencias y, en muchos casos, en valores que son múltiplos pares del voltaje; por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, se emite ruido mecánico a 120 Hz, 240 Hz, 360 Hz, ... [18], siendo este el rango de frecuencias de interés para analizar la respuesta mecánica de la cápsula.

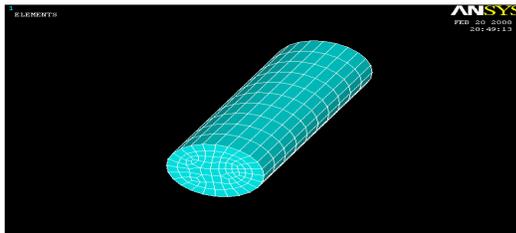


Figura 4. Detalle de la cápsula y la malla de elementos finitos previa al análisis modal

Figure 4. Snapshot of the capsule and the finite element mesh previous to the modal analysis

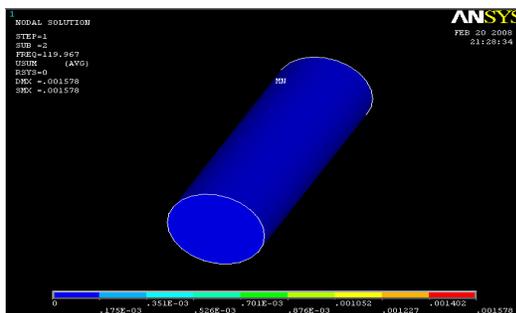


Figura 5. Resultado de la simulación modal realizada en ANSYS®. El valor de la frecuencia es cercano a 120 Hz

Figure 5. Result of the modal simulation ran on ANSYS®. The frequency value displayed is closed to 120 Hz

Los resultados obtenidos de la simulación se presentan en forma de mapas de contorno de amplitud en las Figuras 5 y 6 para una cápsula de 3 mm de diámetro y 20 mm de longitud, para una frecuencia de vibración de 119.97 Hz y 359.3 Hz, respectivamente.

En los resultados presentados, se puede observar también el valor de frecuencia para cada modo de oscilación. La Figura 5 representa el resultado para una frecuencia de vibración igual a 119,967Hz. Este resultado se interpreta como positivo ya que en esta frecuencia, la amplitud de las vibraciones modales de la cápsula es siempre inferior a 1 mm de acuerdo al resultado de la simulación y siempre con un solo valor de amplitud, lo que indica que la cápsula vibra solidariamente. Se concluye, entonces, que una cápsula con las dimensiones antes mencionadas, garantiza que la FBG estará al mismo nivel de tensión en un amplio rango de frecuencias.

El SiC puede ser bueno, pues, mecánicamente es estable, por lo cual resta evaluar su respuesta térmica.

2.3 Análisis térmico

Una cápsula de protección para un sensor de temperatura, es apropiada en la medida que permita que la región sensora pueda percibir un cambio de temperatura en un lapso de tiempo mínimo. Este tiempo de respuesta dependerá, primordialmente, de las propiedades térmicas del material y de la geometría de la cápsula. Para analizar la relación entre las propiedades de la cápsula y el tiempo que puede tomarle a esta equilibrarse térmicamente, se realizó un análisis a partir de la ecuación de transmisión de calor

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a(\nabla^2 u)_{r,\theta} \quad (1)$$

cuya solución es una función continua y derivable

$$u = f(r, \theta, t), \quad (2)$$

donde u representa la temperatura en un punto general (r, θ) sobre la sección transversal de la cápsula. Debido a que el radio de la fibra óptica es demasiado pequeño para las dimensiones de la cápsula ($62.6 \mu\text{m}$), se considera irrelevante el uso de la coordenada z en el análisis. El valor a

representa la difusividad térmica del material, el cual se define como

$$a = \frac{\kappa}{C\sigma} \quad (3)$$

donde κ es la conductividad térmica, C el calor específico y σ la densidad del material.

Para resolver (1) se definieron las siguientes condiciones, de acuerdo a la geometría de la Figura 3 para alambres de radio $r_l = 5$ mm:

1. Continuidad: En el sistema de coordenadas polar, se puede llegar a un punto recorriendo dos sentidos angulares: horario y anti-horario. En cualquier punto, la distribución de temperatura será la misma sin importar el sentido que se use para identificarlo.

$$u(r, \pi, t) = u(r, -\pi, t) \quad (4)$$

2. Acotamiento: Los valores de u siempre son finitos en cualquier punto de la cápsula.
3. Temperatura: Sea ρ el radio de la cápsula. En esta frontera ($r = \rho$) se acordará para efectos de la solución matemática del problema, que la temperatura es cero. Para ello, se realiza el cambio de variable para toda la cápsula $v = u - T_F$, con T_F la temperatura de la frontera. Entonces se modelará usando una variable v en vez de la variable original u .

4. Condición inicial: Para definir de manera satisfactoria una condición inicial cuando se estudia el problema, se dividió la frontera de la cápsula en dos regiones. Una de ellas es la región que se encuentra entre los dos alambres del devanado y la otra es la región en contacto con el aislante, o con el fluido que venga al caso (aire, aceite). Con esto, se definen las siguientes condiciones iniciales:

$$v(r, \theta, 0) = \begin{cases} \frac{-C_{cu}\lambda L}{Cm} T_{cu} (\rho - r) \sin^2\left(\frac{\pi\theta}{2\phi}\right), & -\phi \leq \theta \leq \phi \\ u(r, \theta, 0) = T_F \Rightarrow v(r, \theta, 0) = 0, & \phi \leq \theta \leq 2\pi - \phi \end{cases} \quad (5)$$

La distribución de temperatura para la región $-\phi \leq \theta \leq \phi$ obedece a los siguientes hechos. A un ángulo $\theta = \phi$ (ángulo de contacto) los puntos

de la cápsula van a estar alineados con la fuente de calor (cualquiera de los alambres) y esta distribución es máxima por estar cercanos al alambre. Cuando $r \rightarrow \rho$ se cumple siempre las condiciones de frontera para v , y el factor multiplicativo $\frac{-C_{cu}\lambda L}{Cm}$ se deriva de la relación

entre calor específico y calor transmitido a un cuerpo de la siguiente manera:

$$Q = Cm\Delta v \quad (6)$$

Dado que el calor transmitido Q también es la pérdida de calor en el alambre de cobre se tiene que

$$Q = -C_{cu}m_{cu}\Delta T \quad (7)$$

donde ΔT es el cambio de temperatura experimentado por la sección de alambre de cobre en contacto con la cápsula al transferirse una cantidad de calor Q . La cantidad de cobre que está *en contacto* con la cápsula es la que participa en la transferencia de calor, y por el hecho de que el contacto entre alambre y cápsula se da en una *longitud*, se puede definir la masa que participa de la transferencia de calor como $m_{cu} = \lambda L$, donde λ es una densidad lineal de cobre y L es la longitud de contacto (no despreciable) entre alambre y cápsula.

Entonces, como estas magnitudes son iguales, se establece que

$$Cm\Delta v = -C_{cu}\lambda L\Delta T \quad (8)$$

Puede decirse que un cambio de temperatura en la región de contacto entre el alambre y la cápsula es correspondiente a un cambio de temperatura en la cápsula en sí, con lo cual

$$v_p = \frac{-C_{cu}\lambda L}{Cm} T_{cu} \quad (9)$$

Después de haberse realizado el procedimiento matemático teniendo en cuenta las condiciones definidas, al resolver (1) se obtuvo que

$$v(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} J_n(\alpha_{nk}r) \cdot [a_{nk} \cos(n\theta) + b_{nk} \sin(n\theta)] \cdot e^{-\alpha_{nk}at} \quad (10)$$

donde α_{nk} es el k -ésima raíz de la función de Bessel de orden n y.

$$a_{0k} = \frac{1}{\pi \rho^2 J_1^2(\alpha_{0k} \rho)} \int_0^\rho \int_{-\pi}^\pi r J_0(\alpha_{0k} r) f(r, \theta) dr d\theta$$

$$a_{nk} = \frac{2}{\pi \rho^2 J_{n+1}^2(\alpha_{nk} \rho)} \int_0^\rho \int_{-\pi}^\pi r J_n(\alpha_{nk} r) f(r, \theta) \cos(n\theta) dr d\theta$$

$$b_{nk} = \frac{2}{\pi \rho^2 J_{n+1}^2(\alpha_{nk} \rho)} \int_0^\rho \int_{-\pi}^\pi r J_n(\alpha_{nk} r) f(r, \theta) \sin(n\theta) dr d\theta$$

Para evaluar $v(r, \theta, t)$ en (10), se procedió a analizar qué órdenes de n y k son relevantes y suficientes para modelar la distribución de temperatura de manera satisfactoria para radios de cápsula comprendidos entre $\rho = 1$ mm y $\rho = 10$ mm. Los cálculos indican que mientras los coeficientes b_{nk} siempre son cero para cualquier combinación (n, k) , para cada valor de radio ρ existen únicos valores a_{nk} , como se muestra en las Figuras 7 y 8. En estas figuras es evidente que predominan los órdenes $n = 1, 2, 3$ y en $k = 1$, por lo que para estimar $v(r, \theta, t)$ es suficiente truncar la sumatoria en (10) en los órdenes $n = 3$ y $k = 3$.

Para determinar la velocidad de transferencia de la densidad superficial de calor, se usa la ecuación de conducción de Fourier teniendo en cuenta de que el calentamiento de la cápsula se da directamente por conducción desde los alambres del devanado; es decir

$$\dot{q} = -\kappa \nabla v \quad (11)$$

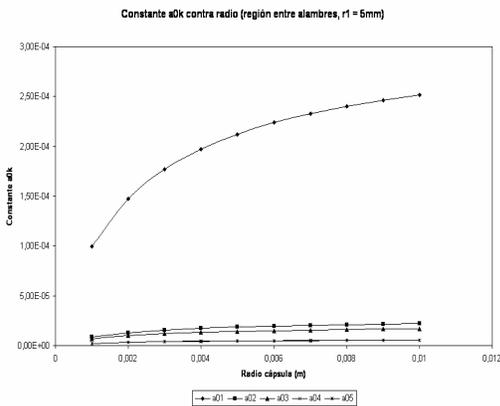


Figura 6. Comportamiento de los coeficientes a_{0k} con el radio. Nótese las diferencias entre $k = 1$ y los demás valores de k

Figure 6. a_{0k} Coefficients behavior with capsule radius. Notice the difference between $k = 1$ and other values for k

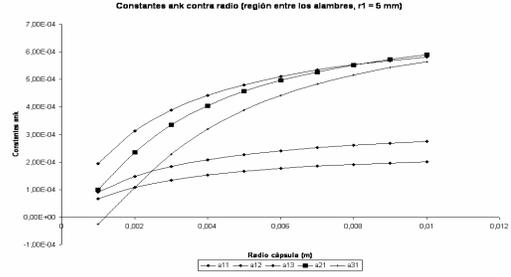


Figura 7. Comportamiento de los coeficientes a_{nk} con el radio de la cápsula. Los órdenes de mayor peso se concentran en $k = 1$ y en $n = 1, 2$

Figure 7. Behavior of the a_{nk} coefficients respect to capsule radius. The most prominent orders are concentrated in $k = 1$ and $n = 1, 2$

Aquí, por la geometría del problema, el operador ∇ se expresa sobre la sección transversal de la cápsula como

$$\nabla v = \frac{\partial v}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \hat{\theta} \quad (12)$$

con lo que junto con (10) se llega a que

$$\nabla v = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\alpha_{nk} at} (S_0 + S_1) \quad (13)$$

donde

$$S_0 = \frac{\partial J_n(\alpha_{nk} r)}{\partial r} [a_{nk} \cos(n\theta) + b_{nk} \sin(n\theta)] \quad (14)$$

$$S_1 = n \frac{J_n(\alpha_{nk} r)}{r} [b_{nk} \cos(n\theta) - a_{nk} \sin(n\theta)] \quad (15)$$

Aplicando los resultados obtenidos para los coeficientes b_{nk} , y a_{nk} se llega a que

$$\nabla v = \sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^3 a_{nk} e^{-\alpha_{nk} at} \{\xi_1 - \xi_2\} \quad (16)$$

donde

$$\xi_1 = [\alpha_{nk} J_{n-1}(\alpha_{nk} r) \cos(n\theta)] \quad (17)$$

$$\xi_2 = \frac{n J_n(\alpha_{nk} r)}{r} [\cos(n\theta) + \sin(n\theta)] \quad (18)$$

Tomando (11), junto con las condiciones iniciales (5), se puede valorar la respuesta del sensor y obtener:

$$\dot{q} = \kappa \frac{C_{Cu} \lambda L}{C_m} T_{Cu} \sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_{nk} e^{-\alpha_{nk} at} \{\xi_1 - \xi_2\} \quad (19)$$

El coeficiente c_{nk} resulta de tomar el término $\frac{-C_{Cu}\lambda L}{Cm}T_{Cu}$ de (5). Con todo esto, y recordando que para un material el calor específico se define como

$$C = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta v} \quad (20)$$

La respuesta de la cápsula está dada por:

$$\Delta t = \frac{\left(\frac{Cm}{L}\right)^2 \Delta v}{\kappa C_{Cu} T_{Cu} \lambda \sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_{nk} e^{-a_n a t} \{\xi_1 - \xi_2\}} \quad (21)$$

Donde:

- C = Calor específico del material de la cápsula.
- m = Masa de la cápsula.
- L = Longitud de contacto entre alambre y cápsula.
- C_{Cu} = Calor específico del alambre de cobre.
- T_{Cu} = Temperatura del alambre de cobre.
- λ = Densidad lineal del cobre.
- Δv = Cambio de temperatura de la cápsula en Δt .

Todos los términos de la expresión (21) tienen unidades del S.I.

Vale recordar que el resultado en (21) aplica para alambres de $r_l = 5$ mm. Para otros radios, el comportamiento de los coeficientes a_{nk} y b_{nk} cambia como se evidencia de las Figuras 7 y 8.

Con la ecuación (21) se trazaron las curvas de respuesta consignada la Figura 9 para diferentes radios de cápsula y para cada valor de temperatura del devanado T_{Cu} . Se observa que en promedio el tiempo de respuesta es de algunas decenas de microsegundos, lo que es más que suficiente para las aplicaciones de interés. Por ejemplo, una cápsula de radio $\rho = 3$ mm en contacto con un devanado a $T_{Cu} = 80$ °C toma un tiempo $\Delta t \approx 20$ μ s para responder a un $\Delta v = 10$ °C. En esta figura(s) se observa también que el radio de la cápsula influye bastante en la rata máxima $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ y con esto puede elegirse un radio de cápsula para obtener una respuesta determinada en la FBG.

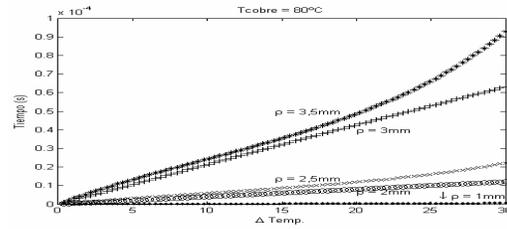


Figura 8. Comportamiento de Δt con un cambio en Δv para $T_{Cu} = 80$ °C en $t = 0$ s y para varios radios de cápsula

Figure 8. Plot showing the Δt behavior related to a change in Δv for $T_{Cu} = 80$ °C on $t = 0$ s and for some capsule radii

3. CONCLUSION

En este trabajo se presentó un modelamiento termo-mecánico para diseñar cápsulas para sensores ópticos basados en FBG en sistemas eléctricos de potencia. Mientras que el análisis mecánico se realizó mediante el método de elementos finitos con un programa comercial, para el análisis térmico se prefirió desarrollar un modelo analítico a partir de ecuación de transmisión de calor y de consideraciones tanto geométricas como térmicas a que estaría expuesta la cápsula en un sistema eléctrico de potencia típico.

Como material para la fabricación de la cápsula se escogió el SiC en atención a sus características tanto dieléctricas y mecánicas como térmicas. De acuerdo a los resultados obtenidos, una cápsula de $\rho = 3$ mm de este material asegura que una FBG estará al mismo nivel de tensión y, por lo tanto, las vibraciones no afectarán las lecturas térmicas del sensor de FBG; además, permite que el tiempo de respuesta sea del orden de decenas de microsegundo, tiempo suficiente para tomar decisiones de prevención y corrección del desempeño del sistema eléctrico bajo monitoreo. Si bien en este trabajo no se presentan resultados experimentales, existen ensayos de laboratorio que indican la viabilidad de fabricar cápsulas de SiC de estas dimensiones [19]. Debe mencionarse que el proceso de formado de una cápsula de SiC que contenga una FBG no puede realizarse a altas temperaturas, pues se compromete seriamente la integridad de la FBG.

Una solución al problema del formado demanda, entonces, un aglomerado con resinas poliméricas a bajas concentraciones.

REFERENCIAS

- [1] SWIFT, GLENN. FEDIRCHUK, DAVE. ZHANG, ZHIYING. 1998. Transformer Thermal Overload Protection – What’s It All About?. 25th Annual Western Protective Relay Conference.
- [2] HARLOW, JAMES. Electric Power Transformer Engineering. 2004. CRC Press.
- [3] FEDIRCHUK, DAVE. REBIZANT, CRUTIS. 2000. Managing Transformer Overloads – Smart Relays. IEEE Canadian Review.
- [4] RADAKOVIC, ZORAN. CARDILLO, ENZO. FESER, KURT. SCHÄFER, MICHAEL. 1998. Thermal Behavior of Transformers with Natural Oil Convection Cooling.
- [5] SYBEL, TILL. SCHOBERT, CHRISTIAN. 2007. Transformer Monitoring According to IEC 60354. A. Eberle Bulletin.
- [6] KARTAS, A. TSANAKAS, D. SFERIDES, A. 1993. Power Transformers Overloading., “Planning Operation and Control of Today’s Electric Power Systems” Conference.
- [7] SHAHBAZI, B. ASHOURI, M. SHARIATI, M.R., FARZALIZADE, S., MAKHDOOMI, M. 2007. A New Approach for Transformer Overloading Considering Economic Terms. IEEE.
- [8] GALDI, V. IPPOLITO, L. PICCOLO A. VACCARO, A. 2000. Neural Diagnostic System for Transformer Thermal Overload Protection. Salerno, IEEE Proceedings on Electric Power Applications vol. 147 N° 5.
- [9] TENYENHUIS, ED G. GIRGIS, RAMSIS S. MECHLER, GÜNTHER F. ZHOU, GANG. 2002. Calculation of Core Hot-Spot Temperature in Power and Distribution Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17 N°4.
- [10] CHIULAN, TRAIAN. PANTELIMON, BRANDUSA. 2007. Theoretical Study on a Thermal Model for Large Power Transformer Units. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology vol. 22.
- [11] SUSA, DEJAN. LEHTONEN, MATTI. NORDMAN, HASSE. 2005. Dynamic Thermal Modeling of Power Transformers. Helsinki, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20 N° 1.
- [12] IEEE C57.91-1995. IEEE Guide for loading Mineral-Oil-Immersed Transformers.
- [13] LOPEZ – HIGUERA, JOSE MANUEL. 2002. Handbook of Optical Fibre Sensing Technology. New York, Wiley Press
- [14] KERSEY, ALAN. DAVIS, MICHAEL. PATRICK, HEATHER. LEBLANC, MICHEL. KOO, K.P. ASKINS, C.G. PUTNAM M.A. FRIEBELE, JOSEPH. 1997. Fiber Grating Sensors. IEEE Journal of Lightwave Technology vol. 15 N° 8.
- [15] ACUÑA, RODRIGO. 2003. Redes de Bragg: Fabricación, Caracterización y Aplicaciones. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- [16] SHAFIR, E. BERKOVIC, G. SADI, Y. ROTTER, S. GALI, S. 1992. Practical Strain Isolation in Embedded Fiber Bragg Gratings. Soreq NRC Electro-Optics Division Bulletin.
- [17] WATARI, KOJI. SHINDE, SUBHASH. 2001. High Thermal Conductivity Materials. MRS Bulletin.
- [18] CHEN, WAI-KAI. 2004. The Electrical Engineering Handbook. Chicago, Elsevier Academic Press.
- [19] AGUIAR, MAURICIO. 2007. Diseño y Construcción de un Sensor Basado en Fibras Ópticas para la Medición de Parámetros al Interior de Máquinas Eléctricas. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.