La impedancia eléctrica normalizada de transductores cerámicos piezoeléctricos como herramienta de evaluación y caracterización

J.L. SAN EMETERIO, A. RAMOS, Y P.T. SANZ

Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas. Instituto de Acústica. C.S.I.C. Serrano 144, 28006 Madrid.

El concepto de impedancia eléctrica normalizada proporciona un importante mecanismo de análisis y evaluación de transductores piezoeléctricos en el entorno de una resonancia aislada. En el caso del resonador piezoeléctrico, esta metodología permite: a) aislar el efecto de la geometría (área y espesor) del asociado al tipo de material y b) evaluar cómodamente el efecto separado de distintos tipos de pérdidas intrínsecas. Se presentan patrones normalizados de impedancia correspondientes a los parámetros típicos de tres familias de materiales cerámicos piezoeléctricos (PZT, Lead Metaniobate, y 1-3 PZT-Epoxy composites). Se detalla como este concepto de impedancia normalizada, previamente definido para el resonador piezoeléctrico, se puede extender a elementos transductores cargados en sus puertos mecánicos, tomando en consideración los valores relativos de las impedancias mecánicas de carga. Por último, se presentan medidas experimentales de la impedancia normalizada en transductores específicos para ensayos no destructivos mediante pulsos ultrasónicos.

Palabras clave: Transductores piezoeléctricos; Impedancia eléctrica normalizada; Cerámicas piezoeléctricas.

The normalized electrical impedance of piezoelectric ceramic transducers as a tool for evaluation and characterization

The concept of normalized electrical impedance provides an important mechanism for the analysis and evaluation of piezoelectric transducers around an isolated resonance. In the case of piezoelectric resonators this methodology permits: a) to isolate the effects of the geometry (area and thickness) from those associated to the type of material and b) evaluate easily the independent effects of different types of intrinsic losses. The normalized impedance patterns corresponding to the typical parameters of three families of piezoelectric ceramic materials (PZT, Lead Metaniobate, and 1-3 PZT-Epoxy composites) are presented. It is described how this concept of normalized impedance can be extended to piezoelectric transducer elements loaded in the mechanical ports, taking into account the relative values of loading and backing mechanical impedances. Finally, experimental measurements of the normalized impedance in specific NDT transducers are presented.

Keywords: Piezoelectric transducers; Normalized electrical impedance; Piezoelectric ceramics

1.- INTRODUCCIÓN

Distintos tipos de materiales cerámicos piezoeléctricos constituyen la base de una amplia gama de sensores y actuadores ultrasónicos. Parámetros relevantes del elemento transductor piezoeléctrico pueden ser determinados a partir de la medida de la impedancia eléctrica, entre sus electrodos, en función de la frecuencia. En el caso de elementos transductores no cargados en sus puertos mecánicos (pe. discos o placas cerámicas de carácter piezoeléctrico), las curvas de impedancia eléctrica compleja y sus frecuencias características asociadas, son la base de la caracterización piezoeléctrica por el método de resonancia. El coeficiente de acoplamiento electromecánico y las pérdidas intrínsecas, junto a las aportaciones de posibles pérdidas parásitas en soportes, son quienes en este caso determinan la variación de dicha impedancia eléctrica compleja con la frecuencia.

Por otra parte, cuando los elementos transductores están cargados, simétrica o asimétricamente, en sus puertos mecánicos, son las cargas externas las que, normalmente predominando sobre las pérdidas intrínsecas, determinan los patrones de impedancia. El concepto de impedancia eléctrica normalizada del resonador piezoeléctrico se puede extender tomando en consideración los valores relativos de las impedancias mecánicas de carga.

En este trabajo, partiendo de la matriz electromecánica que define las interrelaciones entre las variables presentes en las puertos de un transductor cerámico piezoeléctrico, se presentan expresiones analíticas para las impedancias eléctricas normalizadas de resonadores y transductores. Se obtienen patrones de impedancia para tres familias de materiales (PZT, Lead Metaniobate, y 1-3 PZT-Epoxy composites) utilizados en la construcción de transductores para aplicaciones en imagen por ultrasonidos. Se analiza el efecto de las pérdidas intrínsecas, mecánicas y dieléctricas. Por último, se presentan medidas experimentales de la impedancia normalizada de transductores típicos utilizados para ensayos no destructivos, realizadas mediante un programa ASP, con un analizador de impedancias HP-4194A.

2.- EXPRESIONES PARA LA IMPEDANCIA ELÉCTRICA NORMALIZADA DE RESONADORES Y TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS VIBRANDO EN MODO ESPESOR.

El sistema de ecuaciones que define el comportamiento de un elemento transductor piezoeléctrico, operando en modo

TE, como sistema electromecánico de tres puertas es (1,2):

$$\begin{bmatrix} F_L \\ F_B \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AZ_0 / (j \operatorname{tg} \gamma) & AZ_0 / (j \operatorname{sen} \gamma) & h / j \omega \\ AZ_0 / (j \operatorname{sen} \gamma) & AZ_0 / (j \operatorname{tg} \gamma) & h / j \omega \\ h / j \omega & h / j \omega & 1 / (j \omega C_0^S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_B \\ I \end{bmatrix} \quad [1]$$

donde F son las fuerzas que actúan sobre las caras, U son las velocidades con que éstas se desplazan, V es la tensión eléctrica aplicada, e I la intensidad eléctrica que circula a través del transductor. A es el área de los electrodos, C_0^S es la capacidad interelectrónica del disco cerámico a alta frecuencia, $\gamma = k d = \omega d / v = \pi f / f_0$, siendo f_0 la frecuencia de resonancia mecánica fundamental del elemento piezoelectrico (frecuencia de antiresonancia en ausencia de pérdidas); $h = h_{33}$ es la constante piezoelectrica ($h_{33} = k_t (c_{33}^D / \epsilon_{33}^S)^{1/2}$). A partir de esta matriz electromecánica, la impedancia eléctrica de entrada del transductor $Z_{in}(\omega) = V / I$, resulta ser:

$$Z_{in}(\omega) = \frac{1}{j \omega C_0^S} \left[1 - \frac{k_t^2}{\gamma} \frac{2Z_0^2(1 - \cos \gamma) - j(Z_L + Z_B)Z_0 \operatorname{sen} \gamma}{(Z_0^2 + Z_L Z_B) \operatorname{sen} \gamma - j(Z_L + Z_B)Z_0 \cos \gamma} \right] \quad [2]$$

siendo Z_0 , Z_B , y Z_L las impedancias características del material cerámico, del material de "backing" en la cara trasera y del medio de propagación, respectivamente. Las pérdidas intrínsecas se pueden incluir mediante el tratamiento clásico, con constantes elásticas y dieléctricas complejas (tangente de pérdidas mecánicas, $\operatorname{tg} \delta_m$, y tangente de pérdidas dieléctricas, $\operatorname{tg} \delta_e$). Despreciando las pérdidas intrínsecas en los medios no piezoelectricos, y considerando la constante h_{33} como real, la impedancia eléctrica varía con: f , C_0 , k_t , γ , Z_0 , Z_B , Z_L , $\operatorname{tg} \delta_m$, $\operatorname{tg} \delta_e$. En el caso de un transductor no cargado en sus puertas mecánicas, $Z_B = Z_L = 0$, a partir de [2] se obtiene la impedancia del resonador piezoelectrico.

La impedancia eléctrica normalizada de un resonador piezoelectrico se obtiene a partir de:

- a) normalizar la frecuencia $\Rightarrow \bar{f} = f / f_0$
- b) multiplicar la expresión de la impedancia por $2\pi f_0 C_0^S \Rightarrow$

$$\bar{Z}_{in}(\bar{f}) = (2\pi f_0 C_0^S) Z_{in}(\bar{f})$$

La impedancia eléctrica normalizada, que depende únicamente de $\bar{f}$, del coeficiente de acoplamiento electromecánico k_t y de las tangentes de pérdidas mecánicas ($\operatorname{tg} \delta_m$) y dieléctricas ($\operatorname{tg} \delta_e$), responde a la siguiente expresión:

$$\bar{Z}_{in}(\bar{f}) = \frac{1}{j \bar{f} (1 - j \operatorname{tg} \delta_e)} \left[1 - k_t^2 \frac{(1 - j \operatorname{tg} \delta_e)}{(1 + j \operatorname{tg} \delta_m)^{1/2}} \frac{\operatorname{tg} \left[(\pi \bar{f} / 2) (1 + j \operatorname{tg} \delta_m)^{-1/2} \right]}{(\pi \bar{f} / 2)} \right] \quad [3]$$

La impedancia eléctrica normalizada del resonador piezoelectrico ha sido utilizada previamente para evaluar el desplazamiento de las frecuencias de resonancia y antiresonancia en función del acoplamiento electromecánico k_t , y de las pérdidas intrínsecas representadas por $\operatorname{tg} \delta_m$ y $\operatorname{tg} \delta_e$ (3,4).

Este concepto de impedancia eléctrica normalizada del resonador se puede extender a transductores cargados en sus puertas mecánicas, definiendo las impedancias mecánicas relativas $\bar{Z} = Z_B / Z_0$; y $\bar{Z}_L = Z_L / Z_0$. Considerando que, en el análisis de transductores piezoelectricos de banda ancha, normalmente se desprecian las pérdidas intrínsecas, y divi-

diendo numerador y denominador de la ecuación [2] por $(Z_0)^2$, obtenemos la impedancia normalizada para un transductor cargado:

$$\bar{Z}_{in}(\bar{f}) = \frac{1}{j \bar{f}} \left(1 - \frac{k_t^2}{\pi \bar{f}} \frac{2(1 - \cos(\pi \bar{f})) - j(\bar{Z}_L + \bar{Z}_B) \operatorname{sen}(\pi \bar{f})}{(1 + \bar{Z}_L \bar{Z}_B) \operatorname{sen}(\pi \bar{f}) - j(\bar{Z}_L + \bar{Z}_B) \cos(\pi \bar{f})} \right) \quad [4]$$

La impedancia normalizada proporciona un importante mecanismo de análisis y evaluación de transductores piezoelectricos en el entorno de una resonancia aislada. Se supone que los parámetros permanecen constantes en el pequeño intervalo frecuencial de la resonancia analizada. La dependencia de los distintos parámetros con la frecuencia puede introducirse entre las distintas resonancias. Para ello, se puede adoptar en cada resonancia un valor diferente para los parámetros, tomando en consideración su posible variación con la frecuencia.

3.- PATRONES DE IMPEDANCIA NORMALIZADA EN TRANSDUCTORES PIEZOCERAMICOS.

La Tabla I muestra valores típicos de los parámetros característicos, k_t , $\operatorname{tg} \delta_m$ y $\operatorname{tg} \delta_e$, correspondientes a tres familias de materiales cerámicos piezoelectricos normalmente utilizados en la fabricación de transductores de banda ancha. Estos valores han sido seleccionados a partir de datos disponibles en catálogos comerciales y publicaciones específicas (5-8).

La figura (1) muestra, en línea a trazos, los patrones de impedancia eléctrica normalizada correspondientes a estos tres tipos de material piezoelectrico. Para cada caso (a : PZT), (b : Lead metaniobate) y (c : 1-3 piezoelectric composite), se presentan en primer lugar, superpuestas en el mismo eje de frecuencia normalizada, la conductancia eléctrica G y la resistencia R . En segundo lugar se muestran superpuestos el círculo de impedancia $R-X$ y el círculo de admitancia $G-B$.

Puede observarse, analizando esta figura (1), como los valores normalizados $R-X$ son similares respecto a los correspondientes a $G-B$. Una consecuencia útil de ello es que los círculos de impedancia y admitancia pueden representarse a la misma escala. A medida que aumentan las pérdidas mecánicas (p.e. casos (b) y (c)), los círculos se hacen mas pequeños y adquieren una disposición relativa simétrica.

En cada gráfica de la figura se ha superpuesto, en línea continua, el patrón de impedancia resultante cuando se desprecian las pérdidas dieléctricas. El efecto de las pérdidas dieléctricas se manifiesta fundamentalmente en G , cuyo valor de pico disminuye. Las pérdidas dieléctricas también aumentan ligeramente el valor de R .

En conjunto puede observarse como los patrones de impedancia eléctrica normalizada quedan determinados fundamentalmente por las pérdidas mecánicas.

La impedancia normalizada permite parametrizar el efecto de las pérdidas. La Tabla I muestra, para cada uno de los casos (a-c), los valores normalizados de frecuencias características (f_s (frecuencia de resonancia, máximo de G), f_p (frecuencia de antiresonancia, máximo de R), G_{max} (valor normalizado del máximo de G), R_{max} (valor normalizado del máximo de R). Resulta interesante destacar que cuando las pérdidas dieléctricas son despreciables, los valores de pico de la parte real de la impedancia eléctrica R_{max} , y de la parte real de la admitancia G_{max} , son similares con un valor aproximado, que puede obtenerse a partir de (10) aplicando normalización:

Figura 1. Patrones de impedancia eléctrica normalizada (en línea a trazos) para cada caso (a), (b) y (c), presentados en la Tabla I. Se han superpuesto (en línea continua) los patrones de impedancia resultantes cuando se desprecian las pérdidas dieléctricas. A la izquierda se muestran la conductancia G y la resistencia R en función de la frecuencia normalizada. A la derecha se muestran los diagramas $G-B$ y $R-X$ normalizados.

TABLA I. VALORES TÍPICOS DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS Y VALORES NORMALIZADOS DE FRECUENCIAS E IMPEDANCIAS, PARA DISTINTOS TIPOS DE MATERIALES CERÁMICOS PIEZOELÉCTRICOS.

Tipo	k_t	$\text{tg } \delta_m$	$\text{tg } \delta_e$	$\bar{f}_s$	$\bar{G}_{\max}$	$\bar{f}_p$	$\bar{R}_{\max}$
(a) PZT	0.48	0.0120	0.016	0.8967	11.961	1.0000	15.579
(b) Lead Metaniobate	0.33	0.0666	0.01	0.9540	1.310	0.9994	1.336
(c) Composite	0.6	0.150	0.03	0.8303	1.738	0.9971	1.989

$$\bar{R}_{\max} = \bar{G}_{\max} = \frac{8k_t^2}{\pi^2 \text{tg } \delta_m} \quad [5]$$

Por último, en la figura (2) se presentan las medidas experimentales de la admitancia e impedancia eléctrica normalizadas para dos transductores ultrasónicos para END, que han sido realizadas mediante un programa ASP, con un Analizador de impedancias HP-4194A. Corresponden a los dispositivos Tecal U-280 y R-281 de banda relativamente ancha, desarrollados para inspección industrial de estructuras "composite" CFRP en el sector aeronáutico (11).

CONCLUSIONES

El análisis de la impedancia normalizada proporciona un mecanismo de gran utilidad para la evaluación de transductores piezoeléctricos en el entorno de una resonancia aislada. En el caso de resonadores, permite evaluar y parametrizar cómodamente el efecto separado de distintos tipos de pérdidas intrínsecas, tanto en amplitudes de impedancias como en frecuencias características. En el caso de transductores de banda ancha, facilita la evaluación de los efectos de las secciones de amortiguamiento acústico y carga mecánica. Como consecuencia de la normalización, los valores R-X son similares a los valores G-B y por tanto pueden representarse conjuntamente en un mismo diagrama. Utilizando un Analizador de impedancias HP-4194A puede medirse directamente mediante un programa ASP.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con financiación de los proyectos de I+D: CICYT N° TAP-97 0662-CO2-02 y CAM Ref. 07T/0031-97. Los autores agradecen la colaboración de Manuel Cegarra en la realización de medidas experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ristic, V.M. Principles of acoustic devices. John Wiley and Sons, (1983).
2. San Emeterio, J.L., Sánchez M.S. y Montero de Espinosa, F.R. "Circuitos equivalentes de resonadores piezoeléctricos con inclusión de pérdidas mecánicas". *Anales de Física*, **87**, 194-207. (1991)
3. San Emeterio, J.L. "Determination of electromechanical coupling factors of low Q piezoelectric resonators operating in stiffened modes" *IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelec., and Frequency Control*, **44**, 1, 108-113. (1997)
4. San Emeterio, J.L., Sanz, P.T., y Ramos, A.: "Influence of dielectric losses on the shift of the fundamental frequencies of thickness mode piezoelectric ceramic resonators". *J. Eur. Ceram. Society*, **19** 1165-1169. (1999)
5. Sensors Technology Ltd. On line catalogue. (www.sensortech.ca)
6. Ferroperm. Piezoceramics.
7. Kwok, K.W., Chan, H.L.W., y Choy, C.L.: "Evaluation of material parameters of piezoelectric materials by various methods". *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelec. and Frequency Control*, **44**, 4, 733-742. (1997)
8. Zipparo, M.J., Shung, K.K., y Shrout, T.R.: "Piezoceramics for high-frequency (20 to 100 MHz) single-element imaging transducers". *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelec. and Frequency Control*, **44**, 5, 1038-1048. (1997)
9. IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Std 176 (1987).
10. San Emeterio, J.L., y Montero de Espinosa, F.R. "Nuevas expresiones de interés para la caracterización de materiales piezoeléctricos por el metodo de resonancia" *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio*, **20**, 5, 341-344. (1991),
11. Ramos, A., San Emeterio, J.L., Sanz, P.T., y García, J. "Sistema ultrasónico para END de composites laminados con nucleos "nomex", Ponencias 9º Congreso

Figura 2. Medida experimental de la impedancia eléctrica normalizada de dos transductores (U-280 y R-281) para ensayos no destructivos por ultrasonidos.