Análisis experimental de un motor ultrasónico de elevado par

C. MATEO PROUS, J. ÁLVAREZ FLÓREZ, I. CALLEJÓN I AGRAMUNT
Laboratori de Motors Tèrmics ETSEIB-UPC

Los motores ultrasónicos son útiles en diversas aplicaciones debido a su poco peso, pequeñas dimensiones, buena regulación de la posición y velocidad, y elevado par. Hoy en día tan sólo existen motores que desarrollan un par bajo o medio. En esta línea, estamos trabajando en motores ultrasónicos de par elevado, que pueden ser utilizados como actuadores de potencia. Entre todas las configuraciones inicialmente propuestas, se está analizando en detalle una que es excitada por cerámica piezoeléctrica estándar, que trabaja en la zona no lineal y en modo resonante. El análisis, realizado por elementos finitos, abarca el estático y el modal, el armónico y el transitorio. En este artículo se describen el funcionamiento del motor y su análisis por elementos finitos, mostrando los resultados experimentales de dos prototipos, y describiendo las mejoras que aporta el segundo debidamente justificadas.

Palabras clave: Motores piezoeléctricos, motores ultrasónicos, dispositivos piezoeléctricos.

High torque ultrasonic motor. Experimental analysis.

Ultrasonic engines are useful in several applications due to low weight, small size, good position and speed regulation, and high torque. Nowadays there are only low and medium torque engines. We are working on high torque ultrasonic engines, which can be used as power actuators. Among all possible configurations, we are dealing with a standard piezoelectric ceramic excited one, which works in the no linear zone and resonant mode. A static, modal, harmonic and transitory finite elements analysis is being carrying on. The final goal is to obtain all components design criteria in order to optimise the obtained result. The finite element analysis and motor functioning are explained, showing two prototype results, and describing the improvements of the second one and his reason.

Key words: Piezoelectric motors, Ultrasonic Motors, Piezoelectric devices.

1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos de la UPC está desarrollando un nuevo motor piezoeléctrico, que se encuentra en una fase intermedia de optimización.

Inicialmente se construyó un prototipo, que aún y presentando un comportamiento bastante deficiente, permitió confirmar la viabilidad de la solución escogida. El análisis por elementos finitos de tipo no-lineal (debido al contacto), permitió determinar los desplazamientos del motor, que se mostraron insuficientes.

Por medio de una costosa optimización, variando las medidas y parámetros del motor, se han determinado unas medidas del motor mucho más eficientes desde el punto de vista teórico, llegando así a la construcción del segundo prototipo, con unos resultados experimentales que serán mostrados al final del artículo.

2. DESCRIPCIÓN DEL MOTOR.

2.1. Partes del motor.

El motor está formado por uno o varios actuadores que accionan el rotor por su parte interior. Cada unidad de accio-

namiento consiste en la unión de un piezoeléctrico con un actuador metálico de patas inclinadas, que se monta solidariamente sobre el eje central fijo. (Figura 1.).

Figura 1. Partes del motor

El actuador y el piezoeléctrico se montan con un encaje térmico, mientras que la cerámica queda fijada fuertemente al eje soporte, impidiendo el giro de todo este conjunto de actuación.

La única unión que tiene este subconjunto con el rotor es la fricción entre ambos elementos. De este modo cuando se excita la cerámica piezoeléctrica el rotor gira, mientras que cuando no es excitada el rotor permanece fuertemente ligado al actuador, debido al apriete existente entre ambos.

La principal peculiaridad de esta arquitectura es la gran sección de contacto que se obtiene entre el rotor y el estátor, lo cual es una gran ventaja desde el punto de vista del desgaste y del par máximo transmisible. Además, utilizando el mismo rotor, es posible colocar diversos actuadores consecutivos, aumentando así aún más el número de patas que pueden aportar un par total considerable con una pequeña fuerza tangencial en cada una.

El eje central actualmente es un tornillo que por su tracción comprime las cerámicas a través de unas arandelas. La precompresión de este elemento es de gran importancia, ya que es el encargado de reducir las tracciones axiales de los piezoeléctricos, que de otro modo provocan una rotura por las propias fuerzas inerciales.

2.2. Descripción del funcionamiento.

Este motor, se basa en la superposición de tres vibraciones, indicadas por flechas en la Figura 2. Al excitar la cerámica, ésta adquiere una vibración radial que genera la vibración V1 del actuador (véase Figura 2). A causa del contacto aparece la vibración radial (V3) del rotor, que a su vez provoca un movimiento de flexión (V2) del actuador, gracias a la inclinación de las patas.

La excitación de estos 3 modos genera una trayectoria elíptica en el extremo del actuador, que al entrar en contacto con el rotor es capaz de provocarle un movimiento de giro.

En determinadas condiciones, el movimiento radial del rotor es suficiente como para que llegue a perderse el contacto, apareciendo unos breves instantes de tiempo en los cuales el rotor está "suspendido en el aire", desapareciendo totalmente el contacto en todas las patas actuadoras.

Así, por ejemplo, si el contacto se produce entre los puntos 1,2 y 3 (Figura 2), y se pierde entre los puntos 3,4 y 1, el rotor girará a la derecha. En cambio, si el sentido de giro de la elipse fuera al revés (1-4-3-2) y el contacto se produjera en la parte superior de la elipse, aparecería un movimiento hacia la izquierda.

Figura 2. Generación d una elipse en el actuador.

Los instantes de inicio y pérdida de contacto, así como la magnitud de todos los movimientos, dependen de la excitación y de las medidas del sistema. Es posible por ejemplo tener un motor que a una frecuencia gire en un sentido, y que a otra frecuencia superior se mueva en sentido contrario.

Una importante peculiaridad de este sistema es que aparecen unas enormes fuerzas de contacto, debidas al impacto, y que son aprovechadas para dar un importante impulso al elemento rodante.

Este comportamiento percusivo, opuesto totalmente a la fricción continua que se obtiene con los motores de onda viajera (1), da lugar a unas fuerzas normales instantáneas que son comparativamente muy superiores, con la consiguiente posibilidad de obtener una fuerte componente tangencial de arrastre capaz de transferir la energía cinética del actuador (que puede adquirir velocidades superiores a 2 m/s según ANSYS,).

En contrapartida, esta fuerza percusiva da lugar a serios problemas de desgaste, especialmente si el contacto es excesivamente deslizante.

3. ANÁLISIS MODAL DEL SISTEMA.

Cada parte del motor posee unos modos de vibración característicos que pueden ser analizados por separado, y que se

Figura 3. Modos de vibración de cada elemento.

Figura 4. Prototipo 1.

excitan a una determinada frecuencia que depende de las medidas del sistema.

Los modos de vibración del sistema han sido analizados con el programa ANSYS, utilizándose un modelo bidimensional de cada parte del motor por separado.

En la Figura 3 se pueden observar los modos más importantes de cerámica, actuador y rotor. La primera posee un modo radial encargado de excitar las dos vibraciones del actuador (el modo de flexión y el radial) que permiten obtener una trayectoria elíptica o de Lissajous (2). Asimismo en el rotor aparece un modo radial.

4. PRIMER PROTOTIPO.

La Figura 4 muestra una fotografía del prototipo 1, en un montaje realizado con 2 actuadores. A la izquierda se puede ver uno de los tubos realizados: tiene una ranura que permite regular el apriete a través de una brida.

4.1. Analisis por elementos finitos.

Se ha utilizado un modelo tridimensional que incluye la cerámica piezoeléctrica y que permite el giro del rotor. Asimismo, entre rotor y actuador se han insertado unos elementos de contacto. (Fig. 5.).

Figura 5. Modelo FEM.

Figura 7. Velocidad de rotación.

Las restricciones de desplazamiento de los nodos laterales son relativas: Los nodos se acoplan por parejas, de tal modo que se obliga al modelo a que tengan el mismo desplazamiento angular y radial. Ello permite el giro del rotor, y a su vez, mantiene la rigidez del rotor ante deformaciones radiales del mismo.

La aplicación de un campo sinusoidal de 1000V de amplitud, da lugar a un desplazamiento del rotor, según los cálculos obtenidos con ANSYS. La Figura 6 muestra varias curvas, correspondientes a las evoluciones angulares del rotor con diferentes frecuencias de excitación, partiendo siempre del reposo. Cada una de las curvas que componen la gráfica corresponde a una frecuencia, y refleja la evolución temporal que tiene el rotor a dicha excitación.

Así, por ejemplo, en la Figura 6 se observa que a 40.5 KHz el rotor inicia su movimiento de giro en sentido negativo, pero poco después éste se invierte. Por contra, a 46 KHz. aparece una resonancia y el movimiento se mantiene siempre en el mismo sentido.

A partir de estos resultados se pueden calcular la velocidad de giro y la separación alcanzada entre rotor y estátor (Figuras 7 y 8) según la frecuencia de excitación, apareciendo dos resonancias importantes, en 46 KHz y en 51 KHz. Obsérvese que la distancia de separación radial entre ambos elementos es muy escasa (10 micras o menos), pudiendo ser éste un problema importante de funcionamiento.

Figura 6. Evolución angular del rotor según la frecuencia. Prototipo 1.

Figura 8. Separación según la frecuencia.

4.2. Resultados experimentales.

El prototipo 1 (Fig. 4) ha servido para confirmar los comportamientos que se han obtenido a partir del programa de elementos finitos.

Para su experimentación, se ha utilizado un amplificador de audio de 400 W de potencia, que disminuye rápidamente a partir de 40 KHz, y se ha construido un transformador de ferrita de 450 W para elevar la tensión a los valores apropiados del motor.

El comportamiento observado en este prototipo es bastante deficiente: Con voltajes pequeños la respuesta del sistema es nula, ya que no se llega a producir una separación entre rotor y estátor y ambas piezas se mantienen en la misma posición. Al aumentar la excitación, aparecen movimientos intermitentes en las frecuencias de resonancia, que paran en pocos grados ya que se atascan ambos elementos. Por último, a voltajes mayores, se consiguen superar estos obstáculos.

En la Tabla 1 se muestran los comportamientos observados en el motor al hacer un barrido de frecuencias entre 1 KHz y 100 KHz. Cabe remarcar que los voltajes de excitación del

TABLA 1. RESONANCIAS EXPERIMENTALES DEL PROTOTIPO 1.

Freq.	V (pk-pk)	Rad/s	Observaciones
13900	1000	---	Vib. i redV.*
19800	600	---	Vib. i redV.*
27200	1000	---	Vib. i redV.*
29500	1000	---	Vib. i redV.*
40000	600	---	Mov. intermitente.
44200	600	---	Mov. intermitente.
46300	900	---	Mov. intermitente.
56200	1000	-4.6	Giro continuo.
98000	900	---	Vib. i redV.*

*: Vibraciones y reducción del voltaje.

experimento son inferiores a los utilizados en los elementos finitos, donde se ha considerado una excitación de 2000V pk-pk.

Este comportamiento se explica por la magnitud obtenida en la separación máxima rotor-estátor. Si esta distancia es insuficiente, el rotor es incapaz de superar las rugosidades e imperfecciones de ambas superficies, apareciendo o bien vibraciones y una reducción del voltaje (por el descenso de la impedancia), o bien tan solo una tendencia al movimiento.

La escasa magnitud de los desplazamientos en este motor, agravada por la insuficiencia del sistema de alimentación, impiden el correcto funcionamiento del mismo.

5. SEGUNDO PROTOTIPO.

Después de analizar una gran cantidad de medidas con el modelo de elementos finitos, se determinaron algunos motores que daban unas separaciones y velocidades de giro mayores con una excitación mucho más modesta. A partir de estos resultados se seleccionó el prototipo 2 (Fig. 9).

El segundo prototipo tan solo se diferencia del primero en la longitud de las patas del actuador, pasando el diámetro del actuador de 55 mm a 59 mm. De este modo, al aumentar la longitud de las patas, aumenta la amplitud de vibración de las mismas y disminuye su frecuencia de resonancia, apareciendo unos desplazamientos mayores.

Figura 9. Prototipo 2.

Figura 10. Resultados teóricos del prototipo 2.

Figura 11. Resultados experimentales.

5.1. Analisis por elementos finitos.

Los resultados teóricos, obtenidos de forma análoga al caso anterior, muestran unas velocidades de rotación muy superiores, alcanzándose en este caso 36.2 rad/s con la misma excitación de 1000 V (Fig. 10). La separación observada es máxima en 31 KHz y adquiere una magnitud de 55 micras.

Si con esta misma excitación se aplica un par resistente en el rotor, se obtiene de forma numérica una curva par-velocidad que resulta ser aproximadamente lineal, con un par máximo de 1.7 Nm a 0 rpm y una potencia entregada de 15.3 W.

5.2. Resultados experimentales.

El comportamiento de este prototipo (Fig. 9) es claramente mejor, apareciendo un movimiento continuo con excitaciones muy bajas, de tan sólo 28V de amplitud o incluso inferiores.

En la Figura 11 se muestra la evolución de la velocidad de giro con la frecuencia, para diferentes voltajes de excitación. Obsérvese que se obtiene una velocidad más elevada con una excitación inferior: 5.7 rad/s (265V) frente a los 4.6 rad/s (500V) del primer motor.

A causa del incremento de los desplazamientos, han aparecido problemas de desgaste y soldaduras del material, con excitaciones superiores a 400 V y aplicando un par resistente al motor, debido a que así se aumenta el deslizamiento entre ambas superficies.

6. CONCLUSIONES.

El análisis por elementos finitos de este motor ha sido de gran utilidad, tanto a nivel de su optimización como para

determinar los problemas potenciales que puede presentar.

A causa de la no-linealidad del sistema, para que el motor funcione correctamente y con un cierto rendimiento, es necesario combinar adecuadamente las medidas de todos los elementos, ya que en caso contrario pueden aparecer problemas de retrocesos del rotor o bien un frenado posterior al último impulso del actuador, reduciéndose las separaciones y los desplazamientos obtenidos, además de aumentar el calor generado por deslizamiento.

El segundo prototipo ha mostrado unos desplazamientos muy superiores tal como se preveía a partir de los análisis por elementos finitos, con un movimiento estable a partir de una excitación modesta, si bien se han observado dos tipos de problemas:

Soldaduras entre los elementos de fricción

Unas tolerancias demasiado amplias de las piezas, observándose patas que no llegan nunca a actuar, además de diferencias en sus frecuencias de resonancia.

Estas dos limitaciones pueden ser mejoradas en gran medida, teniendo en cuenta que el prototipo se ha realizado con un material muy modesto (ambas piezas son de F114) y con una superficie de acabado relativamente basta.

El siguiente paso a realizar será por tanto el uso de otros materiales con una tendencia al gripaje menor, una mayor dureza superficial y un acabado más fino de las superficies.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido realizado gracias a la concesión, por parte del "Comissionat per a Universitats i Recerca de la Generalitat de Catalunya", de una beca de investigación enmarcada dentro del proyecto CICYT: MAT96-1052-C04-03.

BIBLIOGRAFÍA

1. T. Sashida, T. Kenjo; "An introduction to ultrasonic motors". Oxford Science Publications 1993. ISBN 0-19-856395-7.
2. A. P. French; "Vibraciones y ondas". Editorial Reverté, 1982.
3. B. Agranat, M. Dubrovin, N. Javsky, G. Esin; "Fundamentos de la Física y la técnica de los ultrasonidos". Editorial MIR Moscú 1990. ISBN 5-03-001684-8.
4. T. Ikerda; "Fundamentals of piezoelectricity". Oxford University science publications, 1996.
5. F. Roure Fernández, "Introducción al Método de los elementos Finitos". Dept. Resistencia de Materiales ETSEIB, 1992.
6. S. Ueha, Y. Tomikawa; "Ultrasonic Motors. Theory and Applications". Oxford Science Publications 1993. ISBN 0-19-859376-7.
7. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, "El Método de los Elementos Finitos: Formulación Básica y Problemas Lineales". McGraw-Hill.
8. "Random Vibrations and Spectral analysis". D.E. Newland 1975. ISBN 0 582 46335-1. 2ª Edición 1978. Logman Group Limited.
9. J. Álvarez, "Nuevas aportaciones al sistema de encendido de los M.E.P.(Motores de encendido provocado)". UPC 1990.