Modelado y control de un motor reciprocante magnético

Christian Rios Enriquez, Manuel Adam Medina, Dr. Jarniel García Morales
Departamento de Ingeniería Electrónica -Tecnológico Nacional de México -CENIDET.

INTRODUCCIÓN

El transporte es uno de los principales sectores de la economía que contribuyen a la contaminación del aire. En parte como resultado de ello, la movilidad sostenible se ha desarrollado como un concepto para reducir los efectos ambientales y sociales causados por el uso de vehículos con motor de combustión interna (MCI) porque utilizan como fuente principal de energía a la gasolina que es transformada por el MCI en energía de desplazamiento permitiendo mover al vehículo.

En consecuencia, han surgido nuevos paradigmas de energía sostenible. Actualmente se encuentran centrados en el uso de la electricidad como fuente de energía alternativa para los vehículos, pero también hay investigaciones sobre el uso combustibles alternativos como: el etanol, el hidrógeno, combinaciones gasolina-etanol, entre otros.

Dentro de estos paradigmas de energía sostenible también se encuentra el uso de campos magnéticos, donde se aprovecha la estructura de un MCI y sustituye la quema de combustibles fósiles. Estos motores son conocidos como "*motores reciprocantes magnéticos*" (MRM). Para este caso en particular se propone el desarrollo de un modelado matemático y un control para un MRM utilizando MCI tipo monocilíndrico patentado por investigadores del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

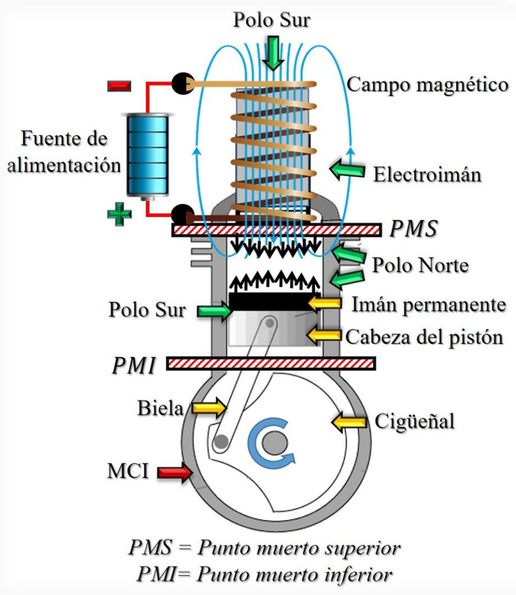

Fig. 1 Motor reciprocante magnético

OBJETIVOS

Objetivo general:

Modelar un MRM tipo monocilíndrico basado en el enfoque energético de Euler-Lagrange y proponer un esquema de control que permita manipular el ángulo de energización del actuador magnético para diferentes puntos de operación del motor con el fin de obtener la mejor velocidad angular y par del motor.

Objetivos específicos:

- ❑ Diseñar un modelo matemático representativo de un MRM monocilíndrico.
- ❑ Proponer un esquema de control para obtener el máximo par motor para diferentes puntos de operación del MRM monocilíndrico.
- ❑ Implementar la estrategia de control en el prototipo experimental de un MRM.

PROPUESTA SOLUCIÓN

$$\tau_m = \ddot{\theta}[\ Q_1 + Q_2 + Q_3] + \dot{\theta}^2\left[Q_4 + \frac{1}{2}R^2 m_b\,(Q_5 + Q_6 + Q_7) + \frac{1}{2}R^2 m_p(\sin(2\theta) + Q_8 + Q_9)\right] + \dot{\theta}\left(\mu_1 + \mu_2\frac{R\cos(\theta)}{\ell\cos\beta}\right) - m_c g h r\sin\theta + Q_{10}, \quad (1)$$

$$Q_1 = I_C + I_V + m_c\,h^2\,R^2 + I_B\left(\frac{R^2}{\ell^2}\frac{\cos^2(\theta)}{\cos^2(\beta)}\right), \quad (2)$$

$$Q_2 = m_b R^2\left(k^2\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) + \frac{jR}{\ell}\frac{\sin(\theta)\sin(2\theta)}{\cos(\beta)} + \left(\frac{jR}{2\ell}\right)^2\frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right), \quad (3)$$

$$Q_3 = m_p R^2\left(\sin^2(\theta) + \frac{R}{\ell}\frac{\sin(\theta)\sin(2\theta)}{\cos(\beta)} + \left(\frac{R}{2\ell}\right)^2\frac{\sin^2(2\theta)}{\cos^2(\beta)}\right), \quad (4)$$

$$Q_4 = \frac{I_B R^2}{2\ell^2}\left(-\frac{\sin(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\cos^2(\theta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{\ell^2}\sin(2\theta)\right), \quad (5)$$

$$Q_5 = (-k^2 + 1)\sin(2\theta), \quad (6)$$

$$Q_6 = \frac{jR}{\ell}\left(\frac{2\sin(\theta)\cos(2\theta) + \sin(2\theta)\cos(\theta)}{\cos(\beta)} + \frac{\sin(\theta)\sin^2(2\theta)}{\cos^3(\beta)}\frac{R^2}{2\ell^2}\right), \quad (7)$$

$$Q_7 = \left(\frac{jR}{2\ell}\right)^2\left(\frac{4\sin(2\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\sin^3(2\theta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{\ell^2}\right), \quad (8)$$

$$Q_8 = \frac{R}{\ell}\left(\frac{2\sin(\theta)\cos(2\theta) + \sin(2\theta)\cos(\theta)}{\cos(\beta)} + \frac{\sin(\theta)\sin^2(2\theta)}{\cos^3(\beta)}\frac{R^2}{2\ell^2}\right), \quad (9)$$

$$Q_9 = \left(\frac{R}{2\ell}\right)^2\left(\frac{4\sin(2\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(\beta)} + \frac{\sin^3(2\theta)}{\cos^4(\beta)}\frac{R^2}{\ell^2}\right), \quad (10)$$

$$Q_{10} = m_b g\left(R\sin(\theta) + \frac{jR^2}{\ell}\frac{\sin(2\theta)}{\cos(\beta)}\right) + m_p g\left(R\sin(\theta) + \frac{R^2}{\ell}\frac{\sin(2\theta)}{\cos(\beta)}\right). \quad (11)$$

Como parte del planteamiento de base se propone el modelo expresado en (1) como la parte del comportamiento dinámico de su parte mecánica del MRM monocilíndrico. La expresión en (12) nos permite calcular el comportamiento del par generado por el MRM de acuerdo al *diagrama de cuerpo libre del motor* de la *Fig. 2* en relación con la fuerza magnética generada de la ecuación (13). La fuerza magnética depende de la corriente suministrada de la fuente de alimentación junto a la posición en la que se encuentre el pistón.

$$\tau_m = R(B_y)\sin(\theta) - B_x\cos(\theta) - T_{IC} - hR(F_{ox}\cos(\theta) - F_{oy}\sin(\theta)), \quad (12)$$

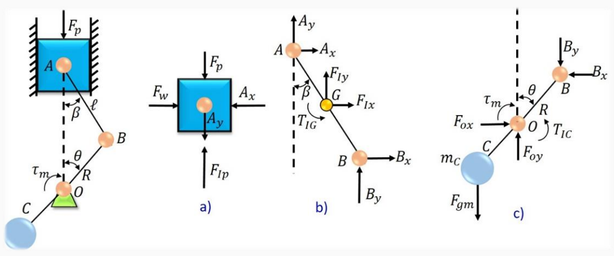

Fig. 2 Diagrama de cuerpo libre de cada sección del motor: a) cabeza del pistón, b) biela y c) cigüeñal.

$$F_p = F_{mag} = \frac{\mu_0\,N^2\,A_m}{4}\frac{i(t)^2}{x_{es}^2}, \quad (13)$$

$$\cos(\beta) = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{\ell}\sin(\theta)\right)^2}. \quad (14)$$

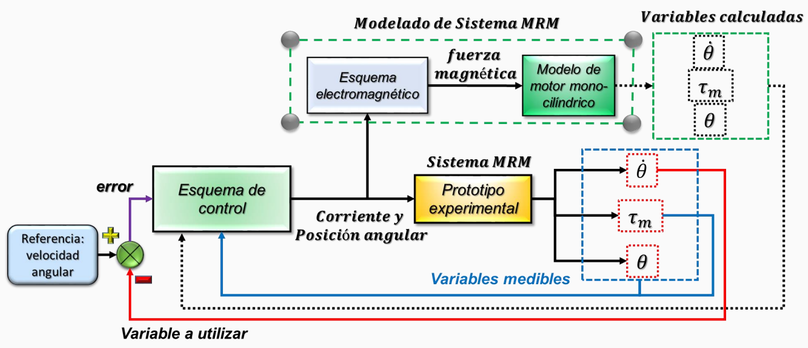

Fig. 3 Esquema de lazo cerrado propuesto para el sistema

En la Fig. 3 se presenta un diagrama de propuestas solución para controlar el MRM. Con la estrategia propuesta consideramos utilizar las variables de velocidad angular, posición angular y el par generado del motor por parte del modelo matemático y de las de las mediciones del prototipo experimental en la cual serán ingresadas a un esquema de control.

El esquema control usara como referencia una velocidad angular deseada donde el controlador deberá de entregar una corriente y posición angular que será utilizada para generar la fuerza magnética en el momento adecuado al haber pasado el PMS.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El objetivo de esta simulación es la de presentar un modelo matemático que presente la dinámica del MRM cuando la fuerza magnética es aplicada sobre el pistón.

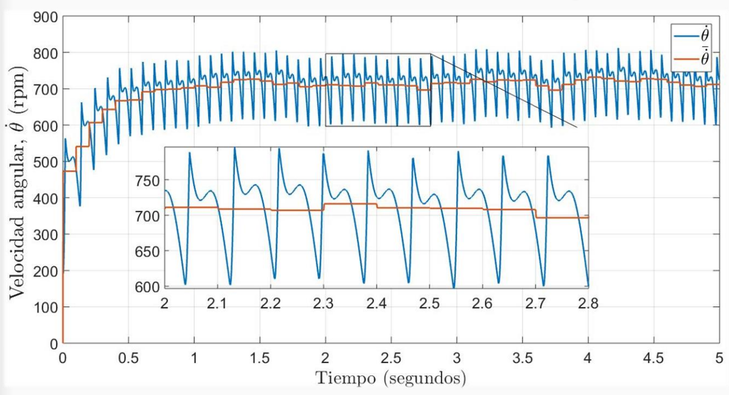

Fig. 4 Velocidad angular del motor trabajando con una corriente de 8A

La Fig. 4 nos muestra como se comporta la velocidad angular del MRM trabajando a 8A y su velocidad angular media cada toma de 100 muestras. En la Fig. 4 se presenta un acercamiento para apreciar mejor el comportamiento del MRM.

La Tabla 1 muestra una comparativa de la media del par, velocidad y fuerza máxima generada en el MRM con diferentes niveles de corriente.

Tabla 1 Comportamiento del sistema en diferentes ángulos de energización y diferentes corrientes.

Corriente: 8A				Corriente: 14A			
θ	$\bar{\tau}\,(Nm)$	$\bar{\dot{\theta}}\,(rpm)$	$F_{max}\,(N)$	θ	$\bar{\tau}\,(Nm)$	$\bar{\dot{\theta}}\,(rpm)$	$F_{max}\,(N)$
1°	0.1	700	293	1°	0.2987	2095.6	891.5
2°	0.0992	698.0987	291	2°	0.2935	2068.3	890.3
3°	0.0994	696.6278	290.3	3°	0.2940	2081.7	887
4°	0.0979	688.1882	288	4°	0.2897	2010.8	885
5°	0.0972	681.7295	285	5°	0.2888	2023.7	879.4
10°	0.0889	632.8399	274	10°	0.2622	1839.8	807.2
15°	0.0772	550.4619	259.3	15°	0.2276	1589.9	785.6
20°	0.0625	445.6272	240.5	20°	0.1838	1303.3	738.7
25°	0.0422	311.8136	225	25°	0.1304	911.81	666.5
30°	0.0203	155.0584	204.4	30°	0.0649	479.57	622

CONCLUSIÓN

- La formulación dinámica de la parte mecánica de un MRM accionado por una fuerza magnética se ha diseñado con una única variable independiente. Esta formulación permite tener una interpretación del comportamiento de la velocidad angular y el par del mecanismo.
- Las simulaciones mostraron que la mejor posición angular respecto al cigüeñal para generar la fuerza magnética sobre el pistón es un rango entre *"un grado y cinco grados después del PMS"* para obtener la mejor velocidad angular y el mejor par del motor.
- Para futuros trabajos se requiere implementar el comportamiento dinámico del actuador magnético para mejorar el modelo dinámico.

BIBLIOGRAFÍA

- Balko, P. and Rosinova, D. (2017). Modeling of Magnetic levitation system. In *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, 252-257. IEEE.
- Butler, K. (2015). Electromagnetic reciprocating engine white paper. *Innovative Energy Policies*, 4(118).
- Crolla, D. and Mashadi, B. (2011). *Vehicle powertrain systems*. John Wiley & Sons.
- Dhawale, R.S., Dasre, A.D., Bharate, S.F., Shelar, Y.D., Powar, R.P., and Gaikwad, P.V. (2020). Design & development of double cylinder reciprocating electromagnetic engine. *Studies in Indian Place Names*, 40 (74), 1337-1339.
- Ha, J.L., Fung, R.F., Chen, K.Y., and Hsien, S.C. (2006). Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism. *Journal of sound and vibration*, 289(4-5), 1019-1044.
- Higueras-Castillo, E., Molinillo, S., Coca-Stefaniak, J.A., and Liébana-Cabanillas, F. (2019). Perceived value and customer adoption of electric and hybrid vehicles. *Sustainability*, 11(18).
- Myklebust, A., Fernandez, E., and Choy, T. (1984). Dynamic response of slider-crank machines during startup. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 108(4).
- Rahman, A., Rahman, M., and Karim, H. (2017). The theory of the development of an electromagnetic engine for automotive use. *International Journal of Advanced Robotics and Automation*, 2(1).
- Wellstead, P.E. (1979). *Introduction to physical system modelling*, volume 4. Academic Press Ltd.