

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR SINCRÓNICO LINEAL DE DESPLAZAMIENTO CIRCULAR

Oswaldo Ojeda

Wilfredo Zichlmann

Claudio Villalobos

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Santiago de Chile

RESUMEN

En este trabajo, los autores dan cuenta del diseño y construcción de un prototipo de motor sincrónico lineal de tipo heteropolar de polos salientes fijos y armadura móvil de desplazamiento circular.

ABSTRACT

In this job, the authors inform about the design and construction of a linear synchronous heteropolar motor prototype, that has stationary salient poles and movil armature of circular displacement.

1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tracción de altas velocidades (más de 300 Km/h) magnéticamente levitados (MAGLEV) utilizan principalmente motores de inducción lineales y motores sincrónicos lineales para su propulsión [1]. En general, cuando se emplea levitación por atracción se prefiere al motor lineal de inducción, en cambio, cuando se emplea levitación por repulsión se utilizan motores sincrónicos lineales.

Existe una gran variedad de motores lineales derivados de estos dos tipos básicos. Se puede mencionar, entre otros: motores de inducción de estator corto, de un solo lado y de dos lados, de rotor corto, motores sincrónicos homopolares, heteropolares, de reluctancia y de imán permanente.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Santiago de Chile se ha diseñado, construido y probado con éxito motores lineales de inducción de diferentes configuraciones [2]. En base a esta experiencia se ha comenzado el estudio de los motores sincrónicos lineales, diseñando y construyendo un prototipo heteropolar. Las bases del diseño y las etapas de construcción, así como sus potencialidades y limitaciones se indican a continuación.

2.- ETAPAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR

El diseño de este motor lineal de desplazamiento circular se adaptó a la infraestructura

existente, que consiste básicamente en un sistema rotatorio de eje vertical que permite montar motores lineales de inducción y/o sincrónicos de estator corto de baja potencia [3]. En esta configuración se ubican sobre la vía circular fija, de 1,5 metros de diámetro, los polos salientes que conforman el campo excitador del motor. El estator trifásico, sujeto a un brazo giratorio, puede desplazarse circularmente sobre la vía a entrehierros ajustables. Así, el sistema permite alcanzar velocidades de régimen permanente.

Se utilizó como estator el núcleo magnético de un motor de inducción lineal, de forma de segmento semicircular de 18 ranuras, en el que puede ubicar un enrollado trifásico de un par de polos.

Las ecuaciones básicas del diseño se obtienen de un modelo fasorial del motor sincrónico lineal [4]. Estas ecuaciones de fase, en los terminales del estator, son las siguientes:

$$V_r \cos(\gamma + \phi) = E_i - (X_{dm} + X_{1\sigma} + X_a)I_d + R_l I_q \quad (1)$$

$$V_r \sin(\gamma + \phi) = (X_{qm} + X_{1\sigma} + X_a)I_q + R_l I_d \quad (2)$$

$$I_d = I_r \sin \gamma \quad (3)$$

$$I_q = I_r \cos \gamma \quad (4)$$

donde:

- V_r : Tensión de fase.
- I_r : Corriente de fase.
- E_i : f.e.m.i. por los polos fijos.
- X_{dm} : Reactancia en eje directo, de magnetización.
- X_{qm} : Reactancia en eje en cuadratura, de magnetización.
- $X_{1\sigma}$: Reactancia de dispersión del estator.
- X_a : Reactancia de dispersión debida al enlace con el campo magnético de los polos que anteceden al estator móvil.
- R_l : Resistencia por fase.
- I_d : Corriente en eje directo.
- I_q : Corriente en eje en cuadratura.
- γ : Ángulo entre la f.e.m.i. y la corriente I_r .
- ϕ : Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente.

Además se cumple que:

$$X_{dm} = \frac{6\mu_o \omega_1 \tau L}{\pi^2 g_o K_c} p K_{dm} N_r^2 \quad (5)$$

$$X_{qm} = \frac{X_{dm} K_{qm}}{K_{dm}} N_r^2 \quad (6)$$

$$X_a = \frac{6\mu_o \omega_1 L(p'-p)}{\pi^2} \quad (7)$$

donde:

- μ_o : Permeabilidad del vacío.
- ω_1 : Frecuencia angular de alimentación.
- τ : Paso polar.
- L : Largo del estator.
- g_o : Entrehierro.
- p : Número de pares de polos.
- N_r : Número de conductores por ranura.
- K_c : Factor de Carter.
- K_{dm} : Constante de valor aproximado a 0,948.
- K_{qm} : Constante de valor aproximado a 0,3845.

$$X_{1\sigma} = \mu_o \omega_1 \left[\left(\lambda_s + \frac{p\lambda_d}{p'} \right) L + 6(\tau + 0,002) \right] 2p' N_r^2 \quad (8)$$

siendo:

$$\lambda_s = \frac{h_s}{12W_s} (1 + 3\beta_1) \quad (9)$$

$$\lambda_d = \frac{5 \left(\frac{\tau}{qW_s} \right)}{5 + 4 \left(\frac{\tau}{qW_s} \right)} \quad (10)$$

donde:

- β_1 : Factor de cuerda.
- q : Ranuras por polo y por fase.
- W_s : Ancho de ranura.
- h_s : Profundidad de la ranura.
- p' : Número de pares de polos alimentados hacia adelante.

2.1.- VALORES DE DISEÑO

Por condiciones de restricción para adecuarse a la estructura del sistema rotatorio, se determinaron las siguientes dimensiones:

$$\begin{aligned} L &= 10 \text{ cm.} & W_s &= 10,75 \text{ mm.} & g_o &= 4 \text{ mm.} \\ \tau &= 16 \text{ cm.} & h_s &= 20,50 \text{ mm.} & q &= 3 \\ & & p &= 1 & & \end{aligned}$$

La frecuencia elegida para fines de disminuir la fuerza centrífuga fue de 10 Hz, luego, $\omega_1 = 20 \pi$. El factor de uso de la ranura se estimó en 0,75, obteniéndose $N_r = 45$ conductores por ranura. A partir de estos valores se construyó el enrollado trifásico del estator, utilizando un conductor N° 13 AWG. Este se muestra en la Figura 1, colocado en la estructura soportante de aluminio.

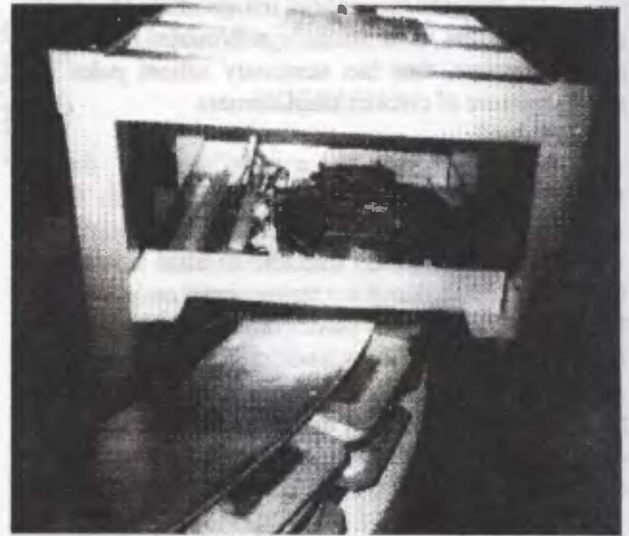


Figura 1. Estator y Enrollado Trifásico.

El número de pares de polos salientes fijos, dispuestos en la vía es $p_r = 15$, estos fueron determinados por el paso polar del estator y la longitud de la vía circular. Cada polo fijo tiene 600 vueltas de conductor N° 16 AWG. El número de vueltas se determinó a partir del valor máximo de la fuerza electromotriz inducida deseada. El montaje de los polos sobre la vía se aprecia en la fotografía de la Figura N°2.

A partir de los valores numéricos iniciales se puede predecir un valor aproximado de la potencia del motor, resolviendo las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), para V_r e I_r . Según estos cálculos la potencia de entrada es 0,85 kW. En la fotografía de la Figura 3 se muestra el motor sincrónico lineal de desplazamiento circular construido. En esta figura también se aprecia una lámina conductora de cobre colocada sobre los polos fijos la cual cumple la función de un enrollado amortiguador.

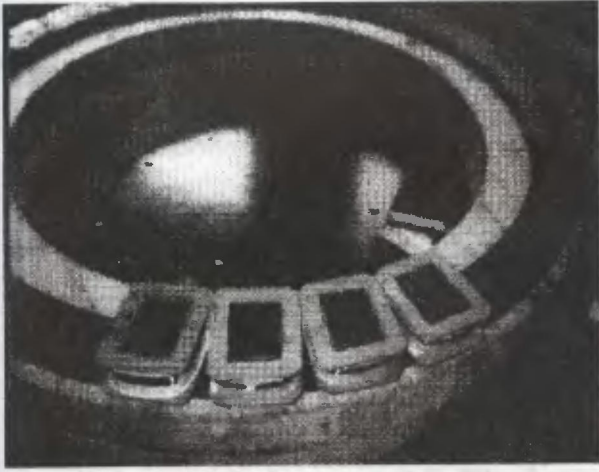


Figura 2. Montaje de Polos en la Vía.

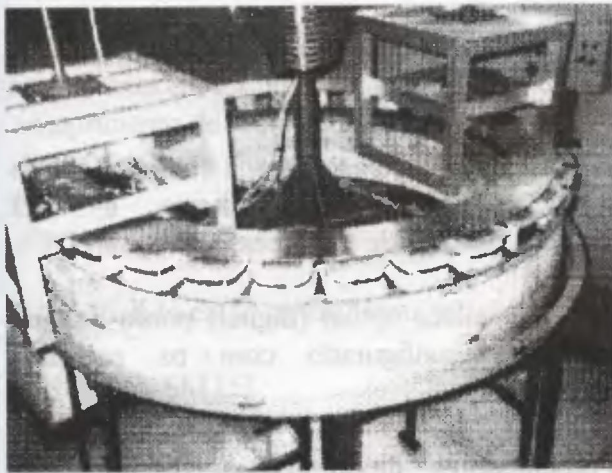


Figura 3. Motor Síncrono Lineal de Desplazamiento Circular.

3.- CONCLUSIONES

Tomando en cuenta las restricciones impuestas a los valores de diseño por la estructura de montaje y los cálculos obtenidos del modelo fasorial, fue posible construir el motor síncrono lineal heteropolar tal como se aprecia en la fotografía de la Figura 3.

El motor se probó en vacío, arrancando inicialmente como motor de inducción lineal, luego se

energizaron con corriente continua los polos de la vía, notándose la sincronización. Hasta ahora, se ha hecho funcionar con frecuencias entre 5 y 10 Hz, absorbiendo corrientes de fases relativamente altas (entre 5 y 8 A) debido principalmente a las bajas frecuencias y a valores de entrehierro mayores que el de diseño.

También se constató que el motor sigue funcionando como motor lineal de reluctancia cuando se hace cero la corriente de campo.

En la Figura 3 se observa otro estator suspendido, el que puede ser utilizado como un generador síncrono lineal, lo cual permitirá cargar el motor y estudiar su comportamiento para diversas condiciones de operación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a "DICYT" (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas) de la Universidad de Santiago de Chile, su respaldo al proyecto N° 07-9413OR.

REFERENCIAS

- [1] A. R. Eastham, W. F. Hayes. "Maglev Systems Development Status". I.E.E.E., AES Magazine, pp. 21-30, January, 1988.
- [2] O. Ojeda, W. Ziehlmann, J. Zolczi. "Motores de Inducción Lineales y su Aplicación en Prototipos de Sistemas de Tracción". Anales de las XII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, pp. 136-139, Quito, Ecuador, 1991.
- [3] O. Ojeda, W. Ziehlmann. "Design, Construction and Testing of a Rotary System Driven by Linear Induction Motor." Anales del "Congreso Brasileiro de Electromagnetismo 95", pp. 361-363, Florianópolis, Brasil, 1995.
- [4] Syed. A. Nasar. "Handbook of Electric Machines", pp. 7-35 a 7-38. Edit McGraw-Hill, 1987.