

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CIUDAD JUAREZ
INSTITUTO DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y MANUFACTURA



”Estudiar el comportamiento y caracterizaciones de los motores de corriente directa sin brochas (EPS) para el diseño de un banco de prueba único para analizar su desempeño”

PROTOCOLO DE INVESTIGACION QUE PRESENTA:

Edgar Martin Martínez Estrada

Como requisito parcial para obtener el título de:

Maestría en Manufactura

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Características	5

Capítulo 1

Introducción

Este Proyecto se enfoca en la caracterización de motores eléctricos de corriente directa sin brochas con el objetivo de poder realizar un diseño de Banco de prueba para los motores antes mencionados, recopilando datos e información respecto al funcionamiento, haciendo una caracterización de los motores que servirá para optimizar el banco de prueba, se realizara un estudio del rendimiento de los diferentes tipos de motores destinados a la dirección eléctrica asistida del automóvil en este caso serían 4 diferentes modelos los cuales tienen diferentes características pero un similar funcionamiento será necesario una base de datos que cumplan con la información de los parámetros que se necesitan conocer y al funcionamiento de los motores eléctricos en su aplicación, de tal forma que el banco de prueba brinde el control y la información requerida para un mayor control en los motores eléctricos lo cual contribuirá en la calidad de los motores. Para el desarrollo del diseño se utilizarán los conocimientos obtenidos de la carrera de ingeniería mecatrónica y el estudio de los motores eléctricos de corriente directa.

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) son uno de los tipos de motores que más popularidad ha ganado en los últimos años. Actualmente, los motores BLDC se emplean en sectores industriales tales como: Automóvil, Aeroespacial, Consumo, Médico, equipos de automatización e instrumentación. Los motores BLDC tienen la característica de que no emplean escobillas en la conmutación para la transferencia de energía; en este caso, la conmutación se realiza electrónicamente. Esta propiedad elimina el gran problema que poseen los motores eléctricos convencionales con escobillas, los cuales producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor, son ruidosos y requieren una sustitución periódica y, por tanto, un mayor mantenimiento. Los motores BLDC tienen muchas ventajas frente a los motores DC con escobillas y frente a los motores de inducción. Algunas de estas ventajas son: - Mejor relación velocidad-par motor - Mayor respuesta dinámica - Mayor eficiencia - Mayor vida útil - Menor ruido - Mayor rango de velocidad.

Además, la relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se puedan emplear en aplicaciones donde se trabaje con un espacio reducido.

Los motores sin brochas están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor. La imagen refleja una sección de uno de estos motores en donde puede verse la disposición de los bobinados y los imanes permanentes (que en este caso son de neodimio).

Como su propio nombre indica, sin brochas. En este tipo de motor la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator o carcasa, por lo tanto aquí no son necesarias ni las escobillas ni el colector que se utilizan en los sin brochas. Esta corriente eléctrica genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y por lo tanto al eje del motor. No tenemos ni escobillas, ni colector y tampoco tenemos delgas; por lo que ahora el elemento que controlará que el rotor gire sea cual sea su posición será el variador electrónico; que lo que hace básicamente es ver en qué posición se encuentra el rotor en cada momento, para hacer que la corriente que le llegue sea la adecuada para provocar el movimiento de rotación que le corresponde. El variador es capaz de hacer esto, gracias a unos sensores en el motor, o también mediante la respuesta obtenida o mejor dicho, observación de cómo se comporta la corriente del motor. Por este motivo, los variadores empleados en este tipo de motores son algo más complicados que los utilizados en sin brochas, ya que deben analizar la respuesta y los datos de funcionamiento del motor según están teniendo lugar, es decir, en tiempo real.

Durante las pruebas que será sometido el motor es importante conocer las fallas que se puedan presentar durante la prueba. La mayoría de las fallas en motores eléctricos sin brochas pueden ser comúnmente en fallas eléctricas del motor ya sea por un pico de corriente o un mal aislamiento de calor en su embobinado lo cual puede afectar en las mediciones de B-EMF, en sus armónicas y cuando es falla mecánica afecta en las mediciones de fricción y en su par de torsión.

Para poder detectar las fallas será necesario medir el rendimiento del motor en un banco de prueba el cual realizara las pruebas necesarias en base a la caracterización de los motores para darnos un análisis más complejo y apto para determinar la condición del motor antes y después de cada prueba de estrés en el que sea sometido.

1.1. Antecedentes

El banco de pruebas para motores eléctricos ha cambiado a partir del momento de su concepción, tratándose por consiguiente de un proceso de diseño iterativo, donde a partir de la observación se fue perfeccionando paso a paso el producto. De este proceso se desprenden las siguientes etapas del proyecto. Inicialmente se planteó resolver los efectos negativos de la inercia en el sistema mecánico, la solución convergió al diseño del dispositivo llamado banco de pruebas para motores monofásicos de baja inercia debido a la incorporación de un freno de disco, con el cual se reduce al mínimo la inercia de frenado, mismo que le permitió realizar operaciones de frenado con una menor cantidad de perturbaciones, sin embargo contó con el inconveniente de carecer de un adecuado control, pues se limitaba a frenar en cinco pasos, insuficientes para generar las gráficas de caracterización.

Posteriormente se creó el banco de pruebas para motores eléctricos con freno magnético, con el cual es posible controlar con precisión la carga de trabajo. Los resultados en este sentido fueron totalmente satisfactorios, ya que el control del freno magnético representó un gran progreso en el proyecto, que permitió generar las mejores curvas de caracterización obtenidas hasta el momento. Otro factor relevante para conseguir estos resultados fue la incorporación del sensor de torque bidireccional, este sensor funciona bajo principios magnéticos, por lo tanto es afectado significativamente por los campos magnéticos generados por el motor y el freno magnético.

PRUEBAS DE VIDA ACELERADA: CUALES SON LAS CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES

Con el descubrimiento de la ley de la inducción electromagnética por Faraday, empieza la historia de las máquinas eléctricas y hasta mediados de la octava década del siglo pasado, representa en esencia la historia del desarrollo de la máquina de corriente continua. En el curso de este tiempo esta máquina pasó cuatro periodos de desarrollo, a saber:

- 1) Máquinas tipo magnetoeléctricas con imanes permanentes,
- 2) Máquinas tipo electromagnéticas con excitación independiente,
- 3) Máquinas del mismo tipo con autoexcitación y tipo elemental del inducido 4) Máquinas del tipo

de polos múltiples con inducido perfeccionado.

El primer periodo de desarrollo de la máquina de corriente continua, que abarca el tiempo desde 1831 hasta 1851, está enlazado ininterrumpidamente con los nombres de los científicos rusos E. J. Lenz y B. S. Jacobi. El segundo y tercer periodo de desarrollo de la máquina de corriente continua, que

abarcan los años de 1851 a 1871, se caracterizan por el paso a las máquinas del tipo electromagnético, al principio, con excitación independiente, y luego, con autoexcitación, y así como por el paso de la máquina bipolar a la multipolar. En el cuarto período de su desarrollo (de 1871 a 1886) la máquina de corriente continua adquirió los rasgos fundamentales de la construcción moderna. Fueron propuestas y realizadas: la máquina con autoexcitación de Gramme y el inducido de anillo de Pacinotti; el tipo hoy día normal de inducido de tambor (Hefner - Altenek, año 1871); los tipos simples de arrollamientos de lazo y ondulados y sus principales modificaciones, arrollamientos en serie-paralelo de Arnold, arrollamientos mixtos (en pata de rana), conexiones compensadoras de los arrollamientos y los arrollamientos compensadores para compensar reacción del inducido (Mengues, año 1884) , polos auxiliares para mejorar la conmutación (Meter. año 1885), divisor de tensión de M. O. Dolivo-Dobrovolski. Para el desarrollo posterior de las máquinas de corriente continua tuvo gran importancia la creación del convertidor con un inducido de corriente alterna a continua y el convertidor inverso de corriente continua a alterna; la creación de instalaciones potentes según el sistema Leonardo Ilgner para la industria (instalaciones metalúrgicas y máquinas de extracción), instalaciones con convertidores a vapor de mercurio para la alimentación de las máquinas de corriente continua de los dispositivos industriales y los, ferrocarriles electrificados tanto en las subestaciones de tracción, como en las locomotoras eléctricas.

Un motor eléctrico sin escobillas o motor brushless es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

Los motores eléctricos solían tener un colector de delgas o un par de anillos rozantes. Estos sistemas, que producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control es mucho más complejo. Esta complejidad prácticamente se ha eliminado con los controladores electrónicos de velocidad ESC (Por sus siglas en inglés).

Otros motores sin escobillas, que sólo funcionan con corriente continua son los que se usan en pequeños aparatos eléctricos de baja potencia, como lectores de CD-ROM, ventiladores de ordenador, casetes, etc. Su mecanismo se basa en sustituir la conmutación (cambio de polaridad) mecánica por otra electrónica sin contacto. En este caso, la espira sólo es impulsada cuando el polo es el correcto, y cuando no lo es, el sistema electrónico corta el suministro de corriente. Para detectar la posición de la espira del rotor se utiliza la detección de un campo magnético. Este sistema electrónico, además, puede informar de la velocidad de giro, o si está parado, e incluso cortar la corriente si se detiene para que no se queme. Tienen la desventaja de que no giran al revés al cambiarles la polaridad (+ y -). Para hacer el cambio se deberían cruzar dos conductores del sistema electrónico.

Un sistema algo parecido, para evitar este rozamiento en los anillos, se usa en los alternadores. En este caso no se evita el uso de anillos rozantes, sino que se evita usar uno más robusto y que frenaría mucho el motor. Actualmente, los alternadores tienen el campo magnético inductor en el rotor, que induce el campo magnético al estator, que a la vez es inducido. Como el campo magnético del inductor necesita mucha menos corriente que la que se va a generar en el inducido, se necesitan unos anillos con un rozamiento menor. Esta configuración la usan desde pequeños alternadores de coche hasta los generadores de centrales con potencias del orden del megavatio.

La Constante de FEM del circuito combinado se define como la relación entre el pico de tensión inducida de línea a línea del motor (V) y su velocidad de giro (rad/seg) del motor (V) a su velocidad de rotación (rad/seg). La constante de la FEM de retorno debe ser la indicada en la tabla 3.1 a 25°C cuando se gire en dirección CW y CCW a velocidades superiores a 500 rpm. La velocidad y la dirección de la prueba para el 100% de las pruebas en la producción deberán ser aprobadas por el departamento de ingeniería de productos.

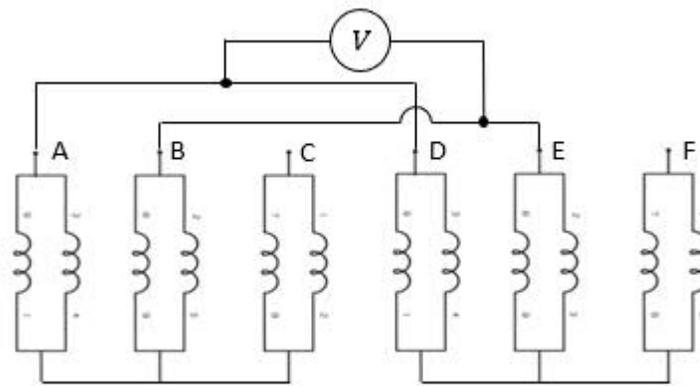


Imagen #1.- Medición del circuito combinado (VAD-VBE mostrado)

Variación de la constante de retro emisión con temperatura, la variación de la constante de la FEM de retorno debido al cambio de la temperatura ambiente no deberá superar el 0,1% por grado C.

Variación entre fases de la constante de la fuerza electromagnética inversa, la variación entre fases de la constante de la FEM de retorno deberá ser inferior al 1%, tal como se define a continuación.

$$K_{\epsilon_{var}} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum \left[\frac{(K_{\epsilon_i} - K_{\epsilon_{ave}})^2}{K_{\epsilon_{ave}}} \right]}$$

where $K_{\epsilon_{ave}} = \frac{1}{3} \sum K_{\epsilon_i}$ and $i = ad - be, be - cf, cf - ad$

Imagen #2.- Formula para la variación de la constante de la FEM.

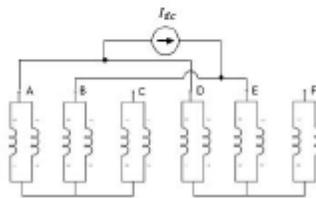
Variación de la constante a lo largo de la vida útil.- A lo largo de la vida útil del motor la constante de la fuerza electromagnética de retroceso no debe disminuir más del 3% con respecto al valor inicial.

Pérdida de la constante de par (K_t) debida a la saturación.-La disminución de la constante de par-torque debida a la saturación magnética deberá ser inferior al 6% a la máxima corriente del motor. La pérdida de la constante de par-torque debida a la saturación magnética se define como la diferencia porcentual entre K_t al 10% de corriente y K_t al 100% de corriente. La constante de par se medirá inyectando corriente continua máxima (I_{dc}) a través de dos fases del motor, midiendo el par máximo en el eje del motor (T_{pico}) a lo largo de al menos una revolución a 10 rpm, y utilizando la ecuación A o la ecuación B como se muestra a continuación:

$$K_t = \frac{T_{peak}}{I_{dc}} \quad \text{where } I_{dc} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{max}$$

$$\text{Equation A: } \% K_t \text{ loss} = \frac{(K_{t10\%} - K_{t100\%}) * 100}{K_{t10\%}}$$

$$\text{Equation B: } \% K_t \text{ loss} = \frac{(K_e - K_{t100\%}) * 100}{K_e}$$



Imagen#3.- Ecuación A y Ecuación B.

Resistencia de línea a línea de los circuitos individuales.- La resistencia de línea a línea del motor de los circuitos individuales será medida a 25°C.

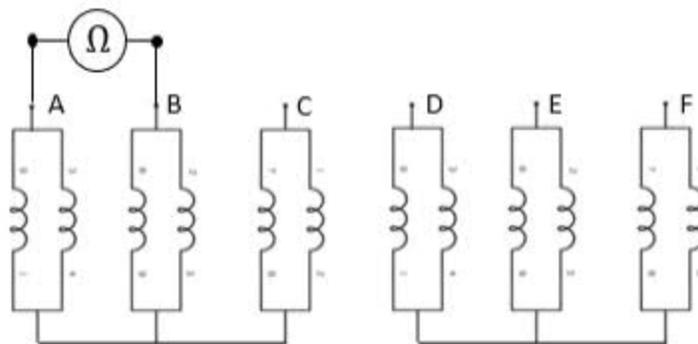


Imagen #4.- Circuito de la medición de la resistencia en el motor.

Desequilibrio de resistencias.- El desequilibrio de resistencia de los valores de resistencia de línea a línea, tanto para los circuitos individuales como para los circuitos combinados no deberá superar el 1,4%. El desequilibrio de la resistencia se calculará como sigue.

$$R_{imb} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum \left[\frac{(R_i - R_{ave})^2}{R_{ave}} \right]}$$

$$\text{where } R_{ave} = \frac{1}{3} \sum R_i \quad \text{and } i = ab, bc, ca, de, ef, fd, ad - be, be - cf, cf - ad$$

Imagen #5.- Ecuación para calcular el desequilibrio de la resistencia.

Variación de la resistencia con la temperatura.- La variación de la resistencia de línea a línea será de 0,393% por °C.

Inductancia sincrónica.- La inductancia sincrónica del circuito combinado del motor a una velocidad de giro de N_{rpm} (la misma velocidad a la que se mide el K_e) se calculará de la siguiente manera a una temperatura de 25°C.

$$L_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}}\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(R_{LL})^2}}{2\pi \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(\frac{N_{rpm}}{60}\right)}$$

where $V_{oc} = K_e * N_{rpm} * \left(\frac{2\pi}{60}\right)$ $N_{rpm} = \text{Rotational Speed (rpm)}$

$I_{sc} = \text{Short Circuit Current (amps)}$ $P = \text{Number of Poles}$

$R_{LL} = \text{Line to Line Resistance (including any extensions or harnesses)}$

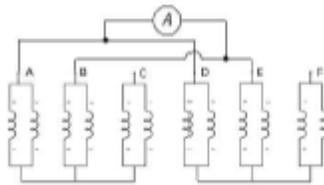
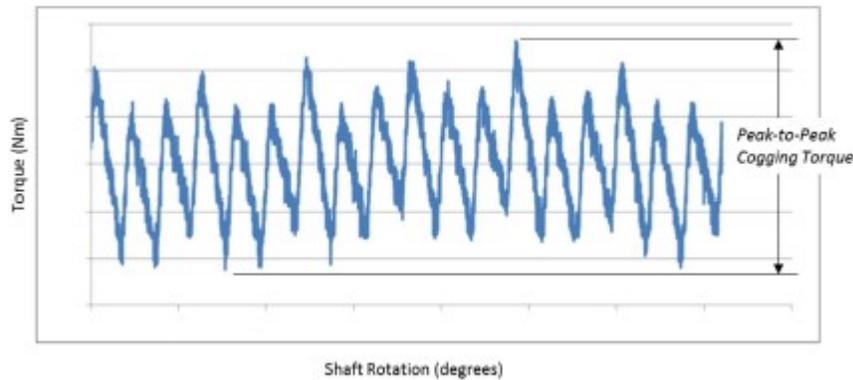


Imagen #6.- Medición de la inductancia sincrónica.

Par de torsión

El par de torsión máximo del motor y el par de torsión específico del pedido se determinarán midiendo el par necesario para hacer girar el eje del motor al menos una revolución a 10 rpm en las direcciones CW y CCW en sentido de la marcha y en sentido contrario, sin que el motor reciba alimentación eléctrica. La velocidad y la dirección de la prueba para el 100% de las pruebas en la producción deberán ser aprobadas por la ingeniería de producto 3.6.1. Par de torsión pico a pico El par de torsión global de pico a pico del motor no deberá superar los límites indicados en la tabla 3.9

Maximum Peak-to-Peak Cogging Torque (Nm)
0.020



Par de torsión específico del orden

El par de torsión pico a pico de los órdenes armónicos especificados de rotación del eje no deberá exceder los los límites indicados en la tabla 3.10, tanto en el sentido de la marcha como en el sentido contrario.

Maximum Cogging Torque (Nm)				
8th Order	12th Order	16th Order	24th Order	48th Order
0.016	0.016	0.016	0.016	0.016

Armónicos

El contenido de armónicos de la forma de onda de la tensión no deberá exceder los límites indicados en la Tabla 3.11 cuando girando en dirección CW y CCW a velocidades entre 500 y 2.000 rpm. La velocidad y la dirección de La velocidad y la dirección de la prueba para el 100% de las pruebas de fin de línea en la producción deben ser aprobadas por la Ingeniería de Producto.

Maximum Back EMF Harmonics (% of Fundamental)					
2 nd Order	3 rd Order	5 th Order	7 th Order	11 th Order	13 th Order
0.8%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%

Fricción

El par necesario para hacer girar el eje del motor a 110 rpm sin entrada eléctrica al motor no deberá superar los valores indicados en la tabla 3.12. El par de fricción es el par medio durante al menos una revolución del eje del motor.

Temperature (°C)	Maximum Friction (Nm)
80	0.035
60	0.035
40	0.035
20	0.035
0	0.035
-20	0.041
-40	0.121

Fricción de amortiguación

La fricción de amortiguación del motor se caracterizará por el coeficiente de amortiguación que se calcula como que se muestra a continuación. El coeficiente de amortiguación no debe superar los valores indicados en la tabla 3.13.

$$\text{Damping Coefficient} = \frac{30(T_{3000} - T_{110})}{2890 \pi}$$

where T_{3000} = Friction measured at 3000 RPM

and T_{110} = Friction measured at 110 RPM

Temperature (°C)	Maximum Damping Coefficient (Nm-s/rad)
80	0.00020
60	0.00020
40	0.00022
20	0.00025
0	0.00031
-20	0.00037
-40	0.00043

Bibliografía

- [1] Mechatronics an Introduction, Robert H. Bishop vol 1, pp. 1-3, 2006.
- [2] Manual del Motor Eléctrico, H. Wayne Beaty, James L. Kirtley, JR. Abril del 2000, pp. 1-4,710, 277-295.
- [3] Mecatrónica Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica, W. Bolton, cuarta Edición, México, Enero 2010.
- [4] DC MOTOR DESIGN, J. Edward Yahne Motor Development Group Valeo, 28 de Octubre de 1998.
- [5] Maquinas eléctricas, Kostenko, M. P., Piotrovski L. M. Tomo I. Editorial MIR Editorial Mir. M. 1979
- [6] Festo Didactic GmbH Co. KG, D-73770 Denkendorf, 2013
- [7] Diseño y construcción de un banco de pruebas para caracterización de motores eléctricos Andrade Jonathan 2014
- [8] Banco de pruebas para sistemas de propulsión eléctrica con regeneración de energía Agustín Alejandro García 2003
- [9] BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE INDUCCION

- [10] diseño y construcción de un banco de prácticas en motores eléctricos, como apoyo a la asignatura diseño de máquinas II Rolando Sánchez rodríguez 2010
- [11] Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción Castelli, Marcelo Universidad de Montevideo. ^a IEEE Member Andrade, Marcos ALFEX S.A. ^a IEEE Senior Member
- [12] plan de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo de los bancos de prueba (motor generador DC- motores monofásicos) del laboratorio de ingeniería eléctrica Carlos Enrique Gual Pedroso 2002
- [13] Diseño de un banco de pruebas para caracterizar motores de combustión interna y eléctricos Luisa Mónico, Mayra Bogotá, Christian Casas
- [14] Motores eléctricos Proyectos de Ingeniería Mecánica Ing. José Carlos López Arenales [15]

SELECCIAN~ Y APLICACIAN~ DE MOTORES ELACTRICOS~ www.weg.net

9 BIBLIOGRAFÍA
