

Automatización de un banco de ensayo para motores eléctricos de media potencia

Trabajo de Fin de Master de Ingeniería en Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial

Eduard Fortuny Pons – Julio de 2020
Universidad Politécnica de Cataluña UPC – EPSEVG
eduard.fortuny@estudiantat.upc.edu

Resumen

Resumen—A lo largo del presente documento se presenta la propuesta de automatización de un banco de ensayo para motores de potencia media. Se realiza un estudio de los tipos de bancos de ensayo empleados en la actualidad, sus ventajas y desventajas respecto a la tipología de ensayos que estos deben desempeñar. Mediante la plataforma Simulink se modelizan las propuestas obtenidas del estado del arte y se realizan diversas simulaciones para analizar el comportamiento de los modelos y validar la opción más adecuada.

Palabras Clave—Automatización, banco de ensayo, corriente, control, inducido, excitación, GAECE.

1. Introducción

Hoy en día los avances en el campo de la electrónica han impulsado la aparición de nuevos controles para motores eléctricos más sofisticados y eficientes, en los bancos de ensayo del GAECE encontramos la herramienta principal para el desarrollo de los diferentes proyectos del departamento, en ellos se ponen en práctica las nuevas teorías de control y simulaciones desarrolladas y se someten a estudio los accionamientos eléctricos y elementos de electrónica de potencia.

Actualmente en el laboratorio se tiene sujeto a estudio un motor de reluctancia auto-conmutada del cual se pretende obtener todos los parámetros necesarios, velocidad, par motor, corrientes y tensión, ángulos de disparo óptimos, para caracterizar el motor y testear diferentes tipos de control, como el de histéresis, pulse width modulation (PWM) u otros más complejos y de este modo valorar el rendimiento ofrecido y últimamente sacar conclusiones como la aplicación final que puede desempeñar dicho motor o proponer mejoras en su diseño y construcción. Para realizar estas tareas el freno o carga del banco de ensayos juega un papel fundamental ya que es el encargado de proporcionar las diferentes condiciones de trabajo al motor en estudio, regulando la carga aplicada como ejemplo podemos emular las condiciones de un motor de un vehículo eléctrico en una pendiente o la carga máxima que este puede transportar

Esta función de freno o carga del banco de ensayo se desempeña mediante un motor/generador eléctrico de excitación independiente conectado al eje del motor en estudio a modo de carga variable. La capacidad y precisión

que tenga este motor/generador y su sistema (electrónica de potencia, sensores, etc.) determinará el rango de pruebas a las que se pueda someter el motor estudiado. Es aquí donde nace la necesidad que motiva este proyecto, automatizar el sistema de frenado del banco de ensayo.

2. Configuración de un banco de ensayo

En general un banco de ensayos se describe como un espacio de trabajo que se utiliza para verificar y constatar la correcta funcionalidad y robustez de un objeto particular. En el contexto de este proyecto pues representa una instalación donde se realizan diferentes comprobaciones y pruebas a los diferentes accionamientos eléctricos y que tiene los siguientes propósitos:

- Dotar de un espacio de investigación para desarrollar, simular y analizar actuadores eléctricos y sus sistemas.
- Establecer procedimientos de evaluación y verificación de diferentes modelos de actuadores eléctricos.
- Facilitar la toma de decisiones en las investigaciones emprendidas, suponiendo reducciones de costes de proyecto y agilizar el trabajo de documentación.
- Servir de fuente de consulta, investigación, prototipaje y test a empresas e grupos de investigación.
- Promover el aprendizaje práctico de los estudiantes en temas de investigación relacionados con el diseño de actuadores eléctricos, electrónica de potencia y control.

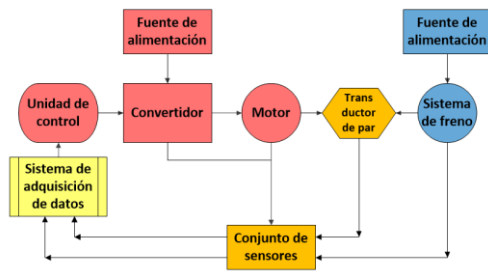


Fig 1 Esquema general banco de ensayo

3. Tipos de configuración. Sistemas de carga.

Se engloban todos los elementos que desempeñan alguna acción en la generación de carga del banco de ensayo, gracias al sistema de frenado la instalación es capaz de someter el motor en estudio a las diferentes condiciones de trabajo deseadas, como variar la carga de par motor, velocidad, generar condiciones de régimen permanente o ensayos con régimen dinámico.

Los elementos periféricos al freno dependerán en gran medida de la tipología de este, que pueden ser frenos basados en pérdida de energía por fricción como los frenos mecánicos (i.e. Prony) o los frenos hidráulicos (i.e. Froude) o por frenos basados en resistencia electromagnética como los frenos de corrientes parásitas Eddy o un motor de inducción trabajando en modo generador, entre otros. La elección del tipo de freno empleado depende de las características de los motores que se estudien en el banco, de los tipos de ensayos que se realicen, del espacio de la instalación y de los recursos económicos para la constitución del banco.

DINAMÓMETRO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
CORRIENTES PARÁSITAS O EDDY	<ul style="list-style-type: none"> Excelente precisión Excelente rango de velocidades Fácil regulación de la carga Bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> Requieren de sistema de refrigeración de agua para potencias elevadas Decada del rendimiento por temperatura
ELÉCTRICO CC	<ul style="list-style-type: none"> Alta precisión Puede funcionar como motor de arrastre Excelente precisión Alta controlabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Inercia media. Coste elevado Potencias limitadas a bajas y medias
ELÉCTRICO AC	<ul style="list-style-type: none"> Excelente precisión Inercia pequeña Puede funcionar como motor de arrastre Alta controlabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Coste elevado Potencias limitadas a bajas y medias
DE PARTICULAS MAGNÉTICAS	<ul style="list-style-type: none"> Excelente precisión Fácil regulación de la carga Bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> Requieren de sistema de refrigeración de agua para potencias elevadas Decada del rendimiento por temperatura
HIDRÁULICO	<ul style="list-style-type: none"> Robustez Inercia muy baja Capacidad de realizar ensayos estables de larga duración Bajo coste 	<ul style="list-style-type: none"> Infraestructura de refrigeración compleja Poca versatilidad Difícil de automatizar Desgaste por cavitación y turbulencias
PRONY	<ul style="list-style-type: none"> Adecuados para ensayos estáticos Ensayo a bajas revoluciones 	<ul style="list-style-type: none"> Tiene un rango de velocidades limitado Difícil de automatizar Mantenimiento frecuente

Fig 2 Tabla comparativa sistemas de frenado

3.1 Selección del tipo de freno

Teniendo en cuenta que:

- El sistema de frenado tiene que poder ser automatizado
- Los motores testeados en el banco de ensayo del laboratorio del GAECE generalmente no superan los 25kW de potencia.
- Se realizan diferentes tipologías de ensayos (estáticos, dinámicos, a régimen permanente, ensayos de arrastre) por lo que se requiere un alto nivel de versatilidad del freno.
- Se puede decir que los ensayos son de corta duración, y de poca continuidad.
- En ocasiones puede ser necesario que la carga ejerza de arrastre del accionamiento en estudio

Los dinamómetros alimentados por corriente eléctrica tienen una clara ventaja respecto a los frenos de fricción o hidráulicos por su alta capacidad de regulación de la carga, dentro de los dinamómetros de esta condición los dinamómetros de corrientes parásitas y de partículas magnéticas aun presentando un amplio rango de potencias y fácil automatización no cumplen con el requisito de poder realizar tareas de arrastre en ocasiones puntuales, es decir trabajar como motor. Es por eso que el sistema de frenado más adecuado por las necesidades existentes de los usuarios del banco de ensayo son los dinamómetros de corriente continua CC o los de corriente alterno CA ya que cumplen con todos los criterios para la elección.

Finalmente entre los dos tipos de dinamómetros eléctricos los de corriente alterno presentan unas mejores condiciones para ensayos dinámicos debido a que estos tienen una inercia inferior a la de los de corriente continuo. Sin embargo debido a los recursos del laboratorio del GAECE que dispone de un motor de corriente continua de excitación independiente con potencia suficiente para desempeñar la función, la ventaja dinámica que presenta un dinamómetro de CA no es un factor que pueda compensar los costes que conllevaría seleccionar esta opción. Por lo tanto la propuesta de automatización se va a realizar en base al motor de corriente continuo de excitación independiente que se dispone en el laboratorio.

3.2 Motor CC de excitación independiente

Un motor de corriente continua es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica de rotación y ofrecen un alto nivel de control de velocidad y par. El motor de corriente continua con excitación independiente es una tipología de motor de continua en que la alimentación del inducido o armadura y de la excitación se realiza por separado teniendo dos fases independientes, es decir están eléctricamente separados. Gracias a que el

circuito eléctrico de la excitación está separado del inducido entonces el campo magnético no depende de la carga, proporcionando un par prácticamente constante.

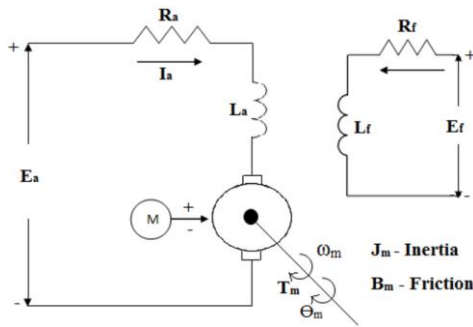


Fig 3 Esquema motor CC de excitación independiente

Se caracteriza por:

$$\omega = \frac{E}{k\phi} \text{ Ecuación (1)}$$

$$E = V_i - R_i I_i \text{ Ecuación (2)}$$

$$M_i = k\phi I_i \text{ Ecuación (3)}$$

Donde:

- ω = Velocidad (rad/s).
- E = f.e.m. inducida.
- k = constante constructiva.
- ϕ = flujo máximo por polo.
- V_i = Tensión del inducido.
- R_i = Resistencia del inducido
- I_i = Corriente del inducido
- M_i = Par interno

Se observan dos hechos muy importantes para el entendimiento del motor de corriente continua con excitación independiente, la velocidad depende de la fuerza electromotriz i el par depende directamente de la corriente del inducido.

3.2 Freno dinámico o reostático

Esta técnica consiste en conectar el motor en modo generador para transformar la energía mecánica en energía eléctrica, luego esta electricidad se conduce a través de una resistencia para ser disipada en forma de calor por el efecto Joule. Los terminales del circuito del inducido son conectados a una resistencia la cual actúa a modo de carga, dependiendo del valor de esta resistencia la carga generada será mayor o menor, como más pequeño sea el valor de dicha resistencia más grande será la potencia disipada en forma de calor y más rápido será el efecto de frenado.

Cuando el inducido gira dentro del campo magnético generado por la excitación este produce una fuerza contraelectromotriz la cual genera la corriente que circula a través de la resistencia, al disiparse en forma de calor el circuito del inducido pierde energía provocando el efecto de frenado deseado.

La fuerza contraelectromotriz como se describe en la ecuación (1) depende de la velocidad de rotación del inducido por lo que a medida que se va disminuyendo la velocidad va disminuyendo también la capacidad de frenado por lo que con este método no se puede aplicar un par de frenado estático al no haber más corriente que la resistencia pueda disipar.

4. Modelización.

4.1 Troceado de corriente de inducido

Mediante el modelado del banco de ensayo se pretende implementar el control del sistema de frenado y justificar su funcionamiento por medio de simulaciones. Empleando el procedimiento SiL (Software in the loop) se recrea y simula el banco de ensayo para estudiar el comportamiento del controlador, de esta manera se evita consumir recursos innecesarios en cuanto a hardware y se optimiza el tiempo ya que sólo se dedica tiempo de set-up una vez se tiene el modelo validado y se procede a el test de hardware.

En el esquema se muestra la arquitectura del banco de ensayo, sombreado en verde el sistema de carga ahora presenta una unidad de control que al igual que la del motor implementa un algoritmo para automatizar la aplicación de carga en los ensayos.

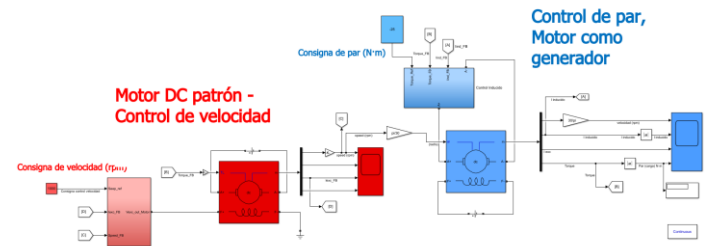


Fig 4 Esquema motor CC de excitación independiente

El principio del control de la carga se basa en la técnica de frenado dinámico. Esta técnica frena el motor a medida que se va disipando la corriente de inducido a través de una resistencia y eventualmente lleva el motor al paro completo. Para la función de fuente de carga variable en el banco de ensayos interesa poder controlar el valor de par que se aplica y mantenerlo constante, para ello se construye un modelo el cual se encarga de trocear la corriente que circula por la resistencia de frenado dejando pasar únicamente corriente cuando es necesario

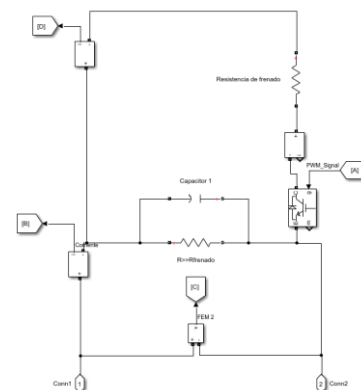


Fig 5 Simulink conexión IGBT a la resistencia de frenado

4.1 Simulaciones

Condiciones de ensayo n° 1:

- Consigna de velocidad = 1000 rpm
- Consigna de par (carga) = 5N·m

Este ensayo se realiza con un índice de carga bajo para ver que el control responde con demandas poco exigentes.

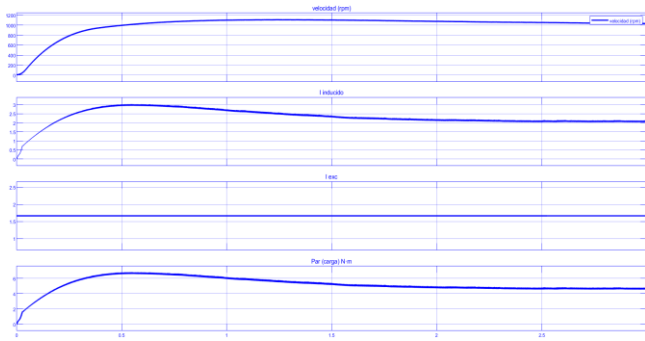


Fig 6 Scope ensayo n°1

El scope es un bloque que crea una ventana de visualización de señales en Simulink, mediante este podemos analizar el comportamiento del motor bajo el efecto del control programado. En el primer gráfico se observa la señal de velocidad del eje del banco de ensayo el cual se estabiliza a las 1000 rpm de consigna, luego podemos observar las corrientes de la fase de inducido y de la excitación donde claramente se aprecia que la corriente de inducido está sometida a un control de troceado mientras que la corriente de excitación es constante ya que los terminales están conectados directamente a la fuente de alimentación.

En la gráfica se observa la forma de la señal del par motor o carga que comparada a la forma de señal de la corriente de inducido y la del par se observa que estas tienen la misma forma ya que como se menciona en la ecuación (3), el par motor es proporcional al corriente de inducido.

Condiciones de ensayo n° 3:

- Consigna de velocidad = 500 rpm, 1000 rpm, 1750 rpm, 2000 rpm.
- Consigna de par (carga) de manera escalonada = 2N·m, 5N·m, 10N·m, 15N·m, 20N·m, 25N·m, 30N·m, 35N·m

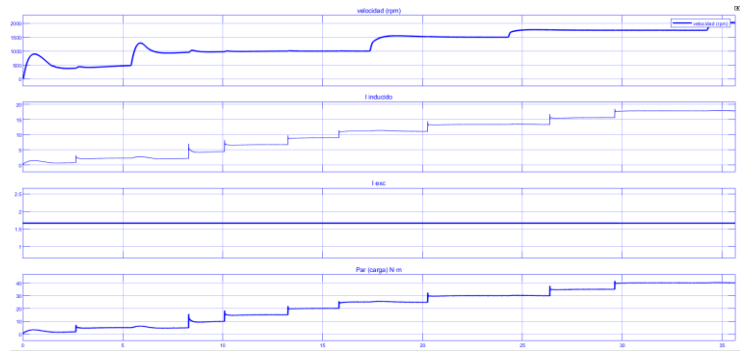


Fig 7 Scope ensayo n°2

En este ensayo se puede comprobar el comportamiento dinámico del sistema de frenado, se empieza con un arranque suave a 500 rpm y 2N·m en el cual apenas se disipa corriente en la resistencia, se va subiendo la carga gradualmente a medida que se incrementa la consigna de velocidad hasta 40N·m y 2000 rpm respectivamente.

6. Conclusiones

Una vez culminado el trabajo propuesto de automatizar el sistema de frenado del banco de ensayos del GAECE se puede concluir que una mejora de la instalación de estas características es altamente necesaria para profesionalizar un espacio de trabajo donde se realizan importantes investigaciones. Las tareas de análisis y ensayos de accionamientos eléctricos representan una importante inversión de horas, donde el objetivo principal de un ensayo es poder obtener información con la máxima calidad posible para luego analizarla y obtener respuestas. De este modo la implementación de un control para el motor de corriente continua que trabaja como freno en el banco elimina funciones innecesarias que no aportan ningún valor a los ensayos, además se centraliza el comando de la instalación desde el ordenador eliminando así la necesidad de tener que disponer otro integrante dedicado a la regulación de la tensión de la fase de excitación del freno.

En cuanto a la solución obtenida después de realizar tareas investigación teórica, modelización y simulación se concluye que la opción con un control aplicado a la corriente del inducido mediante un troceador que regula la cantidad de energía que se disipa en la resistencia de frenado es la más adecuada para implementarse en el banco en detrimento de la opción con doble control en la fase de inducido y de excitación, demostrando que la mejor solución siempre es la que tiene la arquitectura más simple e involucra los componentes mínimos.

Finalmente se originan unas futuras líneas de trabajo las cuales pasan por implementar un sistema de refrigeración para la caja de resistencias y de este modo mejorar la capacidad de realizar una mayor cantidad de ensayos en menos tiempo sin padecer pérdidas de rendimiento en la instalación debido a temperatura. Por otro lado aún teniendo un control implementado y haber centralizado la gestión del banco de ensayo se abre una línea de trabajo para implementar una programación de ensayos preconfigurados de modo que automáticamente se ajusten

los parámetros de carga según un determinado patrón de velocidades del motor en estudio

Por último se abre una línea de trabajo para la gestión de la energía empleada en los ensayos con la posibilidad de modelar el sistema de frenado mediante la técnica de freno regenerativo el cual recupera la electricidad que genera el generador cuando aplica la carga al motor. De este modo se recuperaría la electricidad, que se devolvería a la red o se almacenaría en baterías

Referencias

[1] Gomila González, M. "Aportaciones al control de la máquina de reluctancia híbrida HRM como motor y generador". Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2016.

[2] Blanqué Molina, B. "Simulación interactiva de motores de reluctancia autoconmutados". Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2007. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/93624>

[3] Perat Benavides, J. I. "Contribucion al control de motores de reluctancia autoconmutados". Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2006. Available at: <http://hdl.handle.net/2117/93619>

[4] Perat Benavides, J. I. "Contribucion al control de motores de reluctancia autoconmutados". Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2006. Available at: <http://hdl.handle.net/2117/93619>