



SmartLab Airgap: Una herramienta para facilitar el aprendizaje en máquinas eléctricas rotativas

A. Sapena Baño^a, R. Puche Panadero^a, J. Martínez Román^a, J. Pérez-Cruz^a, M. Pineda Sánchez^a y M. Riera Guasp^a

asapena@die.upv.es, rupucpa@die.upv.es, jmroman@die.upv.es, juperez@die.upv.es, mpineda@die.upv.es, mriera@die.upv.es

^aInstituto Universitario de Investigación en Ingeniería Energética (Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España)

Abstract

Undergraduate courses in electrical machines often include an introduction to the air gap magnetic field as a basic element in the energy conversion process. The students must learn the main properties of the field produced by basic winding configurations and how they relate to the winding current and frequency. This paper describes a new test equipment design aimed at helping students achieve these learning goals. The test equipment is designed around four main elements: a modified slip ring induction machine, a winding current driver board, the DAQ boards and a PC-based virtual instrument. The virtual instrument provides the winding current drivers with the suitable current references depending on the user selected machine operational status (single or three phase/winding with DC or AC current) and measures and displays the air gap magnetic field for that operational status. Students' laboratory work is organized into a series of experiments that guide their achievement of these air gap field-related abilities. Student learning, assessed by means of end of semester exams and pre-&-post lab exams has increased significantly. Students' opinions of the relevance, usefulness and motivational effect of the laboratory was also positive.

Keywords: *Electrical engineering education, Student experiments, Magnetic field measurement, Induction Motors, Test equipment.*

Resumen

Las asignaturas a nivel de grado de Máquinas Eléctricas frecuentemente incluyen una introducción al campo magnético de entrehierro como elemento básico en la conversión electromecánica de energía incluyendo resultados de aprendizaje como reconocer las propiedades del campo magnético de entre-

hierro producido por diferentes devanados y su correlación con las características de la corriente del devanado: amplitud y frecuencia. Este artículo describe el diseño de un nuevo banco de ensayos orientado a facilitar la adquisición de esos resultados de aprendizaje. El banco está diseñado en torno a cuatro elementos principales: una máquina de anillos rozantes modificada, una fuente de corriente múltiple ajustable, 2 tarjetas de adquisición de datos y un Instrumento Virtual basado en un PC. Este Instrumento Virtual proporciona a la fuente de corriente las referencias de corriente adecuadas al modo de operación elegido por el usuario (corriente mono- o trifásica continua o alterna) y mide y representa el campo magnético de entrehierro para ese modo de operación. El trabajo con el banco se estructura en una serie de experimentos orientados a reforzar y alcanzar los resultados de aprendizaje deseados. Se ha constatado una mejora del aprendizaje significativa tras la implantación de este equipo en las prácticas de laboratorio.

Palabras clave: *Aprendizaje en ingeniería eléctrica, prácticas de laboratorio, medida del campo magnético, máquinas de inducción, banco de ensayos.*

1. Introducción

El Campo Magnético de Entrehierro (CME) es una magnitud fundamental para describir el comportamiento de las máquinas eléctricas rotativas, ya que influye directamente en las ff.ee.mm. inducidas y en el par. Las referencias típicas para las asignaturas de grado (Chapman, 2011; Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 2003; Nasar & Unnewehr, 1983; Say, 1983) suelen analizar el CME producido por diferentes devanados atendiendo a su estructura y a su excitación en corriente continua o alterna (monofásica y trifásica).

El uso de conceptos abstractos y difíciles de visualizar, junto con la falta de equipos de medida y de bancos de ensayo adecuados supone un desafío para los estudiantes de ingeniería eléctrica (Bentz, 1995; Pulijala, Akula, & Syed, 2013). La base de la conversión electromecánica de energía en las máquinas eléctricas está en la interacción de los CME de estator y de rotor, que deben girar a la misma velocidad para que la máquina desarrolle un par neto medio no nulo de origen electromagnético y ya en 1979 (S. Gruber & Prole, 1979) se introdujeron dos experimentos para reforzar estos conceptos. El uso de espiras exploradoras para medir el CME de un generador síncrono en lugar de las típicas medidas de tensiones y corrientes de fase (Ueda, Ohta, & Uenosono, 1987) se ha utilizado también para proporcionar una visión más clara del proceso de conversión de energía. Por otra parte, también se han utilizado soluciones efectivas basadas en simulación (Smolleck, 1988), o más recientemente también en el ámbito de los accionamientos eléctricos (Hassell, Weaver, & Oliveira, 2013; Ojaghi, Faiz, Kazemi, & Rezaei, 2012; Syal, Gaurav, & Moger, 2012). Sin embargo, es importante reconocer los inconvenientes de los sistemas basados en simulación como el tiempo

necesario para que el estudiante se familiarice con ellos o la percepción de utilidad limitada (Cañizares & Faur, 1997).

Los Laboratorios Inteligentes o SmartLab (SL) se constituyen en base a un conjunto de sensores/actuadores, una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y un ordenador con una aplicación específicamente desarrollada que controla la DAQ, procesa los datos adquiridos y gestiona la interfaz de usuario. Este último elemento es habitualmente conocido como Instrumento Virtual (VI), utilizando la terminología establecida y difundida por los principales fabricantes de equipos de adquisición de datos (Martínez-Roman et al., 2014). Los SL presentan muchas y variadas ventajas sobre bancos de ensayos tradicionales como ayudar en el aprendizaje de conceptos complejos (Sheldon Gruber, 1984), facilitar el manejo de datos (Williams et al., 2004) para favorecer el interés del estudiante y reducir el tiempo requerido para realizar ensayos (Jiménez-Martínez, Soto, Jodar, Villarejo, & Roca-Dorda, 2005), posibilitar una interacción amigable con el banco de ensayos (Sellschopp & Arjona, 2004) o tener una naturaleza modular que favorece su reutilización (Durovic, 2013) entre otras (Bujanovic & Ghosh, 2014; Dal, 2013; Duran et al., 2013; Heath et al., 2013).

Este artículo describe en la sección 2 los objetivos perseguidos en el desarrollo de un equipo para favorecer el aprendizaje de estos conceptos en las asignaturas de Máquinas Eléctricas impartidas en la ETSII Valencia, en la sección 3 el proceso de diseño del equipo, en la sección 4 el impacto que ha tenido su introducción en la docencia, para terminar con las conclusiones en la sección 5.

2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto ha sido desarrollar una herramienta que fuera de ayuda para facilitar y reforzar el aprendizaje de las complejas relaciones que existen entre la estructura y la corriente en los devanados de máquinas rotativas y las características del CME, especialmente su amplitud, orientación y velocidad de giro. Este objetivo general integra otros más concretos, a saber:

- Diferenciar entre un CME estacionario (ya sea de amplitud fija o pulsante) y uno giratorio.
- Correlacionar cada tipo de CME con la corriente del devanado (continua o alterna mono- y trifásica).
- Asociar diferentes formas de onda de CME con la estructura del devanado que las produce.
- Contrastar la representación clásica y más extendida del CME en coordenadas cartesianas con la geometría cilíndrica del entrehierro.
- Reconocer la diferencia entre la velocidad de giro del CME y la pulsación de las corrientes en máquinas multipolares.
- Motivar al alumno ayudándole a enlazar las herramientas analíticas que se utilizan para describir el CME y su representación visual.

- Reducir el tiempo requerido para madurar este aprendizaje.

3. Diseño de SmartLab Airgap

La premisa fundamental que guio el diseño de SL Airgap (SLA) fue “ver es creer”. Atendiendo a ese principio, se diseñó SLA en torno a cuatro elementos principales: un sistema de medida del CME, un sistema de alimentación de los devanados ajustable, una interfaz de usuario que permitiera aplicar de forma sencilla cambios en la alimentación y representara de forma visual el CME para que fueran fácilmente reconocibles sus propiedades y, por último, una guía de operación con ejercicios de complejidad creciente que acompañara el proceso de aprendizaje de forma efectiva.

3.1 Medida del CME

Para medir el CME se decidió instalar una espira exploradora en el rotor en lugar de sensores de campo magnético de efecto Hall, más complejos de instalar. La f.e.m. inducida en una espira exploradora es proporcional a la densidad de flujo en el punto del entrehierro en que se encuentran sus conductores de ida y de vuelta y a la velocidad angular del rotor (que se ha de mantener constante).

La medida del CME con espira exploradora plantea dos nuevos problemas: su conexión al equipo de medida estacionario y resolver la correlación entre la variación temporal de la f.e.m. inducida en la espira y la distribución angular del CME. El primer problema se resolvió utilizando una máquina asíncrona de anillos rozantes en la que se desconectó el devanado del rotor, se instaló una espira exploradora y se utilizó el conjunto de anillos rozantes – escobillas original para proporcionar conexiones fijas a la espira exploradora del rotor. La solución del segundo pasó por instalar un codificador óptico de la posición que permite asociar la f.e.m. inducida en cada instante a la posición que ocupan los conductores de la espira en el entrehierro en ese momento.

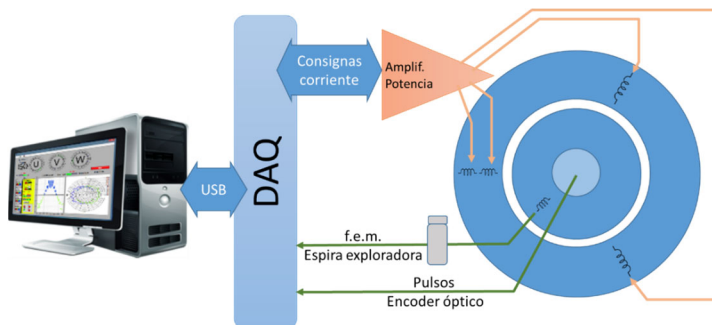


Figura 1. SmartLab Airgap incluyendo el sistema de medida del CME, el sistema alimentación ajustable de los devanados y la interfaz de usuario

3.2 Sistema de alimentación ajustable

SLA debe permitir experimentar con diferentes estructuras de devanados y con corrientes continuas y alternas ajustables. En cuanto a las diferentes estructuras de devanados, la máquina de anillos rozantes original contaba con tres fases iguales cada una con una estructura de tres ranuras por polo y fase por lo que se decidió rebobinar una de las fases (W) para

dividirla en la bobina central de paso completo (W1) y una pareja de bobinas de paso acortado (W23). Junto con las otras dos fases originales (U y V), desplazadas $\pm 120^\circ$, forman un conjunto variado que permite experimentar el CME producido por diferentes estructuras. En cuanto a la alimentación, además de la excitación en corriente continua era necesario poder ajustar también corriente alterna, pero no a la frecuencia industrial fija de 50 Hz ya que, en ese caso, los cambios son muy rápidos y no es posible seguirlos visualmente. Para permitir que el usuario pudiera apreciar el efecto de la corriente alterna senoidal se decidió utilizar frecuencia ajustable en un rango de muy bajo de 0,05 a 0,2 Hz que permitiera al usuario apreciar los detalles de la evolución temporal de la corriente y del CME

3.3.3 Interfaz de usuario, medida y operación

La interfaz de usuario se dividió en dos partes principales: la consola de control de corrientes de devanado (CCCD) y la representación ‘en vivo’ del CME (RVCME). La CCCD cuenta con un selector para alimentación continua o alterna: en modo corriente continua el usuario puede ajustar individualmente la corriente de cada uno de los devanados mientras que en modo corriente alterna puede ajustar la amplitud y la frecuencia, así como el devanado (si es monofásica) o la secuencia de fases (si es trifásica). La RVCME está dividida en dos partes para la representación del CME en coordenadas cartesianas (la más habitual en libros de texto) y polares (directamente relacionable con la estructura cilíndrica del entrehierro) utilizando en ambas representaciones el mismo código de colores para favorecer la correlación entre ambas. Con diferencia, la característica más sobresaliente de la RVCME es la capacidad de proporcionar, mediante la secuencia visual de estados del CME, una descripción claramente identificable del campo fijo, pulsante o giratorio del entrehierro que se pueda comparar con la excitación utilizada (corriente continua o alterna mono/trifásica).

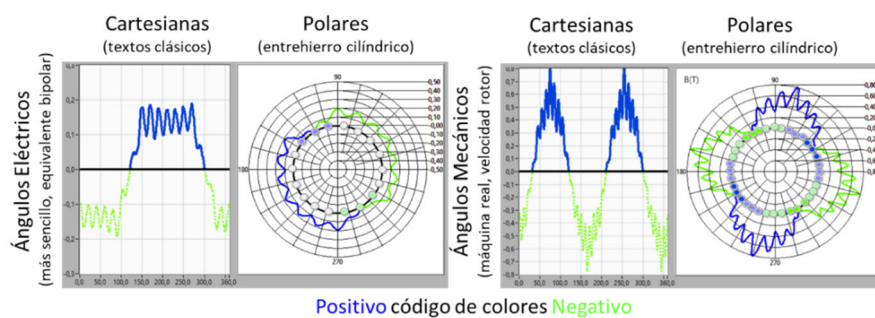


Figura 2. Representación del CME en coord. cartesianas y polares y en ángulos eléctricos y mecánicos

3.4 Guía de experimentación

El diseño del aprendizaje a seguir por los usuarios de SLA se basa en una secuencia que facilita la comprensión e integración gradual de las complejas interrelaciones entre estructura del devanado y su excitación y la amplitud, forma de onda y orientación del CME. La secuencia se resume en la figura 3 y guía al usuario facilitándole establecer esas interrelaciones

para corriente continua, alterna monofásica y alterna trifásica y especialmente en este último caso en el que la RVCME muestra el giro del CME con una velocidad que se asocia directamente a la frecuencia de las corrientes y en la que se puede comprobar cómo la distribución real del campo en ángulos mecánicos gira a una velocidad mitad de la correspondiente a la representación en ángulos eléctricos (iSEE, 2014).

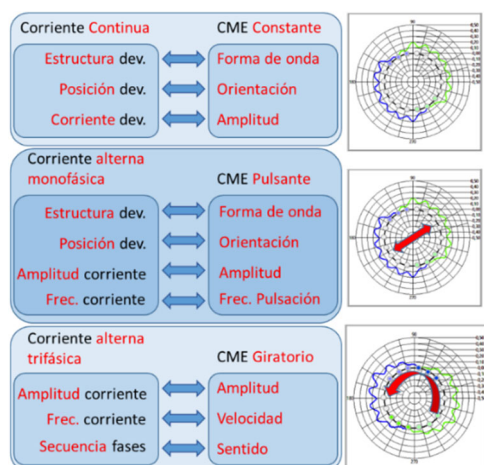


Figura 3. Secuencia de aprendizaje utilizando SLA y sucesivamente alimentación en continua, alterna monofásica y alterna trifásica

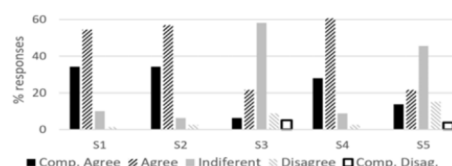


Figura 4. Encuesta de satisfacción con el uso de Smartlab-Airgap. S1: utilidad para el aprendizaje de máquinas eléctricas, S2: ayuda para comprender conceptos complejos, S3: utilidad para desarrollo profesional, S4: adecuación medios – resultados de aprendizaje y S5: mejora de la motivación hacia la asignatura.

4. Resultados

La introducción de SLA en 2015 en la docencia de las asignaturas de máquinas eléctricas ha tenido un impacto claro en los resultados de la asignatura. En particular, en el examen de opción múltiple de la segunda parte de la asignatura, relacionada con máquinas eléctricas, según la comparación de los años 2014, 2015 y 2016 (figura 5).

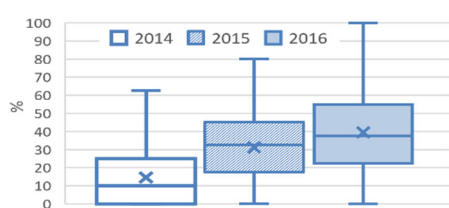


Figura 5. Distribución calificaciones examen teoría de máquinas rotativas

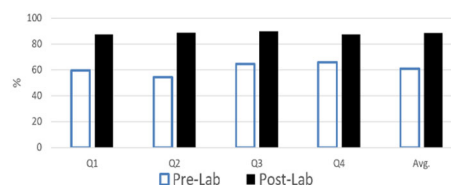


Figura 6. Resultados de las pruebas pre- y post-sesión de formación con SLA. Mayo 2015.

La incidencia de la introducción de SLA también se ha analizado en base a pruebas cortas previas y posteriores a la utilización de SLA en la propia sesión de prácticas (figura 6) y mediante una encuesta de opinión al finalizar la sesión de prácticas (figura 4) obteniendo resultados muy satisfactorios en ambos casos.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado una herramienta, SmartLab Airgap, orientada a facilitar el aprendizaje en aspectos básicos del funcionamiento de máquinas eléctricas que, tradicionalmente, se reconocen como dificultosos por su nivel de abstracción y por la falta de correlación con representaciones visuales descriptivas. La introducción de esta herramienta como herramienta complementaria de aprendizaje a dado lugar a una mejora de las calificaciones acompañada de una buena opinión por parte de los usuarios.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado con el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) en el marco de Proyectos I+D+i - Retos Investigación 2018, ref. RTI2018-102175-B-I00 (MCIU/AEI/FEDER, UE).

Referencias

- Bentz, S. (1995). Integration of basic electromagnetism and engineering technology. *Frontiers in Education Conference, 1995. Proceedings., 1995 (Vol. 2, pp. 4a5.4–4a5.7 vol.2).*
- Bujanovic, T., & Ghosh, P. (2014). Laboratory experiments for enhanced learning of electromechanical devices. *American Society for Engineering Education (ASEE Zone 1), 2014 Zone 1 Conference of the (pp. 1–5).* doi:10.1109/ASEEZone1.2014.6820669
- Cañizares, C. A., & Faur, Z. T. (1997). Advantages and disadvantages of using various computer tools in electrical engineering courses. *Education, IEEE Transactions on, 40(3), 166–171.*
- Chapman, S. J. (2011). *Electric Machinery Fundamentals (5th ed.).* McGraw-Hill.
- Dal, M. (2013). Teaching Electric Drives Control Course: Incorporation of Active Learning Into the Classroom. *Education, IEEE Transactions on, 56(4), 459–469.*
- Duran, M. J., Barrero, F., Pozo-Ruz, A., Guzman, F., Fernandez, J., & Guzman, H. (2013). Understanding Power Electronics and Electrical Machines in Multidisciplinary Wind Energy Conversion System Courses. *Education, IEEE Transactions on, 56(2), 174–182.*
- Durovic, S. (2013). Development of a simple interactive laboratory exercise for teaching the principles of velocity and position estimation. *International Journal of Electrical Engineering Education, 50(3), 256–267.*
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery (6th ed.).* McGraw-Hill International Edition, New York.
- Gruber, S. (1984). A computer-interfaced electrical machines laboratory. *Education, IEEE Transactions on, 27(2), 73–79.*
- Gruber, S., & Prole, A. (1979). Measurement of Rotating Air Gap Magnetic Fields-An Undergraduate Laboratory Experiment. *Education, IEEE Transactions on, 22(3), 143–145.*

- Hassell, T. J., Weaver, W. W., & Oliveira, A. (2013). Using Matlab's Simscape modeling environment as a simulation tool in power electronics and electrical machines courses. *Frontiers in Education Conference, 2013 IEEE* (pp. 477–483). doi:10.1109/FIE.2013.6684870
- Heath, W., Onel, O., Green, P., Lennox, B., Gai, Z., He, Z., & Rodriguez Liñan, M. (2013). Developing a student-focused undergraduate laboratory. *International Journal of Electrical Engineering Education, 50*(3), 268–278.
- iSEE. (2014). SmartLab Airgap demo videoclip. Retrieved from http://personales.upv.es/jmroman/SLA/smartlab_airgap.avi
- Jiménez-Martínez, J. M., Soto, F., Jodar, E. de, Villarejo, J. A., & Roca-Dorda, J. (2005). A new approach for teaching power electronics converter experiments. *Education, IEEE Transactions on, 48*(3), 513–519.
- Martinez-Roman, J., Perez-Cruz, J., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., Roger-Folch, J., Riera-Guasp, M., & Sapena-Bano, A. (2014). Electrical Machines Laminations Magnetic Properties: A Virtual Instrument Laboratory. *Education, IEEE Transactions on, PP*(99), 1–1.
- Nasar, S. A., & Unnewehr, L. E. (1983). *Electromechanics and electric mach.* (2nded.). Wiley.
- Ojaghi, M., Faiz, J., Kazemi, M., & Rezaei, M. (2012). Performance Analysis of Saturated Induction Motors by Virtual Tests. *Education, IEEE Transactions on, 55*(3), 370–377.
- Pulijala, V., Akula, A. R., & Syed, A. (2013). A Web-Based Virtual Laboratory for Electromagnetic Theory. *Technology for Education (T4E), 2013 IEEE Fifth International Conference on* (pp. 13–18). doi:10.1109/T4E.2013.12
- Say, M. G. (1983). *Alternating current machines* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Sellschopp, F., & Arjona, L. (2004). An automated system for frequency response analysis with application to an undergraduate laboratory of electrical machines. *Education, IEEE Transactions on, 47*(1), 57–64.
- Smolleck, H. A. (1988). A simple revolving-field demonstrator for the personal computer. *Education, IEEE Transactions on, 31*(2), 119–123. doi:10.1109/13.2295
- Syal, A., Gaurav, K., & Moger, T. (2012). Virtual laboratory platform for enhancing undergraduate level induction motor course using MATLAB/Simulink. *Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA), 2012 IEEE Internatl. Conf. on* (pp. 1–6).
- Ueda, Y., Ohta, H., & Uenosono, C. (1987). Instrument for real-time measurements of airgap flux distribution of on-load synchr. generators. *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Educ. - Reviews, IEE Proceedings A, 134*(4), 331–334.
- Williams, J. M., Cale, J. L., Benavides, N. D., Wooldridge, J. D., Koenig, A. C., Tichenor, J. L., & Pekarek, S. D. (2004). Versatile hardware and software tools for educating students in power electronics. *Education, IEEE Transactions on, 47*(4), 436–445.