

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DUAL PARA EMULACIÓN DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN BASADOS EN ENERGÍAS RENOVABLES

S.A. Verne, P.E. Battaiotto, C. Mancini, J. Anderson, P. Puleston y M.I.Valla

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales – LEICI
Dpto. de Electrotecnia - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata/CONICET/CIC-PBA
Calle 48 y 116 s/n, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
santiago.verne@ing.unlp.edu.ar

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de estrategias de control sobre los sistemas de generación renovable es un tópico de gran interés. La validación de las mismas mediante plataformas de ensayo experimental es una instancia necesaria cuyos resultados permiten mejorar la comprensión y el modelado de los fenómenos bajo estudio. Sin embargo, disponer de los artefactos de conversión mecánica, en conjunto con los recursos energéticos correspondientes (viento, agua, etc.), resulta impráctico pudiendo citarse algunos de sus inconvenientes y limitaciones:

- La característica en el eje impulsor depende de la condición climática o del recurso, que no es reproducible en forma sistemática a voluntad del operador.
- Son artefactos complejos cuya instalación impone condicionamientos edilicios y de infraestructura.
- No son flexibles en cuanto a sus características constructivas, limitando el universo de casos de análisis.
- No permite reproducir comportamientos mecánicos propios de los sistemas reales como inercia, fenómenos elásticos, entre otros.

Teniendo esto en cuenta, y que en una gran parte de los sistemas de conversión renovable, la potencia colectada es convertida y direccionada a un eje motriz rotativo, resulta conveniente disponer de un eje “de laboratorio” capaz de emular las características del eje real, permitiendo recrear en forma sistemática y repetible una gran variedad de tipos y escenarios de conversión. Este concepto no es nuevo, y se implementa utilizando una máquina eléctrica operando como motor y alimentada desde la red eléctrica en forma controlada [1]. Habitualmente, el uso de los emuladores se orienta hacia la reproducción de la característica del eje impulsor de turbinas eólicas con el propósito de ensayar algoritmos de control sobre otra máquina acoplada a dicho eje, actuando como generador eléctrico en diversos contextos de generación renovable y redes eléctricas [2]. Sin embargo, un enfoque dual puede hacerse en el eje de carga, esto es, conceptualizando la máquina de carga en forma genérica de manera que en el eje de dicha máquina pudieran emularse cargas programables. En el contexto de generación renovable esto reviste interés pues permite analizar el comportamiento de cada uno de los terminales bajo operación estática y/o disturbios dinámicos en el otro terminal [3].

Con respecto a la implementación de los emuladores, la máquina más utilizada es el motor de corriente continua (MCC) por su sencillez de control de par y velocidad [4]. Sin embargo, el motor de inducción con rotor en jaula de ardilla controlado mediante estrategias de campo orientado (FOC) posee características similares al MCC en términos de controlabilidad y precisión, con un menor tamaño y bajo mantenimiento [5]. En [6] se presenta un emulador con máquina impulsora de inducción mediante algoritmo de control FOC para motor de inducción, en forma similar a [7] donde se desarrolla un algoritmo FOC para un impulsor

basado en una máquina sincrónica de imanes permanentes. En ambos trabajos la estrategia FOC se implementó utilizando electrónica de potencia ad-hoc, lo cual complejiza el diseño y dificulta la puesta en marcha del sistema en su conjunto.

Otro punto a considerar son los requerimientos de alimentación del impulsor y la gestión de la energía producida por la máquina de carga. En [7] dicha energía es disipada en bancos de resistores, lo que se traduce en la producción de grandes cantidades de calor que es preciso evacuar. Esta situación puede ser altamente inconveniente en casos en que las dimensiones del sitio de instalación son reducidas. Por otra parte, en [8] la energía generada es reinyectada a la red a través de un inversor, pero esto requiere un diseño específico del mismo, de la red de acoplamiento y de la electrónica necesaria para el sincronismo con la red eléctrica.

En este trabajo se presentan resultados preliminares de un banco de prueba para la emulación dual de un par motriz y un par resistente sobre un eje solidario. El sistema tiene por objetivo representar puntos de funcionamiento programables en el plano par-velocidad de acuerdo con modelos preestablecidos en donde un eje actúa como fuente de energía (convertor primario) y el otro como sumidero (carga mecánica). Ambos puertos mecánicos son implementados a través de dos máquinas de inducción jaula de ardilla alimentadas a partir de variadores electrónicos (VFD) de uso industrial. La conexión compartida del bus de tensión continua de ambos variadores disminuye al mínimo el consumo de energía y por lo tanto los requerimientos para la instalación del sistema. A su vez, elimina la producción de grandes cantidades de calor, la instalación de bancos resistivos y de electrónica específica para la reinyección de potencia a la red.

Se describe la estructura del sistema y su funcionalidad para el uso en el contexto de investigación y docencia. Asimismo, se presentan sus potencialidades para el estudio de estrategias de control de generación y emulación de cargas mecánicas en el contexto de las fuentes alternativas de energía.

II. ESTRUCTURA DEL SISTEMA

En la Figura 1 se muestra la distribución de componentes del emulador. El mismo consiste en dos máquinas de inducción con rotor de jaula de ardilla acopladas por el eje funcionando una de ellas como impulsor (*MI*) y la otra como carga (*MC*). Ambas son alimentadas a través de sendos variadores de velocidad comerciales. El variador que alimenta a la máquina impulsora (*MI*) se alimenta desde la red eléctrica trifásica, mientras el variador que alimenta a la máquina de carga (*MC*) se acopla al primero desde el bus de tensión continua conformando una conexión de bus común. Esto permite retornar parte de la potencia generada para ser reutilizada por el impulsor con las siguientes ventajas:

- Reducir el consumo energético del equipo y la dimensión del cableado de alimentación.
- Evitar la generación de grandes cantidades de calor.
- Evitar un inversor de reinyección conectado a línea para reciclar la energía.

En cuanto a las variables medidas, la velocidad del eje se realiza mediante un encoder de 1000 pulsos por vuelta marca HEDSS modelo ISC5210-001G. La señal de velocidad es enviada a ambos variadores y a los sistemas de comando de los mismos, los cuales consisten en dos plataformas de cómputo independientes basadas en *hardware* DSP. En una de

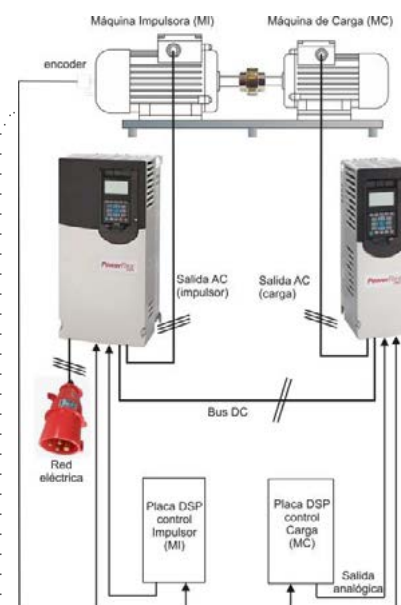


Figura 1. Componentes de la estructura de emulación.

ellas se ejecuta el algoritmo de emulación de la fuerza motriz primaria mientras que en la segunda se hace lo propio con el algoritmo de emulación de la carga.

Los variadores utilizados son Marca Allen-Bradley modelo PowerFlex 755 con corrientes de salida máximas de 30A y 22A para las máquinas impulsora (VI) y de carga (VC) respectivamente. Ambos variadores poseen opción por dos algoritmos de control para la máquina: V/f constante y control de vector de flujo. La aplicación de cada una guarda relación con la aplicación específica, siendo la alternativa por control de flujo la que presenta mayor flexibilidad de configuración y mejor desempeño a nivel de control de la máquina. En modo de control de flujo, el variador es capaz de controlar la velocidad o el par en el eje, siendo la señal de comando recibida por múltiples vías, por ejemplo, desde un puerto analógico de entrada. Como se muestra en la Figura 1, las señales en cuestión son generadas desde sendos convertidores digitales-analógicos comandados a su vez por los DSP.

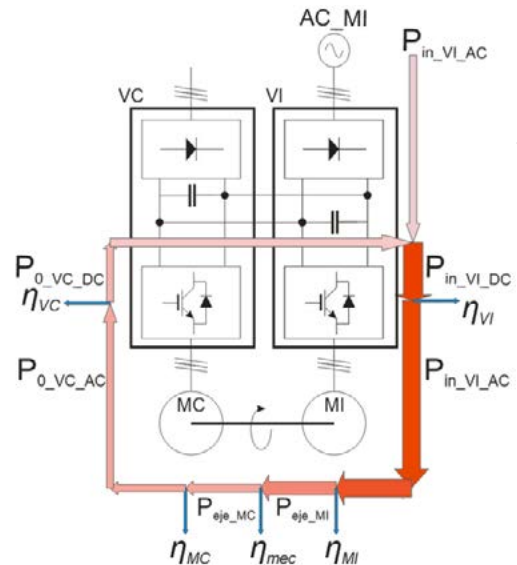


Figura 2. Diagrama de recirculación de potencia.

Las máquinas impulsora y de carga son marca WEG de propósito general tipo W22-IE1-132M-*cast iron* (15HP) y W21-IE1-132M-aluminio (10HP), respectivamente. Ambas poseen dos pares de polos, siendo la velocidad nominal aproximada de ambas 1500RPM. El dimensionamiento de potencia en exceso de la máquina impulsora permite disponer dinámicamente de valores en el par impulsor apreciablemente superiores al par de carga. Esto es esencialmente necesario en emulación de turbinas eólicas e hidráulicas que operan a velocidad variable.

La Figura 2 muestra un diagrama de recirculación de potencia en el sistema. Parte de la energía consumida por la MI es regenerada por la MC ($P_{0_VC_DC}$) vía el acoplamiento mecánico y hacia el bus de continua a través del VC, disminuyendo los requerimientos de potencia de alimentación desde la red de suministro. A su vez, las pérdidas en cada etapa de conversión reducen la potencia reutilizable.

Teniendo en cuenta el rendimiento de la MC, la potencia eléctrica máxima de salida de ésta resulta:

$$P_{0_VC_AC} = P_{eje_MC} \eta_{MC} = 10HP \cdot 746 \frac{W}{HP} \cdot 0,86 = 7,46kW \cdot 0,86 = 6,4kW$$

La potencia generada por el variador de carga en el bus DC, teniendo en cuenta su rendimiento es:

$$P_{0_VC_DC} = P_{0_VC_AC} \cdot \eta_{VC} = 6,4kW \cdot 0,975 = 6,21kW$$

donde: η_{VC} : rendimiento del variador de carga.

η_{MC} : rendimiento de la máquina de carga.

En estas condiciones, si despreciamos las pérdidas mecánicas ($\eta_{mec}=1$), la potencia de entrada al eje de la MI es igual a potencia de salida del eje de la MC, y la potencia eléctrica necesaria a la entrada de la MI resulta:

$$P_{in_VI_AC} = \frac{P_{eje_MI}}{\eta_{MI}} = \frac{P_{eje_MC}}{\eta_{MI}} = \frac{7,46kW}{0,88} = 8,48kW$$

Y la potencia de entrada al variador impulsor es:

$$P_{in_VI_DC} = \frac{P_{VI_AC_out}}{\eta_{VI}} = \frac{8,48kW}{0,975} = 8,7kW$$

donde: η_{MI} : rendimiento de la máquina de impulsión.

η_{VI} : rendimiento del variador de impulsión.

Por lo tanto, la potencia de entrada neta desde la red eléctrica en estas condiciones puede estimarse en:

$$P_{in_VI_AC} - P_{0_VC-DC} = 8,73kW - 6,21kW = 2,52kW$$

Esto significa una reducción del 70% del consumo de potencia si se compara con el caso en que la potencia generada por la MC se disipara en un banco resistivo en forma de calor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra el arreglo experimental para la estructura de doble emulación. Un bastidor común sostiene ambas máquinas a lo largo de cuyo eje se acopla el encoder rotativo. El gabinete de tableros posee dos bandejas portaelementos. Sobre una de ellas se encuentran los variadores y sobre la restante los elementos de maniobra y protección.



Figura 3. Componentes de la estructura de emulación.

Ambas máquinas pueden ser configuradas para ser controladas en velocidad o par. En un lazo de control de velocidad, la señal de referencia ingresa por un puerto analógico proveniente de un convertidor D/A controlado por DSP mientras la señal del encoder ingresa como realimentación al propio variador, el cual ajusta la corriente de la máquina para lograr la velocidad deseada. Por otra parte, para realizar un lazo cerrado de par no se dispone de un sensor. En su lugar, se utiliza el modo *Torque Control* en el cual, un observador interno de la máquina es ajustado automáticamente en base a la carga de sus datos de chapa. Dicho observador proporciona una estimación del par electromagnético, el cual se compara con la señal de referencia para ajustar las corrientes de la máquina. En este caso, la referencia de par se ingresa a través de una de sus entradas analógicas como una fracción del par nominal (0-100%).

a) Verificación del consumo de energía

El sistema se configura de la siguiente manera:

- La máquina de carga (MC) en control de par con la referencia controlada a través del DSP2. DSP2 toma la medición de velocidad y la multiplica por una constante a fin de que a velocidad nominal (1465RPM) el par resistente es 100% de su par nominal (T_{nMC})
- La máquina de impulsión (MI) en control de velocidad con la referencia comandada a través del DSP1, variable por el operador de a pasos discretos.

De esta forma la MC ejerce un par resistente proporcional a la velocidad de rotación, inyectando potencia al bus DC. La MI, por su parte, actúa como motor tomando potencia de la salida de VI, y por consiguiente, del bus DC.

Se realizaron mediciones de potencia para distintos valores de velocidad y par resistente entre 150 y 1465 RPM (Figura 4). Por un lado se observa que a bajas velocidades las pérdidas en ambas máquinas prevalecen por sobre la potencia mecánica, perdiendo la linealidad de la potencia con la velocidad, aunque a la velocidad nominal de MC (1465RPM) el consumo desde la red (2309W) se asemeja al valor estimado (2520W).

b) Verificación de los valores de par

En idénticas condiciones se realizaron medidas para explorar la exactitud del valor de referencia de par especificado en unidades porcentuales del par nominal. Para ello se tomaron medidas de potencia en los puertos de corriente alterna de VI y VC. En función de éstos se determinaron los valores del par de salida de MI y de entrada de MC. Esto se hizo teniendo en cuenta los rendimientos nominales de VI, VC, MI y MC. La Figura 5 muestra una coincidencia aceptable entre valor de referencia y valor calculado (del orden de 5% para velocidades mayores a 300RPM).

También se compararon los valores calculados de par en MI y MC de forma similar, obteniéndose los resultados de la Figura 6. Se puede apreciar un error relativo entre ambas mediciones menor a 10% en casi todo el rango de velocidades considerado.

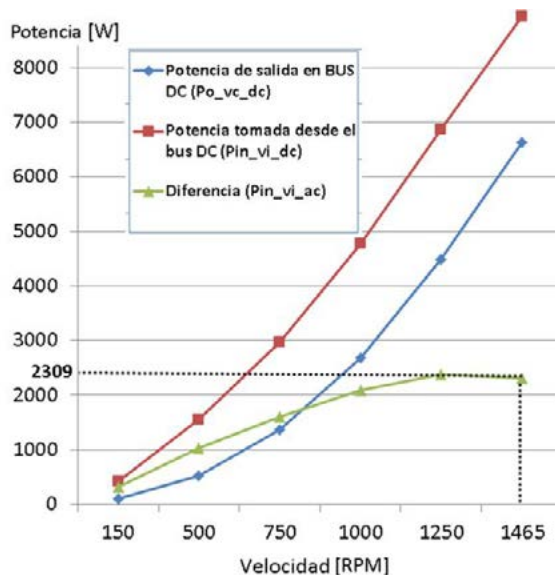


Figura 4. Aportes de potencia en el bus DC debidos a ambos variadores. Diferencia (potencia consumida desde la red de suministro)

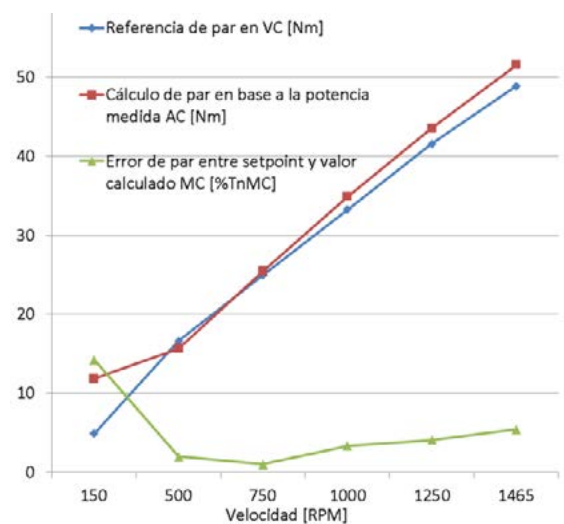


Figura 5. Valor de referencia de par de entrada (azul), valor calculado de par utilizando medidas de potencia y velocidad (rojo) y error entre ambas relativo al valor nominal de par de MC.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la implementación de una estructura de emulación de dos puertos mecánicos. La misma es capaz de representar las características par-velocidad de dos sistemas acoplados por un eje, un sistema impulsor y un sistema de carga. Ambos ejes, en el contexto de generación renovable, corresponderían al sistema de conversión de la fuente (energía del viento, hidráulica, marina) y de la carga (un generador eléctrico, un sistema de bombeo, etc).

El banco de emulación es capaz de combinar puntos de equilibrio de las dos máquinas eléctricas que lo componen para distintas combinaciones de par y velocidad haciendo uso de la recirculación de potencia sin bancos resistivos, sin generación de calor y minimizando el consumo de energía. Configurando adecuadamente ambos variadores es posible hacer trabajar a ambas máquinas en un plano par-velocidad dentro de los valores límite de sus componentes. Los ensayos muestran una coincidencia aceptable entre los valores de par de referencia y su valor estimado a partir del consumo de potencia del conjunto. Esto permite utilizar los valores de par de referencia ingresados al/los variador/es como una estimación razonable del par en el eje, que en conjunto con la medida de velocidad constituye una base firme para la producción de datos experimentales. El uso de variadores comerciales, integrados a electrónica de diseño propio permite un ambiente seguro y eficaz para el análisis y desarrollo de estrategias de control para sistemas de conversión de energía. Como trabajo futuro se prevé el desarrollo de software para la implementación de curvas características de par-velocidad en la máquina impulsora y de algoritmos de control para la máquina de carga.

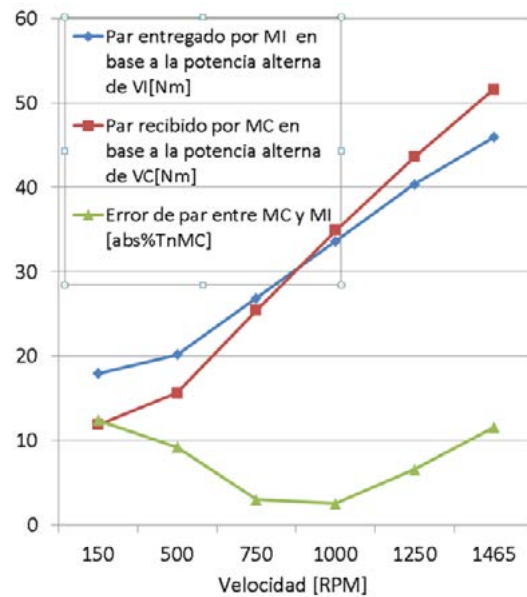


Figura 6. Valor de referencia de par de entrada (azul), valor calculado de par utilizando medidas de potencia y velocidad (rojo) y error entre ambas relativo al valor nominal de par de MC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a CONICET, CIC, UNLP y ANPCyT. También agradecemos a los Ings. Juan I. Talpone y Pablo Baño, sin el apoyo de los cuales, este trabajo no hubiese sido posible.

REFERENCIAS

- [1] P.E. Battaiotto, R.J. Mantz, P.F. Puleston, "A Wind Turbine Emulator Based on a Dual DSP Processor System", IFAC Proc. Volumes, Vol. 28, No. 19, pp. 249-254, 1995.
- [2] Boudjemai Hamza et al., "Design and Experimental Validation for a Small Wind Turbine Emulator", 2nd Int. Conf. on Electron. and Electrical Engineering, Algeria, 2020.
- [3] L. Peretti, V. Särkimäki and J. Faber, "A wind turbine emulator for generator control algorithm development", 2013 IEEE Int. Conf. on Ind. Tech. (ICIT), Cape Town, S. Africa, pp. 228-233, 2013.
- [4] B. Rabelo, W. Hofmann and M. Gluck, "Emulation of the static and dynamic behaviour of a wind-turbine with a DC-machine drive," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, pp. 2107-2112 Vol.3, 2004.
- [5] Sengamalai, U. et al. "Three Phase Induction Motor Drive: A Systematic Review on Dynamic Modeling, Parameter Estimation, and Control Schemes", Energies, Vol.15, 2022.

- [6] Benaouinate, L. et al, "Emulation of a Wind Turbine using Induction Motor Driven by Field Oriented Control", Int. J. of Energy and Power Engineering, Vol.12, No. 3, 2018.
- [7] G. Gokkus and A.A. Kulaksiz, "Design and Implementation of a Wind Turbine Emulator Using an Induction Motor and Direct Current Machine", Int. J. of Renewable Energy Research, Vol.10, No.3, pp. 1426-1438, 2020.
- [8] M. Chinchilla, S. Arnaltes and J. L. Rodriguez-Amenedo, "Laboratory set-up for wind turbine emulation," 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04., Hammamet, Tunisia, pp. 553-557, Vol. 1, 2004.