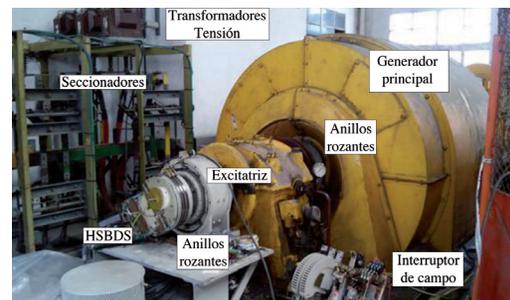


Nuevo "sistema de desexcitación rápida para máquinas síncronas con excitación brushless" (HSBDS) en un generador de 15 MVA

NEW "HIGH SPEED DE-EXCITATION SYSTEM FOR BRUSHLESS SYNCRHONOUS MACHINES" IN A 15 MVA GENERATOR



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7136> | Recibido: 08/04/2014 • Aceptado: 09/07/2014

Emilio Rebollo-López¹, Francisco Rafael Blázquez-Delgado¹, Carlos Antonio Platero-Gaona¹, Francisco Blázquez-García¹, José Ángel Martínez-Rueda², Iñaki Aretxederra-Galarza²

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. carlosantonio.platero@upm.es

² ALSTOM Hydro España S.L. Trapagarán, Vizcaya

ABSTRACT

• Synchronous machines with brushless excitation have the disadvantage that the field winding is not accessible for the de-excitation. This means that, despite the proper operation of the protection system, the slow de-excitation time constant may produce severe damage in the event of an internal short circuit.

In this paper the test in a 15 MVA generator of a novel high-speed de-excitation system for brushless synchronous machines is presented.

The de-excitation is achieved by inserting a resistance in the field circuit, obtaining a dynamic response similar to that archived in machines with static excitation.

The main novelty of this paper is the use of this method in a industrial size machine. This system has been validated through experimental tests on a 15 MVA generator, with satisfactory results.

• **Keywords:** Synchronous generator excitation, AC generator excitation, Brushless rotating machines, Synchronous machines, Generator protection.

RESUMEN

Las máquinas síncronas con excitación indirecta sin escobillas (tipo brushless) presentan el problema de que no es posible acceder al devanado de campo para desexcitar la máquina. Esto provoca que, a pesar de la operación correcta del sistema de protecciones, la lenta constante de tiempo de desexcitación pueda producir graves daños en el caso de un cortocircuito interno.

En este documento se presentan las pruebas de un novedoso sistema de desexcitación rápida para este tipo de máquinas en un generador de 15 MVA. La desexcitación se consigue introduciendo una resistencia en el circuito de campo, obteniendo una respuesta dinámica similar a la que se consigue en las máquinas con excitación estática.

La principal aportación de este estudio es la adaptación del método a máquinas de tamaño industrial y las diversas pruebas realizadas en un generador de 15 MVA validando el correcto funcionamiento de este sistema.

Palabras clave: Máquina síncrona, Generación energía eléctrica, Sistema de excitación, Excitación Brushless, Protecciones de generador.

1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas síncronas de gran potencia utilizadas como generadores en las centrales de producción eléctrica se encuentran protegidas por relés de protección [1] con el objetivo de minimizar los daños ante cualquier posible perturbación como puede ser cortocircuitos, sobrecargas, y, de manera general, cualquier situación que sea susceptible de dañar a la máquina [2].

Dichas protecciones actúan sobre el interruptor de grupo desconectando el generador de la red y, simultáneamente, actúan sobre el interruptor de campo. Sin embargo, una posible falta antes del interruptor de grupo [3] hace imposible despejar el cortocircuito, quedando como única opción abrir el interruptor de excitación.

Dependiendo de la configuración del sistema de excitación el incidente puede tener diferente gravedad. En el caso de un sistema de excitación estático el acceso al rotor del generador, mediante escobillas, posibilita la inserción de una resistencia de descarga que disipa la energía almacenada en el mismo, y por tanto, la máquina se desmagnetiza rápidamente [4], ha-

ciéndose nula rápidamente la corriente de excitación. En el caso de que la instalación cuente con un sistema de excitación sin escobillas (conocido como "Brushless") sólo se puede actuar en el interruptor de campo que alimenta el devanado de excitación de la máquina excitatriz, y no se puede actuar en el devanado de excitación de la máquina síncrona principal. Pese a que el sistema de protecciones actúe correctamente y dispare el interruptor de campo de la excitatriz, la corriente que circula por el rotor del generador principal se cierra por los diodos rotativos, que funcionan en modo rueda libre. La corriente de excitación tardará varios segundos en hacerse cero, produciéndose importantes daños en el estator del generador principal en caso de defecto interno.

Existe una necesidad real de actuar en el circuito rotórico aun en el caso de las excitaciones sin escobillas con el objetivo de limitar el tiempo en que el generador permanece con corriente de excitación tras el disparo del interruptor de campo de la excitatriz. El problema que se da ante un disparo de la máquina principal, o ante una situación que implique una necesidad de una rápida desexcitación del generador principal, se ha intentado resolver por las principales empresas fabricantes de equipos eléctricos. El trabajo presentado en este artículo continúa la línea de investigación en máquinas con excitación brushless iniciada por *Westinghouse Electric* [5]. Posteriormente, también existen referencias al respecto por parte de *Schneider*, *Siemens* y *ABB* [6]-[9]. Todos estos sistemas tienen en común la existencia de un equipo externo al generador para realizar la desexcitación.

Según [10]-[11] donde los autores presentan un novedoso sistema denominado "HSBDS" (del inglés *High Speed Brushless De-Excitation System*) que permite disipar la energía almacenada en el rotor en una resistencia de descarga mediante un circuito de control rotativo que no necesita señales externas al rotor. En el mismo se realizó un desarrollo teórico y se ensayó el método en una pequeña máquina de laboratorio de

5 kVA. Dicha máquina de laboratorio puede no ser representativa respecto a un generador convencional dado que existen grandes diferencias físicas entre ambas y entre las magnitudes de tensión corriente que se manejan.

En este artículo se continúa y amplía el trabajo anteriormente realizado [11], ensayando el HSBDS en un generador síncrono de 15MVA, de tamaño comercial. Para ello se han realizado las modificaciones pertinentes en cuanto a la implementación del sistema en una máquina de alta potencia. Del mismo modo se ha desarrollado una bancada de ensayos a tamaño real que posibilita la obtención de registros realizando cambios en todos los componentes del sistema de manera que se puede optimizar el sistema en su conjunto.

La estructura del trabajo que se presenta es la siguiente: en primer lugar se explica el principio de operación del HSBDS y su comparativa con un sistema de excitación brushless convencional. En la sección III se describe la plataforma de ensayos implementada, posteriormente en la sección IV se incluyen los resultados más significativos de los ensayos realizados en la máquina de tamaño industrial. Por último, en la sección V se finaliza el artículo con las conclusiones del mismo.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL HSBDS

Los sistemas de excitación brushless para máquinas síncronas presentan la importante ventaja de que el regulador maneja una potencia muy inferior respecto a los sistemas con excitación estática. Además, se eliminan las escobillas, por lo que reduce notablemente el mantenimiento [12]. No obstante, en el sector de la generación eléctrica hay algunas compañías que prefieren no instalar generadores con excitación brushless puesto que, como ya se ha expuesto anteriormente, una falta antes del interruptor de grupo produce grandes daños pese a disparar el interruptor de campo.

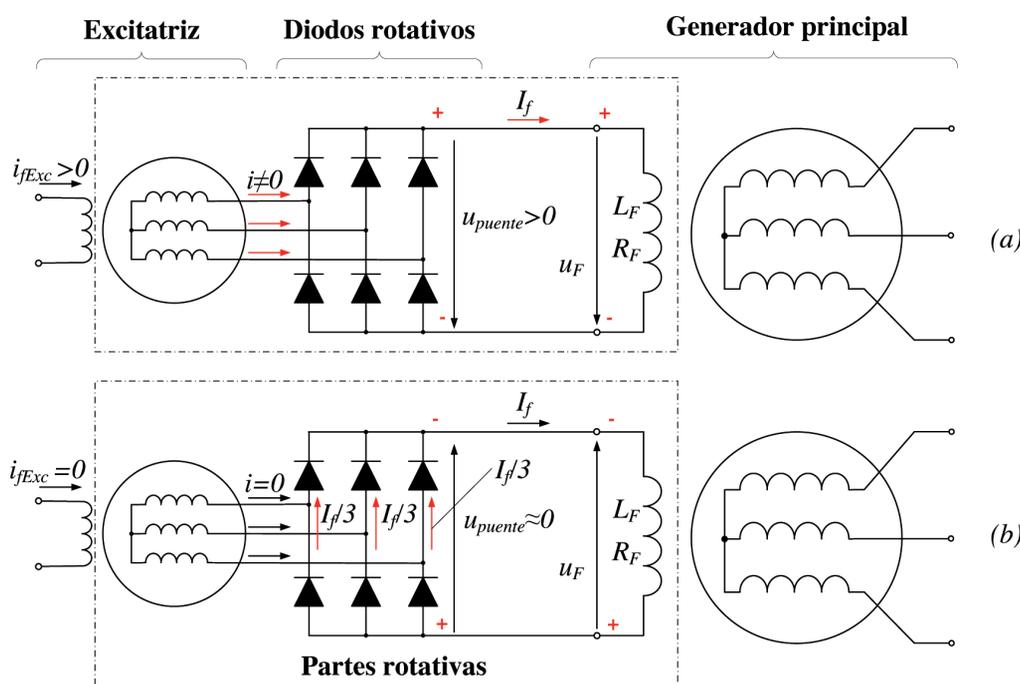


Fig. 1: Sistema de excitación sin escobillas convencional. (a) Excitación convencional. (b) Desexcitación

El proceso de desexcitación en un gran generador con excitación brushless se puede extender típicamente de 5 a 20 segundos, incluso más, por lo que los daños en el estator se mantienen ese tiempo sin posibilidad de tomar medidas externas al rotor para minimizarlos.

• *Sistema excitación brushless convencional en operación normal.*

El sistema de excitación brushless se basa en acoplar dos máquinas síncronas en el mismo eje: la máquina principal y la excitatriz. Se alimenta el devanado de campo o inductor de la excitatriz en corriente continua y en el inducido, que está situado en el rotor, se induce un sistema de tensiones equilibrado de corriente alterna. Posteriormente, las tensiones son rectificadas mediante un puente de diodos rotativos que alimenta el devanado de campo del generador principal. La Figura 1a muestra el sistema de excitación brushless descrito en operación normal.

• *Sistema excitación brushless convencional ante desexcitación.*

El proceso de desexcitación en este tipo de generadores se basa en disparar el interruptor de campo de la excitatriz, normalmente utilizando una resistencia de desexcitación. Tras este disparo, la tensión en el inducido de la excitatriz desciende hasta alcanzar un valor nulo. Sin embargo, la corriente en el devanado de campo del generador principal no puede cambiar de manera brusca puesto que se trata de un circuito muy inductivo (típicamente el valor puede tener una inductancia superior a 2 H). Por esta razón la corriente se cierra por los diodos ocasionando el fenómeno conocido como Rueda libre "freewheel". En la figura 1b puede verse como la corriente se cierra por los diodos, la tensión en el devanado rotórico se invierte, y la tensión en el puente de diodos pasa a ser la suma de los dos diodos en conducción, aproximadamente 1,4V.

Por tanto, la máquina se desmagnetiza prácticamente con la constante de tiempo proporcionada por la inductancia y la resistencia del devanado de campo del generador principal, ya que la tensión es prácticamente nula (1,4 V).

Este nuevo sistema de desexcitación rápida "HSBDS" para máquinas con excitación brushless se basa en la instalación de una resistencia de descarga en la parte rotativa controlada

mediante un interruptor estático de tipo semiconductor. Dicho interruptor estático se controla mediante un circuito de control que se alimenta desde el propio sistema de excitación, por lo que no se necesita la instalación de anillos rozantes ni ningún otro dispositivo externo. Del mismo modo, no se reciben señales de control desde el exterior, por lo que la máquina funciona desde el punto de vista de la regulación como una máquina con configuración Brushless, elemento diferenciador respecto de las patentes precedentes [5]-[9].

El interruptor utilizado es de tipo semiconductor, eligiendo una tecnología que tenga una adecuada tensión de bloqueo y sea capaz de cortar la corriente máxima que pueda darse en el circuito rotórico ante falta en el estator del generador. Además, debe ser capaz de cortar corrientes extraordinariamente inductivas y de funcionar sometido a fuerzas centrífugas muy elevadas.

• *HSBDS en operación convencional*

Cuando la máquina se encuentra en condiciones normales de operación, el regulador automático de tensión "AVR" alimenta al devanado de campo de la excitatriz con un valor determinado de excitación (I_{fExc}). A su vez en el inducido de la excitatriz se induce una tensión AC que es rectificada en el puente de diodos, siendo por tanto la tensión en el puente positiva ($U_{puente} > 0$), Fig 2a.

Al ser la tensión positiva a la salida de los diodos rotativos, el circuito de control dispara el semiconductor, estando este en conducción. Por tanto, el devanado de excitación de la máquina síncrona principal es alimentado (U_p) con la tensión del puente de diodos (U_{puente}). Prácticamente toda la corriente de excitación (I_f) circula por el semiconductor y sólo una pequeña corriente circula por la resistencia de descarga debida a la caída de tensión en el semiconductor. La máquina se comporta como una máquina brushless convencional.

• *HSBDS ante desexcitación*

En el caso de querer desexcitar rápidamente la máquina, bien por un cortocircuito o bien por un rechazo de carga, únicamente se puede actuar en el devanado de campo de la excitatriz, reduciendo o anulando la corriente de campo de la excitatriz (I_{fExc}).

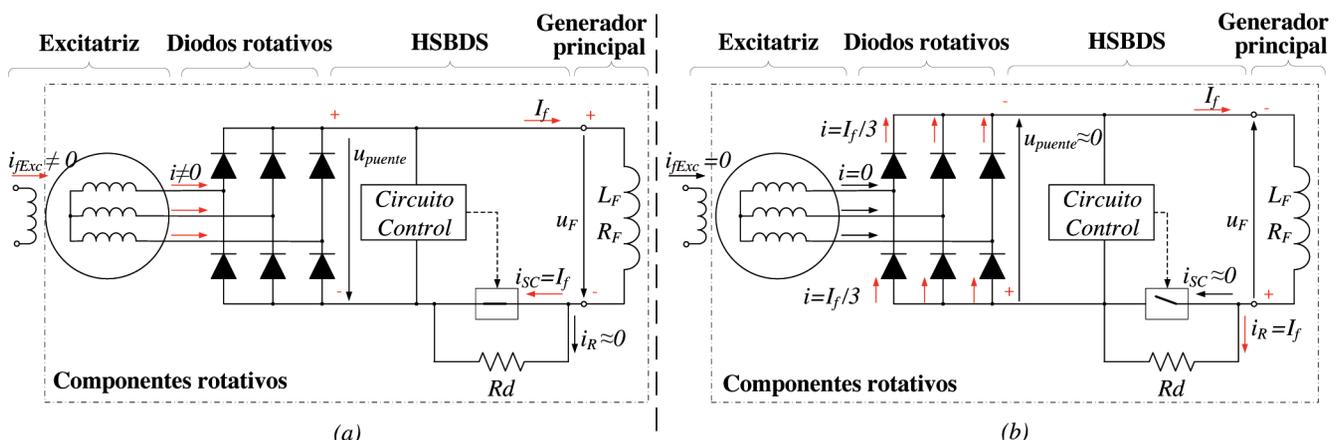


Fig. 2: Esquema del HSBDS: (a) Durante excitación convencional. (b) Durante desexcitación

Cuando se elimina la corriente del devanado de campo de la excitatriz, cae también la tensión a la salida del puente de diodos. El alto valor de la inductancia (L_f), hace que la corriente (I_f) no pueda cambiar bruscamente y circule ahora por los todos los diodos en rueda libre según se muestra en la Figura 2b.

En este caso, el circuito de control mide una tensión ligeramente negativa a la salida del puente de diodos, y deja de disparar el semiconductor, apagándose éste e insertando la resistencia de desexcitación (R_d) en serie entre el devanado de campo y el puente de diodos.

Al insertar la resistencia de descarga se reduce significativamente la constante de tiempo de desexcitación. El comportamiento es por tanto similar a la máquina síncrona con excitación estática.

Las constantes de tiempo T_{d0} y T_d , se ven reducidas al incrementar la resistencia total del circuito del inductor ($R_f + R_d$), de la siguiente manera:

$$T_{d0}' = \frac{L_f}{R_f} \Rightarrow T_{d0}' = \frac{L_f}{R_f + R_d}$$

$$T_d' = \frac{L_f - \frac{M_f^2}{L_d}}{R_f} \Rightarrow T_d' = \frac{L_f - \frac{M_f^2}{L_d}}{R_f + R_d}$$

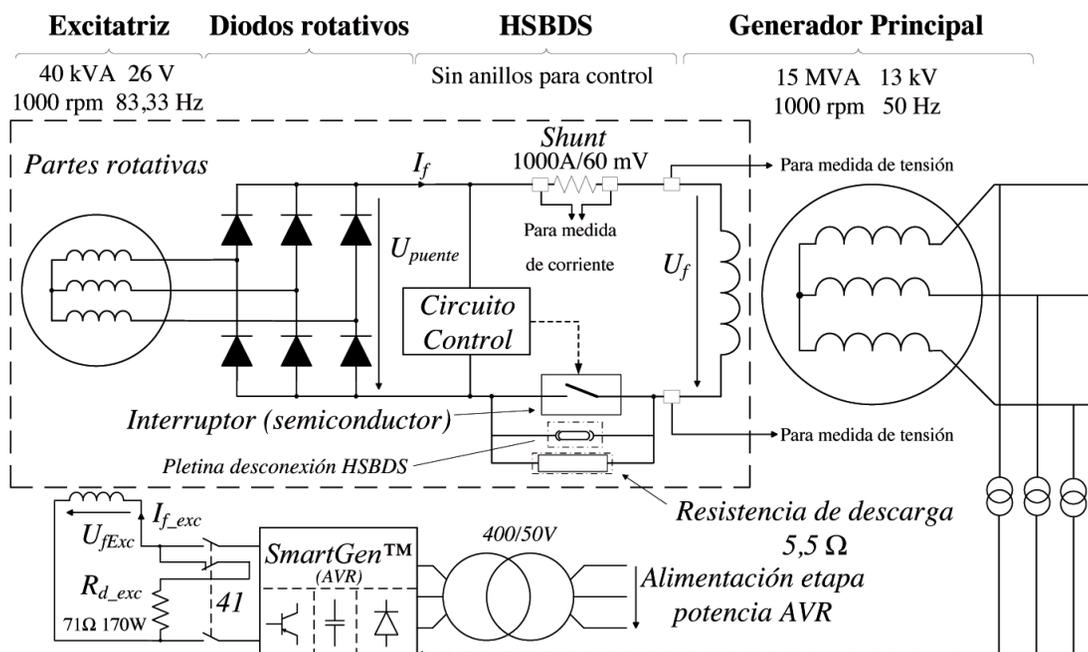
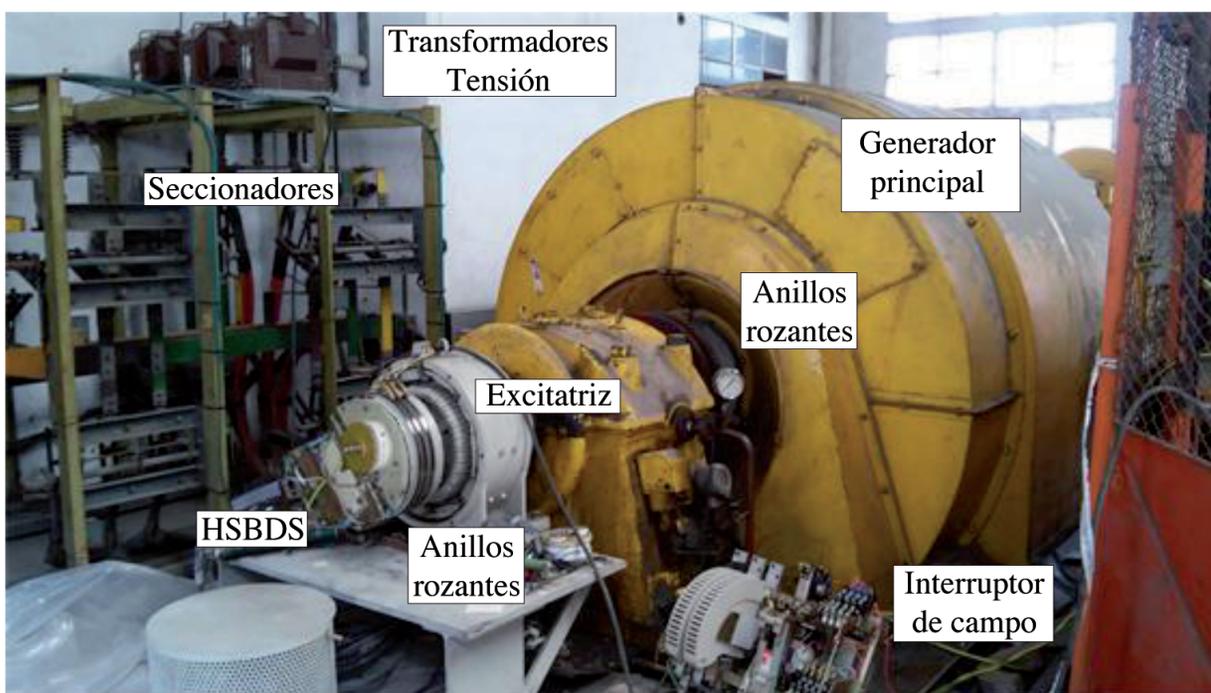


Fig. 3: Plataforma de ensayos y esquema de conexión

3. PLATAFORMA DE ENSAYO

El desarrollo del sistema de desexcitación rápida "HSBDS" se ha realizado en un generador síncrono de 15 MVA. Las características del mismo se recogen en el apéndice 1. Gracias a un juego especial de seccionadores el devanado estático se puede conectar en cuatro configuraciones diferentes posibilitando los ensayos a diferentes tensiones. Al mismo eje se ha acoplado una excitatriz (Apéndice 1) específicamente diseñada para posibilitar diferentes pruebas, con diversas configuraciones de tarjetas de control, semiconductores y resistencias de descarga.

La instalación experimental cuenta con varias particularidades respecto a un generador convencional. En primer lugar, se han instalado tres anillos rozantes que posibilitan la realización de medidas en la parte rotativa de la máquina. De igual modo, se ha previsto la instalación de una pletina de cobre que desconecta el HSBDS de manera que se pueden obtener registros comparativos entre el comportamiento dinámico del generador con y sin HSBDS. En la Figura 3 aparece un esquema detallado y una imagen de la plataforma de ensayos.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Se han realizado diversas pruebas de carácter experimental que garantizan que el sistema se comporta según lo expuesto en la descripción del método en un generador de tamaño comercial.

Todas las pruebas han sido realizadas partiendo del generador principal en vacío, a velocidad y tensión asignada. A partir de estas condiciones se ha realizado la desexcitación de la máquina con el sistema de desexcitación "HSBDS" en operación y fuera de servicio como lo haría una excitación brushless convencional.

Para ello en primer lugar se abre el interruptor de campo de la excitatriz (41) insertando una resistencia de descarga de 71Ω en el circuito, para desmagnetizar la excitatriz. Como consecuencia de la apertura del interruptor de campo, se origina una sobretensión negativa en el devanado de campo de la excitatriz, produciendo que la tensión alterna que alimenta el puente de diodos rotativos (U_{puente}) descienda hasta hacerse nula (Ver Figura 4).

A partir de este instante al intentar disminuir la corriente en el devanado de campo del generador principal (I_f), la tensión en dicho devanado (U_f) se invierte, pasando los diodos rotativos a operar en modo rueda libre, es decir, conducen los 6 diodos. Por tanto la tensión del puente de diodos (U_{puente}) se hace ligeramente negativa ($-2U_d$).

El circuito de control desarrollado mide la tensión en el puente de diodos y en el momento que esta se hace negativa apaga los semiconductores insertando la resistencia de descarga. Al introducir la resistencia de descarga en el circuito se produce una sobretensión en la misma, proporcional a su valor óhmico (R_d) y a la corriente en el devanado de campo (I_f). Esta tensión tiene un valor similar a la que aparece en el devanado de campo, salvo la pequeña caída de tensión en los diodos rotativos.

Al disipar la energía almacenada en el devanado de campo en la resistencia de descarga (R_d) se acelera el proceso de desexcitación. Lo que provoca que las tensiones en el estator del generador principal alcancen un valor nulo de una manera mucho más rápida que en una máquina con sistema de excitación brushless convencional. El proceso completo descrito puede verse de manera gráfica en la Figura 4, destacar como se invierte la tensión rotórica del generador principal (U_f) y la sobretensión alcanzada en la resistencia de descarga (U_{Rd}).

Con el objetivo de optimizar la respuesta del sistema de manera que se pueda generar una mayor sobretensión en la

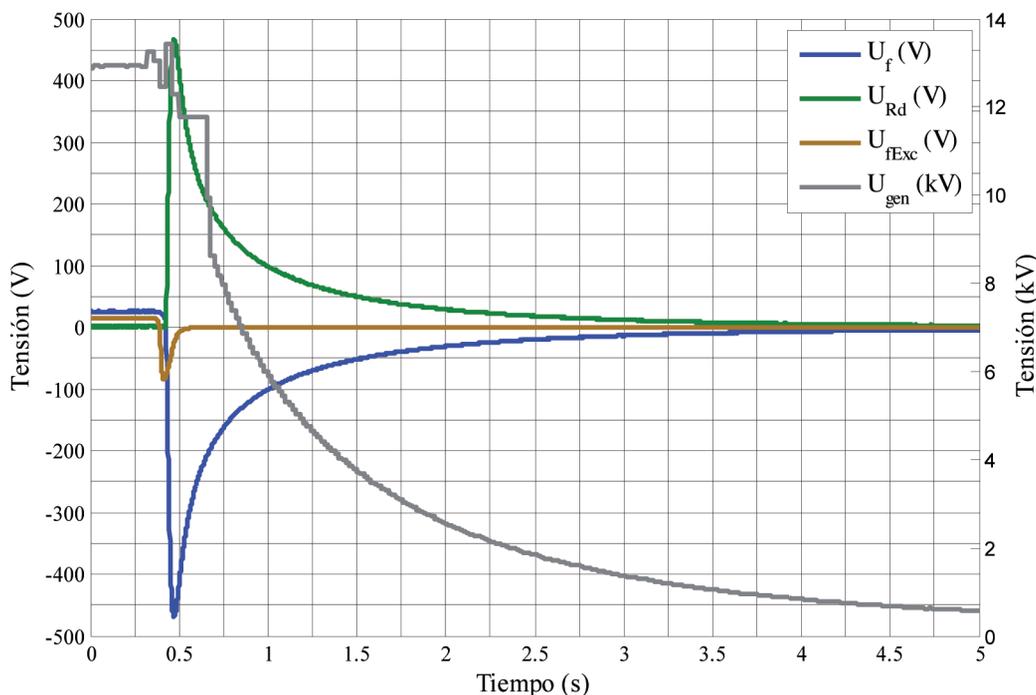


Fig. 4: Evolución de las diferentes tensiones con HSBDS durante desexcitación. Donde U_f es la tensión rotórica, U_{Rd} es la tensión en la resistencia de descarga, U_{fExc} es la tensión en el estator de la excitatriz y U_{gen} es la tensión en el estator del generador principal

resistencia de descarga, se han instalado dos grupos de semiconductores en serie haciendo posible bloquear una tensión mayor en estado de corte. En la figura 5 se puede observar el reparto de las tensiones de bloqueo entre los dos grupos de semiconductores ante desexcitación.

La evolución de la tensión estática debe ser comparada con la obtenida en el caso de excitación indirecta convencional. Como se puede observar en la Figura 6, gracias al sistema HSBDS se reduce el tiempo de desexcitación en vacío de 5,83s a 0,82s, es decir, se ha reducido el tiempo de desexcitación

en unas 7 veces con tan solo 470 V de sobretensión en el devanado de campo del generador principal (U_p).

5. CONCLUSIONES

El nuevo sistema de desexcitación rápida para máquinas síncronas con excitación indirecta HSBDS (del inglés High Speed Brushless De-excitation System) ha sido diseñado, construido y ensayado de manera satisfactoria en una gene-

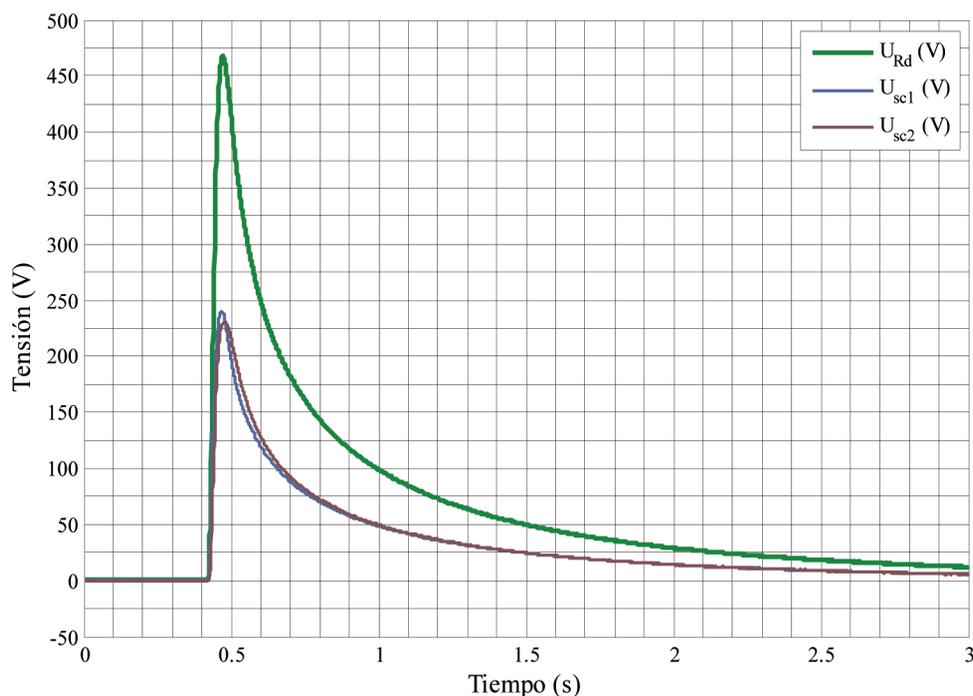


Fig. 5: Evolución de las tensiones en los semiconductores (U_{sc1-2}) y en la resistencia de descarga (U_{Rd})

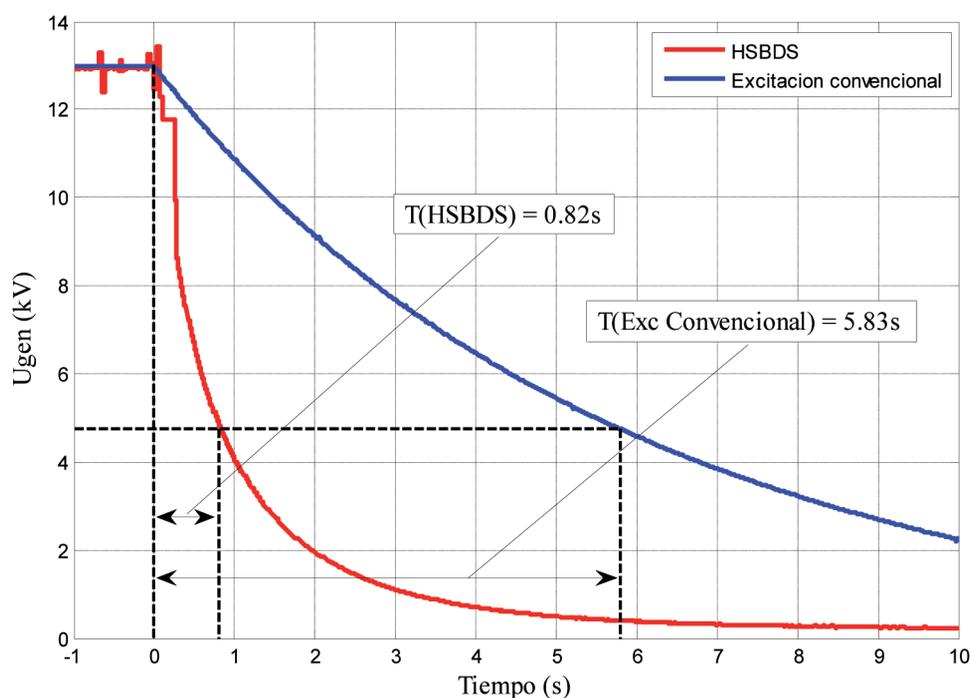


Fig. 6: Comparativa de la tensión estática con HSBDS y en excitación convencional

rador síncrono comercial, con una potencia asignada de 15 MVA. Durante las pruebas se han ensayado diversos tipos de resistencias de descarga, tarjetas de control y semiconductores de potencia.

La principal ventaja de este nuevo sistema de desexcitación frente a otros ya existentes es que no requiere de señales que se envían desde el exterior, ya sea con anillos rozantes, señales inalámbricas, o mediante máquinas eléctricas especiales desarrolladas para tal efecto.

El sistema consigue reducir, en la máquina ensayada, el tiempo de desexcitación en vacío en más de 7 veces (de 5,83s a 0,82s). De esta manera, en caso de una falta en el estator del generador o antes del interruptor de grupo los daños se minimizarían, ya que la corriente de defecto se reduciría tras el disparo del generador de una forma mucho más rápida, como lo hacen los generadores con excitación estática.

En cuanto a las pruebas realizadas a los semiconductores que realizan la función de interruptor estático, se ha validado la configuración de los mismos en serie puesto que el reparto de tensión es aceptable como se puede ver en los resultados de los ensayos.

BIBLIOGRAFIA

1. IEEE. Guide for AC Generator Protection. C37.102. 2006.
2. Platero C, Blázquez F, Frías P, et al. "A Novel Rotor Ground-Fault-Detection Technique for Synchronous Machines With Static Excitation". IEEE Trans. Energy Convers 2010, 25, Vol 4, p. 965-973.

3. Vilchis-Rodríguez D, Acha E. "A Synchronous Generator Internal Fault Model Based on the Voltage-Behind-Reactance Representation". IEEE Trans. Energy Convers 2009, 24, Vol 1, p. 184-194.
4. Taborda J. *Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems*. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008.
5. Westinghouse. *Fast De-excitation Brushless Exciter*. American Patent. US 4152636. 1979.
6. Schneider. *Entregungsschaltung für bürstenlos über rotierende Dienen erregte Synchronmaschinen*. German Patent. DE 1763299. 1971.
7. SIEMENS. *Anordnung zur Schnellentregung von bürstenlosen Synchronmaschinen, die über umlaufende ungesteuerte Gleichrichter erregt werden*. German Patent. DE 2127497. 1971.
8. Asea Brown Boveri. *A method and device for demagnetizing brushless synchronous machines*. International Patent. WO 93/20614. 1993.
9. Xianming C, Wei W, Hongshui L, et al. *New Alternating current De-excitation for Large Hydraulic Generators*, Proceedings of the Power System Technology and IEEE Power India Conference, India, 2008.
10. Technical University of Madrid. *Rapid deexcitation system for synchronous machines with indirect excitation*. European Patent. PCT/ES2010/000058. 2012.
11. Platero C, Redondo M, Blázquez F, et al. "High-speed de-excitation system for brushless synchronous machines", *Electric Power Applications*. IET. 2012. Vol 6-3. p.156-161.
12. IEEE. *Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*. 421.1. 2007.

APENDICE

Generador principal			
Fabricante	Metropolitan Vickers	Tipo	G50/C1
Potencia nominal	15 MVA	Velocidad	1000 rpm
Frecuencia	50 Hz	Factor de potencia	0,85
Toma 1		Toma 2	
Tensión	4 kV Δ Paralelo	Tensión	7 kV Y Paralelo
Corriente	2144 A	Corriente	1237 A
Toma 3		Toma 4	
Tensión	13 kV Y Serie	Tensión	7.5 kV Δ Serie
Corriente	666 A	Corriente	1155 A
X_d	2,203 pu	X_q	2,203 pu
X'_d	0,642 pu	X''_q	0,350 pu
X''_d	0,542 pu	X_l	0,172 pu
Resistencia estator	0,0017 pu	T'_d	2,397 s
T''_d	0,315 s	T'_{d0}	6,02 s
U_{fn}	105 V	I_{fn}	340 A
Resistencia rotórica	181 mΩ		

Tabla A1: Características generador principal y excitatriz.

Excitatriz	
Fabricante	ALSTOM Power, Bilbao
Tipo	WE 5615 10/6
Potencia nominal	40 kVA
Factor de potencia	0,96
Tensión	26 V
Frecuencia	83,33 Hz
Velocidad	1000 rpm
Número de fases	3