

Estabilidad de DFIGs con compensadores síncronos: desarrollo de una plataforma experimental

Jorge Suárez-Porras*, Fidel Fernández Bernal*, Luis Rouco*, Andrés Tomás-Martín*,
Aurelio García-Cerrada* and Emilio José Bueno Peña†

*IIT, ETSI ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España

†UAH - Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España

Resumen—Este artículo presenta el desarrollo experimental de una bancada de laboratorio basada en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) como representación de una fuente de energía renovable eólica tipo 4. En la actual transición energética, la creciente penetración de generación asíncrona en redes eléctricas plantea importantes retos de estabilidad debido a la reducción de inercia y capacidad de cortocircuito. Los compensadores síncronos resurgen como una solución viable para mitigar estos efectos, aportando soporte inercial, regulación de tensión y refuerzo de la corriente de cortocircuito. Este artículo detalla la plataforma experimental formada por dos bancadas interconectables: una bancada de compensador síncrono con disco de inercia, y una bancada DFIG. Se presentan los primeros resultados experimentales obtenidos para validar las simulaciones y primeros análisis teóricos.

Index Terms—Compensador síncrono, análisis modal, pequeña perturbación, laboratorio

I. INTRODUCCIÓN

La creciente integración de fuentes de energía renovable en los sistemas eléctricos de potencia ha iniciado una transformación profunda en la estructura y dinámica de operación de las redes. Esta transición, marcada por la sustitución progresiva de generación convencional síncrona por generación asíncrona basada en fuentes renovables, ha traído consigo importantes desafíos relacionados con la estabilidad del sistema eléctrico. En particular, la pérdida de generación síncrona implica una reducción de la inercia del sistema y de la capacidad de cortocircuito, lo cual compromete la fortaleza de la red y abre la puerta a fenómenos de inestabilidad que anteriormente eran menos probables. Esta situación ha motivado la búsqueda activa de soluciones que permitan mantener la estabilidad del sistema en este nuevo contexto energético.

Entre las tecnologías renovables más implantadas en la actualidad se encuentran la solar fotovoltaica y la energía eólica. Ambas se conectan a la red a través de convertidores de potencia y, en la mayoría de los casos, operan en modo grid-following (GFI), es decir, siguen activamente la tensión de la red mediante un sistema de control que incorpora un lazo de seguimiento de fase (phase-locked loop, PLL). No obstante, cuando estas fuentes se conectan a redes eléctricas débiles, el desempeño del PLL puede degradarse significativamente [1]-[3]. En estas condiciones, la incapacidad del lazo de control para seguir de forma precisa el ángulo de la red puede llevar al sistema a situaciones de inestabilidad. En este artículo, y en el banco de pruebas de laboratorio asociado, se estudia específicamente la tecnología eólica tipo 4, representada por el

generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés). Pueden encontrarse en la literatura bancadas de laboratorio en las que se desarrolla un DFIG para obtener resultados experimentales [4], [5].

Dentro de este proceso de transformación energética, los compensadores síncronos (synchronous condensers, SC) se han propuesto como una solución eficaz para mitigar los efectos adversos derivados de la reducción de generación síncrona. Estos dispositivos permiten suplir dos de las principales carencias de los sistemas basados en energías renovables: (1) la falta de inercia y (2) la escasa capacidad de cortocircuito. A diferencia de las tecnologías renovables, los SC poseen una masa rotante que almacena energía cinética y que, ante una perturbación, puede inyectarla naturalmente en el sistema [6], ayudando así a amortiguar las desviaciones de frecuencia y a evitar escenarios de deslastre de cargas, entre otros. Esta capacidad puede verse incluso reforzada mediante la incorporación de discos de inercia adicionales. Además, gracias a su regulador automático de tensión (automatic voltage regulator, AVR), los compensadores síncronos son capaces de aportar potencia reactiva a la red, contribuyendo al mantenimiento del perfil de tensiones dentro de márgenes de operación seguros. Por último, los SC también son capaces de aportar una corriente de cortocircuito significativamente mayor que la que pueden entregar los convertidores de los sistemas renovables [7], [8], garantizando así el correcto funcionamiento de los sistemas de protección del operador de red.

Con el objetivo de validar de forma práctica los estudios y las simulaciones realizadas en el entorno de investigación teórico, se han desarrollado dos bancadas de laboratorio que pueden interconectarse para analizar la interacción entre generadores eólicos tipo DFIG y compensadores síncronos. La bancada del compensador síncrono fue diseñada previamente y presentada en el congreso SAAEI 2024. En este artículo se presenta el desarrollo del laboratorio en general, y de manera particular, la bancada de laboratorio del DFIG, detallando sus características técnicas y exponiendo las posibilidades que ofrece para el estudio experimental de la estabilidad en sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables.

II. CONTROL DEL DFIG DEL LABORATORIO

La Fig. 1 muestra un esquemático del montaje de la bancada, mientras que el rack del DFIG se muestra en la Fig. 2.

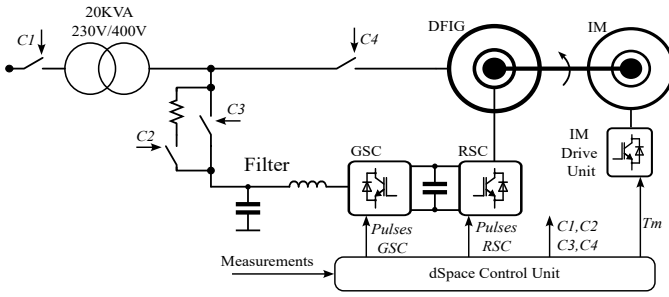


Figura 1. Esquemático de la bancada del DFIG

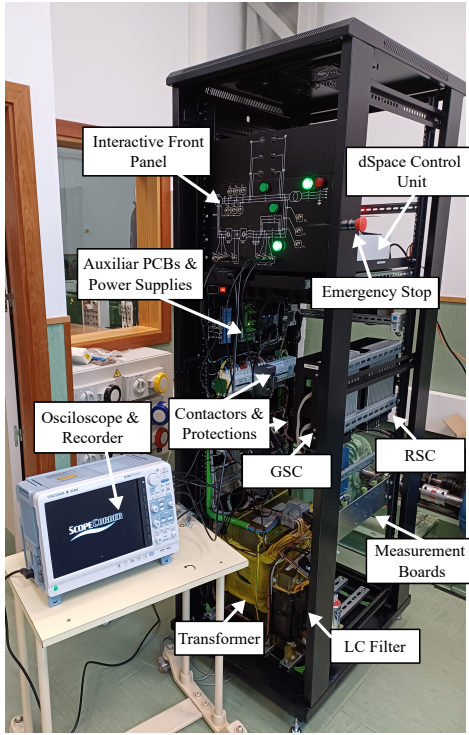


Figura 2. Descripción de los elementos contenidos en el rack del DFIG.

El sistema de control implementado en la bancada del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) se basa en la estrategia descrita en [9], e incluye cuatro lazos principales de control. Estos lazos permiten un manejo eficaz de la potencia activa y reactiva, así como del equilibrio energético interno del sistema de conversión.

El convertidor del lado de red (*grid-side converter*, GSC) tiene como principal función el mantenimiento del voltaje en el bus de corriente continua (DC-link). Para ello, regula la corriente inyectada hacia la red, garantizando que la tensión en el enlace de continua permanezca constante, lo cual es fundamental para el funcionamiento estable del convertidor lado rotor. Además, este convertidor se encarga de mantener la potencia reactiva intercambiada con la red en cero, minimizando así la carga del convertidor y optimizando su eficiencia [10]. La Fig. 3 diagrama de bloques del convertidor lado red.

Por su parte, el convertidor del lado del rotor (*rotor-side converter*) está encargado del control directo de la máquina. A través de un lazo de control de corriente en el eje q , se ajusta el par electromagnético generado por el DFIG para que se corresponda con el valor óptimo de operación. Simultáneamente, un segundo lazo de control en el eje d regula la potencia reactiva del estator. Este último lazo está configurado para mantener dicha potencia reactiva en cero, de modo que el generador sólo inyecte potencia activa a la red, cumpliendo con los criterios de operación típicos en sistemas eólicos conectados a red. La Fig. 4 diagrama de bloques del convertidor lado rotor.

III. DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO

En la Fig. 5 se muestra un esquemático general del laboratorio con los componentes principales anteriormente descritos.

El laboratorio desarrollado para el estudio experimental de la estabilidad en sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables se compone de dos elementos principales:

- **Bancada de generación síncrona (compensador síncrono):** diseñada para emular el comportamiento de un compensador síncrono real, incluyendo su inercia (rotor + disco de inercia), capacidad de aporte de potencia reactiva mediante un regulador automático de tensión (AVR), y su contribución a la corriente de cortocircuito. Esta bancada fue desarrollada previamente y presentada en el congreso SAAEI 2024. La Fig. 6 muestra la bancada de generación síncrona - compensador síncrono.
- **Bancada de generación asíncrona (generador de inducción doblemente alimentado, DFIG):** simula un sistema eólico tipo 4, en el que el generador se acopla mecánicamente a un motor de inducción que actúa como fuente de par mecánico, representando el viento. El sistema está equipado con convertidores de potencia para alimentar el rotor del generador, permitiendo analizar su comportamiento dinámico frente a distintas condiciones de red. La Fig. 7 muestra la bancada del motor de inducción doblemente alimentado.

Adicionalmente, el laboratorio cuenta con una serie de elementos auxiliares que amplían las capacidades de análisis y experimentación:

- **Dos anillos trifásicos:** permiten la conexión flexible de las dos bancadas principales al resto del laboratorio de docencia de máquinas eléctricas, compuesto por 16 bancadas idénticas, cada una equipada con un motor síncrono, uno asíncrono y uno de corriente continua. Esta infraestructura permite realizar configuraciones complejas y reproducir diferentes escenarios de red.
- **Emulador de redes de 30kW:** una herramienta versátil que permite configurar distintos tipos de redes eléctricas, tanto monofásicas como trifásicas, incluyendo condiciones normales, fallos (cortocircuitos, caídas de tensión, etc.) y redes con diferentes niveles de fortaleza. Además, puede funcionar como amplificador de potencia para

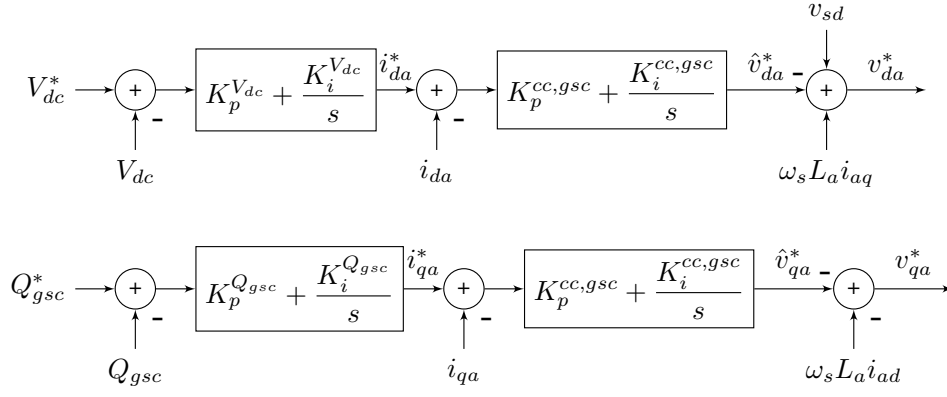


Figura 3. Diagrama de bloques de los controles del convertidor lado red. Las variables se describen en la Tabla III del Anexo A.

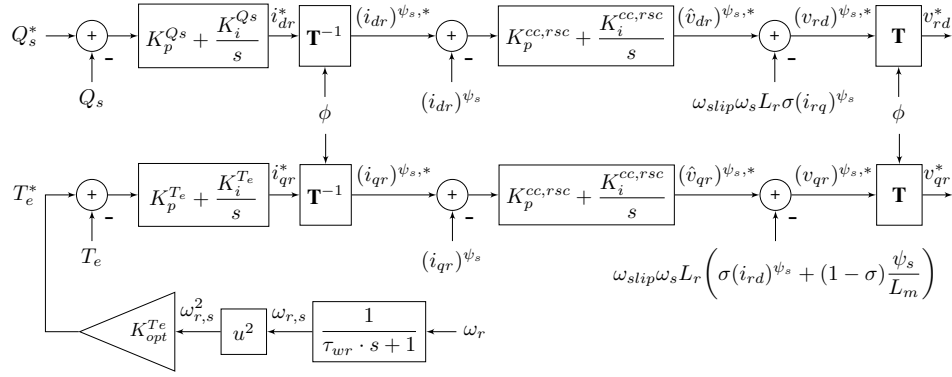


Figura 4. Diagrama de bloques de los controles del convertidor lado rotor. Las variables se describen en la Tabla III del Anexo A.

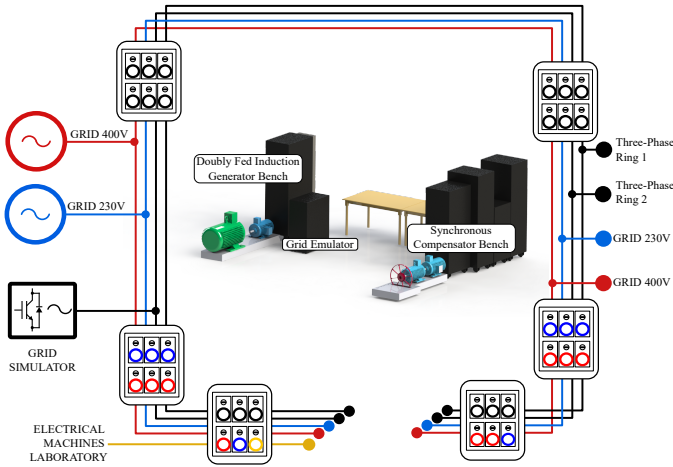


Figura 5. Esquemático general del laboratorio con las distintas conexiones

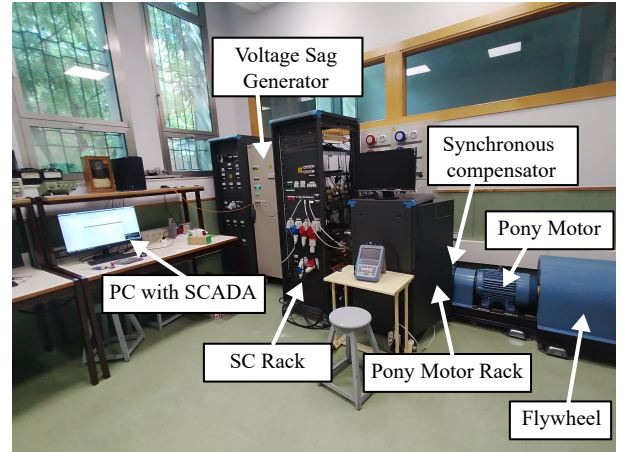


Figura 6. Bancada del compensador síncrono

realizar ensayos en entornos de simulación avanzados. En particular, se puede utilizar en esquemas *Power Hardware in the Loop* (PHIL), permitiendo integrar modelos de simulación en tiempo real con equipos físicos del laboratorio, para validar estrategias de control, protección y operación bajo condiciones realistas. La Fig. 8 muestra el emulador de redes y la placa de interfaz entre el

emulador de redes y el sistema donde se ejecuta la simulación del sistema eléctrico (en nuestro caso en un dSpace, Typhoon HIL o OPAL-RT).

La Tabla I resume las potencias nominales y parámetros principales de los distintos elementos que componen las tres áreas clave del sistema experimental: la bancada de generación síncrona, la bancada del generador DFIG y el emulador de

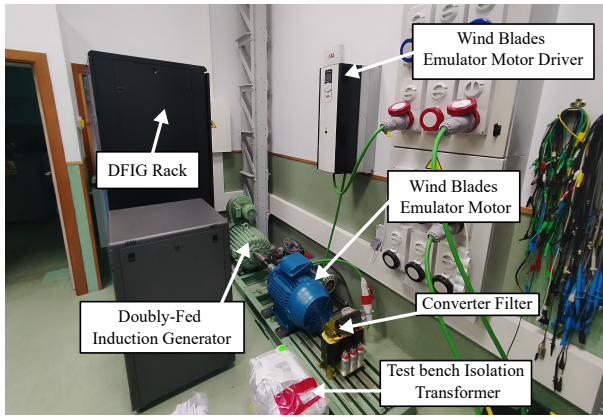


Figura 7. Bancada del generador de inducción doblemente alimentado

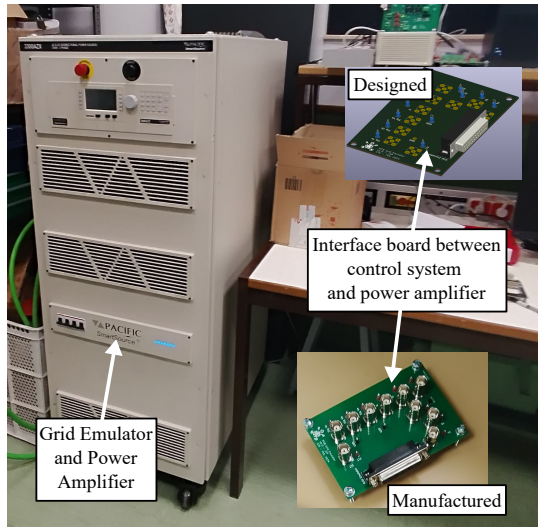


Figura 8. Emulador de redes y placa de interfaz entre unidad de simulación de sistemas eléctricos y el emulador.

redes.

III-A. Bancada del DFIG

La bancada desarrollada para la generación asíncrona está basada en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés), que es una de las configuraciones más comunes en sistemas eólicos tipo 4. Este tipo de generador permite el control independiente de la potencia activa y reactiva gracias a la alimentación del rotor a través de convertidores de potencia, lo que lo convierte en una excelente plataforma para el estudio de la integración de energías renovables en redes eléctricas.

El montaje de la bancada consiste en un generador de inducción conectado mecánicamente a un motor de inducción trifásico que actúa como actuador de par, simulando el comportamiento del viento. El par entregado por este motor puede controlarse desde un sistema externo, permitiendo reproducir distintos perfiles de viento o perturbaciones mecánicas sobre el eje del generador. Esta configuración permite analizar la respuesta dinámica del sistema ante variaciones

Tabla I
POTENCIAS NOMINALES DE LOS EQUIPOS DEL LABORATORIO

Elemento	Potencia
Bancada de generación síncrona	
Generador síncrono	10 kW
Motor asíncrono (pony motor)	11 kW
Inercia total (disco + rotor)	6.2 s
Bancada del DFIG	
Generador DFIG	15 kW
Convertidor lado red (GSC)	15 kW
Convertidor lado rotor (RSC)	15 kW
Transformador de conexión	20 kVA
Motor de inducción (viento)	18.5 kW
Variador de frecuencia	22 kW
Emulador de redes	
Emulador de red	30 kW

en las condiciones de operación, replicando escenarios reales de funcionamiento de un aerogenerador. El rotor del DFIG está conectado a un convertidor de potencia back-to-back, compuesto por dos etapas: un convertidor lado rotor (del inglés RSC) y un convertidor lado red (del inglés GSC), ambos controlados mediante un sistema embebido en dSPACE, que permite el desarrollo y prueba de diferentes algoritmos de control en tiempo real.

El Rack del DFIG se ha diseñado con un panel frontal en el que se presenta el esquemático del rack y desde el que se puede:

- Tomar medidas directamente con conectores BNC procedentes de una placa de adaptación de medidas cuyo fin es transformar las medidas de corriente a tensión y limitar la tensión máxima de entrada a los ADCs del dSpace.
- Comprobar el estado de los contactores y de la seta de emergencia mediante pilotos LED.
- Comprobar visualmente la sincronización y posterior cierre del contactor 4 de la Fig. 1. Este cierre se realiza mediante la comprobación de la amplitud y fase de las tensiones a ambos lados del contactor, pero las bombillas permiten comprobar el correcto cierre del contactor visualmente.

La Fig. 9 muestra el panel frontal con los elementos anteriormente descritos.

Cabe destacar que, dada la topología del generador de inducción doblemente alimentado, es posible operar el sistema en modo compensador estático de potencia reactiva (del inglés, STATCOM, STATic Var COMPensator). Esta configuración se logra manteniendo abierto el contactor que conecta el estator a la red eléctrica (identificado como Contactor 4 en la Fig. 1). Al mismo tiempo, se mantiene desconectado el convertidor lado rotor convertidor lado rotor al estator. En esta

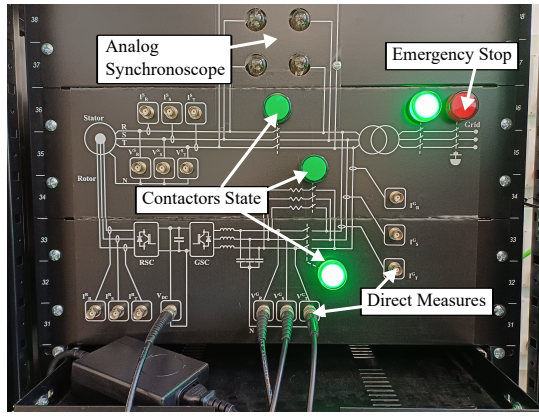


Figura 9. Panel frontal del rack del DFIG.

disposición, el convertidor puede inyectar o absorber potencia reactiva a través del rotor, actuando de forma análoga a un STATCOM. La Figura 10 muestra el esquema del sistema en esta configuración.

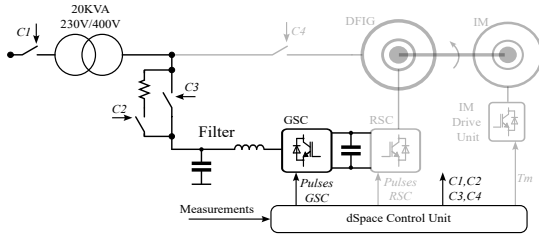


Figura 10. Bancada del DFIG configurada como un STATCOM. En opacidad reducida se muestran los elementos no utilizados.

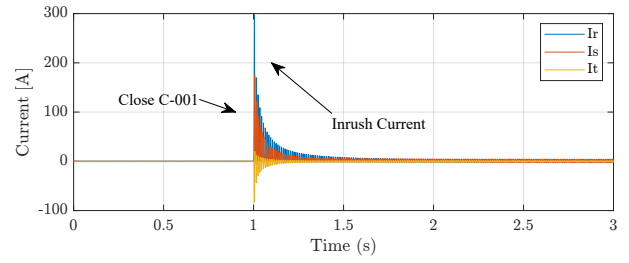
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES PRELIMINARES

Dada la extensión de este artículo, en esta sección se presentan únicamente algunos resultados experimentales preliminares obtenidos con la bancada del DFIG:

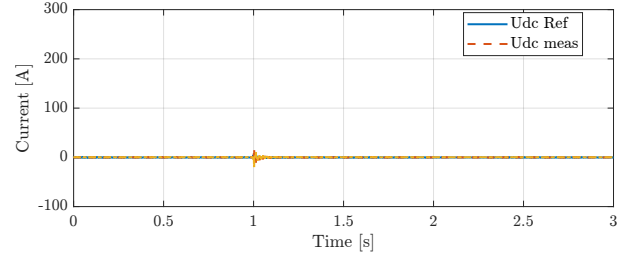
IV-A. Control del GSC

Como se mostraba en la Fig. 3, el GSC se encarga de (1) mantener la tensión del bus de continua a un nivel suficiente como para no tener sobremodulación de ancho de pulso en los convertidores y (2) controlar la reactiva entregada a la red desde el GSC. Típicamente, el GSC tiene como consigna de reactiva 0 [9].

IV-A1. Energización del transformador del rack: La Fig. 11a muestra las corrientes que se producen en el secundario del transformador cuando este se energiza súbitamente al cerrar el contactor C1, como se indica en la Fig. 10. Típicamente, para evitar que estas corrientes disparen las protecciones del rack, se incorporan circuitos de precarga del transformador o bien se seleccionan protecciones cuyas curvas de disparo se adecuen a estas corrientes de energización, de manera que no actúen de forma indebida. La Fig. 11b muestra las corrientes que se producen en el secundario del transformador con un circuito de precarga como el que se muestra en la Fig. 12.



(a) Sin circuito de precarga.



(b) Con circuito de precarga.

Figura 11. Corrientes de energización del transformador (inrush current) con y sin circuito de precarga.

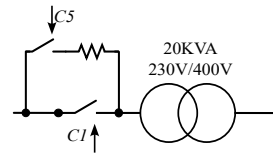


Figura 12. Circuito limitador de inrush current.

IV-A2. Precarga del condensador del bus de continua:

La Fig. 13 muestra la tensión en el bus de continua del convertidor *back-to-back* cuando: (1) se cierra el contactor C2 de la Fig. 10, permitiendo que el condensador se cargue con una constante de tiempo $\tau = RC$. Una vez alcanzado aproximadamente el régimen permanente, la resistencia en serie con el contactor C2 se puentea mediante el cierre del contactor C3, quedando el condensador precargado a su tensión final. Posteriormente, un sistema de control elevaría dicha tensión hasta aproximadamente 650 V (actualmente en desarrollo; se incluirá en la versión final del artículo).

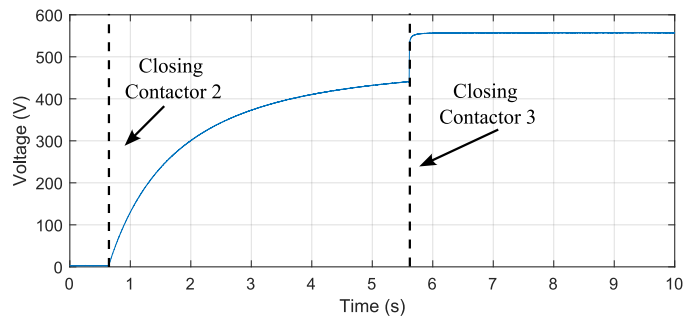


Figura 13. Evolución de la tensión en el bus de continua durante la precarga del condensador.

IV-B. Control del bus de continua

La Fig. 14 muestra el proceso completo de la precarga (a), inicio de la conmutación del convertidor GSC (b) y seguimiento de referencias de tensión (c).

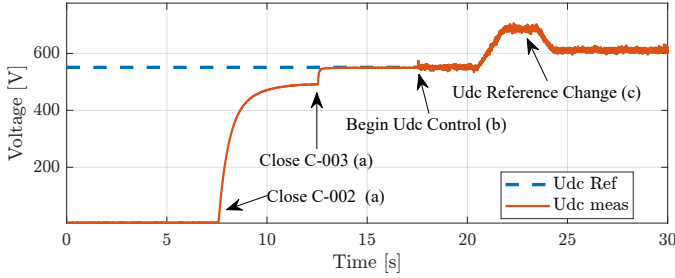


Figura 14. Evolución de la tensión en el bus de continua durante la precarga del condensador.

IV-C. Control de la potencia reactiva del GSC

La Fig. 15 muestra el seguimiento de la referencia de la potencia reactiva inyectada y consumida por el GSC.

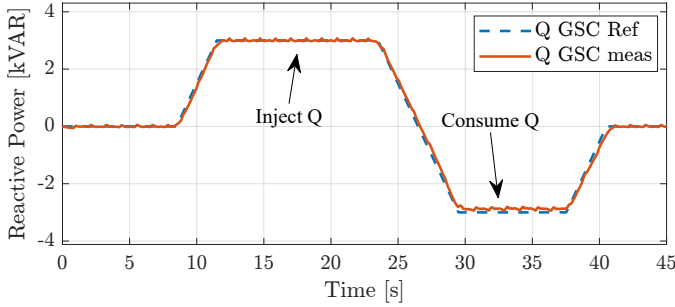


Figura 15. Evolución de la potencia reactiva en el bus de continua durante la precarga del condensador.

IV-D. Conclusiones

Este artículo ha presentado el desarrollo de una bancada experimental basada en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) para el estudio de la estabilidad en redes con alta penetración de energías renovables. La plataforma permite analizar el comportamiento dinámico del DFIG y su control, así como su integración con elementos de red reales, como transformadores y sistemas de conversión de potencia.

Además, se ha destacado el potencial de interconexión con un compensador síncrono previamente desarrollado, lo que permite investigar estrategias de soporte inercial y regulación de tensión en entornos de red débil. Los primeros resultados experimentales muestran la viabilidad del enfoque propuesto y sientan las bases para futuras investigaciones en esquemas de validación como *Power Hardware in the Loop*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto PID2021-125628OB-C21 financiado por MCIN/AEI MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por FEDER Una manera de hacer Europa. Jorge Suárez Porras tiene un contrato predoctoral a

cargo de la ayuda PRE2022-101606 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por FSE+.

APÉNDICE A

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

A-A. Variables de los controles del convertidor lado red (GSC).

Tabla II

DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DE LOS CONTROLES DEL GSC DE LA FIG 3. LAS VARIABLES SE DESCRIBEN EN LA TABLA II DEL ANEXO A.

Variable	Descripción
V_{dc}^*	Tensión de referencia del bus DC
V_{dc}	Tensión medida del bus DC
i_{dqa}^*	Corriente de referencia
i_{dqa}	Corriente medida
$\hat{v}_{dqa}^*$	Tensión de referencia sin compensación
v_{dqa}^*	Tensión de referencia final
Q_{gsc}^*	Potencia reactiva de referencia del GSC
Q_{gsc}	Potencia reactiva medida del GSC
v_{sd}	Componente directa de la tensión de red
$\omega_s L_a i_{daq}$	Tensión de compensación por acoplamiento cruzado
$K_p^{V_{dc}}, K_i^{V_{dc}}$	Ganancias del controlador PI de tensión DC
$K_p^{Q_{gsc}}, K_i^{Q_{gsc}}$	Ganancias del controlador PI de Q_{gsc}
$K_p^{cc,gsc}, K_i^{cc,gsc}$	Ganancias del lazo de corriente del GSC

A-B. Variables de los controles del convertidor lado rotor (RSC).

REFERENCIAS

- [1] C. Guo, C. Zhao, R. Iravani, H. Ding y X. Wang, "Impact of phase-locked loop on small-signal dynamics of the line commutated converter-based high-voltage direct-current station," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, n.º 5, págs. 1311-1318, 2017.
- [2] J. Z. Zhou, H. Ding, S. Fan, Y. Zhang y A. M. Gole, "Impact of Short-Circuit Ratio and Phase-Locked-Loop Parameters on the Small-Signal Behavior of a VSC-HVDC Converter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, n.º 5, págs. 2287-2296, oct. de 2014.
- [3] T. Gu, P. Wang, D. Liu, A. Sun, D. Yang y G. Yan, "Modeling and Small-Signal Stability Analysis of Doubly-Fed Induction Generator Integrated System," *Global Energy Interconnection*, vol. 6, n.º 4, págs. 438-449, ago. de 2023.
- [4] A. González-Cajigas, E. J. Bueno, J. Roldán-Pérez, R. Martín-López y E. Sáiz-Marín, "Control Choices to Allow the Parallel Operation of Grid-Forming Type-III Wind Turbines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, págs. 1-12, 2023.

Tabla III
DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DE LOS CONTROLES DEL RSC DE LA
FIG. 4.

Variable	Descripción
i_{dqr}^*	Corriente de referencia en el eje dq del rotor.
$(i_{dqr})^{\psi_s,*}$	Corriente de referencia transformada al sistema ψ_s , eje dq , del rotor.
$(i_{dqr})^{\psi_s}$	Corriente medida en el eje dq del rotor en el sistema ψ_s .
$(\hat{v}_{dqr})^{\psi_s,*}$	Tensión de referencia salida del PI en el eje dq del rotor en el sistema ψ_s .
$(v_{dqr})^{\psi_s,*}$	Tensión de referencia (con desacoplos) en el eje dq del rotor en ψ_s .
v_{dqr}^*	Tensión de referencia final en el eje dq del rotor.
T_e	Par electromagnético desarrollado por la máquina.
T_e^*	Par electromagnético de referencia.
$K_{opt}^{T_e}$	Ganancia óptima para el cálculo de par en función de la velocidad.
ω_r	Velocidad angular real del rotor.
$\omega_{r,s}$	Velocidad del angular del rotor filtrada.
τ_{wr}	Constante de tiempo del filtro aplicado a ω_r .
σ	Factor de dispersión del rotor.
L_m	Inductancia de magnetización mutua.
L_r	Inductancia de magnetización del rotor.

- [9] F. Mei y B. C. Pal, "Modelling of doubly-fed induction generator for power system stability study," en *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA: IEEE, jul. de 2008, págs. 1-8.
- [10] J. Hu, Y. Lei, Y. Chi y X. Tian, "Analysis on the inertia and the damping characteristics of DFIG under multiple

- [5] S. Hu, X. Lin, Y. Kang y X. Zou, "An Improved Low-Voltage Ride-Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator During Grid Faults," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, n.º 12, págs. 3653-3665, dic. de 2011.
- [6] S. Hadavi, S. P. Me, B. Bahrani, M. Fard y A. Zadeh, "Virtual Synchronous Generator Versus Synchronous Condensers: An Electromagnetic Transient Simulation-based Comparison,"
- [7] E. Marrazi, G. Yang y P. Weinreich-Jensen, "Allocation of synchronous condensers for restoration of system short-circuit power," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, n.º 1, págs. 17-26, ene. de 2018.
- [8] L. Richard, Nahid-Al-Masood, T. K. Saha, W. Tushar y H. Gu, "Optimal Allocation of Synchronous Condensers in Wind Dominated Power Grids," *IEEE Access*, vol. 8, págs. 45 400-45 410, 2020.
working conditions based on the grid-forming control," *Energy Reports*, vol. 8, págs. 591-604, nov. de 2022.