

Mejora del Comportamiento de Convertidores Grid-Following mediante Compensadores Síncronos: Validación Experimental en el LIDER Lab

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

Abstract—Los sistemas de potencia modernos enfrentan una reducción drástica de inercia y rigidez de red debido a la masiva integración de Recursos Basados en Inversores (IBRs). En este contexto, los convertidores con seguimiento de red (*grid-following*, GFL) que utilizan lazos de seguimiento de fase (PLL) son propensos a inestabilidad y bajo amortiguamiento ante condiciones de red débil o cambios súbitos de carga. Este artículo presenta la validación experimental de la interacción entre generación síncrona, convertidores GFL y compensadores síncronos (SC) en el entorno del laboratorio LIDER Lab (Laboratorio de Innovación y Desarrollo de Energías Renovables). Se combina el análisis de estabilidad de pequeña señal (autovalores y factores de participación) con pruebas experimentales de gran señal. Los resultados confirman que la conexión de un compensador síncrono no solo reduce el nadir de frecuencia ante escalones de carga, sino que mejora significativamente el amortiguamiento de la frecuencia medida por el PLL, mitigando el riesgo de pérdida de sincronismo.

Index Terms—Compensador síncrono, convertidor *grid-following*, estabilidad de pequeña señal, inercia, LIDER Lab, PLL.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos modernos están experimentando una rápida transformación debido a la creciente penetración de recursos basados en convertidores (*Inverter-Based Resources*, IBR), como la generación renovable y los sistemas de almacenamiento. Esta transición reduce la proporción de generación síncrona conectada directamente a red y, por tanto, la inercia y el acoplamiento electromecánico disponibles [1], lo que puede incrementar la sensibilidad del sistema frente a perturbaciones de potencia activa y reactiva.

En particular, la operación de convertidores en modo *grid-following* (GFL), que se sincronizan mediante un lazo de enganche de fase (*Phase-Locked Loop*, PLL), puede verse severamente afectada por cambios en la impedancia equivalente de red y por desviaciones de frecuencia tras eventos como escalones de carga. En escenarios de red débil o con baja inercia, estos fenómenos pueden derivar en una degradación del amortiguamiento del PLL y, en casos extremos, en la pérdida de sincronismo del convertidor [2], [3].

Los compensadores síncronos (*Synchronous Condensers*, SC) constituyen una alternativa madura para aportar potencia reactiva y soporte dinámico de frecuencia sin inyectar potencia activa de forma sostenida [4]–[6]. Gracias a su energía cinética almacenada y a su impedancia estatórica, un SC puede

contribuir transitoriamente a la regulación de frecuencia y modificar la impedancia equivalente vista por los convertidores, aumentando la relación de cortocircuito (*Short Circuit Ratio*, SCR) [7], mejorando potencialmente la estabilidad de pequeña señal.

Este artículo presenta la validación experimental de una nueva instalación para investigación en sistemas de potencia: el *LIDER Lab* (Laboratorio de Innovación y Desarrollo de Energías Renovables). Este laboratorio está orientado al estudio de interacciones complejas entre generación síncrona, emulación de red y recursos basados en convertidores.

En este artículo, se demuestra experimentalmente que la conexión de un compensador síncrono equipado con disco de inercia reduce la desviación máxima de frecuencia ante un escalón de carga y facilita la función del PLL de un convertidor GFL. Además, se discute el efecto de la reducción de la impedancia equivalente vista por el convertidor al conectar el compensador en paralelo con las máquinas síncronas.

Las contribuciones principales de este trabajo son:

- Modelado dinámico agregado del sistema de prueba, incluyendo generación síncrona, carga, convertidor GFL y compensador síncrono.
- Análisis modal mediante autovalores y factores de participación para identificar el modo dominante asociado al PLL y su sensibilidad ante la presencia del SC.

II. MODELADO DEL SISTEMA

A. Descripción del sistema de prueba

La Fig. 1 muestra el diagrama unifilar funcional del sistema considerado. Un generador síncrono convencional opera alimentando una barra común, a la que se conecta: (i) un convertidor operado en modo GFL sincronizado mediante PLL y (ii) una carga resistiva que introduce una perturbación tipo escalón. En el segundo escenario de estudio, se añade un compensador síncrono conectado a la misma barra.

Es importante precisar que el convertidor *grid-following* (GFL) considerado en este estudio está configurado en modo STATCOM, dadas las capacidades de la bancada experimental disponible. Por este motivo, y para facilitar la lectura del documento, los términos GFL y STATCOM se emplearán indistintamente a lo largo del artículo. El sistema completo es de orden 28. Este se descompone en un orden 13 para el STATCOM (que integra filtro LCL, control y sincronización),

un orden 9 para el compensador síncrono (dinámicas subtransitorias y excitación), un orden 2 para el generador síncrono (comportamiento mecánico) y un orden 4 para la infraestructura de red (línea de transmisión y nodo de carga).

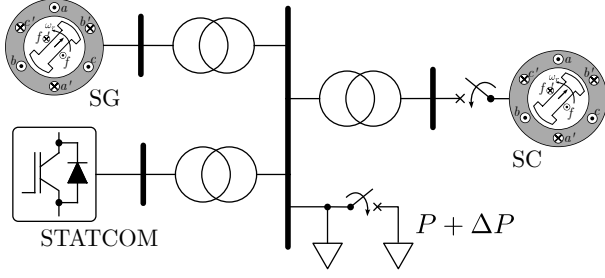


Fig. 1. Diagrama del sistema bajo estudio: máquinas síncronas, convertidor GFL con PLL, carga variable y compensador síncrono (Caso 2).

B. Modelos de las máquinas síncronas

La bancada se representa mediante un modelo dinámico de máquina síncrona (modelo clásico de orden reducido para estudios de estabilidad transitoria) con sus respectivos lazos de control primario. En forma genérica, la ecuación de oscilación se describe como:

$$\dot{\delta} = \omega_b(\omega - 1), \quad (1)$$

$$2H\dot{\omega} = P_m - P_e - D(\omega - 1), \quad (2)$$

donde δ es el ángulo del rotor, ω la velocidad en p.u., ω_b la velocidad base (i.e. 50Hz), H la constante de inercia, D el coeficiente de amortiguamiento. La potencia eléctrica P_e suministrada a la red, siendo P_m la potencia mecánica de entrada a la máquina ($P_m = 0$ en el SC).

C. Modelo del convertidor GFL y PLL

El convertidor opera en modo GFL con control vectorial de corriente y un PLL para la sincronización con la red. Se modela en sistema de referencia síncrono (dq) alineado con el ángulo estimado por el PLL. La dinámica del PLL se puede expresar como:

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\omega}, \quad (3)$$

$$\dot{\hat{\omega}} = k_p v_q + k_i \int v_q dt, \quad (4)$$

donde $\hat{\theta}$ es el ángulo estimado de la red, $\hat{\omega}$ es la velocidad angular estimada y v_q es la componente en cuadratura de la tensión en el PCC, es decir, la medida de tensión para la PLL es la tensión v_0 en la Fig. 2, i.e. la tensión del condensador. Las ganancias proporcional e integral del lazo se han llamado como k_p y k_i , respectivamente. En régimen permanente, el PLL garantiza el alineamiento con el vector de tensión de red al anular la componente v_q . El PLL descrito anteriormente solo ha sido verificado en un sistema trifásico, equilibrado, y considerando únicamente la frecuencia nominal (50Hz). En caso de trabajar en redes desequilibradas o con alto contenido de corrientes armónicas, habría que realizar modificaciones en el modelo de la PLL propuesto. La Fig. 2 muestra el esquemático del convertidor utilizado en este artículo, mientras que la Tabla I detalla los parámetros de control y físicos. El

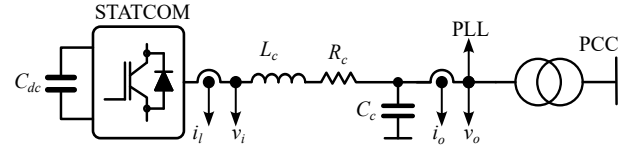


Fig. 2. Modelo de control del convertidor (STATCOM) y filtro de salida.

control de corriente se realiza sobre la inductancia de salida del convertidor L_c , i.e. la corriente i_i . El control de corriente se ha realizado por posicionamiento de polos sobre la planta RL del filtro de salida del convertidor. Los parámetros de control de la PLL se ha realizado también con posicionamiento de polos, asumiendo que la planta es instantánea con ganancia estática unidad.

TABLE I
PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR Y FILTRO (VALORES NOMINALES)

Parámetro	Valor
Frecuencia de conmutación (f_{sw})	10 kHz
Frecuencia de muestreo (f_s)	10 kHz
<i>Control PI de Tensión DC</i>	
Ganancia Proporcional ($k_{p,v}$)	0.02
Ganancia Integral ($k_{i,v}$)	2
<i>Control PI de Corriente (dq)</i>	
Ganancia Proporcional ($k_{p,i}$)	2.3
Ganancia Integral ($k_{i,i}$)	2438
<i>Control del ángulo - PLL(dq)</i>	
Ganancia Proporcional ($k_{p,PLL}$)	0.5
Ganancia Integral ($k_{i,PLL}$)	50
<i>Filtro de Salida y Conexión</i>	
Inductancia del filtro (L_f)	1.4 mH
Resistencia del filtro (R_f)	0.12 Ω
Capacidad del filtro (C_f)	10 μ F
Reactancia de transf. (X_t)	0.08 p.u.

D. Compensador síncrono

El compensador síncrono se modela como una máquina síncrona sin un transmisor de potencia primario ($P_m \approx 0$) y equipada con un disco de inercia adicional que incrementa significativamente la constante de inercia H . Su contribución de potencia activa es estrictamente transitoria ($P \propto d\omega/dt$), mientras que su capacidad de soporte de tensión es permanente gracias a su control automático de tensión (*Automatic Voltage Regulator*, AVR).

E. Emulador de red e impedancias equivalentes

La red vista desde el PCC se representa mediante una impedancia equivalente de Thevenin, Z_{th} . En el caso con compensador síncrono, la impedancia equivalente disminuye debido a la conexión en paralelo de la reactancia del SC, lo que aumenta la rigidez de la red vista por el PLL [2].

III. ESTABILIDAD DE PEQUEÑA SEÑAL

Cabe destacar que el análisis de pequeña señal es válido en el entorno de un punto de operación equilibrio. Aunque el experimento de laboratorio utiliza un escalón de carga (gran señal), el análisis modal permite predecir tendencias en el amortiguamiento y frecuencias de oscilación.

A. Linealización y formulación

El sistema no lineal se linealiza alrededor de un punto de operación estable, obteniendo la representación en espacio de estados:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y = C\Delta x + D\Delta u \end{cases} \quad (5)$$

donde el vector de estado Δx incluye las 28 variables de estado del sistema, incluyendo las variables de las máquinas síncronas, los estados del PLL, los integradores de los lazos de control del convertidor y los flujos magnéticos asociados a la red.

B. Autovalores y Análisis Modal

La Fig. 3 presenta el mapa de polos del sistema comparando los dos escenarios. Se destaca, gracias al análisis de participaciones de la Tabla II, el modo oscilatorio asociado al PLL. Al incorporar el compensador síncrono (Caso 2), la parte real de este modo dominante se desplaza hacia la izquierda en el plano complejo, lo que indica un aumento en el coeficiente de amortiguamiento (ζ).

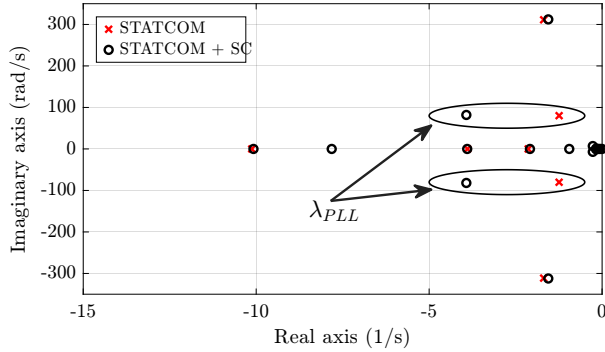


Fig. 3. Mapa de autovalores del sistema: Comparación entre Caso 1 (Sin SC) y Caso 2 (Con SC). Se observa el desplazamiento de los polos dominantes hacia regiones de mayor estabilidad.

C. Factores de participación

Para confirmar el origen físico de los modos, se calculan los factores de participación. La Tabla II muestra que el autovalor crítico (λ_{PLL}) está fuertemente participado por los estados internos del PLL (θ_{PLL}) y la medición de tensión, validando que la inestabilidad potencial es de naturaleza de sincronización.

TABLE II
FACTORES DE PARTICIPACIÓN DEL AUTOVALOR λ_{PLL}

Variable de Estado	Magnitud Normalizada
STATCOM/ θ_{PLL}	0.35
STATCOM/ V_{meas}^{PLL}	0.22
STATCOM/ ω_{PLL}	0.19
STATCOM/ V_{dc}	0.09
STATCOM/ xa_3	0.06
STATCOM/ ψ_s^d	0.02

En la Tabla II el nombre de los estados son los siguientes; θ_{PLL} es el ángulo de la PLL, V_{meas}^{PLL} es la variable asociada al filtro de medida de la tensión, ω_{PLL} es la frecuencia de la

PLL, V_{dc} es la tensión del bus de continua, xa_3 es la variable interna asociada al PI del control de corriente de eje d y por último ψ_s^d es el flujo de eje d del estator del SC.

D. Validación mediante simulación transitoria

Para corroborar el análisis modal, se han realizado simulaciones transitorias utilizando el modelo no lineal completo. Se aplicó un salto de carga resistiva idéntico al que se ejecutará posteriormente en la fase experimental. La Fig. 4 ilustra la respuesta temporal de la frecuencia estimada por la PLL en por unidad, para ambos escenarios de estudio.

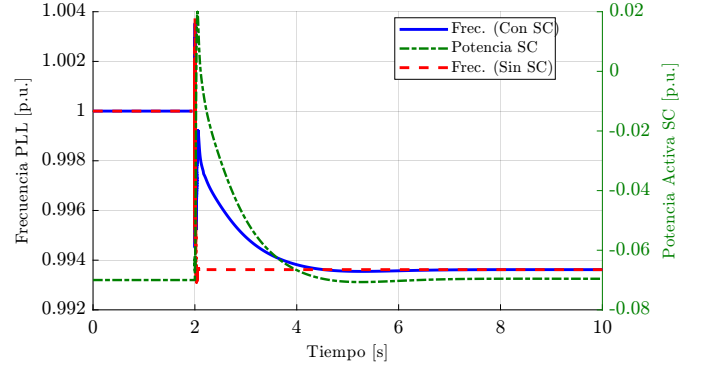


Fig. 4. Simulación de la respuesta temporal de la frecuencia de la PLL ante un escalón de carga. Se observa una reducción significativa del nadir y de las oscilaciones al conectar el compensador síncrono.

Los resultados de la simulación muestran que, en ausencia del compensador síncrono, la frecuencia del sistema experimenta una desviación más rápida y pronunciada (mayor RoCoF y menor nadir). Por el contrario, la incorporación del compensador síncrono ralentiza la dinámica de la frecuencia. Este comportamiento se debe a la inyección transitoria de potencia activa desde el SC hacia la red, la cual esta relacionada con la inercia del volante acoplado. Esta potencia entregada durante los primeros instantes tras la perturbación suaviza la rampa de frecuencia, permitiendo que la PLL opere en un entorno de tensión más estable y con un comportamiento mejor amortiguado, tal como predecía el análisis de autovalores.

IV. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

A. LIDER Lab: Arquitectura

El LIDER Lab de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, dispone de una infraestructura flexible para la emulación de sistemas de potencia síncrona o basada en convertidores. La Fig. 5 muestra un esquemático de las posibilidades que ofrece el LIDER Lab. El banco de generación síncrona convencional consta de 16 unidades modulares que pueden operar en paralelo sobre una barra común. Esta modularidad permite configurar escenarios con distintos niveles de inercia (H_{sys}) y potencia de cortocircuito (S_{sc}), facilitando el estudio de redes débiles y su interacción con convertidores de potencia. La Fig. 6 muestra la disposición física de estas unidades. El sistema del STATCOM se ha implementado a partir de una bancada de ensayos originalmente diseñada para un motor de inducción doblemente alimentado (*Doubly Fed Induction Generator*, DFIG). Mediante la configuración apropiada de

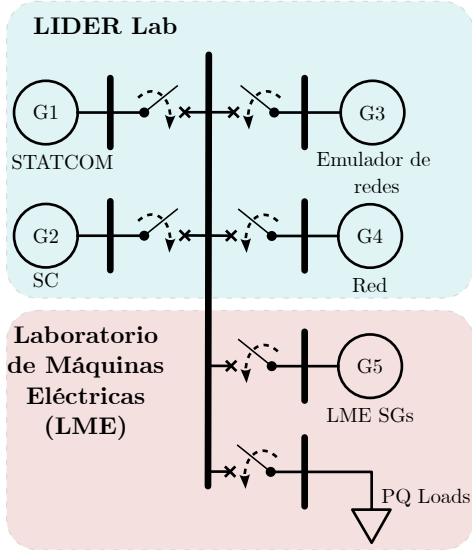


Fig. 5. Esquemático de las posibilidades que ofrece el LIDER Lab.

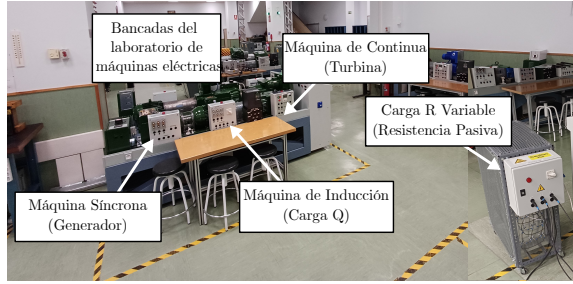


Fig. 6. Bancadas del laboratorio de máquinas eléctricas conectado al LIDER Lab.

los contactores, el convertidor del lado red (GSC) opera de forma autónoma como un STATCOM en modo *Grid-following*. La Fig. 7 ilustra el rack de control y potencia donde se aloja el sistema. Por último, el sistema del compensador síncrono, fundamental para este estudio, se detalla en la Fig. 8.

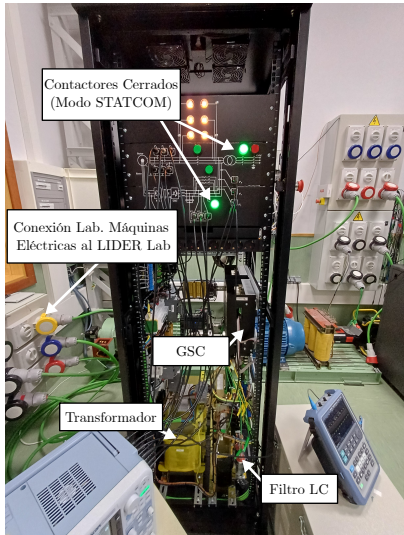


Fig. 7. Unidad de control y rack de potencia del STATCOM basado en tecnología GFL dentro del entorno experimental.

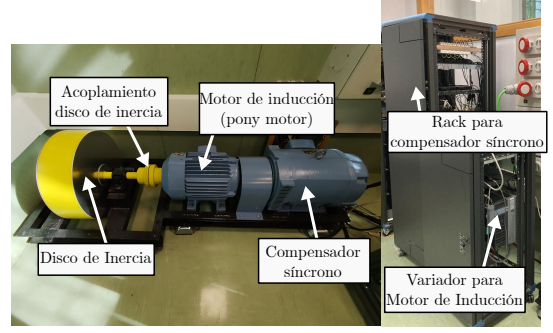


Fig. 8. Detalle del montaje del compensador síncrono: se observa el pony motor de arranque, la máquina síncrona principal y el disco de inercia acoplado al eje.

TABLE III
PARÁMETROS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Elemento	Parámetro	Valor
Bancadas Síncronas (x2)	S_n	≈ 10 kVA
	V_n	230 V
	Inercia H	≈ 1.5 s
Convertidor GFL	S_n	10 kVA
Carga Resistiva	P_{base}	5 kW
	Escalón ΔP	1 kW
Compensador Síncrono	S_n	10 kVA
	H (con disco)	6.2 s

El conjunto consta de un *pony motor* [8], [9], alimentado por un variador de frecuencia para alcanzar la velocidad de sincronismo; el generador síncrono principal, que actúa como compensador una vez desacoplado el motor de arranque; y un disco de inercia adicional. Este volante permite incrementar la energía cinética almacenada, emulando la respuesta de los sistemas reales en redes donde la baja inercia compromete la estabilidad [4].

B. Parámetros del ensayo

La Tabla III resume los ratings eléctricos principales utilizados en la validación experimental. Se emplean dos bancadas síncronas para establecer la red base y un generador síncrono adicional operando como compensador.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Escenarios de prueba

Se evalúa la respuesta del sistema ante un escalón de carga idéntico bajo dos condiciones:

- 1) **Caso Base:** Generación síncrona + Convertidor GFL.
- 2) **Caso Mejorado:** Generación síncrona + Convertidor GFL + Compensador Síncrono (SC).

B. Análisis de la respuesta en frecuencia

La Fig. 9 compara la evolución temporal de la frecuencia estimada por el PLL. La curva azul continua muestra la respuesta de la frecuencia de la PLL (ω^{PLL}) en p.u. del STATCOM conectada únicamente al SG. La curva naranja discontinua muestra ω^{PLL} del STATCOM conectado al SG y al SC. En el caso en el que está el SC conectado, se ha mostrado en línea verde continua en el eje derecho, la potencia activa entregada por el SC durante el transitorio.

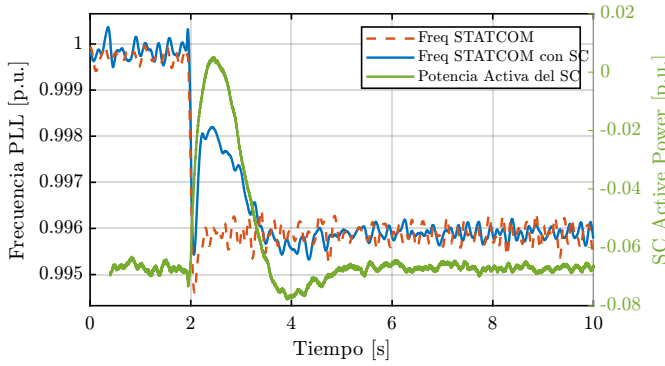


Fig. 9. Respuesta experimental de la frecuencia (estimación PLL) ante un escalón de carga: Comparación sin SC (rojo-línea discontinua) vs con SC (azul-línea sólida). La potencia eléctrica del SC se muestra en el eje vertical derecho (línea verde).

En el caso sin SC, se observa un mayor nadir de frecuencia y una oscilación posterior más pronunciada. Al conectar el SC, la inercia adicional reduce la tasa de cambio de frecuencia (RoCoF) y limita la excursión máxima (nadir). Esto corrobora el análisis de autovalores y las simulaciones transitorias previas.

C. Dinámica del Compensador Síncrono

La Fig. 10 ilustra el comportamiento mecánico del SC. Tras el escalón de carga, la velocidad del rotor disminuye desde ≈ 1500 rpm hasta ≈ 1488 rpm. Esta desaceleración confirma la inyección de potencia activa inercial ($\Delta P \approx -2H\omega \frac{d\omega}{dt}$) hacia la red, lo que suple momentáneamente el déficit de potencia y suaviza la caída de tensión y frecuencia.

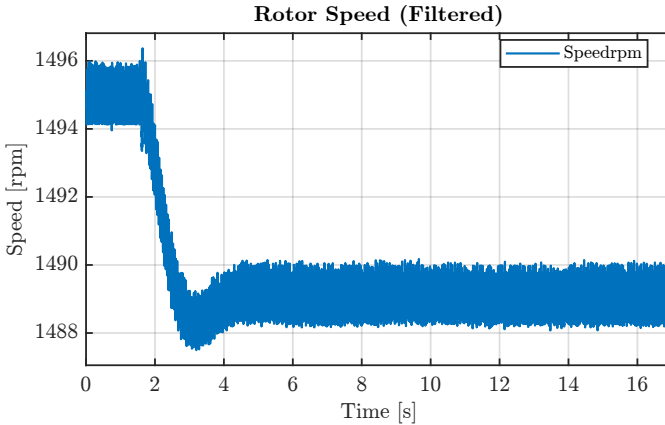


Fig. 10. Velocidad mecánica del rotor del compensador síncrono durante el transitorio. La pérdida de velocidad evidencia la entrega de energía cinética a la red.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado la validación experimental del LIDER Lab y su capacidad para analizar fenómenos de estabilidad en sistemas híbridos. Los resultados demuestran

que la integración de compensadores síncronos es una medida efectiva para mitigar problemas de estabilidad en convertidores GFL conectados a redes débiles.

Específicamente, se ha observado que el SC:

- 1) Aumenta la inercia total del sistema, reduciendo el nadir de frecuencia ante perturbaciones de carga.
- 2) Incrementa la rigidez de la red en el punto de conexión, lo que resulta en un mejor amortiguamiento de los modos asociados al PLL del convertidor.

Estos hallazgos validan experimentalmente las predicciones teóricas del análisis de pequeña señal y posicionan al LIDER Lab como una plataforma robusta para futuros estudios de integración de renovables.

AGRACECIMIENTOS

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+.

REFERENCES

- [1] O. Erdinc, N. G. Paterakis, and J. P. S. Catalão, "Overview of insular power systems under increasing penetration of renewable energy sources: Opportunities and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 333–346, Dec. 2015.
- [2] J. Suárez-Porras, F. Fernández-Bernal, L. Rouco, and A. Tomás-Martín, "Synchronous Compensators Considering Reactive Power for PLL Stability Improvement and Short-Circuit Ratio Evaluation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 1–17, 2025.
- [3] W. Dong, H. Xin, D. Wu, and L. Huang, "Small Signal Stability Analysis of Multi-Feed Power Electronic Systems Based on Grid Strength Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 1393–1403, Mar. 2019.
- [4] M. Caldora, L. Cantoni, M. C. Falvo, A. Coretti, A. Lazzarin, C. Vergine, A. Cinque, and B. Aluisio, "Synchronous condensers with flywheel for power systems with high penetration of RES: The case of Italian transmission grid," in *2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Oct. 2022, pp. 1–5.
- [5] E. Marrazi, G. Yang, and P. Weinreich-Jensen, "Allocation of synchronous condensers for restoration of system short-circuit power," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 17–26, Jan. 2018.
- [6] L. Ding, X. Lu, and J. Tan, "Small-Signal Stability Analysis of Low-Inertia Power Grids with Inverter-Based Resources and Synchronous Condensers," in *2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. New Orleans, LA, USA: IEEE, Apr. 2022, pp. 1–5.
- [7] S. Ghimire, K. V. Kkuni, E. D. Guest, K. H. Jensen, and G. Yang, "Small-Signal Stability and SCR Enhancement of Offshore WPPs with Synchronous Condensers," Oct. 2023.
- [8] A. Karisik, W. Ong, T. Bertes, T. Lim, and J. Leung, "Installation of a Synchronous Condenser - the Kiamal Solar Farm example," in *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Dec. 2021, pp. 1–5.
- [9] K. Becker, "Correcting mill power factor with a synchronous condenser," in *Conference Record of 1991 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Jun. 1991, pp. 257–261.