

# Análisis Modal de un Compensador Síncrono de 10kW con Disco de Inercia Conectado a Red

Jorge Suárez-Porras, Fidel Fernández Bernal, Luis Rouco, Andrés Tomás-Martín and Aurelio García-Cerrada  
 IIT, ETSI ICAI - Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España

**Resumen**—Este artículo explora el análisis modal de un compensador síncrono conectado a red mediante la estabilidad de pequeña perturbación. En las redes de energía renovable actuales, la disminución de la inercia y de la corriente de cortocircuito son desafíos significativos para la estabilidad del sistema. Los compensadores síncronos aportan tanto inercia como capacidad de cortocircuito a la red, lo que puede ser un factor determinante para aumentar la integración de energías renovables en el sistema. Modelar correctamente el compensador síncrono es crucial para validar los resultados de las simulaciones cuando se instala en distintos sistemas de energías renovables. Tras analizar los resultados del análisis modal y compararlos con los resultados experimentales en un compensador síncrono de 10kW con disco de inercia, este artículo verifica la importancia de modelar correctamente el compensador síncrono.

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

## I. INTRODUCCIÓN

La composición de la generación eléctrica está experimentando una transformación global. Las redes de generación tradicional están cediendo paso a la generación renovable. Una gran parte de esta generación renovable proviene de fuentes solares y eólicas, conectadas a la red de transporte y distribución a través de convertidores electrónicos. Estos convertidores ofrecen numerosas ventajas en términos de versatilidad en los diseños de control y gestión de recursos. Sin embargo, presentan dos desafíos significativos: la pérdida de inercia y la disminución del aporte a la relación de cortocircuito [1], [2]

Los compensadores síncronos, que son generadores síncronos sin tracción en el eje (es decir, el eje gira en vacío), se utilizan para regular la potencia reactiva de la red y mantener los niveles de tensión. Debido a que el eje gira a velocidad de sincronismo, almacena energía cinética. En caso de falta en bornas de la máquina, esta energía se libera naturalmente a la red eléctrica en forma de potencia activa. Esta característica permite que los compensadores síncronos aporten inercia natural a la red, la cual puede incrementarse mediante la instalación de un disco de inercia en el eje[3]. Esta inercia es considerablemente mayor que la inercia virtual que se programa en los convertidores electrónicos.

Además, los compensadores síncronos, por su construcción, proporcionan una gran potencia de cortocircuito. Cuando se produce un hueco de tensión en bornas de la máquina, ésta inyecta una gran cantidad de corriente, hasta 3-5 veces la corriente nominal de la máquina [4], [5], mientras que los convertidores tienen una corriente cortocircuito de 1,1-1,2 veces la corriente nominal [1], [2]. Es por ello que los

compensadores síncronos contribuyen sustancialmente a la corriente de cortocircuito en el punto de conexión donde se instalan. A primera vista, el aporte de inercia y de corriente de cortocircuito parecen ser fenómenos desacoplados. La inercia tiene una constante de tiempo que puede ser de 6-8 segundos cuando se instala un disco de inercia, mientras que la constante de tiempo subtransitoria es de alrededor de 0,4 - 0,6 milisegundos [6]. Sin embargo, este artículo profundiza en la interrelación entre estos dos fenómenos y su impacto en la eficacia de los compensadores síncronos.

## II. SISTEMA BAJO ESTUDIO

La Figura 1 muestra el sistema bajo estudio. El compensador síncrono se conecta a la red a través de un transformador de tensión.

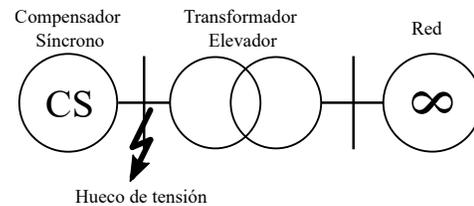


Figura 1. Sistema de estudio.

El modelado del compensador síncrono puede dividirse en dos etapas: (1) el modelado electromagnético y (2) el modelado electromecánico. Los valores de las variables de las ecuaciones que siguen pueden encontrarse en la Tabla ?? . Respecto al modelado electromagnético, las ecuaciones de la tensión se recoge en el sistema (1) [6]:

$$\begin{aligned}
 e_d &= p\Psi_d - \Psi_q\omega_r - R_a i_d \\
 e_q &= p\Psi_q + \Psi_d\omega_r - R_a i_q \\
 e_{fd} &= p\Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \\
 0 &= p\Psi_{1d} + R_{1d} i_{1d} \\
 0 &= p\Psi_{1q} + R_{1q} i_{1q}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $e_d$  y  $e_q$  son las tensiones de eje directo y de cuadratura, respectivamente. La transformada de Park se aplica a las variables trifásicas para tener valores constantes en el estado estacionario.  $p$  representa la derivada con respecto al tiempo de la variable que le sigue,  $\Psi_d$  y  $\Psi_q$  son los flujos magnéticos en los ejes directo y en cuadratura, respectivamente.  $\omega_r$  es la velocidad angular del rotor en radianes por segundo.  $R_a$  es la resistencia de armadura. Las corrientes de eje directo y de eje en cuadratura se denotan como  $i_d$  e  $i_q$  respectivamente.  $e_{fd}$  es la tensión de excitación en el eje directo,  $\Psi_{fd}$  es

el flujo magnético de excitación en el eje directo, y  $R_{fd}$  es la resistencia de excitación en el eje directo. Finalmente,  $\Psi_{1d}$  y  $\Psi_{1q}$  representan los flujos magnéticos de los circuitos amortiguadores de eje directo y cuadratura.

Las ecuaciones electromagnéticas que relacionan los flujos magnéticos se recogen en (2) [6]:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= -(L_{ad} + L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \\ \Psi_q &= -(L_{aq} + L_l) i_q + L_{aq} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} \\ \Psi_{fd} &= L_{ffd} i_{fd} + L_{f1d} i_{1d} - L_{ad} i_d \\ \Psi_{1d} &= L_{f1d} i_{fd} + L_{11d} i_{1d} - L_{ad} i_d \\ \Psi_{1q} &= L_{11q} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} - L_{aq} i_q\end{aligned}\quad (2)$$

Donde  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  representan las inductancias mutuas de armadura en los ejes directo y en cuadratura, respectivamente.  $L_l$  es la inductancia de dispersión en el estator.  $L_{ffd}$  es la autoinductancia del devanado de excitación.  $L_{f1d}$  es la inductancia mutua entre devanado de excitación y el devanado amortiguador de eje d.  $L_{11d}$  y  $L_{11q}$  son las autoinductancias en los ejes directo y en cuadratura de los devanados amortiguadores.

El modelo de la ecuación electromecánica surge de estudiar el modelo real del laboratorio. El compensador síncrono acoplado al disco de inercia es llevado a velocidad de sincronismo, i.e. 50Hz eléctricos, mediante un motor de inducción. Dado que las masas de los ejes de compensador síncrono y motor de inducción son mucho menores que la del disco de inercia, se asume que el sistema se reduce a un sistema de dos masas. De esta manera, el sistema de masas se muestra en la Figura 2.

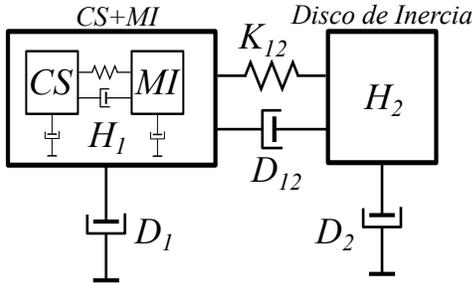


Figura 2. Modelo de dos masas del sistema. La máquina síncrona y de inducción se consideran en el mismo eje.

Finalmente, la ecuación electromecánica, en por unidad, del eje de la máquina se rige por las ecuaciones (3)

$$\begin{aligned}2H_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= K_{12} (\delta_2 - \delta_1) - T_e - D_{12} (\omega_1 - \omega_2) - D_1 \omega_1 \\ 2H_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= T_m - K_{12} (\delta_2 - \delta_1) - D_{12} (\omega_2 - \omega_1) - D_2 \omega_2 \\ \frac{d\delta_1}{dt} &= \frac{\omega_0}{P} (\omega_1 - 1) \\ \frac{d\delta_2}{dt} &= \frac{\omega_0}{P} (\omega_2 - 1) \\ v_{gd} &= v_g \cos(P\delta_1) \\ v_{gq} &= v_g \sin(P\delta_1)\end{aligned}\quad (3)$$

donde  $H_1$  es la inercia del compensador síncrono y máquina de inducción en segundos,  $T_m$  y  $T_e$  son los pares mecánicos y eléctricos aplicados en el eje,  $D_{12}$  es la constante amortiguadora mutua en el acoplamiento,  $K_{12}$  es la constante del acoplamiento en el eje,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos a cada lado del acoplamiento, siendo  $\theta_1$  el ángulo con el que se proyecta el cambio de ejes de la red sobre el sistema de referencia del compensador síncrono, i.e.  $v_{gdq}$ .

## II-A. Análisis modal y simulaciones

Se ha llevado a cabo un análisis modal del sistema anteriormente descrito. compuesto de un compensador conectado a la red eléctrica a través de un transformador. Dado que es de interés la dinámica de la inercia y de la respuesta de las ecuaciones electromagnéticas, se modela dinámicamente el compensador síncrono y estáticamente el resto de componentes. El análisis modal parte de un sistema lineal de la forma (4):

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x + D \cdot u \end{cases}\quad (4)$$

donde  $x$  es el vector de las variables de estado,  $u$  es el vector de entradas al sistema,  $y$  es el vector de variables de salida y  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son las matrices que definen el sistema.

Para estudiar la estabilidad de pequeña perturbación, es necesario estudiar el sistema entorno a un punto de operación tal que  $\Delta x = x - x_0$  donde  $x_0$  es el punto de operación a estudiar. De esta manera, estudiando los autovalores de la matriz  $A$  del sistema linealizado (5), puede determinarse la estabilidad del sistema así como obtener información de la respuesta del sistema ante perturbaciones.

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

Adicionalmente, las participaciones permiten averiguar que estados están más fuertemente relacionadas con determinados autovalores. Las participaciones se obtienen operando los autovectores por la izquierda y por la derecha, definidos en (6),

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i \cdot \lambda_i \\ \mathbf{w}_i^T \cdot \mathbf{A} = \lambda_i \cdot \mathbf{w}_i \end{cases}\quad (6)$$

y las participaciones se calculan con (7) [7],

$$p_{ji} = \frac{w_{ji} v_{ji}}{\sum_k |w_{ik}| |v_{ik}|}\quad (7)$$

donde  $p_{ji}$  es el factor de participación normalizado del modo  $i$ -ésimo en la variable  $j$ -ésima,  $v_{ji}$  es el elemento de la fila  $j$ -ésima y la columna  $i$ -ésima del autovector derecho  $\mathbf{V}$ ,  $w_{ij}$  es el elemento de la fila  $i$ -ésima y la columna  $j$ -ésima del autovector izquierdo  $\mathbf{W}$ , siendo  $\mathbf{W} = \mathbf{V}^{-1}$ .

## II-B. Caso de estudio 1: Sin disco de inercia

El primer estudio que se lleva a cabo consiste en analizar el sistema cuando el compensador síncrono no dispone de disco de inercia. La inercia del eje es de 0,3s. La ecuación (3) se reduce a un sistema de una sola como en (8).

$$2H_1 \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - D_1 \omega_r\quad (8)$$

Los autovalores obtenidos del sistema sin disco de inercia se muestran en la Tabla I y las participaciones de los autovalores en los estados en la Tabla II. En la Tabla II se han descartado las participaciones inferiores a 0,05, redondeando el resto para normalizarlas.

Tabla I  
AUTOVALORES DEL SISTEMA SIN DISCO DE INERCIA

Autovalor	Parte Real (1/s)	Parte Imaginaria (rad/s)	Frecuencia (Hz)
$\lambda_1$	-100,001	-0,223	15,916
$\lambda_2$	-0,453	-18,312	2,915
$\lambda_3$	-47,21	-381,313	61,151
$\lambda_4$	-47,21	381,313	61,151
$\lambda_5$	-0,453	18,312	2,915
$\lambda_6$	-100,001	0,223	15,916
$\lambda_7$	-2231,014	0	355,077
$\lambda_8$	-282,028	0	44,886
$\lambda_9$	-7,74	0	1,232

Tabla II  
PARTICIPACIONES DE LOS AUTOVALORES DEL SISTEMA SIN DISCO DE INERCIA

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
$\omega_r$	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0
$\theta$	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0
$\Psi^s$	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0
$\Psi_a^d$	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0
$\Psi_{fd}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$\Psi_{kd1}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$\Psi_{kg1}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$AVR_{Ka}$	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0	0
$AVR_{filter}$	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0	0

Analizando las participaciones del sistema pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- La velocidad de rotación del rotor en caso de ocurrir una pequeña perturbación debe tener una respuesta temporal de aproximadamente 3Hz.
- Dado que los autovalores relacionados fuertemente con la velocidad del rotor y el ángulo de giro no participan en las variables de las ecuaciones electromagnéticas, la inercia del rotor no debe tener un fuerte impacto en las variables de estado de las ecuaciones electromagnéticas.

### II-C. Caso de estudio 2: Con disco de inercia

El primer estudio que se lleva a cabo consiste en analizar el sistema cuando el compensador síncrono lleva acoplado un disco de inercia en el eje. La inercia del eje, combinando todas las inercias recogidas en la Tabla ??, es de 6,6s.

Los autovalores obtenidos del sistema con disco de inercia se muestran en la Tabla III y las participaciones de los autovalores en los estados en la Tabla IV. En la Tabla IV se han descartado las participaciones inferiores a 0,05, redondeando el resto al primer decimal para normalizarlas.

Tabla III  
AUTOVALORES DEL SISTEMA CON DISCO DE INERCIA

Autovalor	Parte Real (1/s)	Parte Imaginaria (rad/s)	Frecuencia (Hz)
$\lambda_1$	-6,269	-129,005	20,556
$\lambda_2$	-1000	-0,222	15,916
$\lambda_3$	-0,061	-3,951	0,629
$\lambda_4$	-47,170	-381,258	61,142
$\lambda_5$	-47,170	381,258	61,142
$\lambda_6$	-0,061	3,951	0,629
$\lambda_7$	-1000	0,222	15,916
$\lambda_8$	-2231,017	00	355,077
$\lambda_9$	-282,685	00	44,991
$\lambda_{10}$	-7,943	00	1,264
$\lambda_{11}$	-6,269	-129,005	20,556

Analizando las participaciones del sistema pueden obtenerse conclusiones similares a las obtenidas sin disco de inercia con la diferencia de que ante una pequeña perturbación la respuesta temporal de la velocidad del rotor debe tener una frecuencia de 0,6Hz.

### II-D. Bancada de laboratorio

Los resultados preliminares del análisis modal en pequeña perturbación sugieren que las variables de la inercia no están directamente acopladas con las dinámicas de las ecuaciones electromagnéticas. Se han diseñado una serie de experimentos para verificar el análisis modal realizado anteriormente. El esquemático de la bancada de laboratorio se muestra en la Figura 3.

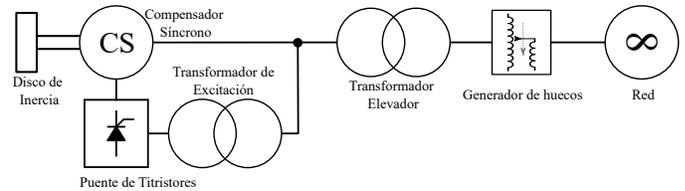


Figura 3. Esquemático de la bancada de laboratorio

Para ello, se dispone de la bancada de laboratorio desarrollada en que se muestra en la Figura 4. Los parámetros del generador síncrono y del disco de inercia se recogen en el Apéndice A

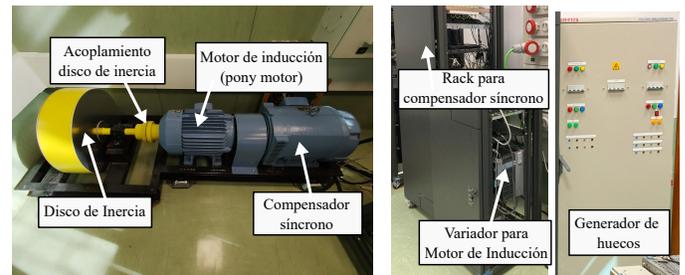


Figura 4. Bancada de laboratorio para estudio del compensador síncrono

El disco de inercia se ha desacoplado para los experimentos en los que se quiere analizar el sistema con baja inercia.

Tabla IV  
PARTICIPACIONES DE LOS AUTOVALORES DEL SISTEMA CON DISCO DE INERCIA Y SISTEMA DE DOS MASAS

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{11}$
$\omega_1$	0	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0
$\theta_1$	0	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0
$\Psi_s^d$	0	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
$\Psi_q^d$	0	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
$\Psi_{fd}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$\Psi_{kd1}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$\Psi_{kg1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$AVR_{Ka}$	0	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0
$AVR_{filter}$	0	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0
$\omega_2$	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
$\theta_2$	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5

El motor de inducción que aparece en la Figura 4, también denominado en inglés *pony motor* [8], se utiliza para llevar el compensador síncrono a velocidad de sincronismo de la red, i.e. 50Hz eléctricos (25Hz en la máquina del laboratorio al ser de dos pares de polos según(9)). Una vez sincronizado y acoplado el compensador síncrono a la red, se desconecta el variador del motor de inducción y el rotor queda en vacío consumiendo de la red las pérdidas de la bancada.

$$\omega_r^{mecanica} = \frac{\omega_r^{electrica}}{N_{pp}} \quad (9)$$

siendo  $N_{pp}$  el número de pares de polos. El experimento que se realiza consiste en generar un hueco de tensión mediante el cambio de tomas en el transformador que alimenta al compensador síncrono. El presente estudio se centra en el análisis de la corriente de cortocircuito y de la velocidad del rotor.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El primer experimento consiste en aplicar un hueco de tensión de 25ms de duración en bornas del generador síncrono con y sin disco de inercia acoplado. La Figura 5 muestra la corriente por el estator del compensador síncrono tras el hueco de tensión. Puede comprobarse cómo la corriente máxima, la capacidad de cortocircuito del generador, no depende significativamente de la inercia del rotor.

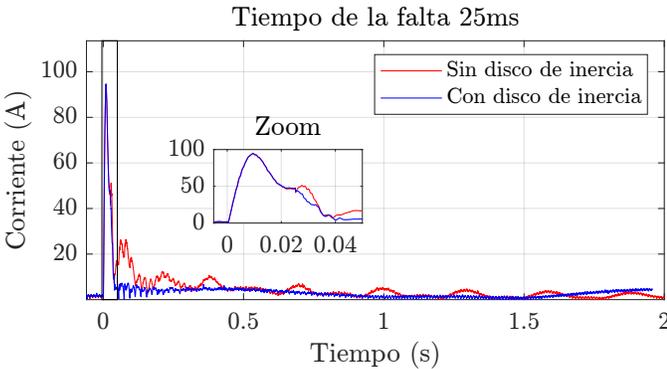


Figura 5. Módulo de la corriente trifásica ante un hueco de tensión de 25ms sin y con disco de inercia acoplado al eje.

La Figura 6 muestra la velocidad del rotor ante la misma falta. Sin disco de inercia, puede observarse que las oscilaciones son de aproximadamente 3Hz. Con disco de inercia, la respuesta transitoria puede dividirse en dos dinámicas bien distinguidas. Una inicial de mayor frecuencia (20Hz, correspondiente a la baja inercia del compensador síncrono con el motor de inducción), y otra de menor frecuencia (0,7Hz, correspondiente a la alta inercia del disco de inercia).

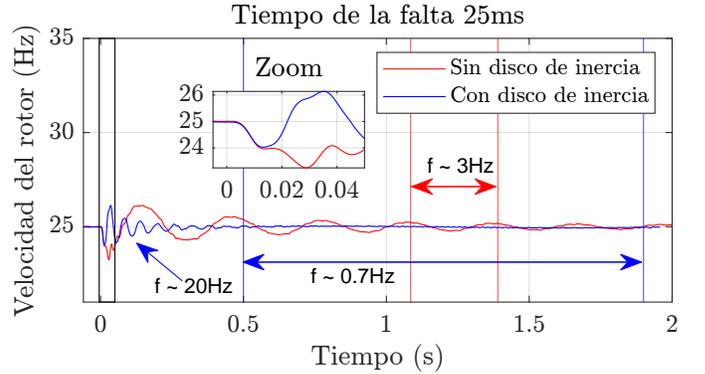


Figura 6. Respuesta de la velocidad mecánica del rotor del compensador síncrono ante un hueco de tensión de 25ms sin y con disco de inercia acoplado al eje.

La Figura 7 muestra la corriente por el estator del compensador síncrono tras un hueco de tensión de 75ms. Puede comprobarse cómo la corriente máxima, la capacidad de cortocircuito del generador, no depende significativamente de la inercia del rotor. No obstante, puede observarse cómo la máxima corriente por el estator se alcanza en dos ocasiones durante el régimen transitorio. Este hecho no se recoge en el estudio de pequeña señal realizado anteriormente. Esto puede deberse a que, dado que el hueco de tensión es tres veces de mayor duración que el anterior (75ms frente a 25ms), los efectos producidos no pueden estudiarse por análisis de pequeña señal.

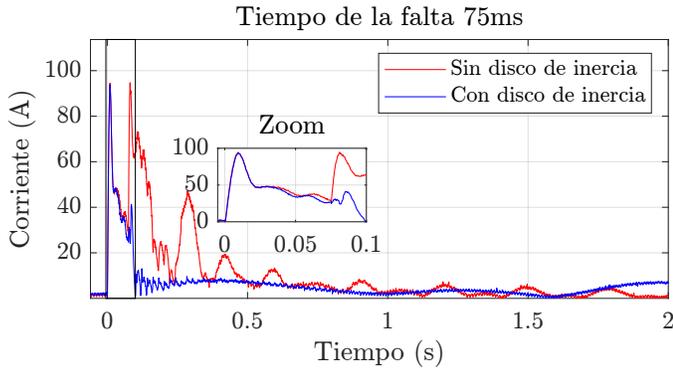


Figura 7. Módulo de la corriente trifásica ante un hueco de tensión de 75ms sin y con disco de inercia acoplado al eje.

La Figura 8 muestra la velocidad del rotor ante el mismo hueco de tensión, pero ahora de 75ms en bornas de la máquina. Puede observarse cómo la desviación de velocidad es mayor cuanto mayor es el hueco de tensión. Además, puede observarse que cuando el disco de inercia está acoplado al eje, la velocidad del rotor no se ve alterada significativamente por la duración del hueco de tensión. En este caso, a pesar de que la falta es de 75ms, el análisis de pequeña perturbación sí recoge las dinámicas que se recogen en el experimento.

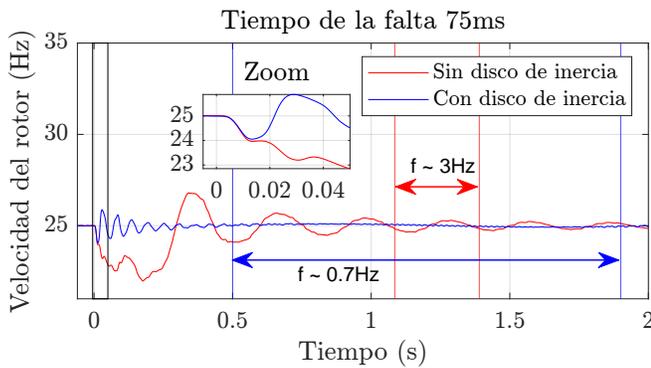


Figura 8. Respuesta de la velocidad mecánica del rotor del compensador síncrono ante un hueco de tensión de 75ms sin y con disco de inercia acoplado al eje.

#### IV. CONCLUSIONES

En este estudio, hemos explorado en profundidad la relación entre la inercia y la corriente de cortocircuito en el contexto de los compensadores síncronos. Nuestros hallazgos indican que, si se produce un hueco de tensión suficientemente largo, el estudio de pequeña señal puede no abarcar con fiabilidad lo recogido en el laboratorio cuando se estudian fenómenos relativamente rápidos (corrientes de cortocircuito o dinámicas electromagnéticas) frente a fenómenos más lentos (variaciones en la velocidad del eje). Es necesario un barrido más extenso de huecos de tensión de distintas duraciones para concluir cuál sería el límite para la validez de análisis de pequeña señal del sistema.

Además, hemos descubierto que los compensadores síncronos pueden desempeñar un papel crucial paliando los des-

años actuales en las redes de energía renovable, como la disminución de la inercia y la corriente de cortocircuito. Estos dispositivos aportan tanto inercia como capacidad de cortocircuito a la red, lo que puede ser un factor determinante para aumentar la integración de energías renovables en el sistema.

#### 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+.

#### APÉNDICE A PARÁMETROS

Tabla V  
PARÁMETROS DEL COMPENSADOR SÍNCRONO DEL LABORATORIO

Param.	Descripción	Valor [pu]
$S$	Potencia aparente nominal	10 kVA
$V$	Tensión nominal	400 V
$n$	Velocidad nominal	1500 rpm
$H_1$	Inercia máquina síncrona y asíncrona	0,3s
$H_2$	Inercia disco de inercia	6,3s
$D_1$	Rozamiento viscoso máquina síncrona y asíncrona	0,001
$D_2$	Rozamiento viscoso disco de inercia	0,7
$D_{12}$	Rozamiento viscoso del acoplamiento	6,2
$K_{12}$	Fricción del acoplamiento	1,04
$E_{fd}^{base}$	Tensión de campo base	10,9 V
$I_{fd}^{base}$	Corriente de campo base	1,1 A
$x_{du}$	Reactancia síncrona no saturada en el eje d	3,0
$x_{\dot{\theta}}$	React. transitoria en el eje d	0,26
$x_d$	React. subtransitoria en el eje d	0,19
$x_{qu}$	React. síncrona no saturada en el eje q	1,5
$x_q$	React. subtransitoria en el eje q	0,9
$r_a$	Resistencia de armadura	0,04
$x_l = xp$	React. de fuga (Potier)	0,16
$x_{adu}$	React. de magnetización no saturada en el eje d	2,85
$r_{fd}$	Resistencia de campo	0,008
$x_{fd}$	React. de campo	0,1
$r_{kd}$	Resistencia de amortiguamiento en el eje d	0,8
$x_{kd}$	React. de amortiguamiento en el eje d	0,05
$r_{kq}$	Resistencia de amortiguamiento en el eje q	1,8
$x_{kq}$	React. de amortiguamiento en el eje q	1,8

#### REFERENCIAS

- [1] E. Marrazi, G. Yang y P. Weirich-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.
- [2] 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.
- [3] M. Caldora, L. Cantoni, M. C. Falvo, A. Coretti, A. Lazzarin, C. Vergine, A. Cinque y B. Aluisio, "Synchronous Condensers with Flywheel for Power Systems with High Penetration of RES: The Case of Italian Transmission Grid," en *2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, oct. de 2022, págs. 1-5.
- [4] S. Hadavi, S. P. Me, B. Bahrani, M. Fard y A. Zadeh, "Virtual Synchronous Generator Versus Synchronous Condensers: An Electromagnetic Transient Simulation- based Comparison,"

- [5] D. B. Rathnayake, M. Akrami, C. Phurailatpam, S. P. Me, S. Hadavi, G. Jayasinghe, S. Zabihi y B. Bahrani, "Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications," *IEEE Access*, vol. 9, págs. 114 781-114 807, 2021.
- [6] P. Kundur, N. Balu y M. Lauby, *Power System Stability and Control* (EPRI Power System Engineering Series). McGraw-Hill Education, 1994.
- [7] I. J. Perez-arriaga, G. C. Verghese y F. C. Schweppe, "Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems, PART I: Heuristic Introduction," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, n.º 9, págs. 3117-3125, sep. de 1982.
- [8] K. Becker, "Correcting Mill Power Factor with a Synchronous Condenser," en *Conference Record of 1991 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, jun. de 1991, págs. 257-261.