



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE AJUSTE DE
ESTABILIZADORES DE OSCILACIONES
SUBSÍNCRONAS DE AEROGENERADORES
BASADOS EN GENERADORES DE INDUCCIÓN
DOBLEMENTE ALIMENTADOS

Autor: Paloma López Díaz

Director: Luis Rouco Rodríguez

Co-Director: Javier García Aguilar

Madrid

Julio de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D^a Paloma López Díaz DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Comparación de dos métodos de ajuste de estabilizadores de oscilaciones subsíncronas en aerogeneradores basados en generadores de inducción doblemente alimentados”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 2 de julio de 2019

ACEPTA

*Paloma
López*

Fdo.....

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE
OSCILACIONES SUBSÍNCRONAS DE AEROGENERADORES BASADOS
GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2019 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total
ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

PROYECTO REALIZADO POR EL ALUMNO


Paloma López Díaz

Fdo.:  Fecha: 02/07/19.

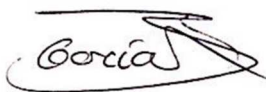
Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Luis Rouco Rodríguez

Fdo.:  Fecha: 02/07/19

Javier García Aguilar

Fdo.:  Fecha: 02/07/19.

COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE OSCILACIONES SUBSÍNCRONAS DE AEROGENERADORES BASADOS EN GENERADORES DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADOS

Autor: López Díaz, Paloma.

Director: Rouco Rodríguez, Luis.

Co-Director: García Aguilar, Javier.

Entidad colaboradora: ICAI- Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Abstracto – La resonancia subsíncrona puede aparecer en parques eólicos basados en generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) conectados a través de líneas de gran longitud con compensación serie. En este proyecto se emplean dos métodos de diseño de estabilizadores de oscilaciones subsíncronas: sensibilidades de los autovalores y filtro de Kalman. Se consideran dos casos de estudio, variando el factor de compensación de la línea. Los resultados de la simulación con Matlab/Simulink se comparan de acuerdo a dos criterios: amortiguamiento del modo subsíncrono y supersíncrono y máxima sensibilidad.

Palabras clave – DFIG, filtro de Kalman, línea compensada serie, resonancia subsíncrona, sensibilidades de los autovalores.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto parte de un problema existente en parques eólicos terrestres basados en generadores de inducción doblemente alimentados conectados a través de líneas de gran longitud con compensación en serie. En estos sistemas aparece una frecuencia natural (1) asociada a la línea compensada serie que puede provocar oscilaciones inestables. Se conoce este fenómeno como resonancia subsíncrona [1].

$$f_e = f_0 \cdot \sqrt{\frac{x_c}{x_\Sigma}} \quad (1)$$

Donde f_e es la frecuencia de las corrientes subsíncronas; f_0 es la frecuencia fundamental de la red (50 Hz); x_c es la reactancia del condensador serie; y x_Σ es la reactancia total de la línea y el transformador. El factor $\frac{x_c}{x_\Sigma}$ es el denominado “factor de compensación” de la línea. En este estudio se han considerado dos casos, considerándose los siguientes factores: 8% y 20%.

Las siguientes corrientes subsíncronas de la línea producen pares y corrientes en el rotor a una frecuencia complementaria:

$$f_r = f_0 - f_e \quad (2)$$

Dichas corrientes generan tensiones en el rotor, que a su vez pueden incrementar las corrientes. Si las frecuencias de oscilación del eje del generador interactúan con las frecuencias de las corrientes del rotor, se producirá la resonancia subsíncrona.

Se han abierto diferentes líneas de estudio ante el problema de la resonancia subsíncrona. Algunas soluciones están dirigidas a garantizar la estabilidad del sistema, por ejemplo sustituyendo el condensador serie por otros aparatos que realizan la misma función de

compensación de reactiva (STATCOM o FACTS). Otro enfoque es realizar estudios con el fin de identificar cuáles son los posibles puntos de funcionamiento en los que puede aparecer la resonancia [2]-[5].

El objetivo del proyecto es la comparación de las prestaciones de los estabilizadores de oscilaciones subsíncronas de aerogeneradores basados en generadores de inducción doblemente alimentados diseñados por medio de dos métodos: sensibilidades de los autovalores y filtro de Kalman.

Se utilizan modelos de simulación disponibles en Matlab/Simulink.

II. MODELO DE SIMULACIÓN

La Figura 1 muestra el modelo empleado para la simulación de este proyecto. Se compone del generador asíncrono doblemente alimentado, un transformador elevador, la línea compensada en serie y la conexión a la red.

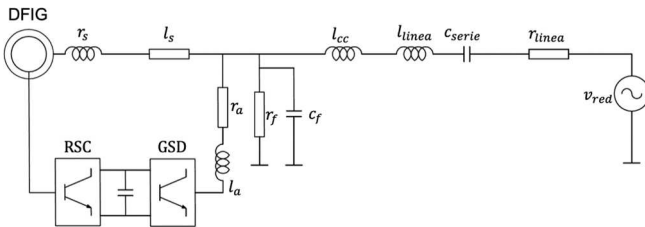


Figura 1: Esquema unifilar del modelo con máquina asíncrona doblemente alimentada, transformador elevador, línea compensada serie y red.

III. DISEÑO DE ESTABILIZADORES

A. Método de sensibilidades de los autovalores

Se define la sensibilidad del autovalor λ_i con respecto al parámetro q de la matriz de estados A como:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial q} = \vec{w}_i^T \frac{\partial A(q)}{\partial q} \vec{v}_i \quad (3)$$

El estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e diseñado por este método tiene la siguiente función de transferencia:

$$F(s, K_S) = K_S \left(\frac{1 + s T_{S1}}{1 + s T_{S2}} \right) \left(\frac{1 + s T_{S3}}{1 + s T_{S4}} \right) \frac{s T_{S5}}{1 + s T_{S5}} \quad (4)$$

Consiste en dos etapas de compensación de fase y un filtro wash-out que evita que el estabilizador actúe para cambios en régimen permanente.

En el primer paso, se impone que la fase de la sensibilidad sea 180° . Se calculan las constantes de tiempo (T_{Sn}). En la segunda fase, obtiene la ganancia del estabilizador (K_S) a partir del amortiguamiento diseñado [6].

B. Método de filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un estimador de estados basado en estadística. Los estados son calculados a partir de estados previos, información sobre el ruido de los sensores y las medidas que éstos ofrecen.

El algoritmo es recursivo y tiene dos fases: predicción y corrección.

La Figura 2 muestra la estructura del controlador.

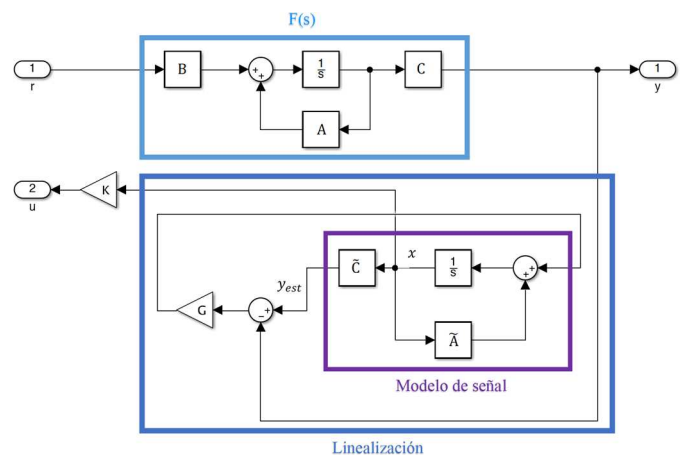


Figura 2: Implantación del Filtro de Kalman en el modelo

$F(s)$ representa la planta del modelo (generador, línea y conexión a la red). Dentro del bloque del modelo de señal, la salida (p_e en

el caso del estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$) se divide en 5 componentes: dos vectores giratorios a distintas frecuencias y un término constante. La matriz K y la estimación X proporcionan el mando u del estabilizador.

Los parámetros del controlador se optimizan con algoritmos genéticos, minimizando la máxima sensibilidad.

IV. RESULTADOS

La Tabla 1 y Tabla 2 la información obtenida a partir de las simulaciones. La comparación entre los dos métodos del estabilizador de oscilaciones subsíncronas se evalúa en función de dos criterios: amortiguamiento de los modos subsíncrono y supersíncrono, y máxima sensibilidad.

FC	Modos	Original	Sensibilidades de los autovalores	Filtro de Kalman
8%	Supersíncrono	4,70	2,76	11,77
	Subsíncrono	-0,25	2,61	11,54
20%	Supersíncrono	5,08	2,13	4,24
	Subsíncrono	-5,80	1,99	5,33

Tabla 1: Comparación del amortiguamiento del modo subsíncrono y supersíncrono que aporta cada método en función del factor de compensación de la línea

Factor de compensación	Estabilizador	Máxima sensibilidad	dB
8%	Sensibilidades	1,4908	3,4686
	Kalman	2,1390	6,6044
20%	Sensibilidades	2,5787	8,2281
	Kalman	2,2106	6,9077

Tabla 2: Comparación de la máxima sensibilidad del estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ según cada método y factor de compensación de la línea

V. CONCLUSIONES

El estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ basado en el método de sensibilidades de los autovalores *amortigua las oscilaciones subsíncronas* en los casos de factor de compensación de 8 y 20%. El estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ basado en el método de filtro de Kalman también es efectivo en los mismos casos, obteniéndose un amortiguamiento de la oscilación notablemente superior al del otro método.

El *modo supersíncrono* disminuye su amortiguamiento para el estabilizador de sensibilidades de los autovalores, incrementando el riesgo de inestabilidad. En el diseño según el filtro de Kalman, el modo supersíncrono reacciona satisfactoriamente, mejorando o manteniendo el amortiguamiento.

Analizando los resultados desde el *criterio de la máxima sensibilidad del sistema*, se concluye que para bajos factores de compensación (8%), el método de sensibilidades de los autovalores es ligeramente mejor que el del filtro de Kalman. Para factores superiores (20%), el estabilizador del filtro de Kalman obtiene un mejor valor.

El *método* de sensibilidad de los autovalores permite un cálculo rápido. Mientras que el filtro de Kalman, al necesitar de los algoritmos genéticos para la optimización de la ganancia, implica un tiempo de computación extensamente mayor.

VI. REFERENCIAS

- [1] J. Daniel, W. Wong, G. Ingestrom, J. Sjoberg, "Subsynchronous phenomena and wind turbine generators", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0510.
- [2] B. Badrzadeh, M. Sahni, D. Muthumuni, Y. Zhou and A. Gole, "Sub-synchronous interaction in wind power plants — part I: Study tools and techniques," 2012 IEEE

Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-9.

- [3] R. Nath, C. Grande-Moran, “Study of Sub-Synchronous Control Interaction due to the interconnection of wind farms to a series compensated transmission system”, 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0478.

- [4] J. Adams, C. Carter, C.; H. Shun-Hsien, “ERCOT Experience with Sub-synchronous Control Interaction and proposed remediation” 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0609.

- [5] G.D. Irwin, A. Isaacs, D. Woodford, D. “Simulation requirements for analysis and mitigation of SSCI phenomena in wind farms”, 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0600.

- [6] L. Rouco, F.L. Pagola, G.C. Verghese, I.J. Pérez-Arriaga, “Selective modal analysis” in Power system coherency and model reduction, J. H. Chow editor, Springer, Berlin, 2013.

COMPATIVE STUDY OF TWO DIFFERENT METHODS FOR STABILISING SUBSYNCHRONOUS OSCILLATIONS IN WIND TURBINES BASED ON DOUBLY FED INDUCTION GENERATORS

Author: López Díaz, Paloma.

Directors: Rouco Rodríguez, Luis.

García Aguilar, Javier.

Collaborator Entity: ICAI- Universidad Pontificia Comillas

PROJECT ABSTRACT

Abstract – Subsynchronous resonance (SSR) may happen in series compensated transmission networks connected to wind farms based on doubly-fed induction generators (DFIG). This project studies two different methods for stabilizing subsynchronous oscillations: eigenvalue sensitivity analysis and Kalman filter. Two series compensation levels (8% and 20%) are simulated in Matlab/Simulink. Comparison is assessed regarding the damping of super and subsynchronous modes and maximum sensibility.

Keywords – DFIG, eigenvalue sensitivity analysis, Kalman filter, subsynchronous resonance, series compensated line.

I. INTRODUCTION

Subsynchronous resonance can occur in onshore wind farms based on doubly-fed induction generators connected to series compensated transmission lines. Series capacitor introduces a natural resonant frequency (1), which may lead to unstable oscillations. This phenomenon is known as subsynchronous resonance [1].

$$f_e = f_0 \cdot \sqrt{\frac{x_c}{x_\Sigma}} \quad (1)$$

Where f_e is the natural resonant frequency; f_0 is the nominal frequency of the power system (50 Hz); x_c is the reactance of series capacitor;

and x_Σ is the reactance of transmission line, which includes step-up transformer. Series compensation level is defined as $\frac{x_c}{x_\Sigma}$. This project has considered two series compensation levels (8% and 20%).

Natural resonant frequency produces subsynchronous rotor currents and torques, computed as follows:

$$f_r = f_0 - f_e \quad (2)$$

These currents result in rotor voltage, which may increase subsynchronous currents. Subsynchronous resonance occurs when there is an exchange of energy between the mechanical system and electrical network.

Subsynchronous resonance is a well-known problem. It has been studied since Mohave accident (1970, US). There are different approaches to solve it. Guaranteeing system stability by using other devices (STATCOM or FACTS) with the same function instead of the series capacitor, or analyzing operating points likely to become unstable [2]-[5].

This project aims to compare the capability of two different methods for stabilizing subsynchronous oscillations in wind turbines based on doubly-fed induction generators (DFIG): eigenvalue sensitivities analysis and Kalman filter.

Simulation models in Matlab/Simulink are used.

II. MODELING AND SIMULATION

Figure 1 displays the model which has been used in this project: DFIG, step-up transformer, series compensated line and grid connection.

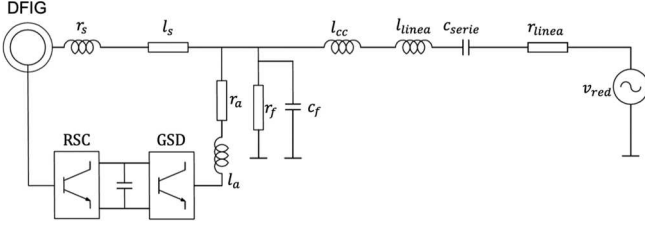


Figure 1: One line diagram of model: DFIG, step-up transformer, series compensated line and grid connection

III. STABILIZERS DESIGN

A. Eigenvalue sensitivity analysis

The first-order sensitivity of the eigenvalue λ_i with respect to a parameter q of the state matrix A can be computed as:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial q} = \vec{w}_i^T \frac{\partial A(q)}{\partial q} \vec{v}_i \quad (5)$$

Stabilizer $i_{\text{gq}}^{\text{ref}} - p_e$ based on this method has the following transfer function:

$$F(s, K_S) = K_S \left(\frac{1 + s T_{S1}}{1 + s T_{S2}} \right) \left(\frac{1 + s T_{S3}}{1 + s T_{S4}} \right) \frac{s T_{S5}}{1 + s T_{S5}} \quad (6)$$

It has two stages for phase compensation and a wash-out filter which rejects steady-state inputs.

The first step of this method is setting the phase of sensitivity to 180° . Then, time constants are calculated (T_{Sn}). Next step is computing controller gain (K_S) by choosing the damping [6].

B. Kalman filter

Kalman filter is a state estimator based on statistics. States are computed from previous state estimations, noise information and measurements from sensors.

This algorithm is recursive. It has two steps: prediction and updating.

Figure 2 shows the controller structure.

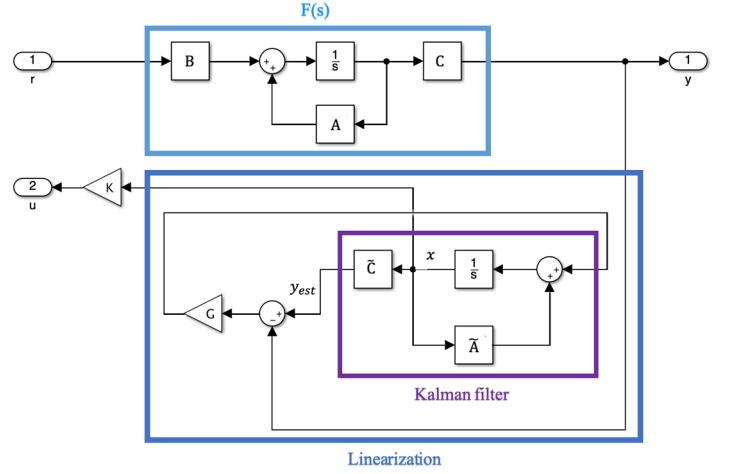


Figure 2: Implementation of Kalman filter

$F(s)$ represents the plant (generator, line and grid connection). Kalman filter estimates the output (p_e in case of stabilizer $i_{\text{gq}}^{\text{ref}} - p_e$), which is divided into five components: two phasors and a offset. Matrix K and estimation X provide the actuating signal u .

IV. RESULTS

Table 1 and Table 2 gather results from simulations. The comparison between the two methods is assessed regarding the damping of super and subsynchronous modes and maximum sensitivity.

CL	Modes	Original	Eigenvalue sensitivities	Kalm an filter
8%	Supersynchronous	4,70	2,76	11,77
	Subsynchronous	-0,25	2,61	11,54
20%	Supersynchronous	5,08	2,13	4,24
	Subsynchronous	-5,80	1,99	5,33

Table 1: Damping of super and subsynchronous modes

Compensation level	Stabilizer	Maximum sensitivity	dB
8%	Sensitivities	1,4908	3,4686
	Kalman	2,1390	6,6044
20%	Sensitivities	2,5787	8,2281
	Kalman	2,2106	6,9077

Table 2: Maximum sensitivity

V. CONCLUSIONS

Stabilizer i_{gq}^{ref} - p_e based on eigenvalue sensitivities manage to *damp subsynchronous oscillations* with 8% and 20% series compensation level. Stabilizer i_{gq}^{ref} - p_e based on Kalman filter also eliminates oscillations in both cases. This method achieves an enhanced damping of subsynchronous oscillations.

Supersynchronous mode decreases its damping when eigenvalue sensitivities stabilizer is applied, increasing the risk of instability. Kalman filter stabilizer does not worsen supersynchronous damping. Actually, it is possible to improve it.

Analyzing results *regarding maximum sensitivity*, it can be concluded that eigenvalue sensitivities method slightly produces better results with 8% series compensation level. Kalman filter method works better with upper series compensation level (20%).

Eigenvalue sensitivities method is *quicker* than Kalman filter one. Because Kalman filter implementation need genetic algorithms in order to optimize controller gain.

VI. REFERENCES

- [1] J. Daniel, W. Wong, G. Ingestrom, J. Sjoberg, "Subsynchronous phenomena and wind turbine generators", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0510.
- [2] B. Badrzadeh, M. Sahni, D. Muthumuni, Y. Zhou and A. Gole, "Sub-synchronous interaction in wind power plants — part I: Study tools and techniques," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-9.
- [3] R. Nath, C. Grande-Moran, "Study of Sub-Synchronous Control Interaction due to the interconnection of wind farms to a series compensated transmission system", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0478.
- [4] J. Adams, C. Carter, C.; H. Shun-Hsien, "ERCOT Experience with Sub-synchronous Control Interaction and proposed remediation" 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0609.
- [5] G.D. Irwin, A. Isaacs, D. Woodford, D. "Simulation requirements for analysis and mitigation of SSCI phenomena in wind farms", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0600.
- [6] L. Rouco, F.L. Pagola, G.C. Verghese, I.J. Pérez-Arriaga, "Selective modal analysis" in Power system coherency and model reduction, J. H. Chow editor, Springer, Berlin, 2013.



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE AJUSTE DE
ESTABILIZADORES DE OSCILACIONES
SUBSÍNCRONAS DE AEROGENERADORES
BASADOS EN GENERADORES DE INDUCCIÓN
DOBLEMENTE ALIMENTADOS

Autor: Paloma López Díaz

Director: Luis Rouco Rodríguez

Co-Director: Javier García Aguilar

Madrid

Julio de 2019

Agradecimientos

A Luis y Javier, por toda su ayuda y disponibilidad.

A mi hermano, por guiarme y ayudarme.

A mis padres, por su apoyo, esfuerzo y generosidad sin límites.

Índice de la memoria

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1. El tema del proyecto.....	1
1.2. Estado del arte	2
1.2.1. Soluciones	2
1.2.2. Estudios preventivos	2
1.2.3. Relación entre las oscilaciones subsíncronas y sus parámetros del modelo.....	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Organización del documento.....	4
Capítulo 2 : Resonancia subsíncrona.....	5
Capítulo 3 : Modelos matemáticos de sistemas dinámicos	7
3.1. Modelos en espacio de estado	7
3.1.1. Autovalores y autovectores	7
3.1.2. Factores de participación.....	8
3.1.3. Residuos	9
Capítulo 4 : Modelo matemático de un generador de inducción doblemente alimentado	11
4.1 Implantación en Matlab.....	11
4.2. Implantación en Simulink	12
4.2.1. Máquina asíncrona doblemente alimentada	13
4.2.2. Línea.....	14
4.2.3. Red infinita.....	15
4.3. Punto de operación.....	15
Capítulo 5 : Simulación del modelo	17
5.1. Factor de compensación 8%.....	17
5.2. Factor de compensación 20%.....	20
5.3. Conclusiones parciales	23
Capítulo 6 : Diseño de estabilizador basado en Sensibilidad de los autovalores	25
6.1. Sensibilidades.....	25
6.2. Método de ajuste	25
6.3. Estabilizadores	27
6.3.1. Estabilizador i_{gd}^{ref} - p_e	27
6.4. Conclusiones parciales	36
Capítulo 7 : Diseño de estabilizador basado en Filtro de Kalman.....	37
7.1. Filtro de Kalman.....	37
7.1.1. Estructura del controlador	38
7.2. Algoritmos genéticos.....	39

7.3.	Estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e	40
7.3.1.	Factor de compensación 8%.....	40
7.3.2.	Factor de compensación 20%.....	44
7.4.	Conclusiones parciales.....	48
Capítulo 8 : Conclusiones		49
8.1.	Resumen de los resultados	49
8.2.	Conclusiones finales.....	49
Capítulo 9 : Referencias		51

Índice de figuras

Figura 4.1: Esquema unifilar del sistema para uso en Simulink	12
Figura 4.2: Estabilizador del modelo de simulación	12
Figura 4.3: Interior del subsistema de componentes del sistema	13
Figura 5.1: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 8%	18
Figura 5.2: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 8%	18
Figura 5.3: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna. Factor de compensación 8%.....	19
Figura 5.4: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 8%	19
Figura 5.5: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 20%	21
Figura 5.6: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 20%	21
Figura 5.7: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna. Factor de compensación 20%.....	22
Figura 5.8: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 20%	22
Figura 6.1: Representación gráfica del diseño de estabilizador por el método de sensibilidad de los autovalores [10]	26
Figura 6.2: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%.....	29
Figura 6.3: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%.....	30
Figura 6.4: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%.....	30
Figura 6.5: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%	31
Figura 6.6: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%	31
Figura 6.7: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.....	33
Figura 6.8: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.....	34
Figura 6.9: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.....	34
Figura 6.10: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%	35
Figura 6.11: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%	35

Figura 7.1: Implantación del Filtro de Kalman en el modelo.....	38
Figura 7.2: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%	41
Figura 7.3: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%	42
Figura 7.4: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%.....	42
Figura 7.5: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%	43
Figura 7.6: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%.....	43
Figura 7.7: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%	45
Figura 7.8: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%	46
Figura 7.9: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%.....	46
Figura 7.10: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%	47
Figura 7.11: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%.....	47

Índice de tablas

Tabla 4.1: Parámetros de la máquina asíncrona doblemente alimentada.....	14
Tabla 4.2: Parámetros del filtro serie del convertidor del lado de estator, condensador de acoplamiento y transformador elevador.....	14
Tabla 4.3: Parámetros de los reguladores PI de corriente	14
Tabla 4.4: Parámetros de la línea con compensación serie	15
Tabla 4.5: Condiciones iniciales del estator.....	15
Tabla 4.6: Condiciones iniciales del rotor.....	15
Tabla 4.7: Condiciones iniciales del filtro serie del convertidor de estator	15
Tabla 4.8: Condiciones iniciales del condensador de acoplamiento	15
Tabla 4.9: Condiciones iniciales de la impedancia de conexión a red	15
Tabla 5.1: Autovalores del modelo linealizado para un factor de compensación del 8%	17
Tabla 5.2: Autovalores del modelo linealizado para un factor de compensación del 20%	20
Tabla 6.1: Factores de controlabilidad y observabilidad del modo subsíncrono para los valores de compensación de la línea.....	27
Tabla 6.2: Constantes del estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores $i_{gq}^{ref}-p_e$, para un factor de compensación del 8%.....	27
Tabla 6.3: Autovalores del modelo linealizado con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores $i_{gq}^{ref}-p_e$. Factor de compensación 8%.	28
Tabla 6.4: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores $i_{gq}^{ref}-p_e$. Factor de compensación 8%.....	28
Tabla 6.5: Constantes del estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores $i_{gq}^{ref}-p_e$, para un factor de compensación del 20%.....	32
Tabla 6.6: Autovalores del modelo linealizado con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.	32
Tabla 6.7: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.....	33
Tabla 7.1: Resultados de la optimización para la formulación general. Factor de compensación 8%	40
Tabla 7.2: Autovalores del sistema con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%.....	40
Tabla 7.3: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%.	41
Tabla 7.4: Autovalores del sistema con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%.....	44
Tabla 7.5: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%	44
Tabla 8.1: Comparación del amortiguamiento del modo subsíncrono y supersíncrono que aporta cada método en función del factor de compensación de la línea	49
Tabla 8.2: Comparación de la máxima sensibilidad del estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ según cada método y factor de compensación de la línea	49

Capítulo 1 : Introducción

1.1. El tema del proyecto

En sistemas eléctricos con *líneas de gran longitud* una alternativa a construir líneas en paralelo (para reducir la impedancia efectiva de la línea) es instalar condensadores en serie. El condensador serie es una medida muy efectiva en términos económicos, que permite ampliar los límites de operación de la línea.

La configuración de los sistemas eléctricos con compensación serie (circuitos LC) añade una frecuencia de oscilación natural, cuya magnitud depende del grado de compensación de la línea. Dicha frecuencia natural puede interactuar con alguno de los modos de oscilación del sistema.

La *resonancia subsíncrona* estudia la inestabilidad de las oscilaciones torsionales de turbogeneradores conectados a través de líneas con compensación serie. Estas oscilaciones se producen a frecuencias inferiores a la fundamental, es decir, por debajo de 50 Hz en Europa. La resonancia subsíncrona puede ocasionar: daños en el eje y inestabilidad eléctrica (potencia, tensión).

Desde 1970 se ha investigado en profundidad sobre este acontecimiento y sus posibles soluciones, en concreto, desde el *incidente* de la central térmica Mohave [1], donde se operaba con un generador síncrono. La causa fue la interacción entre las oscilaciones del eje y de una línea de la red de transporte 500kV compensada en serie. El eje del generador resultó gravemente dañado.

Otro incidente relevante se produjo en el sistema ERCOT de Texas en Octubre de 2009 [2]. Un disparo en una línea derivó en la conexión de un parque de generadores eólicos (con máquina asíncrona doblemente alimentada) con una línea de la red de transporte 345kV con compensación en serie. La resonancia subsíncrona apareció por la interacción entre el condensador serie de la línea y los componentes electrónicos del aerogenerador.

Este fenómeno es un tema de gran *importancia* por la extensión del problema, especialmente en el contexto de los aerogeneradores. Este tipo de generación es cada vez más empleado por tratarse de una energía renovable. En general se comercializan dos tipos de turbinas eólicas con control de la velocidad. Permiten extraer la máxima energía para cada punto de velocidad del viento. La primera opción es utilizar una máquina asíncrona doblemente alimentada. Su principal ventaja es que el tamaño del convertidor que se necesita es menor y por tanto el coste es más barato. La otra opción es utilizar una máquina síncrona (de imanes permanentes o de excitación externa). En este caso es posible prescindir de la reductora y así reducir el número de reparaciones ([3]-[4]).

Es frecuente que la demanda eléctrica no se encuentre cerca de los parques eólicos, y sumado a la geografía de algunos lugares como: China [5], Estados Unidos (Texas, Minnesota), Canadá, Chile, Argentina, se construyen líneas largas para conectar la generación a la demanda. Y por tanto, existen probabilidades de problemas asociados a la resonancia subsíncrona.

1.2. Estado del arte

Se han abierto diferentes líneas de estudio ante el problema de la resonancia subsíncrona: garantizar la estabilidad del sistema, proteger los generadores, sus equipos electrónicos y la red. Las posibles soluciones afectan a [6]: los fabricantes de los generadores, investigadores, compañías de transporte y operadores del sistema [7].

1.2.1. Soluciones

La opción más *simple* es reducir el grado de compensación de la línea, o introducir un filtro que funcione como baipás del condensador serie, que se active ante un imprevisto durante la operación del sistema.

También se puede *sustituir* el condensador serie por otros equipos como los SVC (sistemas estáticos de potencia reactiva) o los STATCOM [8].

Hay otras opciones más avanzadas, enfocadas a *prevenir las oscilaciones*. Existen equipos localizados en el generador o el condensador serie. Tienen como principio filtrar las corrientes en el rango subsíncrono.

En la misma línea, se puede *proteger el generador*. Consiste en instalar una protección o relé que vigile esfuerzos sobre el eje del generador. Se programan unos límites y si se sobrepasan, se envía una señal de disparo al generador.

Otro enfoque es *reducir las oscilaciones* [9]. Una estrategia económica es actualizar el propio control del aerogenerador, añadiendo un control de amortiguamiento. Este control se diseña generalmente con un ajuste MIMO (entradas y salidas múltiples) en espacio de estado, ya que introduce varios grados de libertad. Destacan dos métodos de ajuste: *diseño por sensibilidad de los autovalores* ([10]-[11]) o *Filtro de Kalman* [12]. El control vectorial de una máquina asíncrona en turbinas eólicas presenta dos posibilidades para introducir el control de amortiguamiento: en el controlador del rotor o en el de la red. En [13] se ha comprobado, por medio de varias técnicas, que es más satisfactorio añadir este lazo de control en el rotor.

Otros estudios han usado filtros paso-bajo para estimar las tensiones subsíncronas, para después compensarlas con dispositivos FACTS [14].

1.2.2. Estudios preventivos

También hay técnicas que permiten identificar puntos de funcionamiento en los que hay probabilidad resonancia subsíncrona. Por lo general, se emplean herramientas informáticas [15].

Es común realizar pruebas de *screening* ([16]-[17]). Consiste en calcular la impedancia (reactancia) del sistema, vista desde el punto de conexión con la red, dentro del intervalo subsíncrono (de 0 a 50 Hz). Si hay alguna frecuencia en la que esta impedancia decrece, es posible la aparición de una inestabilidad. En particular, se considera crítico que el valor de la impedancia se acerque a 0Ω o incluso tome un valor

negativo. Se relaciona una baja impedancia con un bajo amortiguamiento del sistema a dicha frecuencia. Un amortiguamiento negativo implica una inestabilidad. Otra forma de verlo es que la impedancia negativa se traduce en un deslizamiento negativo, que afecta a la máquina auto excitándola [18]. Este análisis se aplica en varios escenarios: en condiciones normales de funcionamiento y en contingencias.

Un *análisis de la función de transferencia* del sistema permite examinar sus autovalores y así conocer si existe riesgo de resonancia subsíncrona. No obstante, el sistema formado por la turbina y los sus controles no son lineales. Para ello, se usan programas específicos de simulación como PSCAD® o EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) ([19]-[20]). Estos programas realizan simulaciones con *respuesta temporal*. Es importante que el modelo incluya detalles como las constantes elásticas y las masas del eje, de la turbina y de los elementos electrónicos del sistema para un estudio preciso y coherente con la realidad. Se somete el modelo a faltas, variaciones en la demanda o cambios del factor de compensación de la línea.

Otra técnica empleada para analizar la estabilidad del modelo es el *criterio de Nyquist*.

Muchas de estas técnicas no son determinantes por sí solas y a la hora de estudio se realizan otras pruebas complementarias.

1.2.3. Relación entre las oscilaciones subsíncronas y sus parámetros del modelo

Algunos investigadores han estudiado el impacto de varios factores sobre la resonancia subsíncrona [21].

Un factor determinante es el *nivel de compensación* de la línea. Para estudios de parques reales a partir de un 70% aparecen oscilaciones subsíncronas.

La *rigidez del eje* es otro factor fundamental. Se mide con el coeficiente K_{ig} . Para valores habituales de funcionamiento, las frecuencias de oscilación están por debajo de los 10 Hz. Conforme esta constante aumenta, la frecuencia asociada también lo hace.

Han concluido que el *tamaño de los parques* eólicos sí afecta a la posible inestabilidad, siendo la resonancia subsíncrona más probable con un mayor número de aerogeneradores [22].

Se ha comprobado que la *velocidad de viento* tiene influencia en la aparición de la resonancia subsíncrona. El amortiguamiento del modo subsíncrono mejora según asciende la velocidad del viento [23]. Se explica por una relación directa entre el deslizamiento y la velocidad del viento, causada por el comportamiento del generador que se ajusta a la curva de máxima potencia extraída del viento.

Los *lazos de corriente* en generadores asíncronos son controles PI. Se ha descubierto una relación entre la constante proporcional K_p y el amortiguamiento: para valores altos (positivos) de K_p , el sistema se vuelve inestable. El motivo es que según aumenta la constante, el margen de fase se reduce.

1.3. Objetivos

En este proyecto se parte de un modelo con aerogenerador basado en generador asíncrono doblemente alimentado, el transformador elevador, una línea con compensación en serie, y una red infinita. Las herramientas utilizadas para el estudio de estabilidad son Matlab/Simulink.

Se han considerado dos métodos distintos de ajuste: el método de sensibilidad de los autovalores y filtro de Kalman. Ambos métodos de estabilizadores trabajan con representación en espacio de estado.

A partir de los resultados que ofrece cada metodología se compararán para concluir cuál es más favorable.

1.4. Organización del documento

A continuación se presenta la estructura de la memoria.

En el **Capítulo 2** se introduce el problema de la resonancia subsíncrona.

En el **Capítulo 3** se presenta el modelo de trabajo. Su construcción en Matlab/Simulink se describe en el **Capítulo 4**.

En el **Capítulo 5** se estudian los casos elegidos y se demuestran las inestabilidades del sistema para cada factor de compensación.

En los **Capítulo 6** y **Capítulo 7** se abordan los resultados obtenidos en cada método de diseño.

En el **Capítulo 8** se comparan ambos métodos de estabilizadores. Finalmente, este capítulo recoge las conclusiones finales del proyecto.

Por último, el **Capítulo 9** contiene las referencias.

Capítulo 2 : Resonancia subsíncrona

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE, clasificó en 1894 los tipos de interacciones subsíncronas [22]:

- Resonancia subsíncrona, o SRR en la literatura inglesa. Es causado por un intercambio de energía entre el generador y la línea compensada serie. Deriva en fallo del eje del generador e inestabilidad en la red.

- Interacción torsional subsíncrona o SSTI. Originada por elementos electrónicos tales como enlaces HVDC o FACTS, y la masa mecánica del generador. Pueden provocar oscilaciones inestables en el eje a frecuencias subsíncronas.

- Interacción con los controles electrónicos o SSCI. Este tipo de oscilación se produce por la interacción entre la electrónica de potencia y la línea con compensación serie. En particular, no implica ningún efecto mecánico. Sin embargo, se trata de una seria amenaza para la seguridad y la fiabilidad en la operación de la planta debido al probable daño de los equipos.

La Resonancia subsíncrona es el objeto de estudio de este proyecto. Las corrientes que aparecen con la introducción del condensador serie de la línea pulsan a una frecuencia subsíncrona, calculada como:

$$f_e = f_0 \cdot \sqrt{\frac{x_c}{x_\Sigma}} \quad (2.1)$$

Donde f_e es la frecuencia de las corrientes subsíncronas; f_0 es la frecuencia fundamental de la red (50 Hz); x_c es la reactancia del condensador serie; y x_Σ es la reactancia total de la línea, el transformador y el generador. El factor $\frac{x_c}{x_\Sigma}$ es el denominado “factor de compensación” de la línea. En este estudio se han considerado dos casos, considerándose los siguientes factores: 8% y 20%.

Las siguientes corrientes subsíncronas de la línea producen pares y corrientes en el rotor a una frecuencia complementaria:

$$f_r = f_0 - f_e \quad (2.2)$$

Dichas corrientes generan tensiones en el rotor, que a su vez pueden incrementar las corrientes. Si las frecuencias de oscilación del eje del generador interaccionan con las frecuencias de las corrientes del rotor, se producirá la resonancia subsíncrona.

Capítulo 3 : Modelos matemáticos de sistemas dinámicos

3.1. Modelos en espacio de estado

Considerar que el modelo matemático de un sistema dinámico está descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales y un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales.

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}} &= G(\vec{x}, \vec{z}, \vec{u}) \\ 0 &= H(\vec{x}, \vec{z}, \vec{u}),\end{aligned}\tag{3.1}$$

donde G y H son vectores de funciones no lineales; \vec{x} representa las variables de estado, \vec{z} a las variables algebraicas y \vec{u} las variables de entrada del sistema.

Estas ecuaciones se pueden linealizar en torno al punto de trabajo, resultando una notación más compacta.

Si el sistema se considera lineal e invariante en el tiempo, su notación vectorial resulta:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= A X + B U \\ Y &= C X + D U\end{aligned}\tag{3.2}$$

Las matrices A, B, C y D representan el modelo en espacio de estado. Se corresponden con las matrices jacobianas de las funciones vectoriales G y H.

3.1.1. Autovalores y autovectores

Este proyecto trabaja con espacio de estado. Como consecuencia, la estabilidad se estudiará a partir de los *autovalores* de la matriz de estados A (λ_i).

El sistema será estable siempre y cuando todos los autovalores tengan parte real negativa. El comportamiento de la respuesta será una exponencial con amortiguamiento positivo. Para autovalores con parte real nula, la respuesta del sistema es oscilante. Para autovalores con parte real positiva el sistema es inestable, siguiendo una tendencia exponencial creciente.

También es posible calcular los *autovectores derechos* (\vec{v}_i) e *izquierdos*, definidos como:

$$\begin{aligned}A \vec{v}_i &= \vec{v}_i \lambda_i \\ \vec{w}_i A &= \lambda_i \vec{w}_i,\end{aligned}\tag{3.3}$$

Estos autovectores no son únicos. Una forma de eliminar el grado de libertad es imponer:

$$\overline{w}_i^T \cdot \overline{v}_i = 1 \quad (3.4)$$

Detrás de estos vectores hay un significado físico:

- Los autovalores derechos (\overline{v}_i) señalan la repercusión que tiene cada variable de estado en el modo i-ésimo.
- Los autovalores izquierdos (\overline{w}_i) indican la importancia de las condiciones iniciales en cada modo i-ésimo.

Para recoger los autovalores, autovectores derechos e izquierdos de la matriz en forma matricial, se representan como: Λ , matriz de autovalores ; V , matriz de los autovectores derechos y W , para los autovectores izquierdos.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix}$$

$$V = [\overline{v}_1 \quad \dots \quad \overline{v}_n]$$

$$W = \begin{bmatrix} \overline{w}_1^T \\ \vdots \\ \overline{w}_n^T \end{bmatrix}$$

La exponencial de la matriz de estado e^{At} , en función de los autovectores izquierdos y derechos de la matriz de estados es:

$$e^{At} = V e^{\Lambda t} W \quad (3.5)$$

La solución homogénea de un sistema de ecuaciones diferenciales lineales se puede calcular a partir de los autovalores y de los autovectores derechos e izquierdos de la matriz de estados:

$$\Delta \vec{x}(t)_h = \sum_{i=1}^n \overline{v}_i e^{\lambda_i t} [\overline{w}_i^T \Delta \vec{x}(t_0)] \quad (3.6)$$

3.1.2. Factores de participación

El factor de participación p_{ji} de la variable de estado j-ésima en el modo i-ésimo mide el peso del modo i-ésimo en la variable de estado j-ésima cuando la condición inicial es un vector unitario. Se define matemáticamente como el siguiente producto:

$$p_{ji} = w_{ij} v_{ij} \quad (3.7)$$

Los factores de participación no tienen unidades. Por convención se normalizan, de tal forma que la suma de los factores de participación de la variable j-ésima es igual a la unidad.

$$\sum_{j=1}^n p_{ji} = \sum_{i=1}^n p_{ji} = 1 \quad (3.8)$$

Es posible dividir un sistema en varios subsistemas, y así calcular los factores de participación de cada subsistema p_{si} . Éstos se definen como la suma de los factores de participación en el modo i -ésimo de las variables de estado que forman el subsistema S :

$$p_{si} = \sum_{j \in S} p_{ji} \quad (3.9)$$

3.1.3. Residuos

Sea un sistema con una variable de salida definido como:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\vec{x}}(t) &= A \vec{x}(t) + \vec{b} \Delta u(t) \\ \vec{y}(t) &= \vec{c} \Delta \vec{x}(t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

La función de transferencia expresada en función de los residuos y los polos es:

$$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - p_i} \quad (3.11)$$

Una forma de obtener los residuos asociados a cada modo es a partir de los autovalores derechos e izquierdos:

$$R_i = \vec{c} \vec{v}_i \vec{w}_i^T \vec{b} \quad (3.12)$$

Los residuos también se pueden calcular a partir de los factores de observabilidad y controlabilidad modal. Se definen estos factores como:

$$c_{i,\Delta y} = \vec{c} \vec{v}_i \quad (3.13)$$

$$b_{i,\Delta u} = \vec{b} \vec{w}_i^T \quad (3.14)$$

El factor de observabilidad ofrece información de cómo los estados del sistema afectan a la salida. El factor de controlabilidad permite comprobar si las entradas son capaces de influir en los estados del sistema.

El residuo del modo i -ésimo también se puede expresar en términos de los factores de participación:

$$R_{\Delta y/\Delta u, i} = \vec{w}_{\Delta x, i}^T \vec{b} \vec{c}^T \vec{v}_{\Delta x, i} \quad (3.15)$$

Capítulo 4 : Modelo matemático de un generador de inducción doblemente alimentado

4.1 Implantación en Matlab

Se trabaja con un código de Matlab, que llama internamente al modelo definido en Simulink.

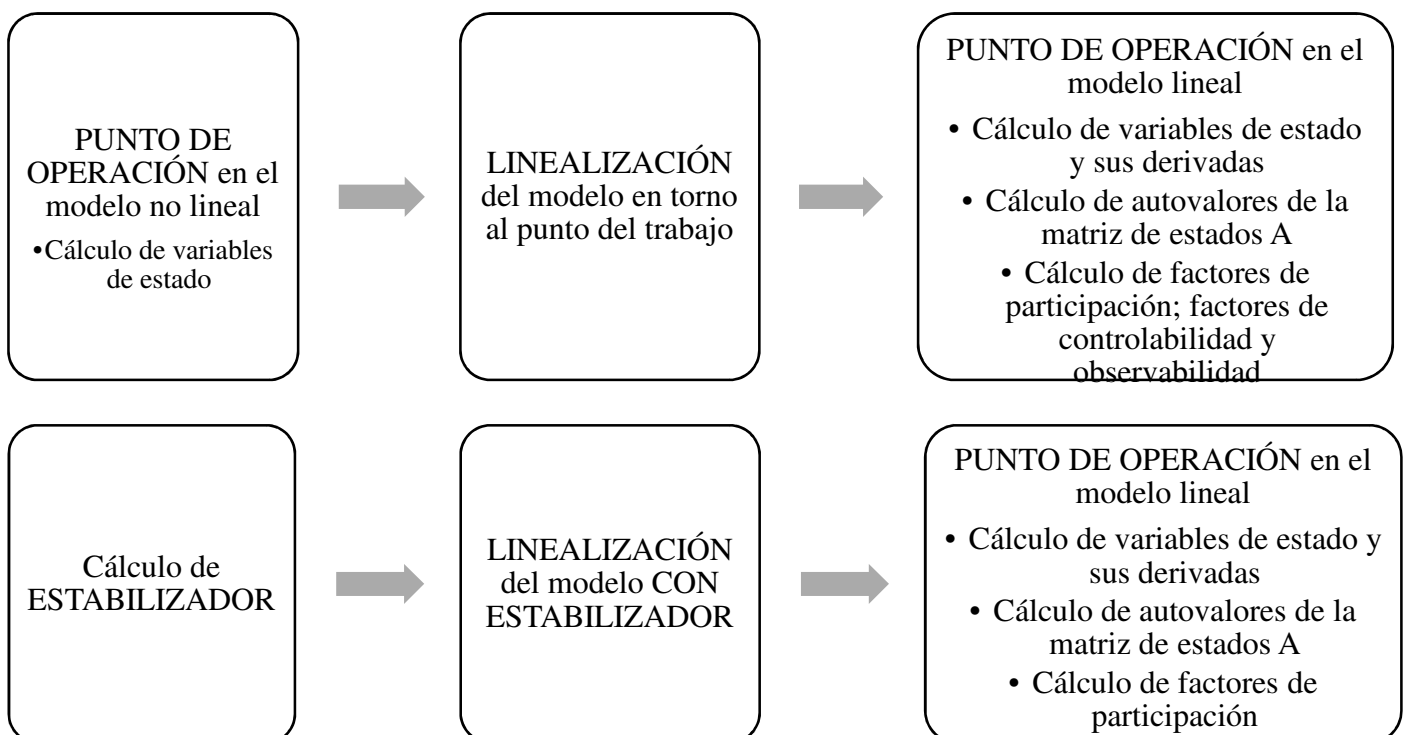
En el código de la simulación se calculan los valores de las variables de espacio de estado a partir del punto de operación. Después se linealiza el sistema, obteniéndose las matrices de que definen las ecuaciones de la planta. Se calcula de nuevo las variables de estado y sus derivadas en el punto de operación.

El modelo muestra por pantalla los autovalores la matriz de estados, con su respectivo amortiguamiento y frecuencia sin el estabilizador. También calcula los factores de participación y los factores de observabilidad y controlabilidad.

A continuación, se calcula el estabilizador que corresponda: método de sensibilidad de los autovalores o filtro de Kalman. El siguiente paso que sigue el programa es conectarlo. Se repiten los cálculos anteriores: autovalores y participaciones.

Es importante verificar que la linealización es fiel a la simulación real. Esto se hace comparando la salida del sistema del modelo linealizado y el completo para un escalón en la referencia.

Además de este código de Matlab, hay otro que permite modificar el grado de compensación y el tipo de estabilizador.



4.2. Implantación en Simulink

Las simulaciones de este proyecto utilizan el algoritmo de integración numérico de con paso variable (ode23t). Éste emplea una aproximación trapezoidal de la derivada.

Para modelar el sistema en Simulink ha sido necesario añadir elementos espurios al modelo físico. En la Figura 4.1 se observa el modelo usado en el proyecto, que añade dos elementos shunt (r_{sh1} , r_{sh2} , b_{sh1} , b_{sh2}) y una impedancia serie (r_{red} , l_{red}). Los valores de estos elementos se han elegido de tal forma que sus dinámicas son despreciables, y por tanto, no afectan al sistema físico.

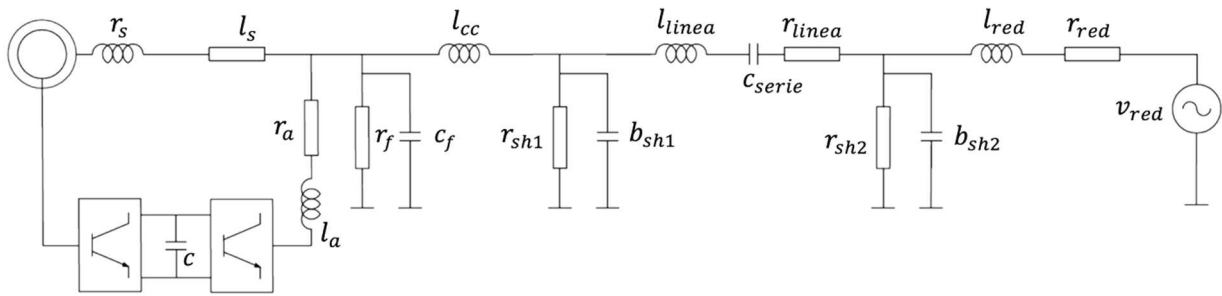


Figura 4.1: Esquema unifilar del sistema para uso en Simulink

El esquema de Simulink está formado por tres *subsistemas*: la definición del sistema eléctrico y los componentes (máquina, línea y red) y el estabilizador. Los tres se conectan mediante etiquetas.

La Figura 4.2 muestra el subsistema del estabilizador. En el caso del método de sensibilidades de los autovalores, el estabilizador se implementa como función de transferencia. Mientras que, con el filtro de Kalman, el estabilizador se integra con espacio de estado, necesitando las cuatro matrices del sistema y las condiciones iniciales.

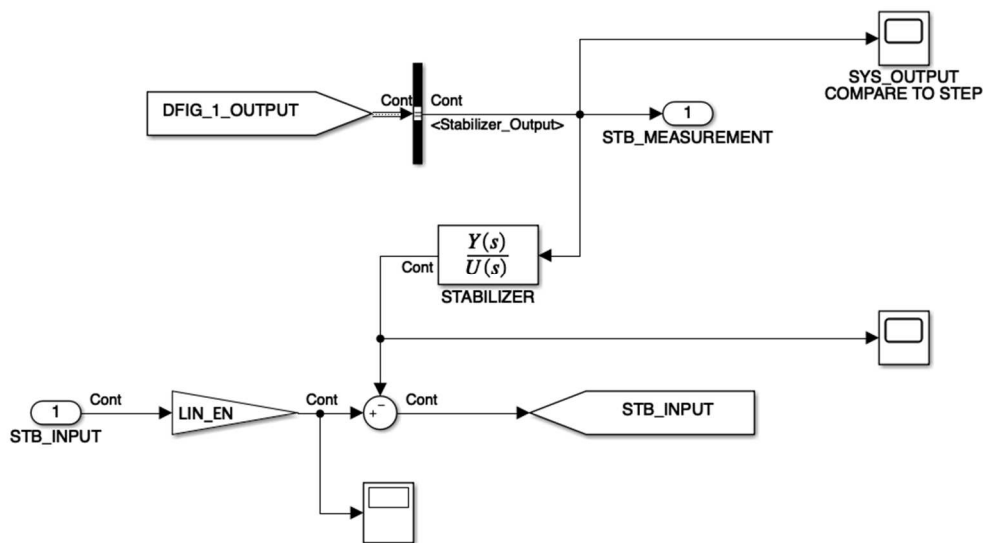


Figura 4.2: Estabilizador del modelo de simulación

En la Figura 4.3 se puede observar el interior del subsistema de los componentes del sistema eléctrico. Se encuentran las entradas y salidas de cada bloque (máquina, línea y red). Se han incluido como estructuras. La ventaja que aporta es la de reducir la complejidad del sistema.

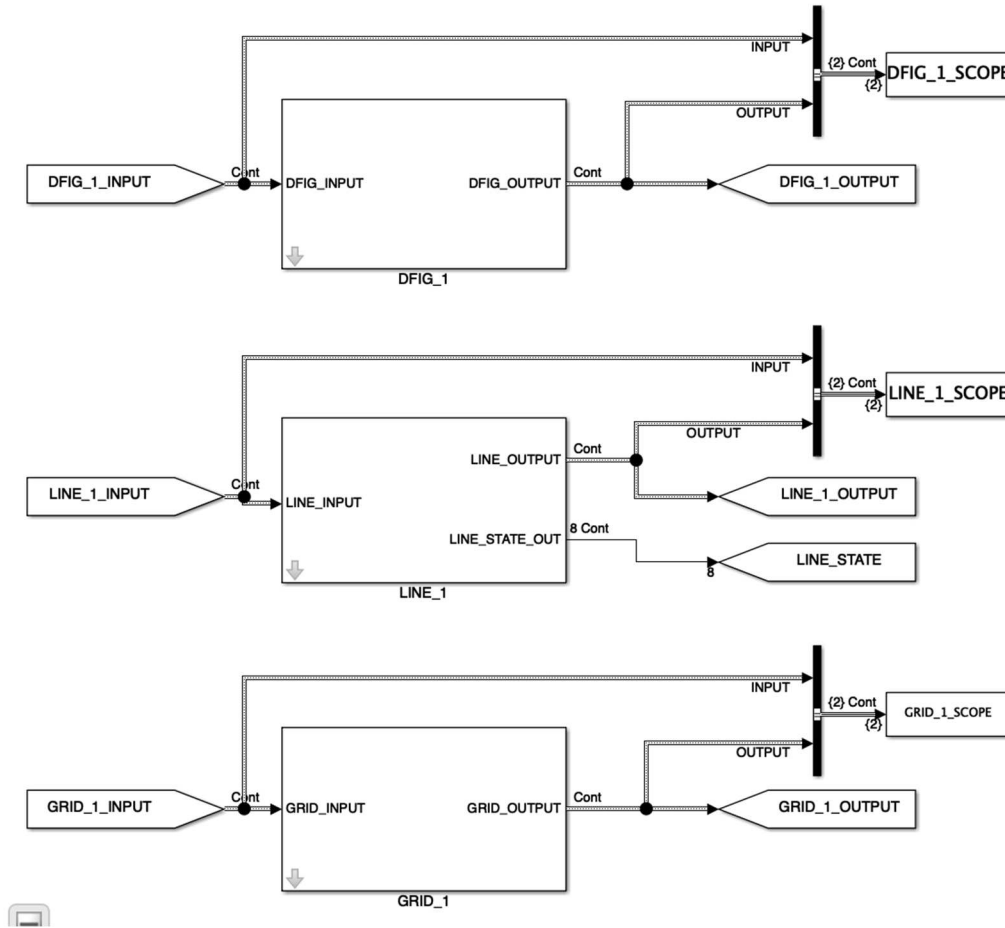


Figura 4.3: Interior del subsistema de componentes del sistema

El tercer subsistema es la definición del sistema eléctrico. Sirve para conectar las salidas y las entradas de los distintos elementos.

4.2.1. Máquina asíncrona doblemente alimentada

La máquina asíncrona está modelada con las siguientes entradas: tensión de entrada al bloque y referencias de los lazos de corriente en eje directo y transversal. La salida del bloque es la corriente de la línea.

Este bloque, además de la máquina, incluye sus convertidores, un filtro y un transformador elevador.

Los convertidores son fundamentales para el control óptimo de la velocidad del generador. Permite extraer la máxima potencia del viento en función de su velocidad. El convertidor del lado de red se encarga de gestionar la tensión del bus de continua y la potencia reactiva de la red. El convertidor conectado al rotor controla la velocidad de giro y la excitación del generador.

Los parámetros que definen el generador y sus convertidores son los siguientes:

r_s (pu)	l_s (pu)	r_r (pu)	l_r (pu)	l_m (pu)	h (s)	P
0,01	0,15	0,01	0,15	5	3	2

Tabla 4.1: Parámetros de la máquina asíncrona doblemente alimentada

Se coloca un filtro en serie con los convertidores para eliminar armónicos procedentes de los pulsos del PWM. El transformador elevador engloba el transformador del propio aerogenerador (0,06 pu) y el del parque (0,09 pu).

r_a (pu)	l_a (pu)	c (pu)	l_{cc} (pu)
0,06	0,6	0,05	0,15

Tabla 4.2: Parámetros del filtro serie del convertidor del lado de estator, condensador de acoplamiento y transformador elevador

Lazo interior		Lazo exterior	
ω_n (rad/s)	<i>zeta</i>	ω_n (rad/s)	<i>zeta</i>
125	0,7	12,5	0,7

Tabla 4.3: Parámetros de los reguladores PI de corriente

A la salida del generador (véase Figura 4.1) hay un filtro que actúa para eliminar el armónico 35, y así mejorar la calidad de la corriente que llega a la red infinita.

Las ecuaciones de los parámetros del filtro son:

$$\begin{aligned} n &= 35 \\ \xi_f &= 0,9 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$x_{th} (pu) = \frac{1}{\frac{1}{l_s + l_r} + \frac{1}{l_a} + \frac{1}{l_e}} \quad (4.2)$$

$$c_f (pu) = \frac{1}{x_{th} \cdot n^2} \quad (4.3)$$

$$r_f (pu) = 2 \cdot \xi_f \cdot \sqrt{\frac{x_{th}}{c_f}} \quad (4.4)$$

4.2.2. Línea

El bloque de línea tiene dos entradas: la corriente de la red infinita y la del generador. Las salidas son las tensiones en bornes de la turbina eólica y la tensión de la red infinita.

Los parámetros de la línea incluyen: el transformador elevador, la impedancia serie de la línea y el condensador serie. Éste último se ajusta según el factor de compensación elegido:

$$FC = \frac{x_c \text{ serie}}{x_l \text{ línea}} \quad (4.5)$$

	$r_{\text{línea}} (pu)$	$x_l \text{ línea} (pu)$	$x_c \text{ serie} (pu)$
Factor de compensación 8%	0,025	0,1	-0,02
Factor de compensación 20%			-0,05

Tabla 4.4: Parámetros de la línea con compensación serie

4.2.3. Red infinita

La entrada de la red infinita está definida por la tensión en bornes de los elementos shunt de la línea. La salida es la corriente de la red infinita.

4.3. Punto de operación

El punto de operación se calcula a partir de las ecuaciones diferenciales del sistema y las condiciones iniciales.

$v_{sd} (pu)$	$v_{sq} (pu)$	$i_{sd} (pu)$	$i_{sq} (pu)$	$\varphi_{sd} (pu)$	$\varphi_{sq} (pu)$
1	0	1	0	0	-1

Tabla 4.5: Condiciones iniciales del estator

$v_{rd} (pu)$	$v_{rq} (pu)$	$\phi (rad)$	$s (pu)$	$i_{rd} (pu)$	$i_{rq} (pu)$
1	0	$\pi/2$	-0,0428	-1	0

Tabla 4.6: Condiciones iniciales del rotor

$i_{ad} (pu)$	$i_{aq} (pu)$
-1	0

Tabla 4.7: Condiciones iniciales del filtro serie del convertidor de estator

$v_c^2 (pu)$
1

Tabla 4.8: Condiciones iniciales del condensador de acoplamiento

$i_{ed} (pu)$	$i_{eq} (pu)$
1	0

Tabla 4.9: Condiciones iniciales de la impedancia de conexión a red

Capítulo 5 : Simulación del modelo

El modelo sin estabilizador está descrito por 30 variables de estado. En el modelo lineal aparecen 15 parejas de autovalores complejos. En las tablas de autovalores de este proyecto se han eliminado dos parejas de autovalores correspondientes a los elementos espurios debido a que no añaden información relevante al estudio.

5.1. Factor de compensación 8%

En la Ecuación (1) se indica la fórmula de la frecuencia natural que introduce el condensador serie al circuito. Para el factor de compensación de 8%, la frecuencia es:

$$f_n = f_0 \cdot \sqrt{\frac{x_c}{x_\Sigma}} = 50 \cdot \sqrt{0,08} = 14,1421 \text{ Hz}, \quad (5.1)$$

y aplicando la Ecuación (2.2), se conoce el valor de la frecuencia subsíncrona:

$$f_{sub} = f_0 - f_n = 50 - 14,1421 = 35,8579 \text{ Hz}, \quad (5.2)$$

La frecuencia supersíncrona es:

$$f_{sup} = f_0 + f_n = 50 + 14,1421 = 64,1421 \text{ Hz}, \quad (5.3)$$

Los autovalores de la matriz de estados A, mostrados en la Tabla 5.1, confirman una inestabilidad. Los factores de participación demuestran que el modo que inestable (par 15, 16) está asociado a la interacción de los devanados del estator con la línea compensada serie.

Autovalores complejos				
nº	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
9	-8137,61	6010,91	80,44	1610,16
11	-8126,12	5371,22	83,42	1550,3
13	-17,56	372,85	4,7	59,41
5	-2,153E+09	314,16	100	342704232,7
7	-46146093	314,16	100	7344378,75
15	0,63	248,16	-0,25	39,5
23	-38,16	95,32	37,17	16,34
21	-77,54	94,29	63,52	19,43
17	-87,5	89,27	70	19,89
19	-88,86	87,71	71,17	19,87
25	-49,34	81,55	51,76	15,17
29	-8,45	8,94	68,7	1,96
27	-16,65	3,41	97,97	2,71

Tabla 5.1: Autovalores del modelo linealizado para un factor de compensación del 8%

La simulación respalda el análisis anterior. Las siguientes variables presentan oscilaciones inestables: velocidad del rotor (Figura 5.1), tensión del bus de continua (Figura 5.2), corriente del estator (Figura 5.3) y corriente de la red infinita (Figura 5.4).

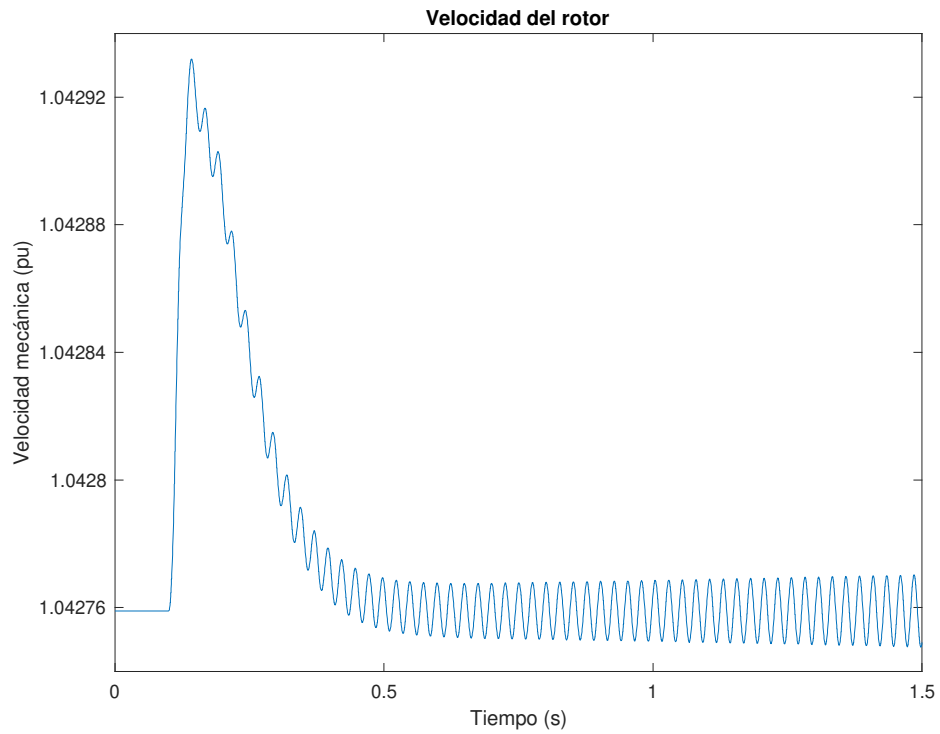


Figura 5.1: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 8%

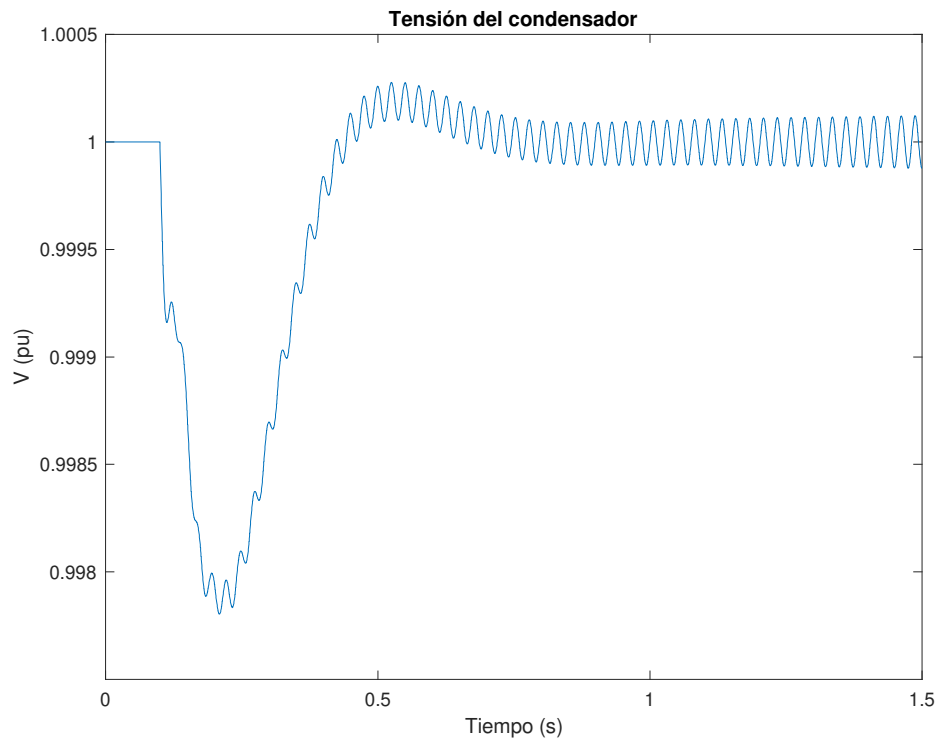


Figura 5.2: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 8%

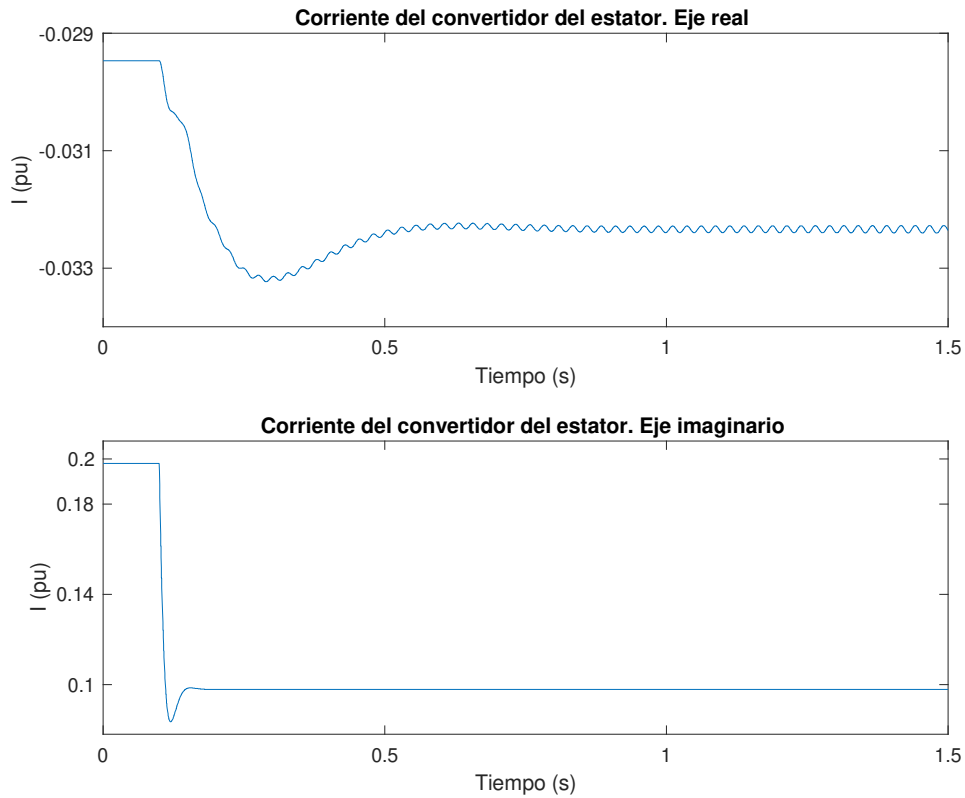


Figura 5.3: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna. Factor de compensación 8%

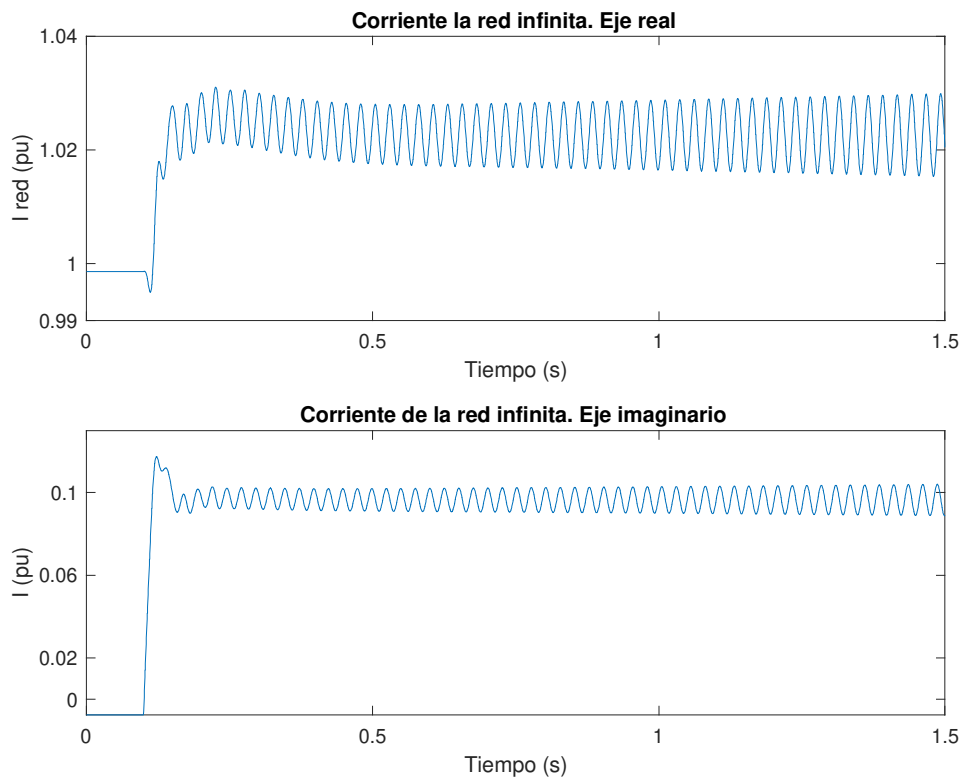


Figura 5.4: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 8%

5.2. Factor de compensación 20%

Aplicando las mismas ecuaciones que para el anterior factor (véase 5.1) se determinan la frecuencia natural, subsíncrona y supersíncrona:

$$f_n = f_0 \cdot \sqrt{\frac{x_c}{x_\Sigma}} = 50 \cdot \sqrt{0,2} = 22,3607 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

$$f_{sub} = f_0 - f_n = 50 - 22,3607 = 27,6393 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

$$f_{sup} = f_0 + f_n = 50 + 22,3607 = 72,3607 \text{ Hz} \quad (5.6)$$

De nuevo se comprueban los autovalores de la matriz de estados A (Tabla 5.2). Los resultados confirman una inestabilidad en el modo subsíncrono (33,68 Hz).

Autovalores complejos				
nº	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
9	-8137,52	6011,4	80,43	1610,19
11	-8126,21	5371,85	83,42	1550,37
13	-20,79	409,2	5,08	65,21
5	-2,153E+09	314,16	100	342704232,7
7	-46146093	314,16	100	7344378,75
15	12,28	211,26	-5,8	33,68
23	-40,92	96,86	38,92	16,74
21	-77,51	94,27	63,51	19,42
19	-87,5	89,27	70	19,89
17	-89,4	87,7	71,38	19,93
25	-54,7	82,58	55,22	15,76
29	-8,56	8,95	69,12	1,97
27	-16,87	2,82	98,63	2,72

Tabla 5.2: Autovalores del modelo linealizado para un factor de compensación del 20%

La simulación corrobora los resultados de la linealización. El amortiguamiento, que es más negativo, implica que las oscilaciones crezcan más rápido que en caso anterior. Las siguientes figuras muestran la simulación en el dominio del tiempo de algunas de las variables del sistema.

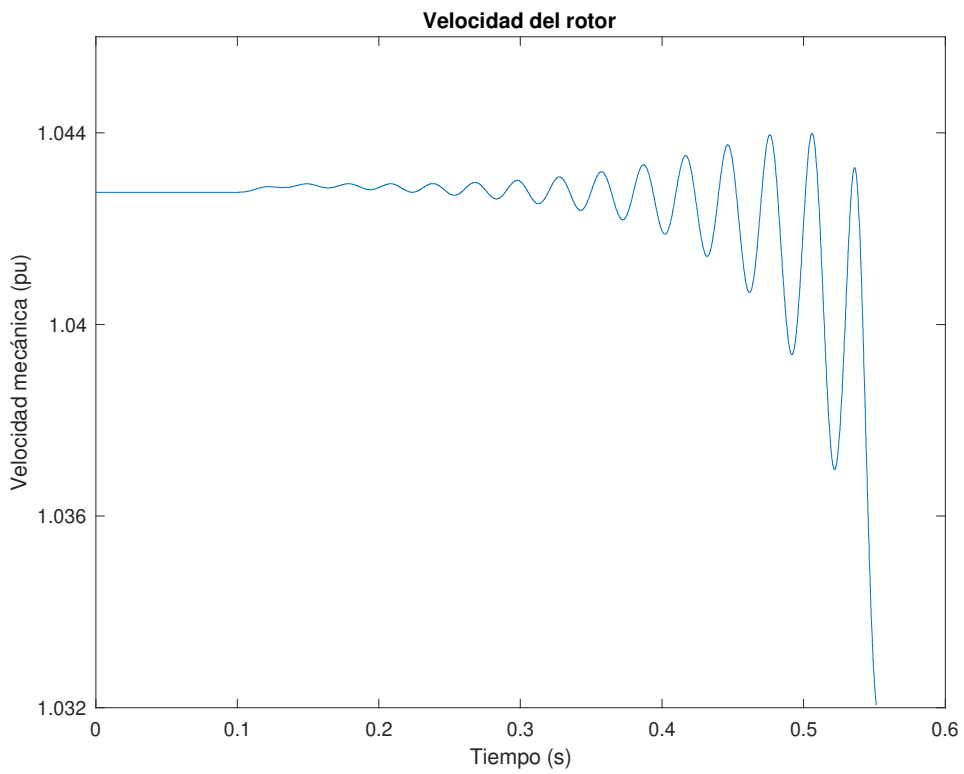


Figura 5.5: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 20%

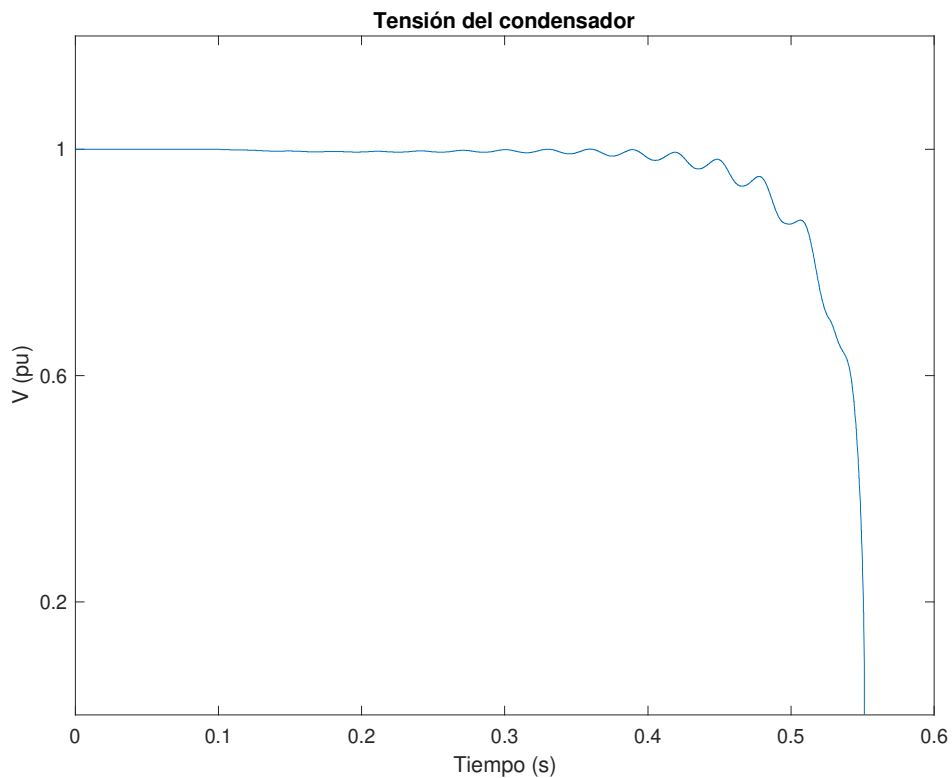


Figura 5.6: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 20%

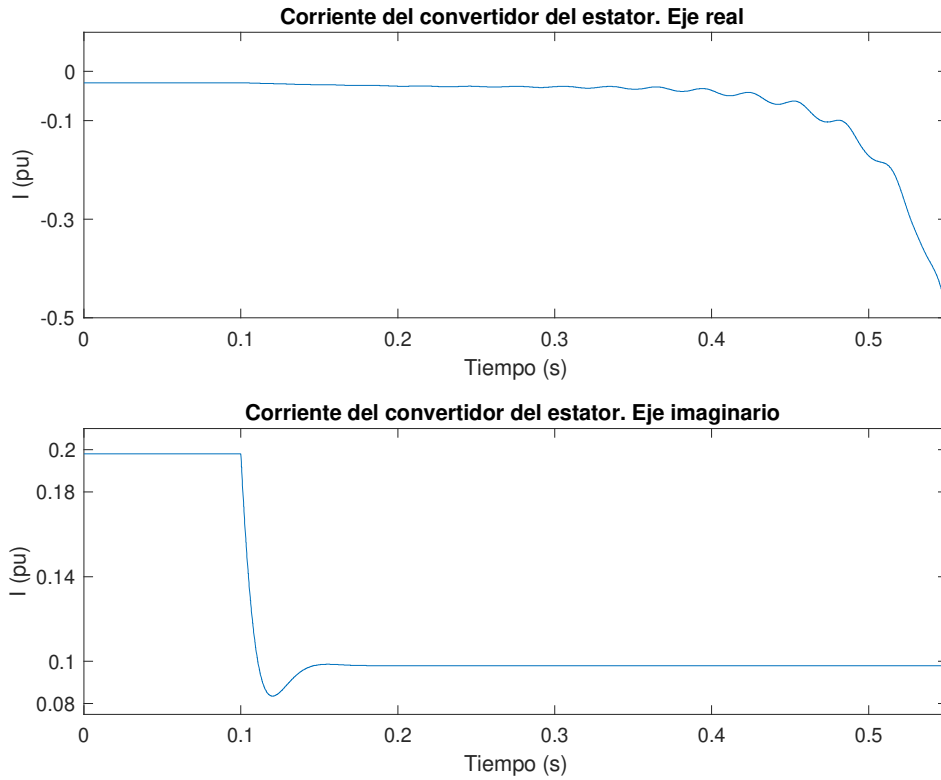


Figura 5.7: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna. Factor de compensación 20%

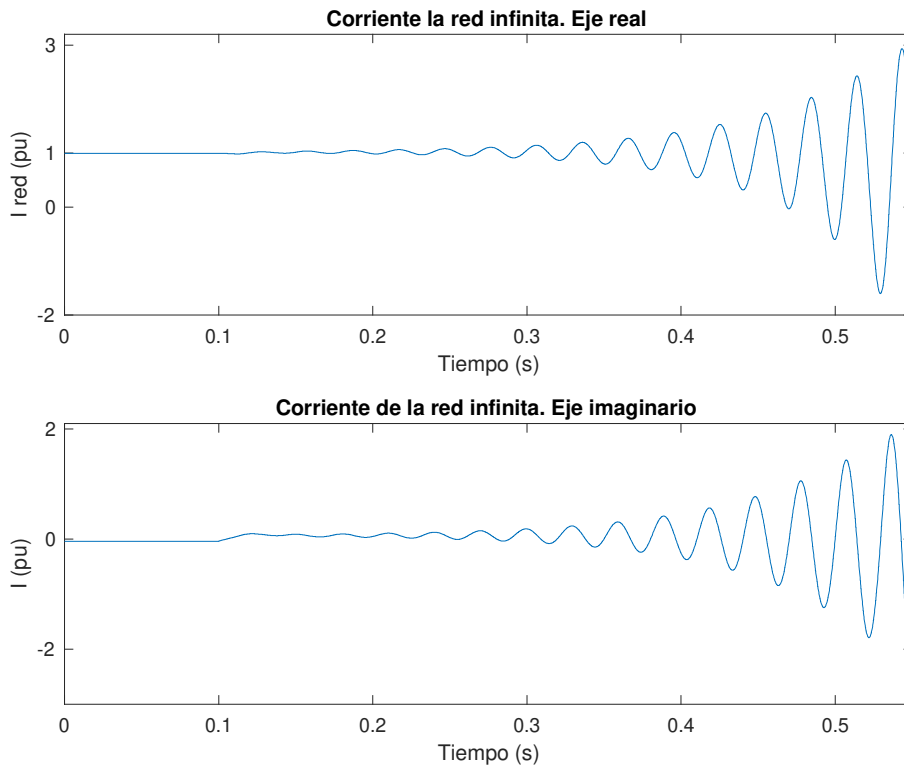


Figura 5.8: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator. Factor de compensación 20%

5.3. Conclusiones parciales

Como se comentó anteriormente (Véase 1.2.3), la resonancia subsíncrona se produce con la interacción del subsistema eléctrico de la línea con compensación serie y el subsistema mecánico de las masas de la turbina-generator. El análisis de los factores de participación permiten relacionar el modo inestable con una interacción entre los devanados del estator y la línea compensada en serie.

Los cálculos realizados en este capítulo confirman que a medida que se incrementa el factor de compensación de la línea, la frecuencia subsíncrona se acerca más al rango de frecuencias de las oscilaciones mecánicas. La consecuencia es directa: la resonancia subsíncrona es más probable para factores de compensación de línea elevados.

Las simulaciones del modelo no lineal corroboran los resultados del análisis los autovalores de la matriz de estados A. Las oscilaciones se manifiestan en variables mecánicas (velocidad del eje) y eléctricas (corriente de red, corriente del convertidor y tensión del condensador de acoplamiento).

Capítulo 6 : Diseño de estabilizador basado en Sensibilidad de los autovalores

6.1. Sensibilidades

La sensibilidad del autovalor λ_i con respecto al parámetro q de la matriz de estados A es:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial q} = \bar{w}_i^T \frac{\partial A(q)}{\partial q} \bar{v}_i \quad (6.1)$$

La sensibilidad del autovalor i -ésimo respecto a la variación de la ganancia del j -ésimo estabilizador es:

$$S_i(T_{s1j}) = R_{ij} \left. \frac{\partial F(s, K_{Sj}, T_{s1j})}{\partial K_{Sj}} \right|_{s=\lambda_i^0} \quad (6.2)$$

siendo R_{ij} el residuo de la función de transferencia entre la salida y la entrada del j -ésimo estabilizador.

6.2. Método de ajuste

La función de transferencia del estabilizador tiene como fórmula general:

$$F(s, K_{Sj}, T_{s1j}) = \left(\frac{1 + s T_{s1j}}{1 + s \frac{T_{s1j}}{\alpha}} \right) \quad (6.3)$$

La ecuación (6.4) es la particularización de la fórmula general. Cuenta con dos etapas de compensación de fase y un filtro wash-out, que es un filtro paso alto que elimina entradas en régimen permanente y deja pasar transitorios. Es decir, evita que el estabilizador actúe en dicho caso.

$$F(s, K_S) = K_S \left(\frac{1 + s T_{S1}}{1 + s T_{S2}} \right) \left(\frac{1 + s T_{S3}}{1 + s T_{S4}} \right) \frac{s T_{S5}}{1 + s T_{S5}} \quad (6.4)$$

El diseño de un estabilizador por sensibilidades de los autovalores pretende mover un autovalor que es inestable, a una zona en la que se asegure la estabilidad (parte real negativa). Este proceso consta de dos etapas: compensación de fase de cada etapa y determinación de la ganancia del estabilizador.

El *primer paso* consiste en imponer que la fase de la sensibilidad del autovalor sea de 180° a la frecuencia natural. En este cálculo no se tiene en consideración el filtro wash-out. A continuación se detallan las expresiones del adelanto (6.5) o retraso (6.6) de fase ϕ_j que aporta el estabilizador en cada etapa j :

$$\phi_j = \frac{\pi - \varphi_i \cdot \text{sign}(K_{Sj})}{N_{Sj}} \quad (6.5)$$

$$\phi_j = \frac{\pi + \varphi_i \cdot \text{sign}(K_{Sj})}{N_{Sj}} \quad (6.6)$$

Una vez calculada la fase del estabilizador se buscan cuáles son el coeficiente del filtro α_j y a constante de tiempo T_{s1j} :

$$\alpha_j = \frac{1 + \sin(\phi_j)}{1 - \sin(\phi_j)} \quad (6.7)$$

$$T_{s1j} = \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega_{di}^0} \quad (6.8)$$

$$T_{s1j} = T_{s3j} \quad (6.9)$$

$$T_{s2j} = T_{s4j} = \alpha_j T_{s1j} \quad (6.10)$$

$$\lambda_i^0 = \sigma_i^0 + j \cdot \omega_{di}^0 \quad (6.11)$$

El *segundo paso* del diseño del estabilizador consiste en la determinación de la constante del estabilizador K_S . Para ello, se fija el amortiguamiento del autovalor estimado al valor del amortiguamiento del autovalor deseado:

$$\Delta K_{Sj} = K_{Sj} - K_{Sj}^0 = \frac{\text{Re}\{\Delta\lambda_i\}}{\text{Re}\left\{\frac{\partial\lambda_i}{\partial K_{Sj}}\right\}} = \frac{\text{Re}\{\lambda_i^d - \lambda_i^0\}}{\text{Re}\{S_i(T_{s1j})\}} \quad (6.12)$$

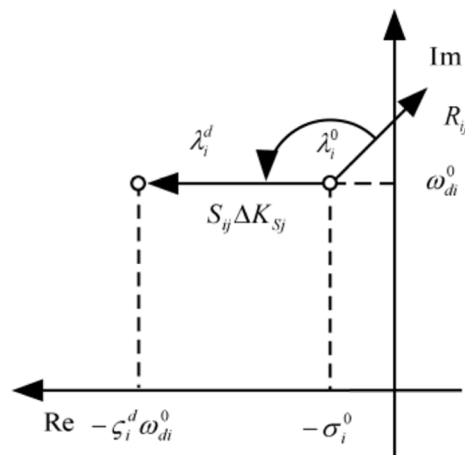


Figura 6.1: Representación gráfica del diseño de estabilizador por el método de sensibilidad de los autovalores [10]

Una vez obtenido el estabilizador es necesario comprobar que hay una alta correspondencia entre el autovalor del diseño y el verdadero (Ecuación (6.13)) .

$$\lambda_i^d = -\zeta_i^d \omega_{di}^0 + j \omega_{di}^0 \quad (6.13)$$

6.3. Estabilizadores

El sistema tiene dos *entradas*. La consigna de corriente de eje transverso del convertidor del estator, i_{gq}^{ref} , y la consigna de corriente de eje directo del convertidor del rotor, i_{rd}^{ref} .

Asimismo, hay dos *salidas*. La potencia activa entregada a la red, p_e , y la tensión (módulo) del estator, $|V_s|$.

En lo referente al estabilizador, se habla de salida o mando del estabilizador a las consignas de corriente. La entrada del estabilizador se corresponde con la salida del sistema.

A continuación, en la Tabla 6.1 se evalúan los factores de controlabilidad y observabilidad (Véase 3.1.3) para los dos casos de estudio de la red.

	Factor de controlabilidad			Factor de observabilidad		
	Entrada	Módulo	Ángulo(°)	Salida	Módulo	Ángulo(°)
FC = 8%	i_{gq}^{ref}	5,9805	0,493	$ V_s $	0,0358	-8,664
	i_{rd}^{ref}	7,1982	-5,140	p_e	0,9737	-83,020
FC = 20%	i_{gq}^{ref}	11,5077	16,275	$ V_s $	0,0673	-20,455
	i_{rd}^{ref}	13,2355	15,957	p_e	1,0032	-80,726

Tabla 6.1: Factores de controlabilidad y observabilidad del modo subsíncrono para los valores de compensación de la línea

La controlabilidad de i_{rd}^{ref} es mayor que la de i_{gq}^{ref} para ambos factores de compensación. No obstante, ambos están dentro del mismo orden de magnitud. La observabilidad de la potencia es destacablemente mayor que la de tensión. En línea con un proyecto anterior [24], se va a estudiar el estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e .

6.3.1. Estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e

6.3.1.1. Factor de compensación 8%

La Tabla 6.2 muestra los parámetros del estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e . Se ha diseñado para amortiguar el modo subsíncrono un 3%:

k_s (pu)	$t_{s1} = t_{s3}$ (ms)	$t_{s2} = t_{s4}$ (ms)	t_{s5} (s)
-0,3098	6,634	2,446	5

Tabla 6.2: Constantes del estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores i_{gq}^{ref} - p_e , para un factor de compensación del 8%

La Tabla 6.3 presenta los autovalores de la matriz de estados A, con el estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e basado en el método de sensibilidades de los autovalores.

Autovalores complejos				
n°	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
11	-7186,51	5887,23	77,36	1478,56
9	-9041,41	5571,7	85,13	1690,27
7	-46146069	1339,73	100	7344374,97
5	-2,153E+09	589,89	100	342704232,8
14	-10,31	373,37	2,76	59,45
18	-6,47	247,73	2,61	39,44
24	-77,49	94,42	63,44	19,44
26	-37,24	91,9	37,55	15,78
20	-87,72	89,7	69,92	19,97
22	-88,86	87,71	71,17	19,87
28	-51,8	80,51	54,11	15,24
16	-313,82	74,34	97,31	51,33
32	-8,3	8,95	67,97	1,94
30	-16,16	4,63	96,13	2,67
Autovalores reales				
n°	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
13	-715,63	0	100	113,9
34	-0,2	0	100	0,03

Tabla 6.3: Autovalores del modelo linealizado con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores i_{gq}^{ref} - p_e . Factor de compensación 8%.

La Tabla 6.4 compara los autovalores originales del sistema con los autovalores obtenidos tras introducir el estabilizador basado en sensibilidades.

AUTOVALORES ORIGINALES				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-17,56	372,85	4,7	59,41
Subsíncrono	0,63	248,16	-0,25	39,50
AUTOVALORES CON ESTABILIZADOR				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-10,31	373,37	2,76	59,45
Subsíncrono	-6,47	247,73	2,61	39,44

Tabla 6.4: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores i_{gq}^{ref} - p_e . Factor de compensación 8%.

La Figura 6.2 muestra un detalle del movimiento de los autovalores del sistema tras introducir el estabilizador. En concreto, se observa cómo desaparecen del plano real positivo la pareja de autovalores complejos del modo subsíncrono. El modo supersíncrono reduce su amortiguamiento.

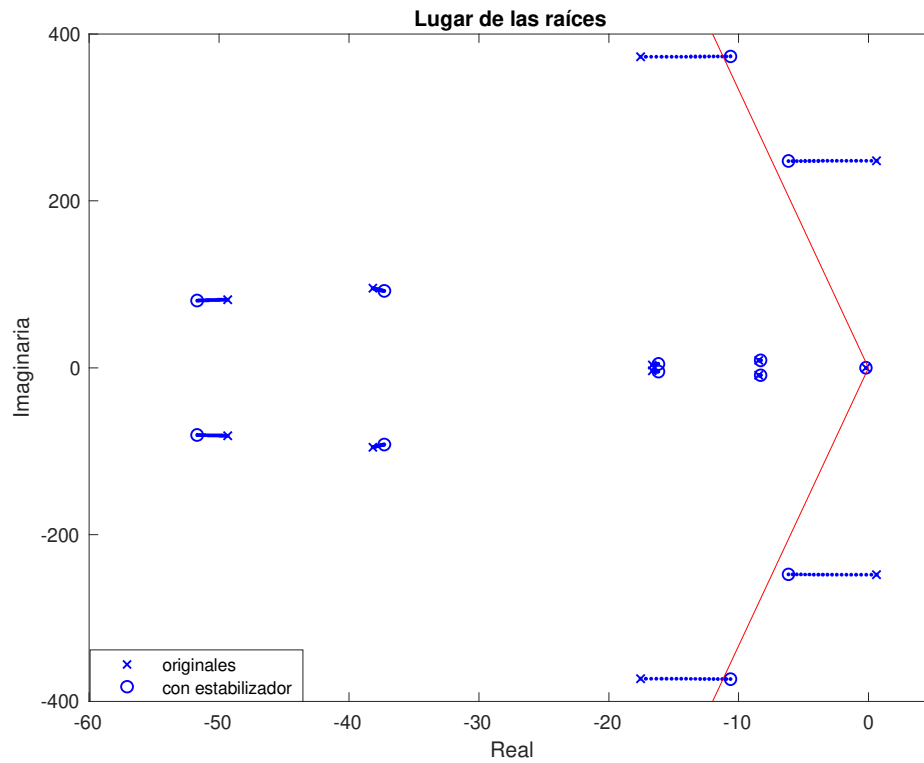


Figura 6.2: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%

A continuación, se muestra la respuesta temporal de algunas variables del sistema tras aplicar un escalón en la consigna del convertidor de estator. La oscilación subsíncrona se amortigua satisfactoriamente.

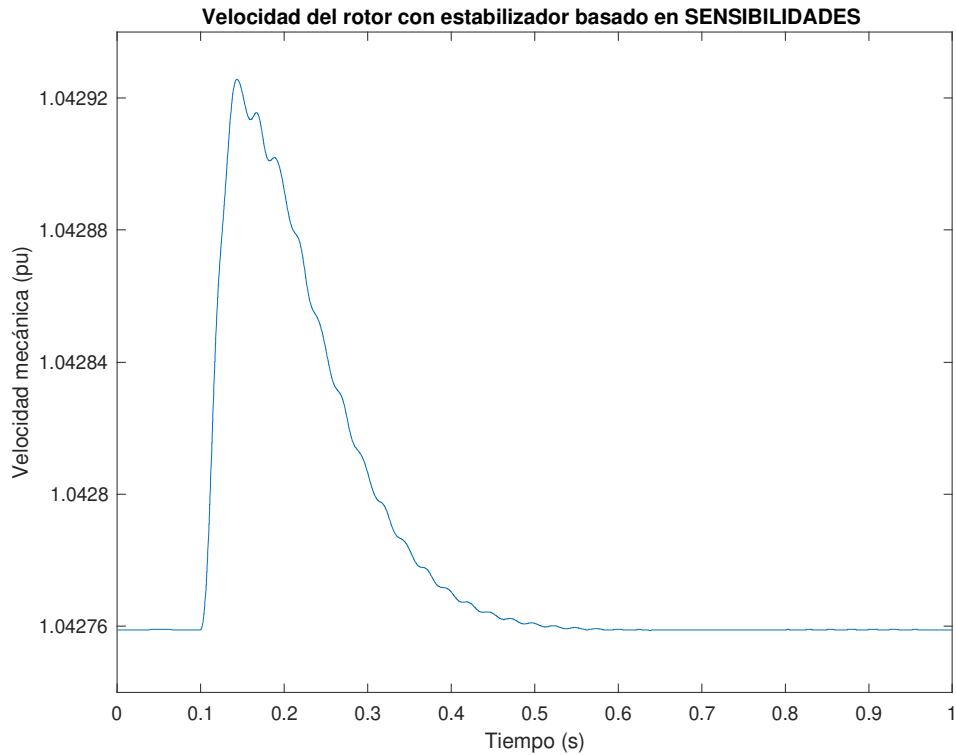


Figura 6.3: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%

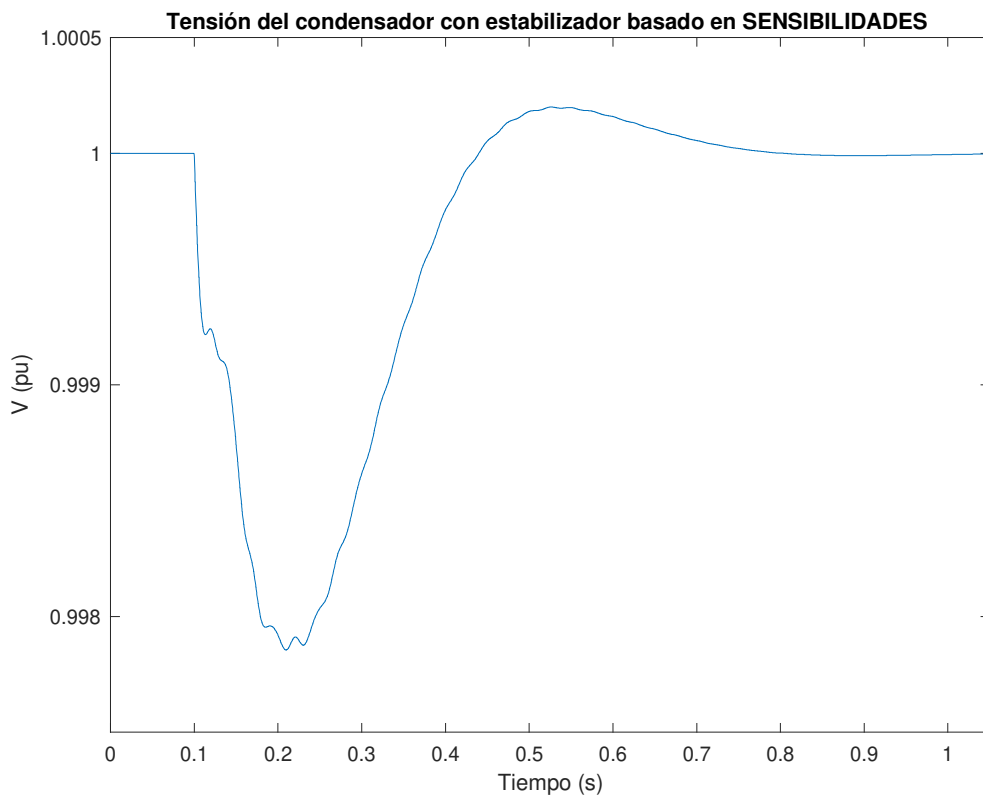


Figura 6.4: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%

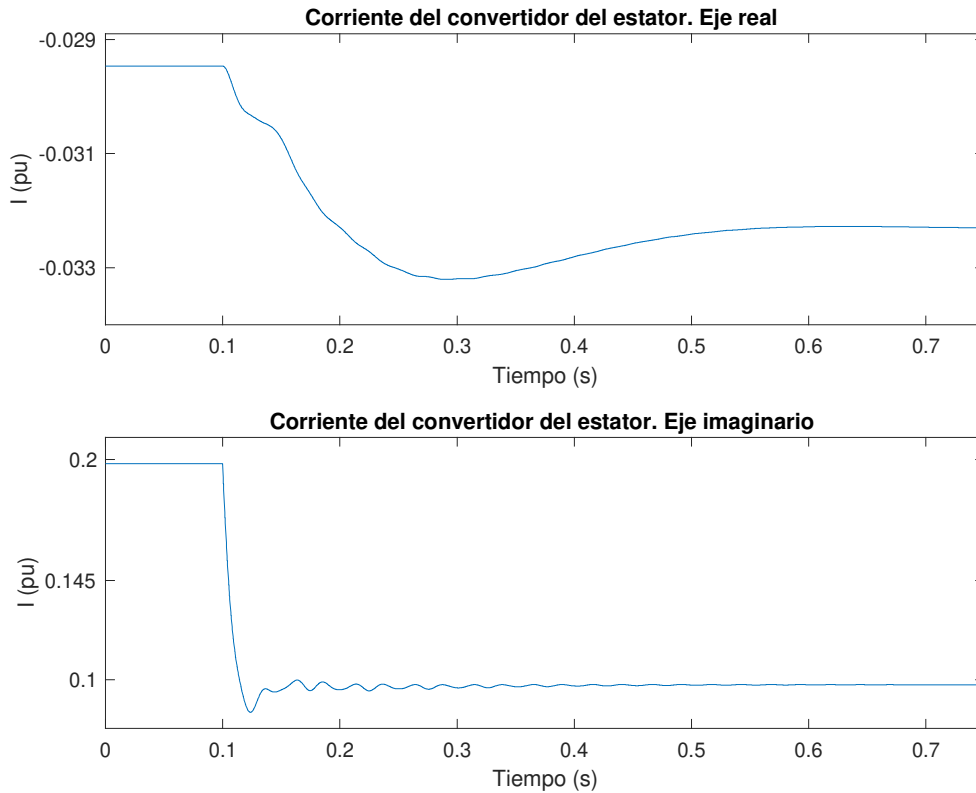


Figura 6.5: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%

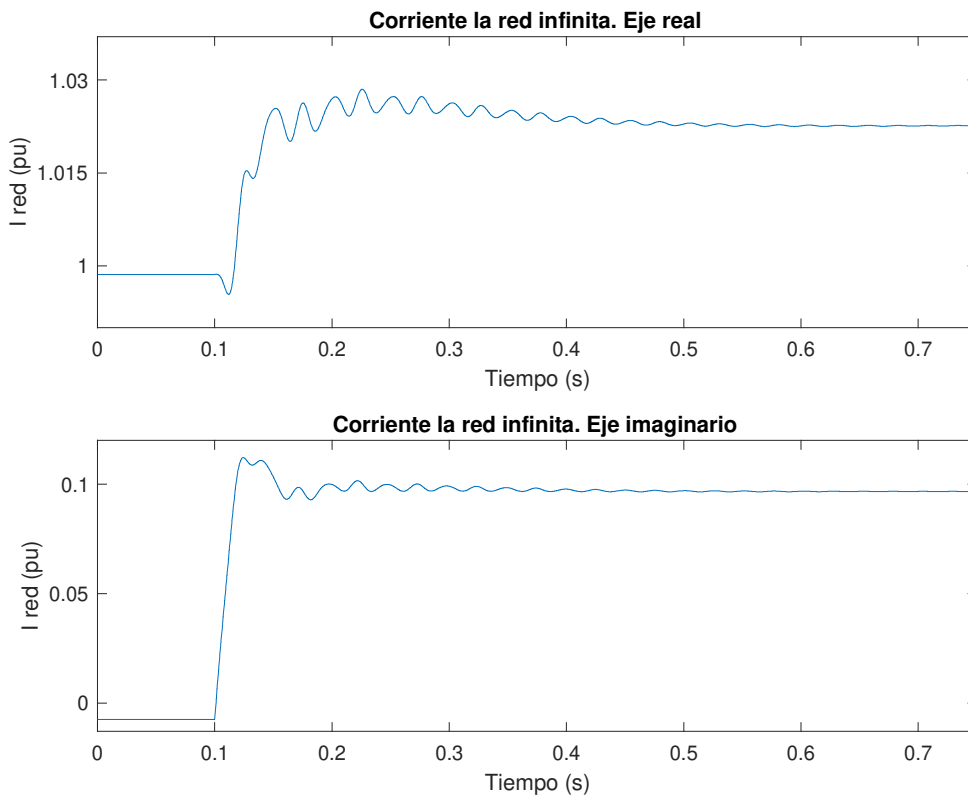


Figura 6.6: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 8%

6.3.1.2. Factor de compensación 20%

La Tabla 6.5 muestra los parámetros del estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e . Se ha diseñado para amortiguar el modo subsíncrono un 3%:

k_s (pu)	$t_{s1} = t_{s3}$ (ms)	$t_{s2} = t_{s4}$ (ms)	t_{s5} (s)
-0.5110	6,936	3,220	5

Tabla 6.5: Constantes del estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores i_{gq}^{ref} - p_e , para un factor de compensación del 20%

La Tabla 6.6 presenta los autovalores de la matriz de estados A, con el estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e basado en el método de sensibilidades de los autovalores.

Autovalores complejos				
nº	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
11	-7333,04	5846,34	78,19	1492,61
9	-8973,1	5574,36	84,94	1681,25
7	-46146008	1215,62	100	7344365,27
5	-2,153E+09	552,77	100	342704231,1
14	-8,61	403,76	2,13	64,28
18	-4,19	210,49	1,99	33,51
26	-40,53	96,02	38,89	16,59
24	-77,08	94,45	63,23	19,4
20	-87,94	90,23	69,79	20,05
22	-89,4	87,7	71,38	19,93
28	-57,13	78,46	58,86	15,45
16	-252,55	45,12	98,44	40,83
32	-8,2	8,98	67,42	1,94
30	-16,15	4,69	96,03	2,68
Autovalores reales				
nº	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
13	-521,28	0	100	82,96
34	-0,2	0	100	0,03

Tabla 6.6: Autovalores del modelo linealizado con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.

La Tabla 6.7 compara los autovalores originales del sistema con los autovalores obtenidos tras introducir el estabilizador basado en sensibilidades.

AUTOVALORES ORIGINALES				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-20,79	409,2	5,08	65,21
Subsíncrono	12,28	211,26	-5,8	33,68

AUTOVALORES CON ESTABILIZADOR				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-8,61	403,76	2,13	64,28
Subsíncrono	-4,19	210,49	1,99	33,51

Tabla 6.7: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%.

La Figura 6.7 muestra un detalle del movimiento de los autovalores del sistema tras introducir el estabilizador. En concreto, se observa cómo desaparecen del plano real la pareja de autovalores complejos del modo subsíncrono.

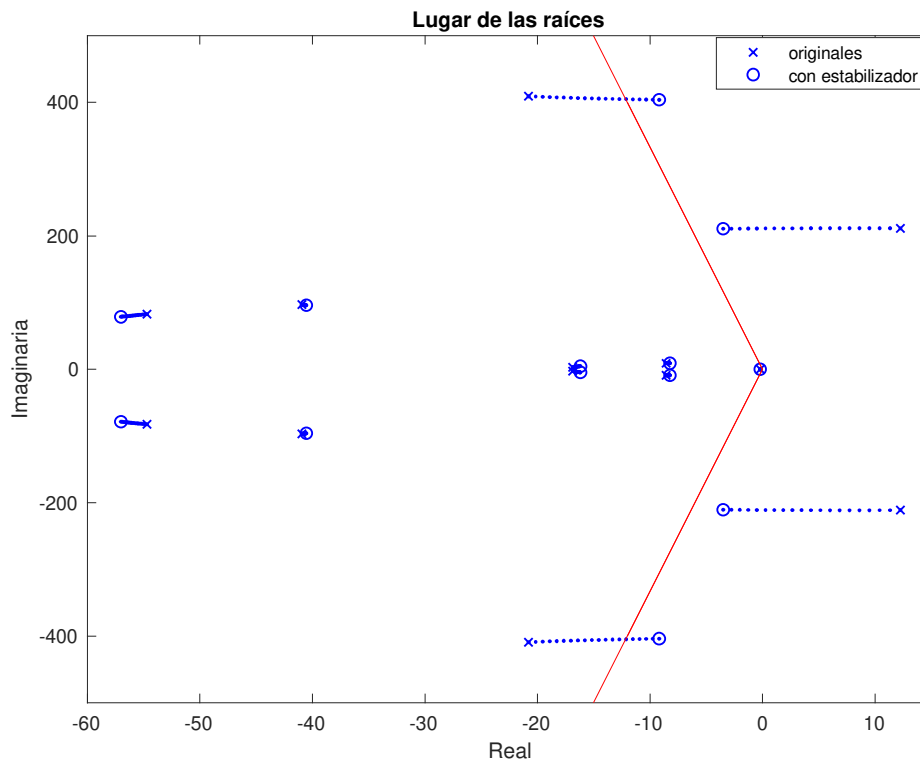


Figura 6.7: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%

A continuación, se muestra la respuesta temporal de algunas variables del sistema tras aplicar un escalón en la consigna del convertidor de estator. La oscilación subsíncrona se amortigua satisfactoriamente.

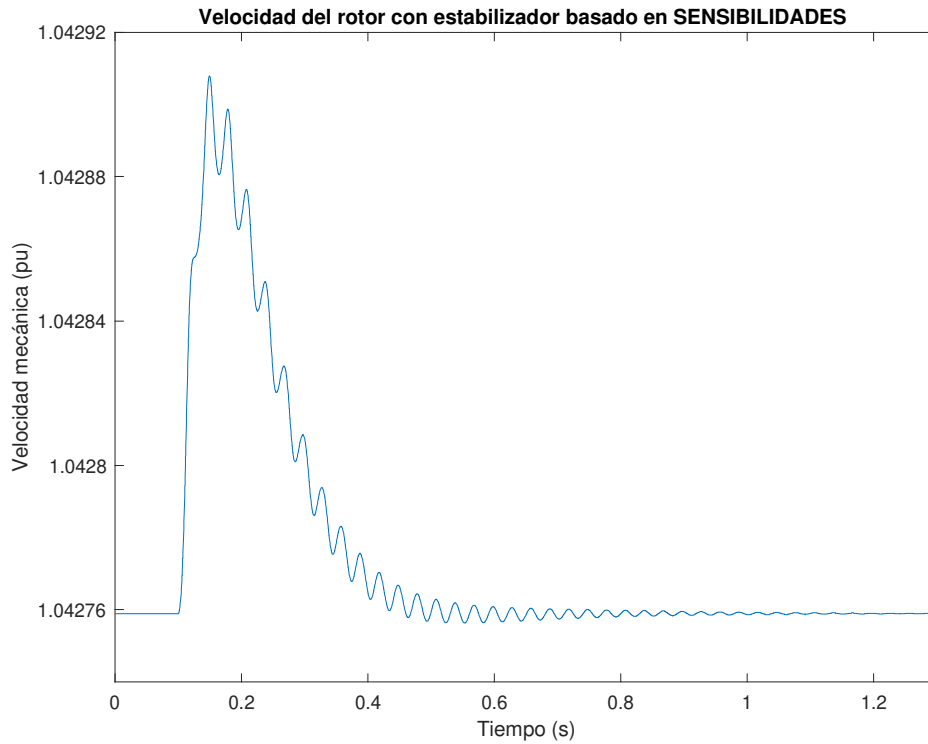


Figura 6.8: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%

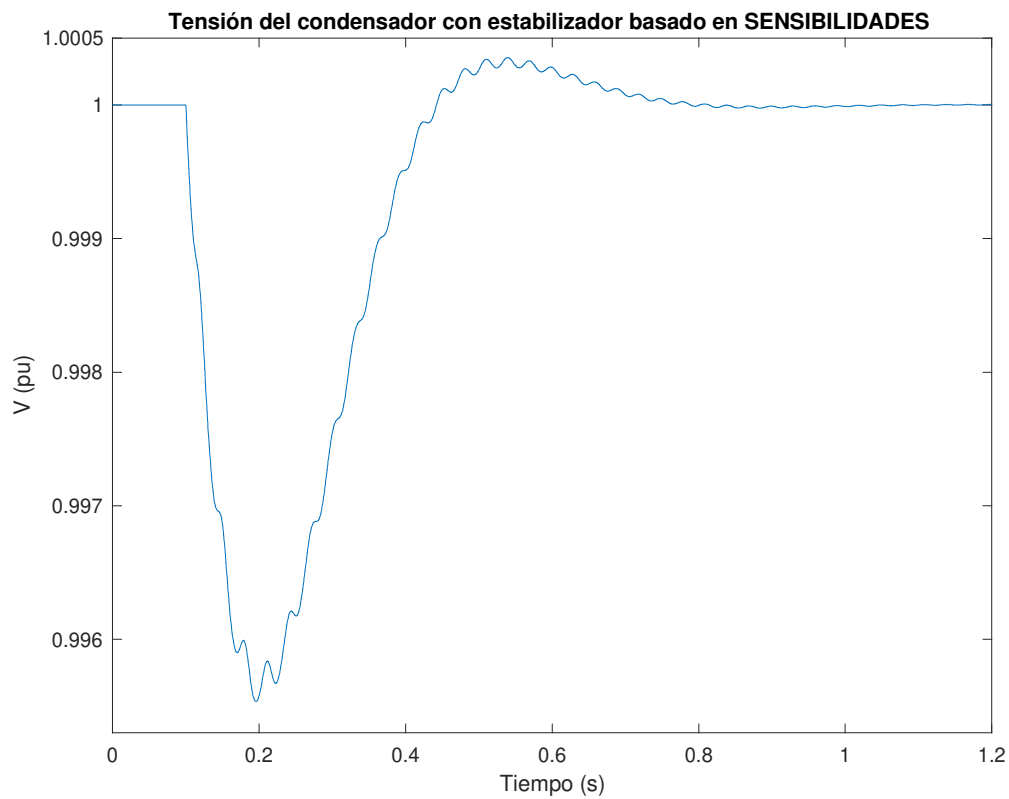


Figura 6.9: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%

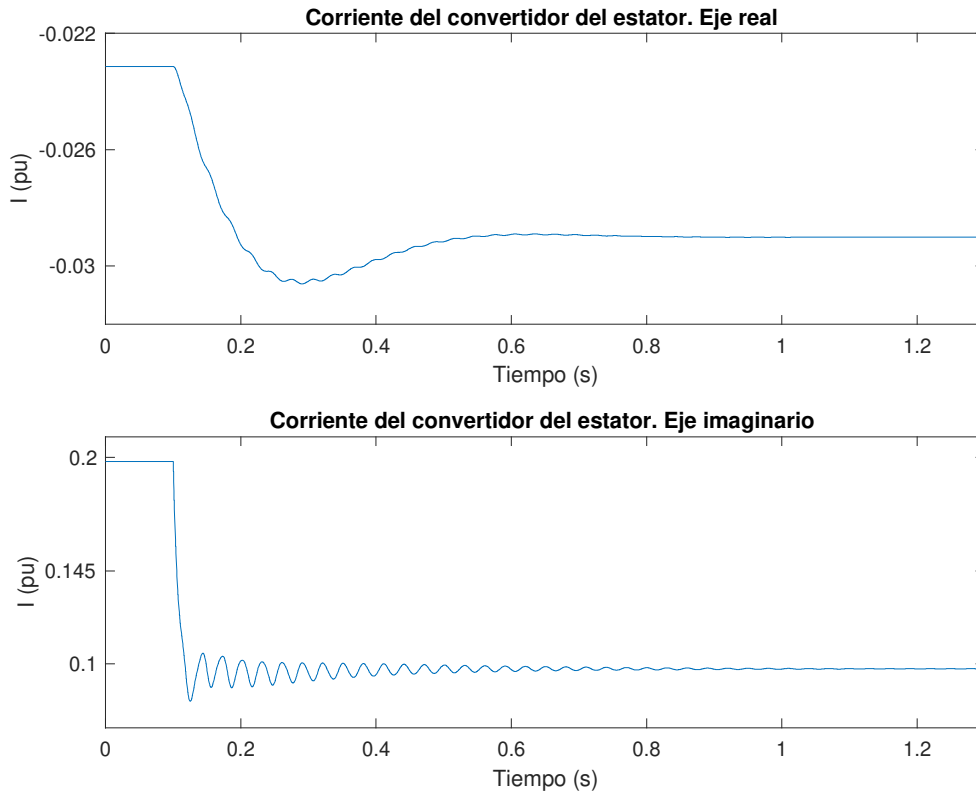


Figura 6.10: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%

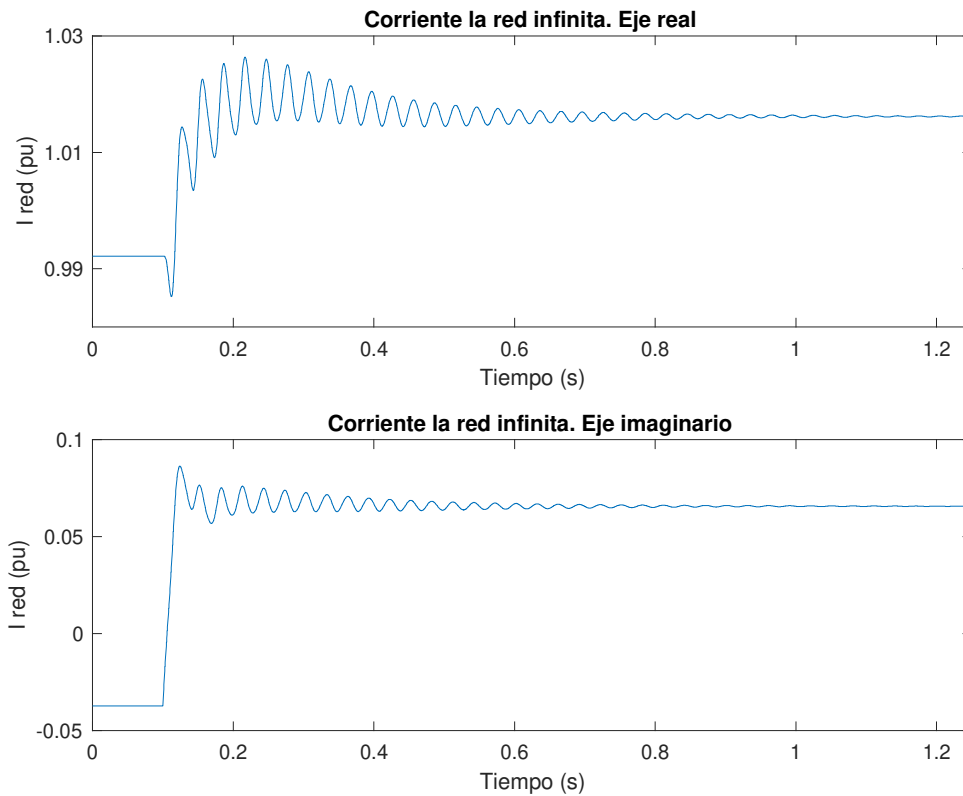


Figura 6.11: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores. Factor de compensación 20%

6.4. Conclusiones parciales

El estabilizador de oscilaciones subsíncronas i_{gq}^{ref} - p_e basado en el método de sensibilidades de los autovalores es satisfactorio para los casos de estudio de factores de compensación de 8 y 20%. Para un caso más extremo, con un factor de compensación de la línea del 60% el estabilizador no logra amortiguar el modo subsíncrono.

El modo supersíncrono pierde capacidad de amortiguamiento con el estabilizador de sensibilidades de los autovalores.

Capítulo 7 : Diseño de estabilizador basado en Filtro de Kalman

El estabilizador basado en el filtro de Kalman consiste en un controlador de amortiguamiento subsíncrono (SSDC en la literatura inglesa, Subsynchronous damping controller). Su objetivo es obtener amortiguamientos positivos en todo el sistema. Los parámetros del estabilizador se desarrollan con algoritmos genéticos.

7.1. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un modelo recursivo basado en el estimador de mínimos cuadrados. Su uso está ampliamente extendido en el ámbito de los sistemas eléctricos para la estimación de armónicos y variables de estado.

Las ecuaciones [25] que describen el estado del sistema (para un único estado) son:

$$x_k = a x_{k-1} + w_k \quad (7.1)$$

$$z_k = x_k + v_k \quad (7.2)$$

donde x_k representa el estado actual de la variable, z_k es la observación actual del sistema, v_k es el ruido de la medida, w_k es el ruido del proceso y a es una constante.

Puesto que el ruido (v_k y w_k) no se conoce, la estimación del estado se calcula a partir de la observación actual z_k y la estimación de estado previa \hat{x}_{k-1} :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + g_k(z_k - \hat{x}_{k-1}) \quad (7.3)$$

La ganancia g_k permite corregir la estimación, y permite ponderar las estimaciones previas o a las observaciones actuales. Su valor se obtiene según la siguiente expresión:

$$g_k = \frac{p_k}{p_k + r} \quad (7.4)$$

donde p_k es la covarianza del proceso de estimación y r es la varianza de la señal del ruido.

El algoritmo tiene dos fases:

- Predicción

$$\hat{x}_k = a \hat{x}_{k-1} \quad (7.5)$$

$$p_k = a p_{k-1} \quad (7.6)$$

- Corrección

$$g_k = \frac{p_k}{p_k + r} \quad (7.7)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + g_k(z_k - \hat{x}_k) \quad (7.8)$$

$$p_k = (1 - g_k)p_k \quad (7.9)$$

Para estimar varios estados es necesario reformular dichas ecuaciones. En tal caso, se utilizarán matrices y vectores.

7.1.1. Estructura del controlador

La Figura 7.1 presenta la implantación del estabilizador basado en filtro de Kalman en el modelo:

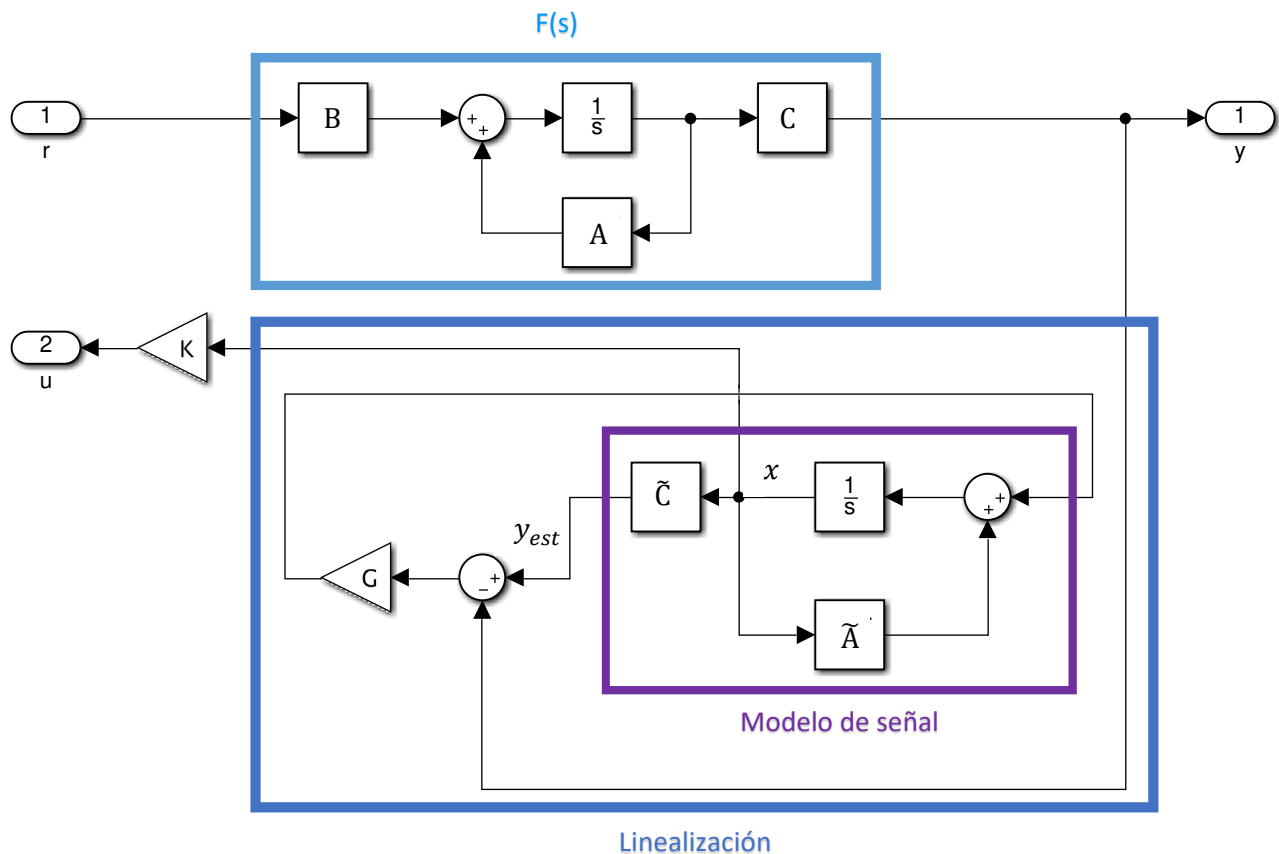


Figura 7.1: Implantación del Filtro de Kalman en el modelo

$F(s)$ es la *planta* del modelo linealizado: compuesto por la máquina asíncrona doblemente alimentada, la línea compensada serie y la red infinita. El modelo queda definido por las matrices de estados A , B y C . La entrada 'r' es la referencia (consigna de corriente reactiva), y la salida (potencia) es 'y'.

El *modelo de señal* representa al filtro de Kalman. La salida 'y' se estima a partir de 2 vectores giratorios de frecuencias distintas y un valor medio. En consecuencia, hay 5 componentes:

- Módulo y frecuencia de cada vector
- Término constante

El objetivo de dividir la señal de salida en 5 términos es el de actuar sobre el amortiguamiento del modo subsíncrono sin reducir el del modo supersíncrono.

Las ecuaciones dinámicas del filtro de Kalman son:

$$\frac{dx}{dt} = \tilde{A} x + G (y - y_{est}) \quad (7.10)$$

$$y_{est} = \tilde{C} x \quad (7.11)$$

El vector x representa las 5 componentes estimadas de la salida. Las matrices \tilde{A} y \tilde{C} definen el modelo de señal. La matriz G pondera las amplitudes de las estimaciones con el fin de corregir el error entre la estimación y_{est} y la salida y .

$$u = K x \quad (7.12)$$

Por otro lado, K es una matriz de dimensión 1x5. A partir de los 5 estados de la señal se calcula el mando u .

El filtro de Kalman es *no lineal*. Para implantarlo en el modelo se linealiza, obteniéndose unas matrices que representan el estabilizador linealizado.

7.2. Algoritmos genéticos

Con el fin de optimizar los parámetros del controlador se han usado algoritmos genéticos. En concreto, se ha optimizado la matriz K con el fin de mejorar la sensibilidad del control.

La máxima sensibilidad es un índice de gran robustez. Está relacionada con la distancia al punto -1. Es recomendable que el valor de máxima sensibilidad se encuentre entre 2.3 y 6 dB [26].

$$S(s) = \frac{1}{1 + G(s)} \quad (7.13)$$

$$M_s = \max[\text{mod}[S(j\omega)]]$$

La formulación general del problema de optimización se muestra en la Ecuación 7.14.

$$\begin{aligned} & \min(M_s) \\ & \text{sujeto a: } \text{Re}\{\lambda_i\} < 0 \end{aligned} \quad (7.14)$$

Para el caso de factor de compensación de la línea 8%, los algoritmos genéticos encuentran una sensibilidad muy baja, inferior a los límites recomendados.

ξ	M_s (dB)
0,0024	0,5164

Tabla 7.1: Resultados de la optimización para la formulación general. Factor de compensación 8%

Por ello, excepcionalmente para el caso del factor de compensación 8%, se ha reformulado la optimización, exigiendo maximizar el amortiguamiento mínimo tal y como aparece a continuación:

$$\begin{aligned} & \max(\min(\xi)) \\ & \text{sujeto a: } M_s < 7\text{dB} \\ & \text{Re}\{\lambda_i\} < 0 \end{aligned} \quad (7.15)$$

7.3. Estabilizador $i_{gq}^{\text{ref}}-p_e$

7.3.1. Factor de compensación 8%

La Tabla 7.2 presenta los autovalores de la matriz de estados A del sistema linealizado con el estabilizador $i_{gq}^{\text{ref}}-p_e$ basado en el filtro de Kalman.

Autovalores complejos				
nº	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
9	-7994,63	5994,9	80,01	1590,38
11	-8240,62	5453,59	83,39	1572,73
13	-87,46	719,21	12,07	115,31
16	-45,02	386,52	11,57	61,93
18	-42,92	362,25	11,77	58,06
7	-46146093	314,2	100	7344378,75
5	-2,153E+09	314,16	100	342704232,7
20	-31,82	273,77	11,54	43,87
22	-99,87	103,55	69,42	22,9
28	-20	91,83	21,28	14,96
26	-82,78	91,25	67,19	19,61
24	-89,1	87,71	71,27	19,9
30	-52,07	70,44	59,45	13,94
34	-8,1	8,62	68,45	1,88
Autovalores reales				
nº	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
15	-493,39	0	100	78,53
32	-21,83	0	100	3,47
33	-15,22	0	100	2,42

Tabla 7.2: Autovalores del sistema con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%.

La Tabla 7.3 compara los autovalores originales del sistema con los autovalores obtenidos tras introducir el estabilizador basado en el método de Kalman.

AUTOVALORES ORIGINALES				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-17,56	372,85	4,7	59,41
Subsíncrono	0,63	248,16	-0,25	39,50
AUTOVALORES CON ESTABILIZADOR				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-42,92	362,25	11,77	58,06
Subsíncrono	-31,82	273,77	11,54	43,87

Tabla 7.3: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%.

La Figura 7.2 muestra un detalle del movimiento de los autovalores del sistema tras introducir el estabilizador. En concreto, se observa cómo desaparecen del plano real positivo la pareja de autovalores complejos del modo subsíncrono. El modo supersíncrono aumenta su amortiguamiento.

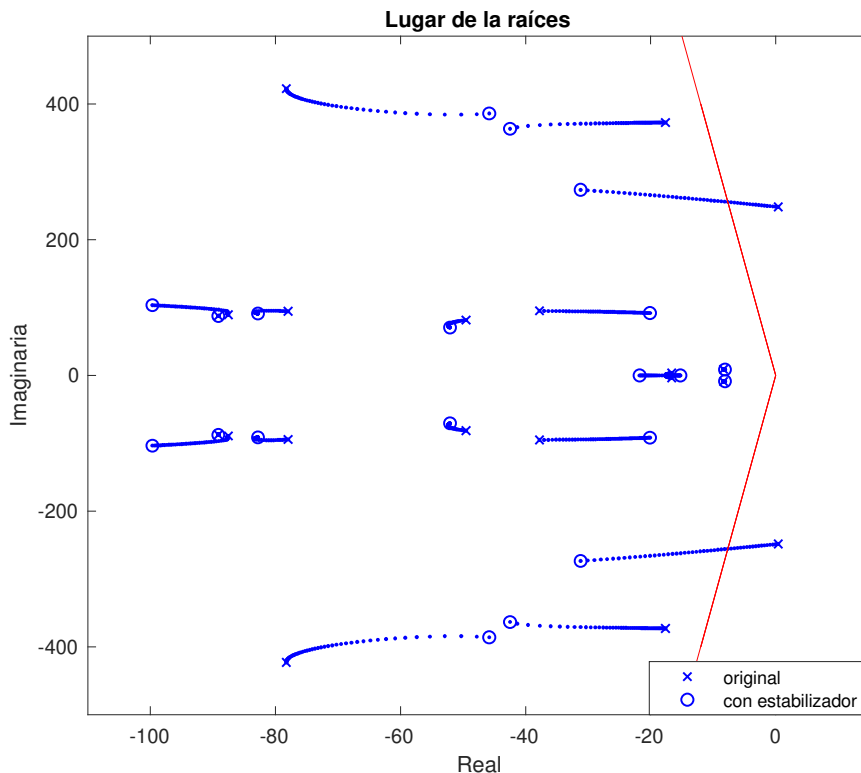


Figura 7.2: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%

A continuación, se muestra la respuesta temporal de algunas variables del sistema tras aplicar un escalón en la consigna del convertidor de estator. La oscilación subsíncrona se amortigua satisfactoriamente en un menor tiempo que el estabilizador de sensibilidades.

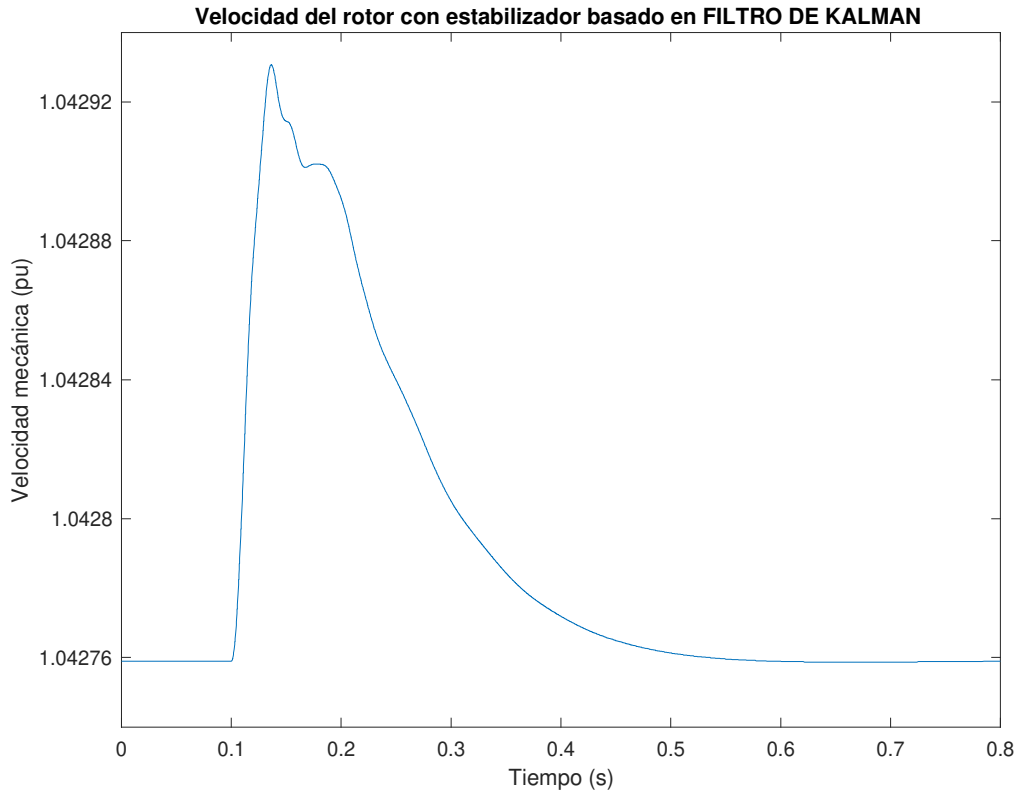


Figura 7.3: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%

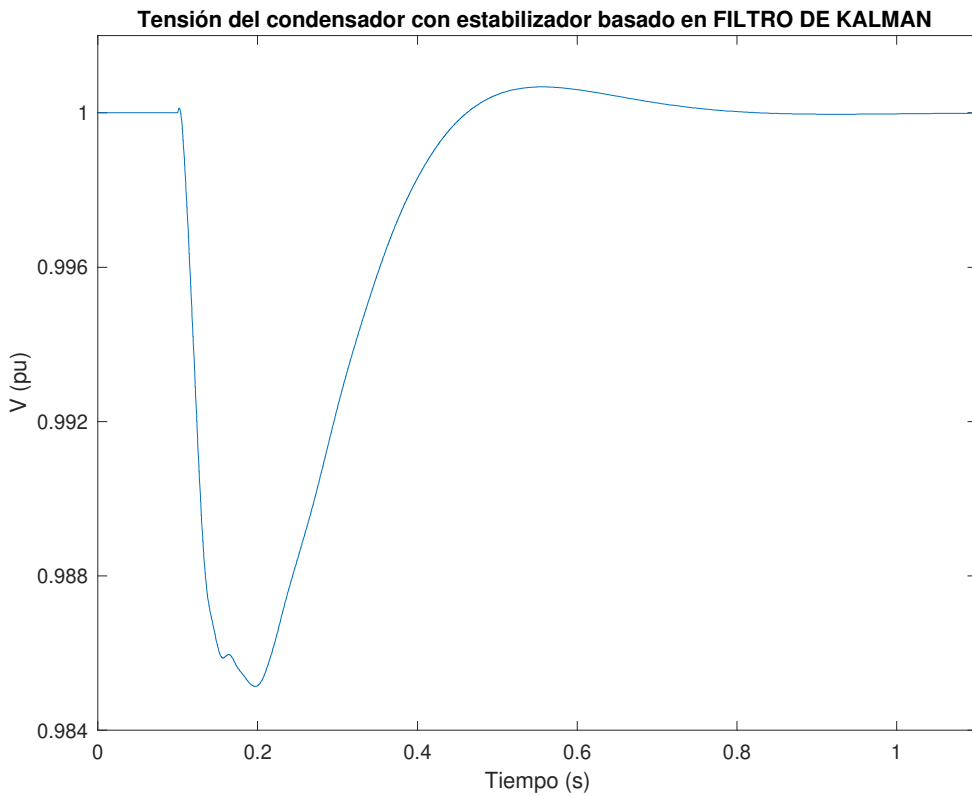


Figura 7.4: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%

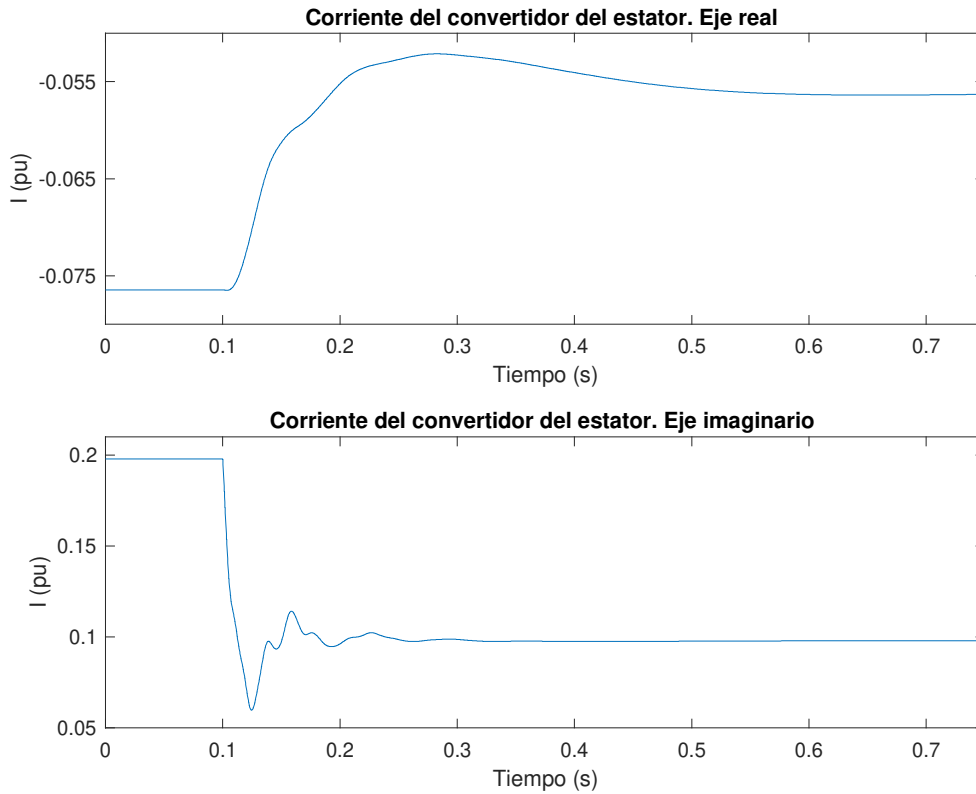


Figura 7.5: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%

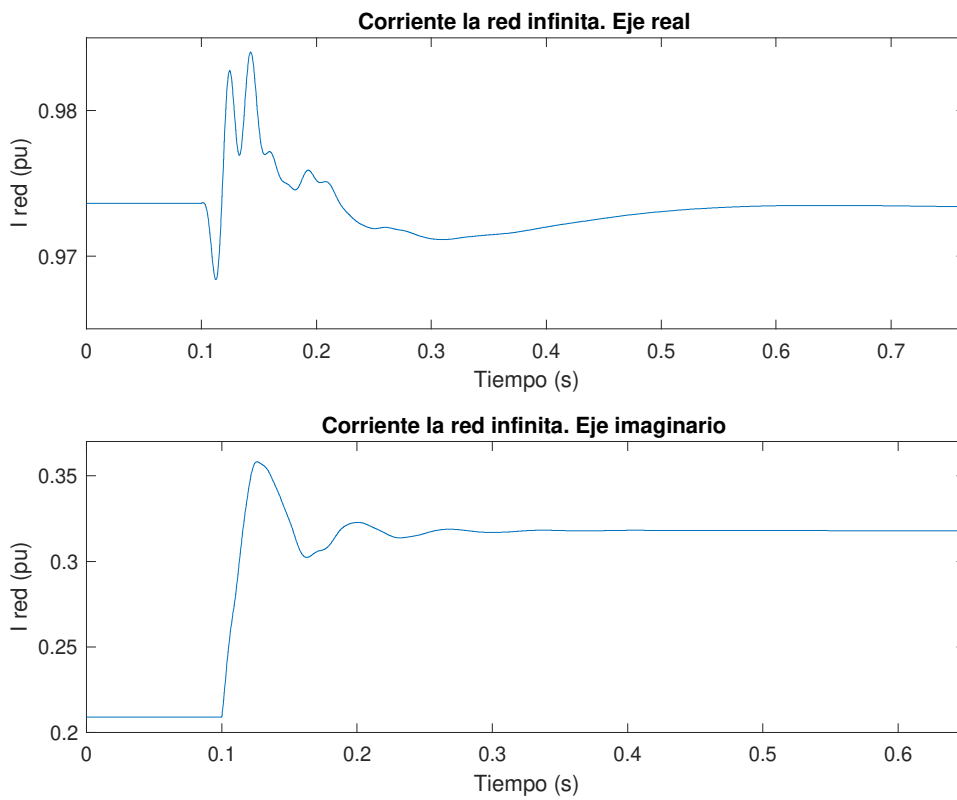


Figura 7.6: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 8%

7.3.2. Factor de compensación 20%

La Tabla 7.4 presenta los autovalores de la matriz de estados A del sistema linealizado con el estabilizador i_{gq}^{ref} - p_e basado en el filtro de Kalman.

Autovalores complejos				
n°	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
9	-8117,29	6006,41	80,39	1607,13
11	-8143,26	5386,89	83,4	1553,95
13	-62,08	1324,61	4,68	211,05
15	-36,51	868,4	4,2	138,33
17	-16,55	390,32	4,24	62,18
5	-2,153E+09	314,16	100	342704233
7	-46146093	314,16	100	7344378,75
19	-12,09	226,65	5,33	36,12
22	-85,19	103,56	63,53	21,34
28	-28,11	100,62	26,9	16,63
26	-83,92	91,92	67,42	19,81
24	-89,58	87,7	71,45	19,95
30	-54,62	72,26	60,3	14,42
34	-8,38	8,78	69,03	1,93
Autovalores reales				
n°	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
21	-172,49	0	100	27,45
32	-19,39	0	100	3,09
33	-16,23	0	100	2,58

Tabla 7.4: Autovalores del sistema con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%.

La Tabla 7.5 compara los autovalores originales del sistema con los autovalores obtenidos tras introducir el estabilizador basado en el método de Kalman.

AUTOVALORES ORIGINALES				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-20,79	409,2	5,08	65,21
Subsíncrono	12,28	211,26	-5,8	33,68
AUTOVALORES CON ESTABILIZADOR				
Modo	Real	Imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
Supersíncrono	-16,55	390,32	4,24	62,18
Subsíncrono	-12,09	226,65	5,33	36,12

Tabla 7.5: Comparación de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%

La Figura 7.7 muestra un detalle del movimiento de los autovalores del sistema tras introducir el estabilizador. En concreto, se observa cómo desaparecen del plano real positivo la pareja de autovalores complejos del modo subsíncrono. El modo supersíncrono reduce su amortiguamiento, acercándose al plano real positivo.

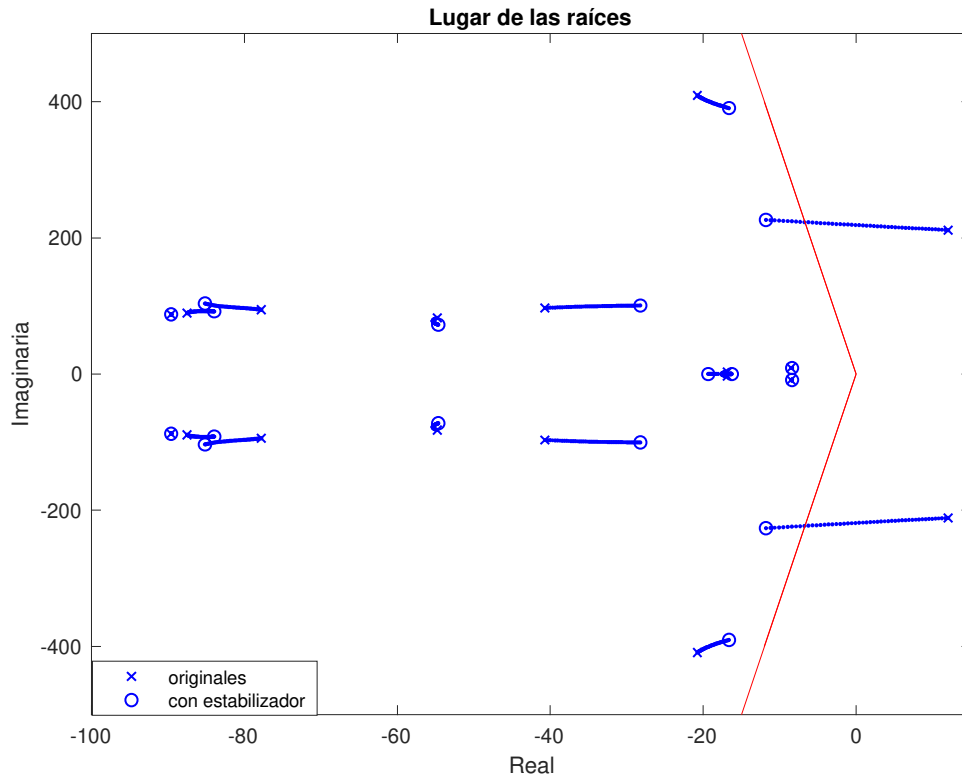


Figura 7.7: Detalle de los modos subsíncrono y supersíncrono originales y con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%

A continuación, se muestra la respuesta temporal de algunas variables del sistema tras aplicar un escalón en la consigna del convertidor de estator. La oscilación subsíncrona se amortigua satisfactoriamente en un menor tiempo que el estabilizador de sensibilidades.

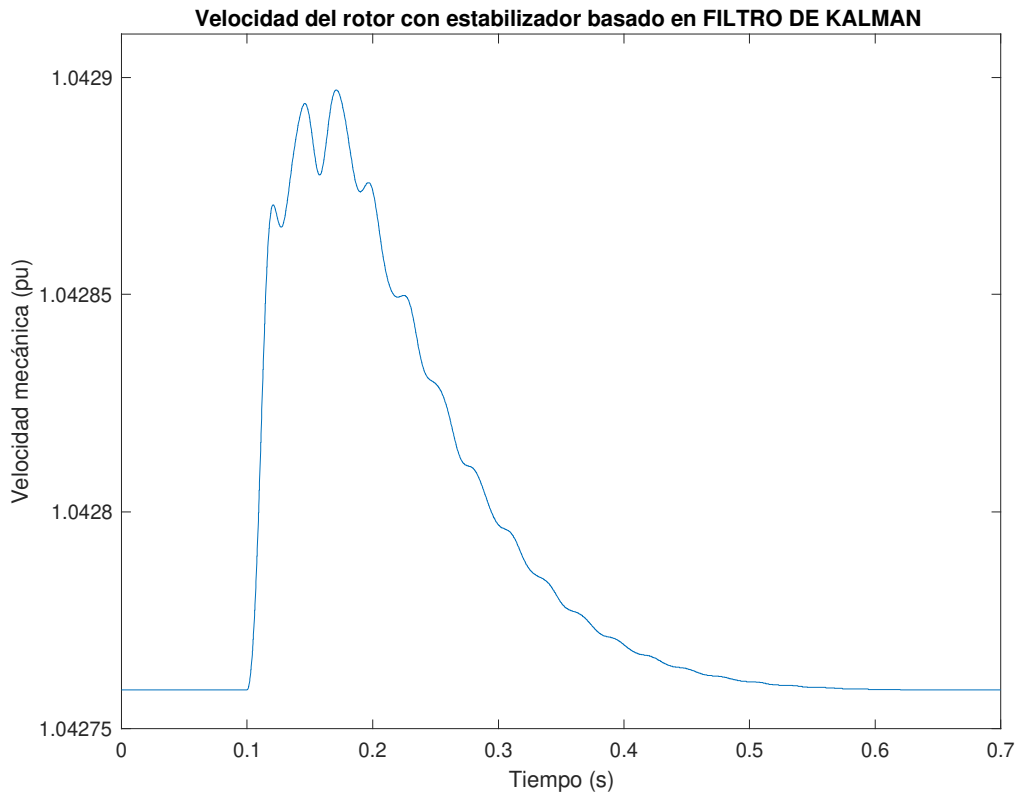


Figura 7.8: Evolución de la velocidad del rotor ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%

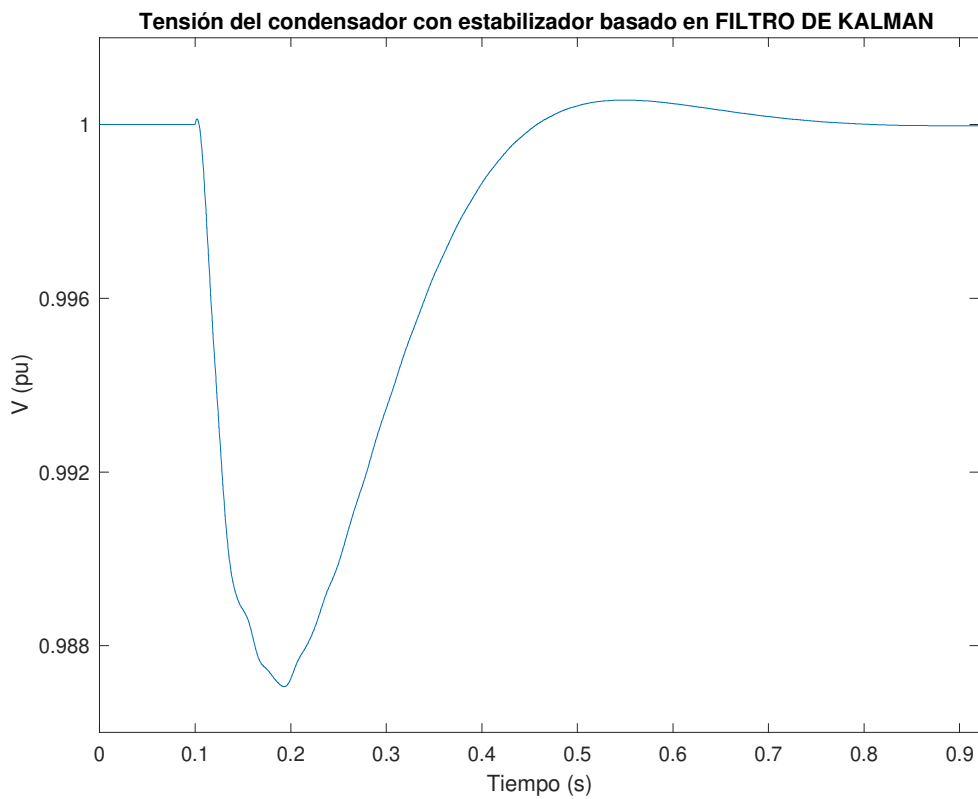


Figura 7.9: Evolución de la tensión del bus de continua ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%

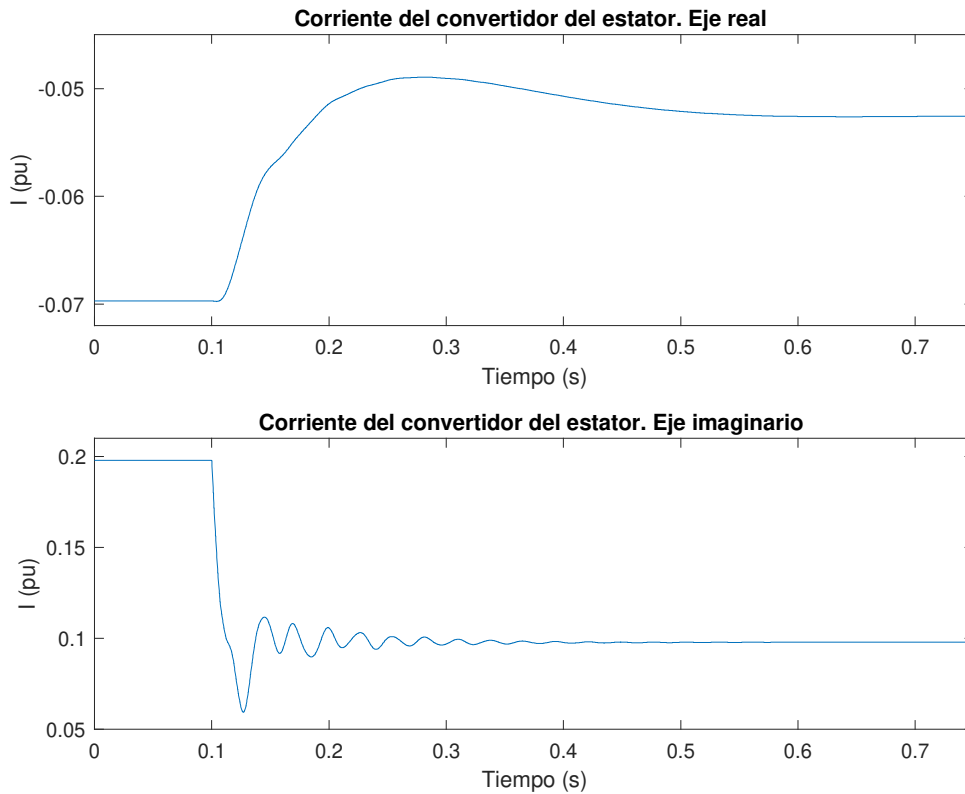


Figura 7.10: Evolución de corriente del convertidor de estator ante un escalón en su consigna con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%

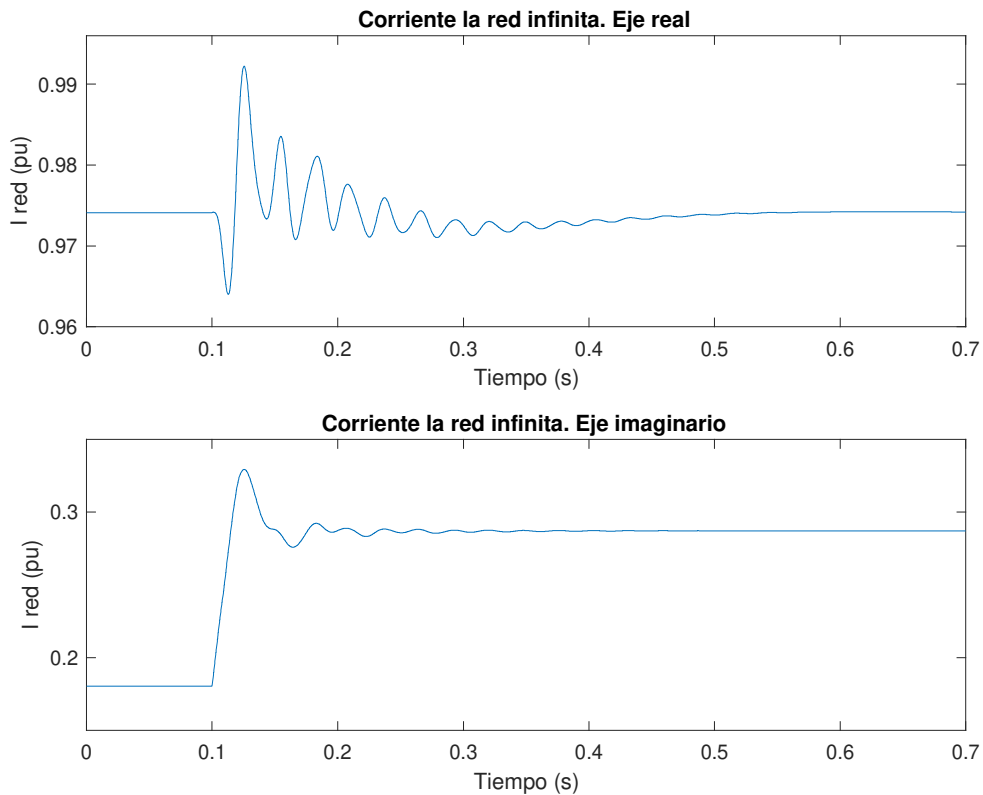


Figura 7.11: Evolución de la corriente inyectada en la red ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de estator con estabilizador basado en filtro de Kalman. Factor de compensación 20%

7.4. Conclusiones parciales

El estabilizador de oscilaciones subsíncronas i_{gq}^{ref} - p_e basado en método de Kalman es satisfactorio para los casos propuestos (factores de compensación 8% y 20%).

El estabilizador con el filtro de Kalman pretende desacoplar los modos supersíncrono y subsíncrono. Los resultados muestran que el modo supersíncrono también incrementa el amortiguamiento o se mantiene cerca del original. Este efecto es resultado de la descomposición de la salida del sistema en los dos vectores giratorios y el término constante.

El estabilizador basado en filtro de Kalman presenta un problema asociado a los bajos factores de compensación. Para el caso del factor de compensación del 8% se ha reformulado la optimización de las ganancias del estabilizador debido a la baja sensibilidad. En consecuencia, el estabilizador asociado a este factor es menos robusto por optimizarse el mínimo amortiguamiento del sistema, en lugar de la máxima sensibilidad del sistema.

Capítulo 8 : Conclusiones

8.1. Resumen de los resultados

La Tabla 8.1 recoge los resultados del amortiguamiento de los modos subsíncrono y supersíncrono obtenidos en las simulaciones.

FC	Modos	Amortiguamiento original	Amortiguamiento con estabilizador de sensibilidades de los autovalores	Amortiguamiento con estabilizador de filtro de Kalman
8%	Supersíncrono	4,70	2,76	11,77
	Subsíncrono	-0,25	2,61	11,54
20%	Supersíncrono	5,08	2,13	4,24
	Subsíncrono	-5,80	1,99	5,33

Tabla 8.1: Comparación del amortiguamiento del modo subsíncrono y supersíncrono que aporta cada método en función del factor de compensación de la línea

La máxima sensibilidad del sistema es un índice de robustez. Es recomendable que su valor se encuentre entre 2,3 y 6 dB. La Tabla 8.2 muestra la máxima sensibilidad obtenida en cada estabilizador.

Factor de compensación	Estabilizador	Máxima sensibilidad	dB
8%	Sensibilidades	1,4908	3,4686
	Kalman	2,1390	6,6044
20%	Sensibilidades	2,5787	8,2281
	Kalman	2,2106	6,9077

Tabla 8.2: Comparación de la máxima sensibilidad del estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ según cada método y factor de compensación de la línea

8.2. Conclusiones finales

Este proyecto ha empleado un modelo de simulación no lineal de un aerogenerador (generador asíncrono doblemente alimentado), un transformador elevador, una línea compensada serie y la conexión a red. Se ha trabajado con representación en espacio de estado. La herramienta utilizada para el estudio de la estabilidad ha sido Matlab/Simulink.

El estabilizador basado en sensibilidades de los autovalores se inspira en los principios de los estabilizadores del sistema de potencia. El estabilizador basado en el filtro de Kalman toma conceptos estadísticos y se optimiza con algoritmos genéticos. Los resultados se han analizado atendiendo a dos criterios: máxima sensibilidad y amortiguamiento de los modos supersíncrono y subsíncrono.

Las contribuciones al proyecto son:

- modificación del modelo de simulación para asemejarlo al modelo de referencia [24]
- selección de los casos de estudio (factor de compensación de la línea)
- comparación de las prestaciones de los estabilizadores en los casos de estudio

Las conclusiones principales del proyecto son:

- El estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ basado en el método de sensibilidades de los autovalores *amortigua las oscilaciones subsíncronas* en los casos de factor de compensación de 8 y 20%. El estabilizador $i_{gq}^{ref}-p_e$ basado en el método de filtro de Kalman también es efectivo en los mismos casos, siendo el amortiguamiento notablemente superior al del otro método.
- El *modo supersíncrono* disminuye su amortiguamiento para el estabilizador de sensibilidades de los autovalores. En el diseño según el filtro de Kalman, el modo supersíncrono reacciona satisfactoriamente, mejorando o manteniendo el amortiguamiento.
- Analizando los resultados desde el *criterio de la máxima sensibilidad del sistema*, se concluye que para bajos factores de compensación (8%), el método de sensibilidades de los autovalores es ligeramente mejor que el del filtro de Kalman. Para factores superiores (20%), el estabilizador del filtro de Kalman obtiene un mejor valor.
- El *método* de sensibilidad de los autovalores permite un cálculo rápido. Mientras que el filtro de Kalman necesita de los algoritmos genéticos para la optimización de la ganancia. Implica un tiempo de computación extensamente mayor.

Capítulo 9 : Referencias

- [1] D. N. Walker, C.E.J. Bowler, R.L. Jackson, D. A. Hodges, “Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.: 94, No. 5, May 1975, pp. 1878 – 1889.
- [2] J. Adams, C. Carter, C.; H. Shun-Hsien, “ERCOT Experience with Subsynchronous Control Interaction and proposed remediation” 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0609.
- [3] E. V. Larsen, “Wind generators and series-compensated AC transmission lines”, 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD371.
- [4] B. Badrzadeh, S. Saylor, “Susceptibility of wind turbines to sub-synchronous control and torsional interaction”, 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0476.
- [5] R. Piwko, N. Miller, J. Sanchez-Gasca, Xiaoming Yuan, Renchang Dai and J. Lyons, “Integrating Large Wind Farms into Weak Power Grids with Long Transmission Lines,” 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, 2005, pp. 1-7.
- [6] G. D. Irwin, A. K. Jindal, A.L. Isaacs, “Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems”, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan, July 24-28, 2011, 2011GM0872.
- [7] D. Kidd, P. Hassink, “Transmission operator perspective of Sub-Synchronous Interaction” 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0514.
- [8] Moharana, R. K. Varma, R. Seethapathy, “SSR Alleviation by STATCOM in Induction-Generator-Based Wind Farm Connected to Series Compensated Line”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, July 2014, pp. 947-957.
- [9] K. Clark, K. “Overview of Subsynchronous Resonance Related phenomena”, 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0297.
- [10] L. Rouco, F.L. Pagola, G.C. Verghese, I.J. Pérez-Arriaga, “Selective modal analysis” in Power system coherency and model reduction, J. H. Chow editor, Springer, Berlin, 2013.

- [11] F. Lingling, Z. Chanxia, M. Zhixin, H. Minqiang, "Modal Analysis of a DFIG-Based Wind Farm Interfaced With a Series Compensated Network", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 4, 2011, pp. 1010 – 1020.
- [12] T. Rajaram, J. M. Reddy and Y. Xu, "Kalman Filter Based Detection and Mitigation of Subsynchronous Resonance with SSSC," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 2, pp. 1400-1409, March 2017.
- [13] E. Leon, J. A. Solsona, "Sub-Synchronous Interaction Damping Control for DFIG Wind Turbines", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 1, January 2015, pp. 419-428.
- [14] M. Bongiorno, J. Svensson and L. Angquist, "Single-Phase VSC Based SSSC for Subsynchronous Resonance Damping," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 3, pp. 1544-1552, July 2008.
- [15] B. Badrzadeh, M. Sahni, D. Muthumuni, Y. Zhou and A. Gole, "Sub-synchronous interaction in wind power plants — part I: Study tools and techniques," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-9.
- [16] R. Nath, C. Grande-Moran, "Study of Sub-Synchronous Control Interaction due to the interconnection of wind farms to a series compensated transmission system", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0478.
- [17] Y. Cheng, M. Sahni, D. Muthumuni and B. Badrzadeh, "Reactance Scan Crossover-Based Approach for Investigating SSCI Concerns for DFIG-Based Wind Turbines," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 742-751, April 2013.
- [18] J. Adams, C. Carter, C.; H. Shun-Hsien, "ERCOT Experience with Sub-synchronous Control Interaction and proposed remediation" 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0609.
- [19] G.D. Irwin, A. Isaacs, D. Woodford, D. "Simulation requirements for analysis and mitigation of SSCI phenomena in wind farms", 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0600.
- [20] M. Sahni et al., "Sub-synchronous interaction in Wind Power Plants- part II: An ERCOT case study," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-9.
- [21] Z. Miao, "Impedance-Model-Based SSR Analysis for Type 3 Wind Generator and Series-Compensated Network," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, no. 4, pp. 984-991, Dec. 2012.

- [22] J. Daniel, W. Wong, G. Ingestrom, J. Sjoberg, “Subsynchronous phenomena and wind turbine generators”, 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando, Florida, May 7-10, 2012, Paper No. 2012TD0510.
- [23] F. Lingling, R. Kavasseri, M. L. Zhixin Lee, Z. Chanxia, “Modeling of DFIG-Based Wind Farms for SSR Analysis”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.: 25, No. 4, December 2010, pp. 2073-2082
- [24] Sanz Soriano, “Estabilizador de oscilaciones subsíncronas para aerogeneradores basados en generadores de inducción doblemente alimentados”, E.T.S. de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Septiembre 2017.
- [25] <https://simondlevy.academic.wlu.edu/kalman-tutorial/>
- [26] Juan Luis Zamora. Apuntes de Control Digital.