



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

INTERACCIONES ADVERSAS EN PARQUES EÓLICOS

Autor: Paloma López Díaz
Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid
Agosto de 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

INTERACCIONES ADVERSAS EN PARQUES EÓLICOS

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/21 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.

Fdo.: Paloma López Díaz

Fecha: 30/ 08/ 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Luis Rouco Rodríguez

Fecha: 31/08/2021

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 Dña. Paloma López Díaz DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Interacciones adversas en parques eólicos”, 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) Reproducir la 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 30. de agosto de 2021

ACEPTA



Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

INTERACCIONES ADVERSAS EN PARQUES EÓLICOS

Autor: Paloma López Díaz
Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid
Agosto de 2021

INTERACCIONES ADVERSAS EN PARQUES EÓLICOS

Autora: López Díaz, Paloma.

Director: Rouco Rodríguez, Luis.

Entidad colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Abstracto – Los requisitos de acceso a la red para la generación eólica están ligados con la potencia de cortocircuito. Este proyecto examina las posibles oscilaciones entre generadores conectados a redes de distinta potencia de cortocircuito. Para ello, se considera un modelo simplificado de la red con dos aerogeneradores basados máquina síncrona multipolar (MSG) y máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG). Se plantean tres escenarios: MSG-MSG, MSG-DFIG y DFIG-DFIG. Los resultados obtenidos en Matlab estudian la estabilidad del sistema a través de tres métodos: análisis modal del modelo linealizado, simulaciones en el dominio del tiempo y análisis del lugar de las raíces.

Palabras clave – aerogeneradores, máquina síncrona multipolar (MSG), máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG), potencia de cortocircuito, lugar de las raíces, impedancia de red.

1. Introducción

En el sistema eléctrico español, la *conexión a la red de generación asíncrona* a la red de transporte está limitada por la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión. Por generación asíncrona debe entenderse la generación conectada a través de convertidores electrónicos de potencia. El Real Decreto 413/2014, de 6 de junio [5], establece que la “Para la generación no gestionable, la capacidad de generación de una instalación o conjunto de instalaciones que compartan punto

de conexión a la red no excederá de $1/20$ de la potencia de cortocircuito de la red en dicho punto”.

La ventaja de los criterios basados en la relación de cortocircuito es su *sencillez* y *transparencia*. Sin embargo, son criterios *conservadores*.

Diversos agentes han planteado que la aplicación de estos criterios pueda complementarse con la realización *estudios específicos*.

Los citados estudios pueden clasificarse en:

- Estudios de sistema. Utilizan modelos (estático y dinámico) del sistema eléctrico peninsular español. Representan de forma agregada la generación asíncrona en los nudos de conexión a la red modelada. Dichos estudios incluyen: cálculos de potencia de cortocircuito, análisis de flujo de cargas en condiciones normales y en caso de contingencias y análisis de estabilidad en caso de faltas en la red.
- Estudios de aprovechamiento, donde los aerogeneradores de un parque se representan de forma agregada. La red de transporte se representa por su equivalente Thevenin en términos de la potencia de cortocircuito. Los estudios de aprovechamiento comprenden: estudios de control de tensión y gestión de potencia reactiva, estudios de respuesta dinámica ante faltas en el

punto de conexión y estudios de estabilidad de controles.

Los *estudios de estabilidad de controles* estudian la estabilidad de los controles de los convertidores electrónicos de potencia de los aerogeneradores. El lazo de control que con más frecuencia se hace inestable es el lazo de la PLL (Phase Lock Loop) [10]. Para acometer el estudio de estabilidad de los controles es preciso desarrollar modelos apropiados de los aerogeneradores. Si se desea estudiar la factibilidad de conectar capacidad adicional de generación es preciso disponer de un modelo que incluya modelos de dos aerogeneradores.

Actualmente en la industria hay múltiples opciones para *modelar los sistemas eléctricos*. Las técnicas empleadas dependen de los fenómenos que se están estudiando, adaptando la escala temporal para que los modelos reflejen las dinámicas dominantes del estudio el resto de comportamientos se simplifiquen [3]-[4]. Comúnmente se emplean los modelos electromagnéticos (Electromagnetic Transient, EMT). Durante las simulaciones, para cada instante de tiempo se representan todas las variables del modelo a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales. Los simuladores más usados son: ATP/EMPT, EMPT-RV y PSCAD.

2. Definición del proyecto

Inicialmente, el proyecto buscaba analizar las interacciones que existen entre aerogeneradores en redes de baja potencia de cortocircuito, en línea con los estudios de aprovechamiento. Se pretendía demostrar que la conexión de los aerogeneradores a la red es segura para todos los usuarios, incluso cuando no se cumplen los criterios conservadores que los agentes regulatorios establecen.

Durante el desarrollo del proyecto, se ha comprobado que los modelos obtenidos son inestables en redes de baja potencia de cortocircuito. Consecuentemente, se ha decidido continuar el proyecto con un enfoque

más amplio, en el que los tres escenarios sean estables.

Finalmente, el estudio se basa en redes de alta potencia de cortocircuito. El objetivo último ha sido evaluar la estabilidad de los sistemas eléctricos con aerogeneradores conectados a redes fuertes. Estos sistemas, de acuerdo a la normativa, no deben presentar ningún problema de estabilidad. Para valorar los resultados se emplean las siguientes técnicas: respuesta lineal en el dominio del tiempo y análisis modal de la matriz de estados. Las conclusiones finales se han elaborado a partir de un análisis de sensibilidad basado en el análisis modal, donde se modifica la impedancia de la red.

Se parte de modelos individuales de las máquinas disponibles en Matlab. La construcción del sistema completo consiste en integrar los modelos de las dos máquinas con los de la red.

3. Descripción del modelo

Para estudiar las posibles interacciones en el sistema eléctrico, se plantea un modelo de la red simplificado con dos máquinas conectadas a una red de potencia infinita. Cada máquina representa un parque eólico, es decir, los generadores se modelan de forma agregada. La Figura 1 muestra el circuito empleado.

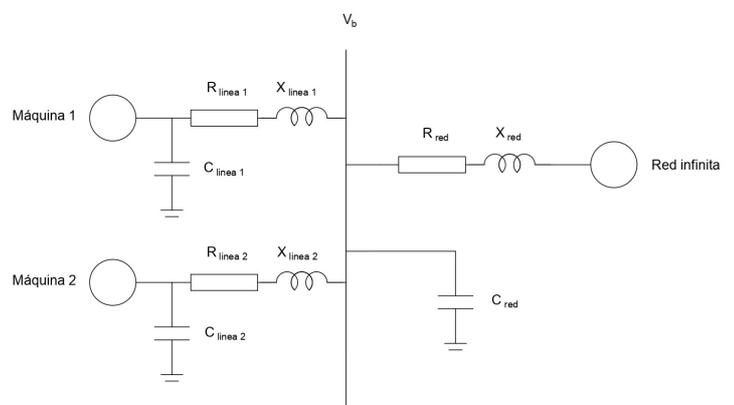


Figura 1: Circuito equivalente para el estudio de las interacciones en parques eólicos.

El modelo incluye dos generadores eólicos conectados al mismo punto de conexión, V_b . Cada máquina está conectada al punto de conexión por medio de una línea, parametrizada por una impedancia (R, X) , que incluye el transformador elevador, y por un filtro de armónicos (C) . Los aerogeneradores se conectan a la red a través de una línea $(R_{red}, X_{red}, C_{red})$. La red se modela como una red infinita, con una tensión fija V_g .

4. Resultados

- Respuesta temporal

En cada escenario, se ha dado un escalón del 10% a la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1.

En todos los casos, las oscilaciones originadas se han extinguido en menos de 1 segundo y se ha llegado de nuevo a un régimen permanente. Los escenarios definidos son estables.

- Autovalores de la matriz de estados

En los tres escenarios seleccionados todos los autovalores del sistema han tenido parte real negativa. Por tanto, el sistema es estable en los tres escenarios.

No obstante, en cada sistema aparecen pares de autovalores de altas frecuencias con un amortiguamiento bajo (inferior al 1%). Analizando las participaciones de éstos, es posible identificarlos con las variables de estado de la red.

- Lugar de las raíces

Para cada escenario se han calculado las gráficas del lugar de las raíces, de acuerdo a la variación de la impedancia de red (0 a 1.5 veces).

A continuación, se presentan los resultados de este análisis:

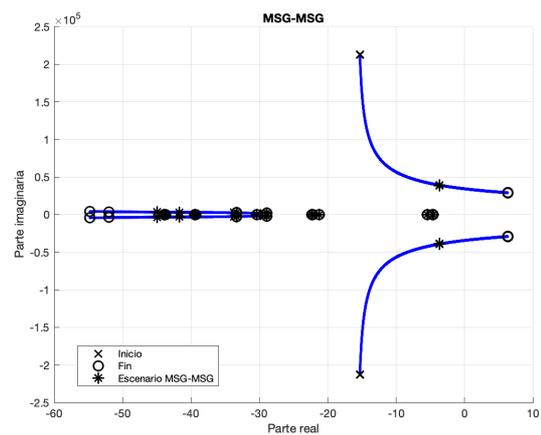


Figura 2: Lugar de las raíces, variando la impedancia de red entre 0 y 1.5 veces el valor del escenario MSG-MSG.

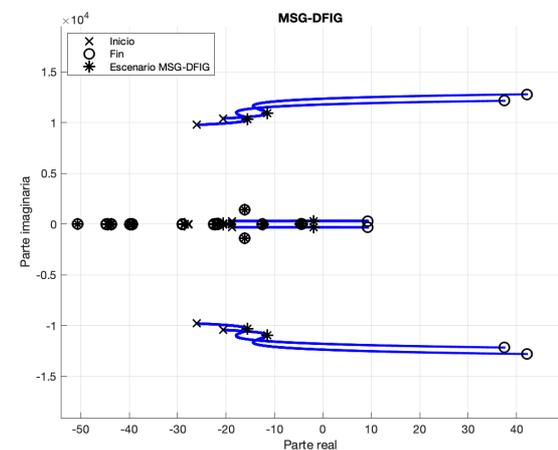


Figura 3: Lugar de las raíces, variando la impedancia de red entre 0 y 1.65 veces el valor del escenario MSG-DFIG.

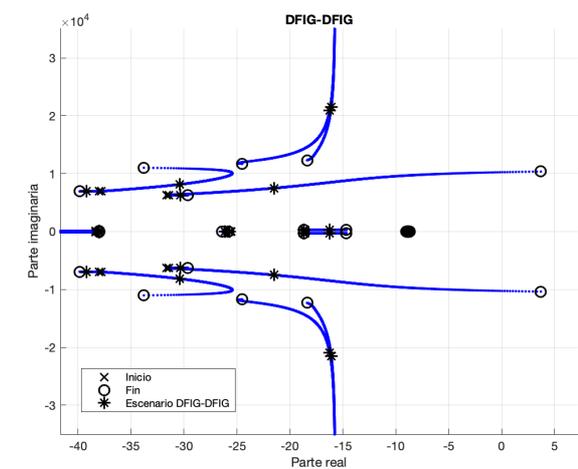


Figura 4: Lugar de las raíces, variando la impedancia de red entre 0 y 1.5 veces el valor del escenario DFIG-DFIG.

5. Conclusiones

Los escenarios elegidos (MSG-MSG, MSG-DFIG y DFIG-DFIG) son estables en redes de alta potencia de cortocircuito. Se verifica a través de las simulaciones lineales en el dominio del tiempo y con el análisis modal de la matriz de estados.

El estudio del lugar de las raíces ofrece un resultado inesperado: aparecen dinámicas de rápidas frecuencias que son inestables. Este suceso sorprende porque en las redes con alta potencia de cortocircuito no hay constancia de que existan oscilaciones inestables. Además, las normas del acceso a la red solo establecen límites para la conexión de aerogeneradores en redes de baja potencia de cortocircuito.

Se llega a la conclusión de que estos modelos simplificados tienen limitaciones porque no describen la realidad. Por tanto, no sirven para tomar decisiones sobre el funcionamiento de los mismos.

La hipótesis más probable es que la simplificación establecida no es válida. No es correcto representar todos los generadores de un parque de forma agregada.

6. Referencias

- [1] Real Decreto 413/2014, de 6 de junio por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos (B.O.E. núm. 140, de 10 de junio de 2014, páginas 43876 a 43978.
- [2] R. Ávila-Martínez, L. Rouco, J. García-Aguilar, J. Renedo, L. Sigríst, “Impact of PLL Control on Small-Signal Stability of Wind DFIGs”, IEEE PES General Meeting, 2020.
- [3] Petar V. Kokotovic, Hassan K. Khalil (Editors), “Singular Perturbations in Systems and Control”, IEEE Press.
- [4] J. H. Chow (Editor) “Time-Scale Modeling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems”, Springer, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 46.

NEGATIVE INTERACTIONS IN WIND FARMS

Author: López Díaz, Paloma.

Director: Rouco Rodríguez, Luis.

Collaborative entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

Abstract – Wind power plants have to fulfill some requirements to get access to the grid. They are related to short-circuit ratio. This project assesses the likelihood of oscillations between wind power plants to occur when considering both weak and strong grids. According to this, a simplified model of the grid has been built: two wind power generators are connected to an infinite power grid. Generators are based on multi-synchronous generator (MSG) and doubly-fed inductor generator (DFIG). Three different scenarios are simulated: MSG-MSG, MSG-DFIG and DFIG-DFIG. System stability is evaluated according to: modal analysis from the lineal model, time-domain simulations and root locus analysis.

Key words – wind farms, multi-polar synchronous generator (MSG), doubly-fed inductor generator (DFIG), short-circuit ratio, root locus plot, grid impedance.

1. Introduction

In the Spanish electrical power system, *access to the grid for asynchronous generation* depends on the short-circuit ratio at the connection point. Asynchronous generation refers to that power connected through power electronic converters. Royal Decree Law 413/2014 on June 6th [5] sets that “For non-manageable generation, installed generation capacity of an installation will not be higher than 1/20 of the grid short-circuit power”.

The main advantage of this requirement is the *simplicity* and transparency. However, this approach is *conservative*.

Some agents have suggested that this guideline may be completed by adding *specific studies* that would prove the system stability.

Those studies can be classified in:

- System studies. Static and dynamic models of the Spanish power system are used. They represent asynchronous generators together at the connection points in the power system model. Those studies include: short-circuit power calculation, standard and contingency operation power flows analysis and stability studies of the grid in case of a fault.
- Exploitation studies. Wind power generators of a wind farm are represented together. Transmission grid is modelled by the Thevenin equivalent in terms of short-circuit power. Those studies contain: voltage control analysis and reactive power management, dynamic response of the system in case of faults and stability analysis of control systems.

Stability analysis of control systems study the stability control of the power electronic converters in wind generators. The most common unstable loop is PLL (Phase Lock

Loop) [2]. In order to accomplish this study, it is necessary to build specific models of wind generators. If the matter of study is the installation of additional generation issue, the system model must include a model for each wind generator.

Nowadays, there are many *options to model power systems*. Techniques differ depending on the phenomena studied. The time scale has to be chosen so that the dominant dynamics are included in the model response, and the other behaviors are simplified [3]-[4]. It is common to use electromagnetic transient software (EMT). Other simulators are: ATP/EMPT, EMPT-RV and PSCAD.

2. Project definition

The project aimed in the first place to analyze interactions between wind generators connected to weak grids, as part of the exploitation studies. The goal was to prove that access to the grid of non-suitable wind generators is safe for the power system and users, even when the requirements are not satisfied.

During the project, the model has shown that there are instabilities when the generators are connected to a weak grid. Consequently, it has been decided to go on and find 3 stable scenarios.

Ultimately, this project has studied interactions in strong grids. These systems, according to the rules, are not supposed to have any instability issue. In order to evaluate the results, different techniques have been used: linear simulations in the time domain and modal analysis of the state-space matrix. Final conclusions are based on a sensitivity analysis, varying the grid impedance.

The complete model starts from individual models of the generators available on Matlab. It is built by putting these models together and the grid.

3. Model description

To study the interactions in the power system, a simplified model has been used. It is made from two generators connected to an infinite power grid. Each generator represents a wind farm, meaning that all wind generators are represented as a single one. Figure 1 shows the circuit.

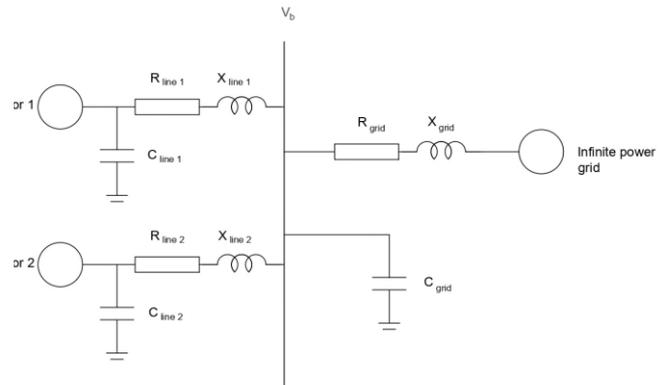


Figure 1: Equivalent circuit for the study of interaction between wind generators connected to weak grids

This model includes two wind generators connected to a common point, V_b . Each generator is connected to that node through a line that includes an elevator transformer. This line has the following parameters: R , X and C . Then, generators are connected to the network through a line (R_{grid} , X_{grid} , C_{grid}). The network is modelled as an infinite grid, with a fixed voltage V_g .

4. Results

- Time domain simulations

In each scenario, a step of 10% in the reactive current reference of the grid converter has been simulated.

Results have been successful in each scenario: in a time period lower than 1 second, oscillations have disappeared and all the variables get to a new equilibrium. Systems are stable.

- Space-state eigenvalues

Eigenvalues of the space-state matrix show that the 3 scenarios are stable.

Nevertheless, in each scenario there are some pairs of eigenvalues of high frequencies with a low damping ratio (lower than 1%). By analyzing participation factors, they are identified with grid dynamics.

- Root locus plots

For each scenario, it has been plotted root locus as a function of the grid impedance (from 0 to 1.5 times).

The results are presented hereunder:

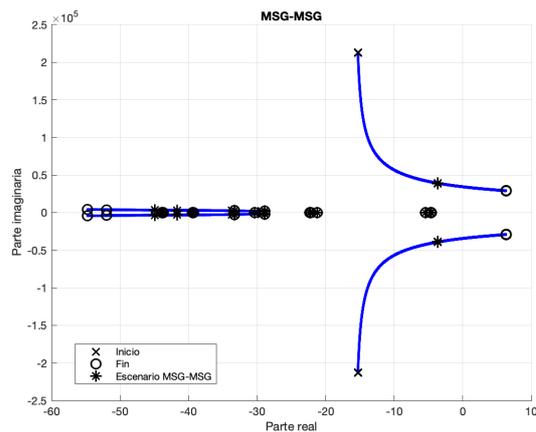


Figure 2: Root locus plot, varying grid impedance between 0 and 1.5 times the value of MSG-MSG scenario.

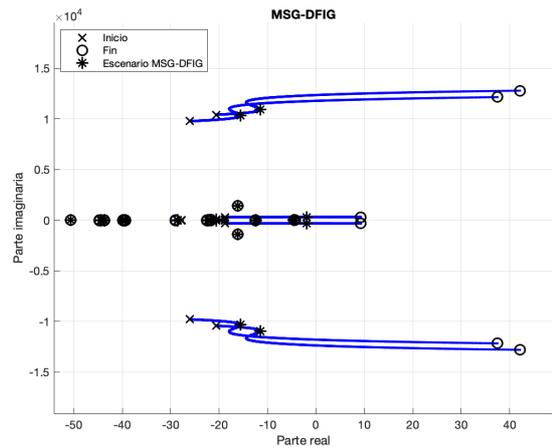


Figure 3: Root locus plot, varying grid impedance between 0 and 1.65 times the value of MSG-DFIG scenario.

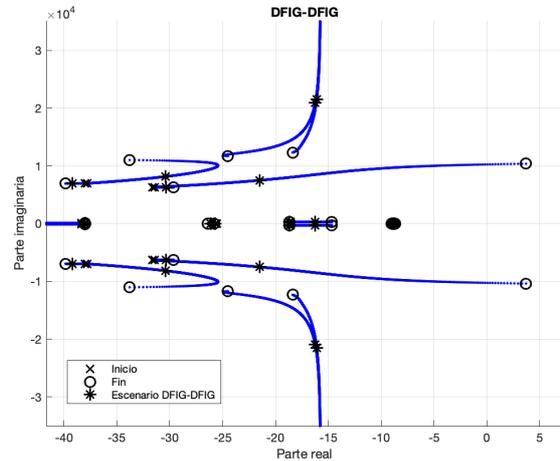


Figure 4: Root locus plot, varying grid impedance between 0 and 1.5 times the value of DFIG-DFIG scenario.

5. Conclusions

The selected scenarios (MSG-MSG, MSG-DFIG, DFIG-DFIG) are stable when the generators are connected to strong grids. This is proved by time domain simulations and modal analysis.

Root locus analysis shows an unexpected result: some rapid dynamics turn out to be unstable. This fact is shocking because no evidence of instability in strong grids is found. Furthermore, rules regarding access to the grid only set limits for wind generators in weak grids.

The conclusion is that these models have limitations since they do not represent reality. Thus, they are not useful to make any decision based on them.

The most likely hypothesis is that the simplification is not correct. Namely, generators cannot be represented as a single one in the models.

6. References

- [1] Real Decreto 413/2914, (B.O.E. number.140, June 10th 2014, pages from 43876 to 43978).
- [2] R. Ávila-Martínez, L. Rouco, J. García-Aguilar, J. Renedo, L. Sigrist, “Impact of PLL Control on Small-Signal Stability of Wind DFIGs”, IEEE PES General Meeting, 2020.
- [3] Petar V. Kokotovic, Hassan K. Khalil (Editors), “Singular Perturbations in Systems and Control”, IEEE Press.
- [4] J. H. Chow (Editor) “Time-Scale Modeling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems”, Springer, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 46.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación del proyecto	1
1.2	Estado de la cuestión.....	3
1.3	Objetivos del proyecto	3
1.4	Organización del documento	4
2.	DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS	7
2.1	Máquina síncrona multipolar (MSG)	7
2.2	Máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG)	8
2.3	Red	9
3.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DESARROLLADO	11
3.1	Representación del modelo	11
3.2.1	Modelo no lineal	12
3.2.2	Modelo lineal	13
3.2	Implementación.....	13
3.2.3	Modelos no lineales	14
3.2.4	Modelos lineales	15
3.3	Métodos de análisis	17
3.3.1	Simulaciones en el dominio del tiempo	17
3.3.2	Autovalores y participaciones.....	17
3.3.3	Lugar de las raíces	18
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	19
4.1	MSG-MSG.....	19
4.1.1	Parámetros del sistema.....	19
4.1.2	Condiciones iniciales	21
4.1.3	Simulación en el dominio del tiempo	22
4.1.4	Autovalores de la matriz de estados.....	25
4.1.5	Lugar de las raíces	29
4.2	MSG-DFIG.....	32
4.2.1	Parámetros del sistema.....	32
4.2.2	Condiciones iniciales	35
4.2.3	Simulación en el dominio del tiempo	36
4.2.4	Autovalores de la matriz de estados.....	39
4.2.5	Lugar de las raíces	44
4.3	DFIG-DFIG	48
4.3.1	Parámetros del sistema.....	48
4.3.2	Condiciones iniciales	49
4.3.1	Simulación en el dominio del tiempo	50
4.3.2	Autovalores de la matriz de estados.....	53
4.3.3	Lugar de las raíces	57
4.4	Conclusiones parciales.....	60
4.4.1	Respuesta lineal en el dominio del tiempo.....	60
4.4.2	Autovalores y participaciones.....	60
4.4.3	Lugar de las raíces	61

5.	CONCLUSIONES	63
5.1	Conclusiones sobre la metodología.....	63
5.2	Conclusiones sobre los resultados.....	63
5.3	Recomendaciones para futuros estudios.....	64
6.	BIBLIOGRAFÍA	65
7.	Anexo A: Modelos matemáticos en espacio de estado.....	67
7.1	Modelos en espacio de estado.....	67
7.1.1	Autovalores y autovectores.....	67
7.1.2	Factores de participación	68
7.1.3	Residuos.....	69
8.	Anexo B: Modelo de la máquina síncrona multipolar (MSG).....	71
8.1	Modelo no lineal.....	71
8.1.1	Modelo electromagnético.....	71
8.1.2	Modelo electromecánico	72
8.1.3	Control de las corrientes del convertidor de máquina	73
8.1.4	Control de velocidad del rotor	75
8.1.5	Modelo del convertidor de red.....	75
8.1.6	Control de las corrientes del convertidor de red	76
8.1.7	Modelo del condensador de acoplamiento de los convertidores de red y de máquina... 78	
8.1.8	Control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de red y de máquina	78
8.1.9	Modelo del filtro	79
8.1.10	Ecuaciones de la PLL	80
8.1.11	Resumen	80
8.2	Modelo lineal	81
8.2.1	Ecuaciones diferenciales	81
8.2.2	Ecuaciones algebraicas	82
9.	Anexo C. Modelo de la máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG).	83
9.1	Modelo no lineal.....	83
9.1.1	Modelo electromagnético.....	83
9.1.2	Modelo electromecánico.....	84
9.1.3	Control de las corrientes del convertidor del rotor.....	85
9.1.4	Control de velocidad del rotor	88
9.1.5	Modelo de convertidor del estator	88
9.1.6	Las ecuaciones vectoriales que rigen el funcionamiento del convertidor de estator son: 88	
9.1.7	Control de las corrientes del convertidor de estator	89
9.1.8	Modelo del condensador de acoplamiento de los convertidores de estator y de rotor ...91	
9.1.9	Control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de estator y de rotor	91
9.1.10	Modelo del filtro	92
9.1.11	Ecuaciones de la PLL	93
9.1.12	Resumen	93
9.2	Modelo lineal	94
9.2.1	Ecuaciones diferenciales.....	94
9.2.2	Ecuaciones algebraicas	94
10.	Anexo D: Modelo de la red	97
10.1	Modelo no lineal.....	97

10.1.1	Modelo de la línea de conexión con la red de potencia infinita	97
10.1.2	Resumen	98
10.2	Modelo lineal	98
10.2.1	Ecuaciones diferenciales	98
10.2.2	Ecuaciones algebraicas	98
11.	Anexo E: Phase Locked Loop (PLL) y cambios de referencia	99
11.1	Modelo no lineal	99
11.1.1	Ecuaciones de la PLL	99
11.1.2	Transformación del sistema de referencia (RI-dq).....	99
11.2	Modelo lineal	101
11.2.1	Ecuaciones de la PLL	101
12.	Anexo F: Objetivos del desarrollo sostenible	103
12.1	Implicación del proyecto en el cumplimiento de los ODS.	103

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema unifilar de la máquina síncrona multipolar [12].	7
Figura 2.2: Esquema unifilar de la máquina asíncrona doblemente alimentada [13].	8
Figura 3.1: Circuito equivalente para el estudio de las interacciones en parques eólicos.	12
Figura 3.2: Circuito equivalente con los tres subsistemas indicados.	14
Figura 3.3: Circuito equivalente con las corrientes indicadas.	14
Figura 3.4: Respuestas temporales asociadas a los autovalores de la matriz de estados A [13].	18
Figura 4.1: Respuesta temporal de la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de la misma (iaqref), en el modelo MSG-MSG.	22
Figura 4.2: Respuesta temporal de la tensión de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG). Escenario MSG-MSG.	23
Figura 4.3: Respuesta temporal del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red.	24
Figura 4.4: Respuesta temporal de la tensión del nudo de conexión ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG). Escenario MSG-MSG.	25
Figura 4.5: Lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia con respecto al escenario MSG-MSG.	30
Figura 4.6: Detalle de los autovalores inestables del lugar de las raíces para el sistema MSG-MSG.	30
Figura 4.7: Respuesta temporal de la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de la misma (iaqref). Escenario MSG-DFIG.	37
Figura 4.8: Respuesta temporal de la tensión de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG). Escenario MSG-DFIG.	38
Figura 4.9: Respuesta temporal del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red.	38
Figura 4.10: Respuesta temporal de la tensión del nudo de conexión ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG), en el modelo MSG-DFIG.	39
Figura 4.11: Lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.65 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.	44
Figura 4.12: Detalle del lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.65 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.	45
Figura 4.13: Respuesta temporal de la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (DFIG) ante un escalón en la consigna de la misma (iaqref). Escenario DFIG-DFIG.	51
Figura 4.14: Respuesta temporal de la tensión de la máquina 1 (DFIG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (DFIG). Escenario DFIG-DFIG.	51
Figura 4.15: Respuesta temporal del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina 1 (DFIG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red.	52
Figura 4.16: Respuesta temporal de la tensión del nudo de conexión ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (DFIG). Escenario DFIG-DFIG.	53
Figura 4.17: Lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.	57
Figura 4.18: Detalle del lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.	58
Figura 8.1: Esquema unifilar de la máquina síncrona multipolar [12].	71
Figura 8.2: Lazos de control de las componentes de la corriente del estator [12].	74
Figura 8.3: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor del estator [12].	75
Figura 8.4: Lazo de control de velocidad [12].	75
Figura 8.5: Lazos de control de las componentes de la corriente del convertidor de red [12].	77
Figura 8.6: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor de red [12].	78
Figura 8.7: Lazo de control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de red y de máquina [12].	79
Figura 9.1: Esquema unifilar de la máquina asíncrona doblemente alimentada [13].	83
Figura 9.2: Lazos de control de las componentes de la corriente del rotor [13].	87
Figura 9.3: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor del rotor [13].	87
Figura 9.4: Lazo de control de velocidad [13].	88

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Figura 9.5: Lazos de control de las componentes de la corriente del convertidor del estator [13].	90
Figura 9.6: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor del estator [13].	91
Figura 9.7: Lazo de control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de estator y de rotor [13].	92
Figura 10.1: Esquema unifilar del sistema de estudio	97
Figura 11.1: Diagrama de bloques de la PLL [12].	99
Figura 11.2: Relación entre los sistemas de referencia.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Datos del punto de operación para los tres escenarios	19
Tabla 4.2: Parámetros de la red	19
Tabla 4.3: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 1.	20
Tabla 4.4: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 1.	20
Tabla 4.5: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 1.	20
Tabla 4.6: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 1.	20
Tabla 4.7: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 1.	20
Tabla 4.8: Condiciones iniciales del subsistema red en el escenario MSG-MSG.	21
Tabla 4.9: Condiciones iniciales del subsistema máquina 1 en el escenario MSG-MSG.	21
Tabla 4.10: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG-MSG.	25
Tabla 4.11: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG-MSG.	25
Tabla 4.12: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-MSG.	26
Tabla 4.13: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-MSG (continuación)	27
Tabla 4.14: Módulo de las participaciones de los autovalores reales del sistema MSG-MSG.	28
Tabla 4.15: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario MSG-MSG.	31
Tabla 4.16: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario MSG-MSG.	31
Tabla 4.17: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos inestables del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario MSG-MSG.	31
Tabla 4.18: Parámetros de la red	32
Tabla 4.19: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 1.	33
Tabla 4.20: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 1.	33
Tabla 4.21: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 1.	33
Tabla 4.22: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 1.	33
Tabla 4.23: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 1.	33
Tabla 4.24: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 2.	34
Tabla 4.25: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 2.	34
Tabla 4.26: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 2.	34
Tabla 4.27: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 2.	34
Tabla 4.28: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 2.	34
Tabla 4.29: Condiciones iniciales del subsistema red en el escenario MSG-DFIG.	35
Tabla 4.30: Condiciones iniciales del subsistema máquina 1 en el escenario MSG-DFIG.	35
Tabla 4.31: Condiciones iniciales del subsistema máquina 2 en el escenario MSG-DFIG.	35
Tabla 4.32: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG-DFIG.	39
Tabla 4.33: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG1-MSG2.	40
Tabla 4.34: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-DFIG.	40
Tabla 4.35: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-DFIG (continuación).	41
Tabla 4.36: Módulo de las participaciones de los autovalores reales del sistema MSG-DFIG.	43
Tabla 4.37: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.65 veces la del escenario MSG-DFIG.	45
Tabla 4.38: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.65 veces la del escenario MSG-DFIG.	46
Tabla 4.39: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos inestables del sistema cuando la impedancia de red es 1.65 veces la del escenario MSG-DFIG.	46
Tabla 4.40: Parámetros de la red	48
Tabla 4.41: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 1.	48
Tabla 4.42: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 1.	48
Tabla 4.43: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 1.	48
Tabla 4.44: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 1.	48
Tabla 4.45: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 1.	49

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tabla 4.46: Condiciones iniciales del subsistema red en el escenario DFIG-DFIG.	49
Tabla 4.47: Condiciones iniciales del subsistema máquina 1 en el escenario DFIG-DFIG.	49
Tabla 4.48: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema en el escenario DFIG-DFIG.	53
Tabla 4.49: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema DFIG-DFIG.	54
Tabla 4.50: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema DFIG-DFIG (continuación).	55
Tabla 4.51: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario DFIG-DFIG.	58
Tabla 4.52: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos inestables del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario DFIG-DFIG.	59
Tabla 4.53: Relaciones de cortocircuito de los escenarios elegidos	60
Tabla 4.54: Resultados de los valores límite de la impedancia de red para cada escenario.	61

1. INTRODUCCIÓN

La generación eólica es una parte indiscutible de la transición energética, ya que se trata de una energía renovable y no contaminante.

La conexión de nuevos aerogeneradores en la red es un asunto históricamente polémico. Los criterios para el acceso a la red son simples, pero son altamente restrictivos. Además, varios agentes del sistema eléctrico están involucrados en este asunto: empresas de transporte, empresas distribuidoras y dueños de parques eólicos.

1.1 Motivación del proyecto

En el sistema eléctrico español, la conexión a la red de generación asíncrona a la red de transporte está limitada por la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión. Por generación asíncrona debe entenderse la generación conectada a través de convertidores electrónicos de potencia, por tanto, lo son la generación eólica y solar fotovoltaica. En efecto, el Real Decreto 413/2014, de 6 de junio [5], establece que la “Para la generación no gestionable, la capacidad de generación de una instalación o conjunto de instalaciones que compartan punto de conexión a la red no excederá de 1/20 de la potencia de cortocircuito de la red en dicho punto”. La relación entre la potencia de cortocircuito en el punto de conexión y la potencia nominal de la generación se conoce como relación de cortocircuito (Short Circuit Ratio, SCR, en la literatura técnica en inglés [6]). Esta limitación sobre potencia de cortocircuito no aplica a la generación síncrona.

El citado Real Decreto heredaba el criterio establecido en la Orden de 5 de septiembre de 1985 [7] que según el cual “en los generadores eólicos, para evitar las fluctuaciones de tensión debidas a las variaciones rápidas de la velocidad del viento, la potencia de estos generadores no será superior a 1/20 la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión”.

La propuesta de circular de la CNMC [17] por la que se establece la metodología y condiciones de acceso y de la conexión a las redes de transporte y distribución de las instalaciones de producción de energía eléctrica, propone la utilización de la relación de cortocircuito ponderada (Weighted Short Circuit Ratio, WSCR, en la literatura técnica en inglés [9]) de los nudos del área de influencia del nudo de interés. potencia de cortocircuito en el punto de conexión para determinar la máxima generación no síncrona conectable a la red de transporte cambiando el ámbito de aplicación. En lugar de aplicarse a la generación *no gestionable* pasa a aplicarse a la generación *asíncrona*.

La ventaja de los criterios basados en la relación de cortocircuito es su sencillez y transparencia. Sin embargo, son criterios conservadores. Diversos agentes han planteado que la aplicación de estos criterios pueda complementarse con la realización estudios específicos. Para identificar los estudios a realizar es preciso tener presente la naturaleza de los fenómenos que aparecen en la conexión de generación asíncrona a las redes eléctricas

- Fenómenos globales. Por fenómenos globales entendemos las variaciones de tensión en régimen permanente y transitorio que ocurren a lo largo y ancho del sistema eléctrico en caso de perturbaciones.
- Fenómenos locales. Por fenómenos locales entendemos los fenómenos interacciones adversas o de inestabilidad que podrían producirse en los parques conectados a un nudo tras la incorporación de un parque al mismo nudo.

Para abordar los citados fenómenos, los citados estudios pueden clasificarse en

- Estudios de sistema y
- Estudios de aprovechamiento.

Los estudios de sistema utilizarían modelos (estático y dinámico) del sistema eléctrico peninsular español. Representarían de forma agregada la generación asíncrona en los nudos de conexión a la red modelada.

Se entiende por aprovechamiento un conjunto de parques eólicos conectados a través de una infraestructura común a un nudo de la red de transporte. Los aerogeneradores de un parque se representan de forma agregada. La red de transporte se representa por su equivalente Thévenin en términos de la potencia de cortocircuito.

Los estudios de sistema incluirían

- cálculos de potencia de cortocircuito,
- análisis de flujo de cargas en condiciones normales y en caso de contingencias y
- análisis de estabilidad en caso de faltas en la red.

Los análisis de flujo de cargas comprobarían si las tensiones de nudos y cargas de líneas y transformadores se encuentran en los márgenes admisibles y los análisis de estabilidad comprobarían si el sistema es estable (si los generadores síncronos permanecen en sincronismo y si las tensiones se recuperan a sus valores de prefalta). Ello significaría que la eventual desconexión de generación asíncrona no afecta a la estabilidad del sistema.

Los estudios de aprovechamiento comprenderían

- estudios de control de tensión y gestión de potencia reactiva,
- estudios de respuesta dinámica ante faltas en el punto de conexión y
- estudios de estabilidad de controles

El objetivo de los estudios de control de tensión y gestión de potencia reactiva es comprobar la capacidad de los parques cumplir con los requisitos de potencia reactiva en el punto de conexión a la red de transporte manteniéndose las tensiones dentro de los márgenes admisibles. El propósito de los estudios de respuesta dinámica ante faltas en el punto de conexión es comprobar la capacidad de cumplir con los requisitos de potencia reactiva en el punto de conexión a la red de transporte manteniéndose las tensiones dentro de los márgenes admisibles.

Los estudios de estabilidad de controles estudian la estabilidad de los controles de los convertidores electrónicos de potencia de los aerogeneradores. El lazo de control que con más frecuencia se hace inestable es el lazo de la PLL (Phase Lock Loop) [10].

El estudio de estabilidad de los controles de los aerogeneradores requiere modelos detallados de sus sistemas de control. Si bien es cierto que la implantación de los esquemas de control puede diferir de unos a otros fabricantes, los principios de control son comunes.

El estudio de la estabilidad de los controles se puede abordar por dos métodos: análisis del modelo en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, realizando un análisis modal [16].

Para acometer el estudio de estabilidad de los controles es preciso desarrollar modelos apropiados de los aerogeneradores. Si se desea estudiar la factibilidad de conectar capacidad adicional de generación es preciso disponer de un modelo que incluya modelos de dos aerogeneradores.

1.2 Estado de la cuestión

Para el estudio de las interacciones entre los controles de los aerogeneradores, se utilizan modelos detallados de las máquinas y de los controles. A partir de éstos, se realizarán simulaciones en el dominio del tiempo y análisis en el dominio de la frecuencia.

Actualmente en la industria hay múltiples opciones para modelar los sistemas eléctricos. Las técnicas empleadas dependen de los fenómenos que se están estudiando, es decir, se trata de adaptar la escala temporal para que los modelos reflejen las dinámicas dominantes del estudio y el resto de comportamientos se simplifiquen [12]-[13]. De este modo, es posible analizar interacciones entre sistemas de la red, por ejemplo, los convertidores electrónicos o los controles de los generadores [14].

Una primera opción son los *modelos electromagnéticos* (Electromagnetic Transient, EMT). Durante las simulaciones, para cada instante de tiempo se representan todas las variables del modelo a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales. Los simuladores más usados son: ATP/EMPT, EMPT-RV y PSCAD.

Para el estudio de la estabilidad en sistemas que contienen generadores síncronos, se suele emplear *modelos electromecánicos*. En este caso, los modelos incluyen ecuaciones diferenciales para representar en detalle los generadores y sus controles. También hay ecuaciones algebraicas que modelan la red. Las interacciones en este tipo de sistemas se han estudiado en profundidad y están muy acotadas. Sin embargo, en sistemas con generación renovables, surge un nuevo reto: las dinámicas son más rápidas y hay menor conocimiento.

1.3 Objetivos del proyecto

Inicialmente, el proyecto buscaba analizar las interacciones que existen entre los controles de los aerogeneradores en redes de baja potencia de cortocircuito, en línea con los estudios de aprovechamiento. Se pretendía demostrar que la conexión de los aerogeneradores a la red es segura para todos los usuarios, incluso cuando no se cumplen los criterios conservadores que los agentes regulatorios establecen.

Durante el desarrollo del proyecto, se ha comprobado que los modelos obtenidos son inestables en redes de baja potencia de cortocircuito. Consecuentemente, se ha decidido continuar el proyecto con un enfoque más amplio, en el que los tres escenarios sean estables.

Finalmente, el estudio se basa en redes de alta potencia de cortocircuito. El objetivo último ha sido evaluar la estabilidad de los sistemas eléctricos con aerogeneradores conectados a redes fuertes. Estos sistemas, de acuerdo a la normativa, no deben presentar ningún problema de estabilidad. Para valorar los resultados se emplean las siguientes técnicas: respuesta lineal en el dominio del tiempo y análisis modal de la matriz de estados. Las conclusiones finales se han elaborado a partir de un análisis de sensibilidad basado en el análisis modal, donde se modifica la impedancia de la red.

En el proyecto se trabaja con representación en espacios de estado. El modelo de red está simplificado, y cuenta con los siguientes sistemas:

- Red de potencia infinita, incluyendo la línea de conexión.
- Máquina 1, que representa de forma agregada un parque eólico,
- Máquina 2, que representa de forma agregada otro parque eólico.

Se consideran dos tecnologías diferentes de aerogeneradores: la máquina síncrona multipolar y la máquina asíncrona doblemente alimentada.

1.4 Organización del documento

A continuación se presenta la estructura de la memoria.

En el 0 se muestran las diferentes tecnologías de aerogeneradores usadas en el proyecto para el estudio de las interacciones.

En el 3 se presenta el modelo del sistema y sus ecuaciones (lineales y no lineales). También se detallan los métodos empleados para el estudio de los resultados.

En el 4 se analizan los resultados de los tres escenarios elegidos de acuerdo a los métodos elegidos y se presentan las conclusiones parciales.

El 0 recoge las conclusiones finales del estudio.

En el 6 aparecen las referencias.

Al final del documento, se encuentran los siguientes capítulos complementarios:

- 7: resume los conceptos más importantes de los sistemas dinámicos.
- 8: contiene las ecuaciones (lineales y no lineales) de la máquina síncrona multipolar.

- 9: recoge las ecuaciones (lineales y no lineales) de la máquina asíncrona doblemente alimentada.
- 10: incluye las ecuaciones lineales y no lineales de la red.
- 11: se explican los cambios de referencia y el sistema de control PLL (Phase-Locked Loop).
- 12: se profundiza en las contribuciones que aporta este proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Para estudiar las posibles interacciones en el sistema eléctrico, se plantea un modelo de la red simplificado con dos máquinas conectadas a una red de potencia infinita. Cada máquina representa un parque eólico, es decir, los generadores se modelan de forma agregada.

Para cada máquina se han evaluado dos tecnologías distintas:

- máquina síncrona multipolar (MSG).
- máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG).

Los convertidores de cada tecnología tienen un papel importante en la estabilidad del sistema.

2.1 Máquina síncrona multipolar (MSG)

El diagrama unifilar de la máquina síncrona multipolar MSG (del inglés, *multi-pole synchronous generator*) se encuentra en la Figura 2.1.

La máquina está equipada con dos convertidores electrónicos acoplados por un condensador. Otra implementación más simple es usar un convertidor con un tiristor.

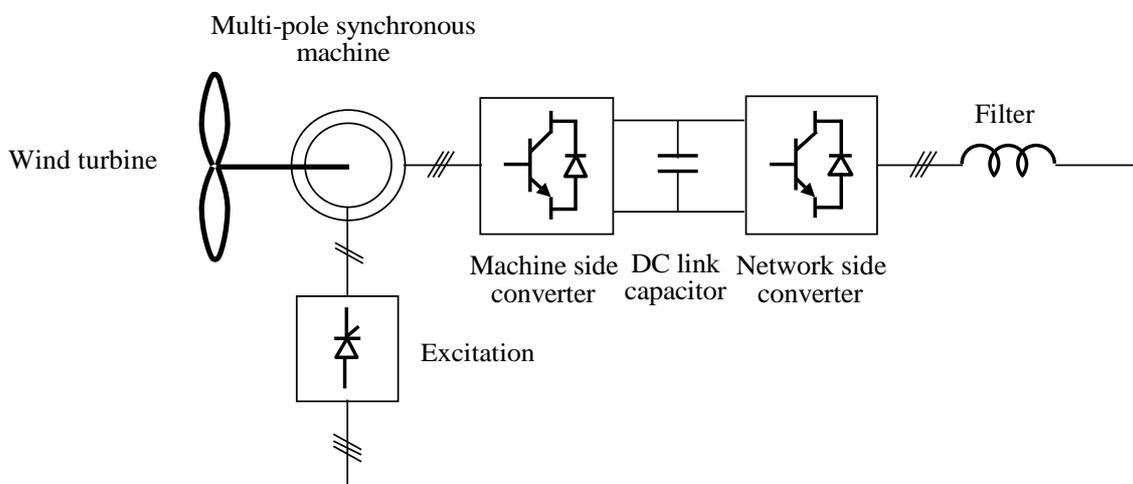


Figura 2.1: Esquema unifilar de la máquina síncrona multipolar [16].

El convertidor del lado de la máquina (Machine side converter) se encarga de controlar la velocidad de giro, haciendo posible que la máquina opere en el punto máxima de eficiencia. El convertidor genera una tensión de frecuencia variable que alimenta al estator (v_{sd}, v_{sq}). La frecuencia de la tensión generada se corresponde con la frecuencia de la velocidad del rotor. Este convertidor también puede controlar el par a partir de la corriente de eje transverso de la corriente del estator (i_{aq}).

El convertidor del lado de la red (Network side converter) permite compensar la potencia reactiva y controlar la tensión del condensador. Para ello, se diseña el control de la corriente del estator:

- La componente directa de la corriente del estator (i_{ad}) controla la tensión del condensador, a través del balance de potencia activa que fluye a través del convertidor.
- La componente transversa de la corriente (i_{aq}) determina la potencia reactiva.

Para ver en detalle las ecuaciones de los controladores, ir al 8.

Una de las ventajas de la máquina síncrona multipolar es que no necesita una reductora acoplada en el eje del generador, reduciendo por tanto la probabilidad de fallo del aerogenerador.

2.2 Máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG)

La máquina asíncrona doblemente alimentada DFIG (del inglés: *doubly fed induction generator*) es el modelo más extendido en parques eólicos. La Figura 2.2 muestra su esquema unifilar.

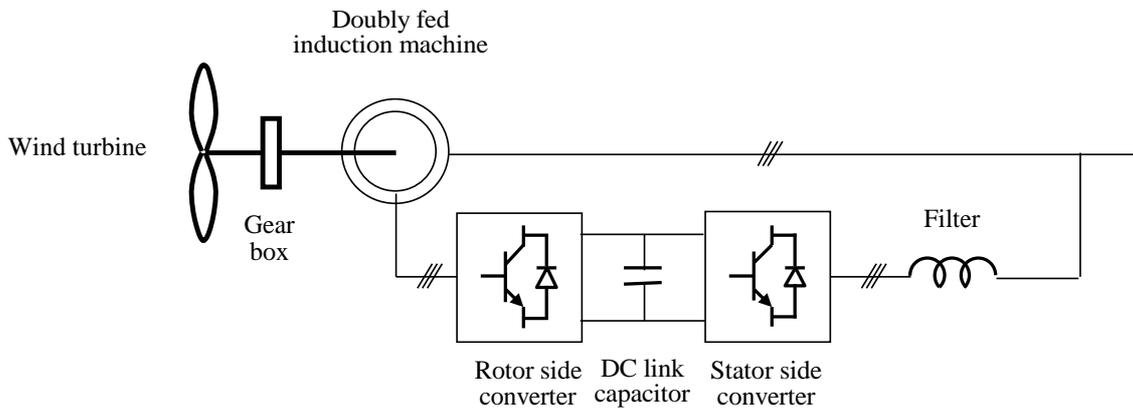


Figura 2.2: Esquema unifilar de la máquina asíncrona doblemente alimentada [17].

Se trata de una máquina asíncrona en la cual el rotor está alimentado por un convertidor electrónico (Rotor side converter). Gracias a la tecnología de modulación de ancho de pulso, el rotor recibe una tensión trifásica de la frecuencia f_2 :

$$f_2 = s f_1$$

siendo s el deslizamiento y f_1 la frecuencia del estator. La variación de la frecuencia de alimentación del rotor afecta directamente a la velocidad n del rotor, permitiendo modificarla. Otro enfoque consiste en diseñar el controlador del rotor para regular el par electromagnético. Además, el controlador del rotor también permite regular la potencia reactiva.

Para llevar a cabo estos controles, se diseña un control de las corrientes del rotor. Se elige un sistema de referencia 'dq' solidario al flujo del estator en el cual:

- La corriente del rotor en la componente directa (i_{rd} , corriente de excitación) permite controlar la potencia reactiva. Normalmente se fija a 0.
- La corriente del rotor en la componente transversa (i_{rq}) controla el par de la máquina.

En la máquina asíncrona doblemente alimentada hay también otro convertidor, que está acoplado al anterior por medio de un condensador. Es el convertidor de estator (Stator side converter, o también llamado, convertidor de red). Su función es doble: regula la potencia reactiva y la tensión del condensador de acoplamiento. Para ello, se diseña un regulador de las corrientes del convertidor:

- La componente directa de la corriente (i_{ad}) controla la tensión del condensador, a través del balance de potencia activa que fluye a través del convertidor.
- La componente transversa de la corriente (i_{aq}) determina la potencia reactiva.

Para ver en detalle las ecuaciones de los controladores, ir al 9.

Las principales ventajas de esta máquina son: posibilidad de operación en el punto de máxima eficiencia y la necesidad de convertidores electrónicos de menor potencia, puesto que no están integrados en la línea principal.

Una desventaja de esta máquina está relacionada con la necesidad de una reductora. Este elemento mecánico puede producir averías, a diferencia de la máquina síncrona multipolar, que no lo requiere.

2.3 Red

Los sucesos que ocurren en los sistemas eléctricos se pueden clasificar en:

- Fenómenos electromecánicos y
- Fenómenos electromagnéticos.

Para el estudio de las oscilaciones de los aerogeneradores es conveniente centrarse en los fenómenos electromagnéticos y, por ello, se integra la red en el modelo de forma dinámica.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DESARROLLADO

En este capítulo se detalla cuál es el modelo utilizado para el estudio de las interacciones. Para el modelado se han empleado modelos lineales y no lineales en Matlab.

3.1 Representación del modelo

La

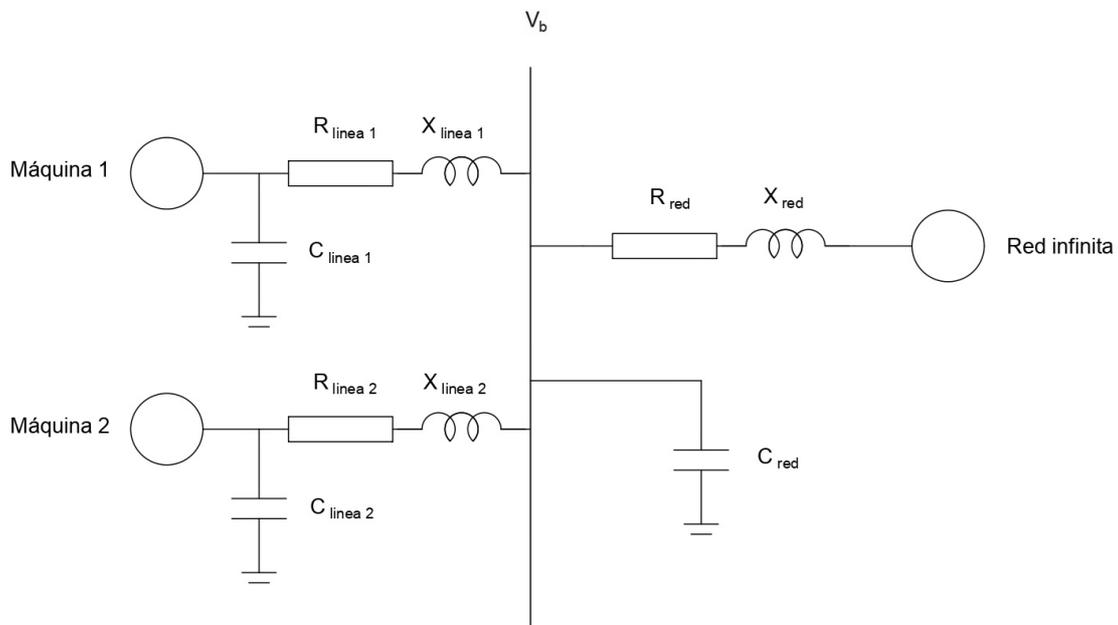


Figura 3.1 muestra el circuito empleado para el estudio de las interacciones entre aerogeneradores. El modelo está simplificado, pues cada generador representa un parque eólico de forma agregada.

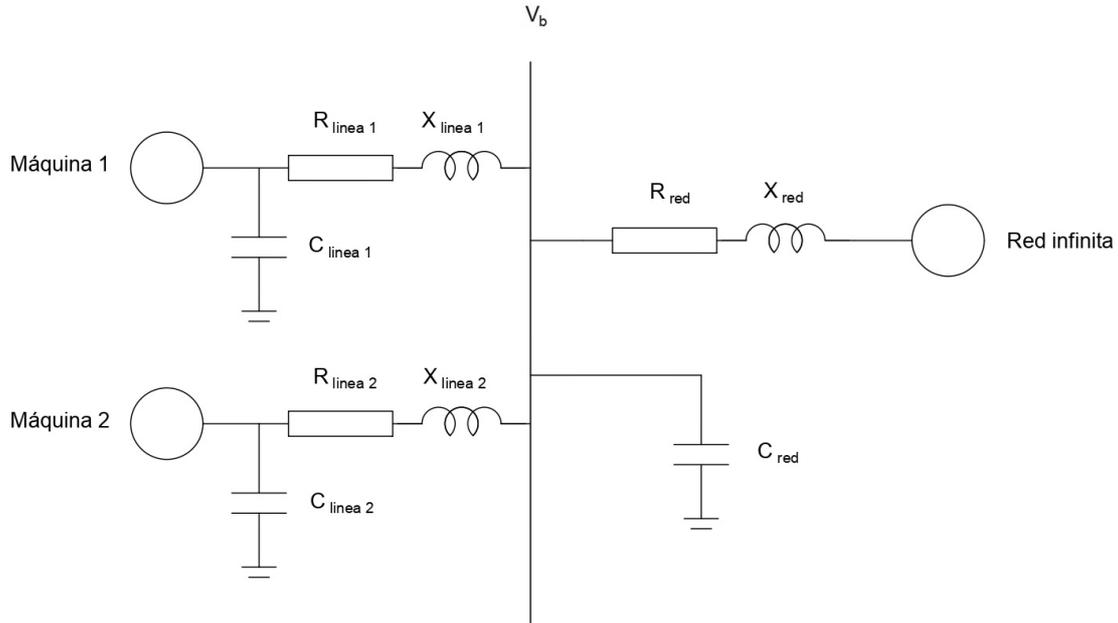


Figura 3.1: Circuito equivalente para el estudio de las interacciones en parques eólicos.

El modelo incluye dos generadores eólicos conectados al mismo punto de conexión, V_b . Cada máquina está conectada al punto de conexión por medio de una línea, parametrizada por una impedancia (R, X), que incluye el transformador elevador, y por un filtro de armónicos (C). Los aerogeneradores se conectan a la red a través de una línea ($R_{red}, X_{red}, C_{red}$). La red se modela como una red infinita, con una tensión fija V_g .

En el proyecto se estudiarán tres casos distintos:

- dos máquinas síncronas multipolares (MSG-MSG).
- una máquina de cada tipo (MSG-DFIG).
- dos máquinas asíncronas doblemente alimentadas (DFIG-DFIG).

A continuación, se presentan las ecuaciones del modelo de forma genérica.

3.2.1 Modelo no lineal

Las ecuaciones no lineales de la máquina 1 (síncrona multipolar (MSG) o asíncrona doblemente alimentada (DFIG)) en forma condensada son:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq } 1} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}_{\text{Maq } 1}, \mathbf{z}_{\text{Maq } 1}, \mathbf{v}_b, \mathbf{u}_{\text{Maq } 1}) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{H}(\mathbf{x}_{\text{Maq } 1}, \mathbf{z}_{\text{Maq } 1}, \mathbf{v}_b, \mathbf{u}_{\text{Maq } 1}) \\ \mathbf{i}_{\text{Maq } 1} &= \mathbf{J}(\mathbf{x}_{\text{Maq } 1}, \mathbf{z}_{\text{Maq } 1}, \mathbf{v}_b, \mathbf{u}_{\text{Maq } 1}) \end{aligned}$$

donde:

$\dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq } 1}$ engloba las derivadas de las variables de estados de la máquina 1; \mathbf{G} representa las ecuaciones de estado; \mathbf{H} , las ecuaciones algebraicas; y \mathbf{J} , las ecuaciones de salida del modelo. En este caso, la salida se ha definido con la corriente del transformador elevador $\mathbf{i}_{\text{Maq } 1}$. Para ver las ecuaciones con más detalle, consultar el 8 y el 9.

De igual modo, las ecuaciones no lineales de la máquina 2 (MSG o DFIG) en forma condensada son:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq } 2} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}_{\text{Maq } 2}, \mathbf{z}_{\text{Maq } 2}, \mathbf{v}_b, \mathbf{u}_{\text{Maq } 2}) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{H}(\mathbf{x}_{\text{Maq } 2}, \mathbf{z}_{\text{Maq } 2}, \mathbf{v}_b, \mathbf{u}_{\text{Maq } 2}) \\ \mathbf{i}_{\text{Maq } 2} &= \mathbf{J}(\mathbf{x}_{\text{Maq } 2}, \mathbf{z}_{\text{Maq } 2}, \mathbf{v}_b, \mathbf{u}_{\text{Maq } 2})\end{aligned}$$

Por último, las ecuaciones algebraicas no lineales de la red son:

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{v}_b}{dt} &= \frac{1}{C_b} \omega_0 \mathbf{i}_{C_b} - j \omega_0 \omega_S \mathbf{v}_b \\ \mathbf{v}_b + \mathbf{i}_g R_g + \frac{L_g}{\omega_0} \frac{d\mathbf{i}_g}{dt} + j \omega_S L_g \mathbf{i}_g &= \mathbf{v}_\infty \\ 0 &= -\mathbf{i}_g + \mathbf{i}_{\text{Maq } 1} + \mathbf{i}_{\text{Maq } 2} + \mathbf{i}_{C_b}\end{aligned}$$

3.2.2 Modelo lineal

El modelo lineal se obtiene a partir de la linealización alrededor del punto de operación de las ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales.

Las ecuaciones lineales de la máquina 1 (MSG o DFIG) en forma condensada son:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq } 1} &= \mathbf{A}_{\text{Maq } 1} \Delta \mathbf{x}_{\text{Maq } 1} + \mathbf{B}_{\text{Maq } 1 v} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{B}_{\text{Maq } 1 u} \Delta \mathbf{u}_{\text{Maq } 1} \\ \Delta \mathbf{i}_{\text{Maq } 1} &= \mathbf{C}_{\text{Maq } 1} \Delta \mathbf{x}_{\text{Maq } 1} + \mathbf{D}_{\text{Maq } 1 v} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{D}_{\text{Maq } 1 u} \Delta \mathbf{u}_{\text{Maq } 1}\end{aligned}$$

donde las matrices $\mathbf{A}_{\text{Maq } 1}$, $\mathbf{B}_{\text{Maq } 1 v}$, $\mathbf{B}_{\text{Maq } 1 u}$, $\mathbf{C}_{\text{Maq } 1}$, $\mathbf{D}_{\text{Maq } 1 v}$ y $\mathbf{D}_{\text{Maq } 1 u}$ son las matrices que representan el modelo lineal de la máquina 1 en espacio de estados.

Las ecuaciones lineales de la máquina 2 (MSG o DFIG) en forma condensada son:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq } 2} &= \mathbf{A}_{\text{Maq } 2} \Delta \mathbf{x}_{\text{Maq } 2} + \mathbf{B}_{\text{Maq } 2 v} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{B}_{\text{Maq } 2 u} \Delta \mathbf{u}_{\text{Maq } 2} \\ \Delta \mathbf{i}_{\text{Maq } 2} &= \mathbf{C}_{\text{Maq } 2} \Delta \mathbf{x}_{\text{Maq } 2} + \mathbf{D}_{\text{Maq } 2 v} \Delta \mathbf{v} + \mathbf{D}_{\text{Maq } 2 u} \Delta \mathbf{u}_{\text{Maq } 2}\end{aligned}$$

Las ecuaciones lineales de la red en forma condensada son:

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta \mathbf{v}_b}{dt} &= \frac{1}{C_b} \omega_0 \Delta \mathbf{i}_{C_b} - j \omega_0 \omega_S \Delta \mathbf{v}_b \\ \Delta \mathbf{v}_b + \Delta \mathbf{i}_g R_g + \frac{L_g}{\omega_0} \frac{d\Delta \mathbf{i}_g}{dt} + j \omega_S L_g \Delta \mathbf{i}_g &= \Delta \mathbf{v}_\infty \\ 0 &= -\Delta \mathbf{i}_g + \Delta \mathbf{i}_{\text{Maq } 1} + \Delta \mathbf{i}_{\text{Maq } 2} + \Delta \mathbf{i}_{C_b}\end{aligned}$$

3.2 Implementación

El estudio se realiza en Matlab. Se parte de los modelos individuales de las máquinas y la red (*subsistemas*) que, posteriormente, son integrados para formar el sistema completo. Después, se realizan varios análisis que serán explicados en la siguiente sección.

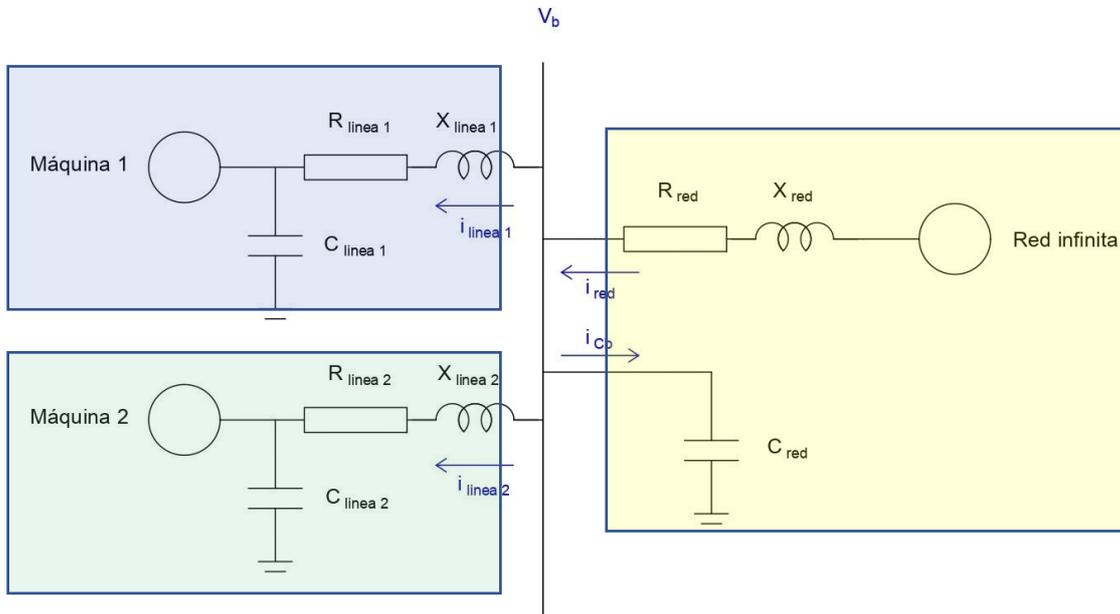


Figura 3.2: Circuito equivalente con los tres subsistemas indicados

3.2.3 Modelos no lineales

Los subsistemas en el modelo no lineal se relacionan por medio de las corrientes. Tal y como muestra el circuito en la Figura 3.3:

$$\mathbf{i}_{red} = \mathbf{i}_{maq\ 1} + \mathbf{i}_{maq\ 2} + \mathbf{i}_{Cb}$$

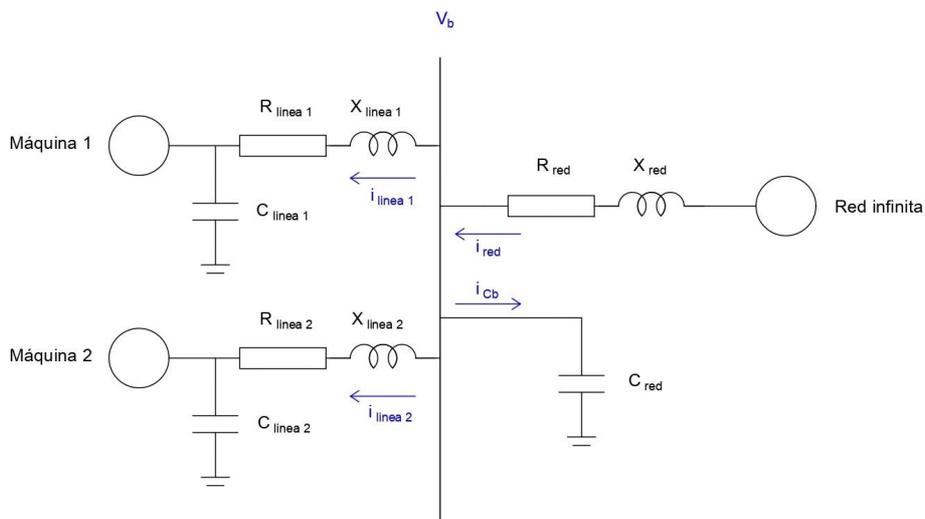


Figura 3.3: Circuito equivalente con las corrientes indicadas.

Nótese que las máquinas están modeladas con criterio motor.

Además, la tensión de salida de los subsistemas de las máquinas es la misma:

$$\mathbf{V}_{\text{maq } 1} = \mathbf{V}_{\text{maq } 2} = \mathbf{V}_b$$

Los valores de las variables en el modelo no lineal se calculan a partir de las derivadas de las variables de estado:

-Las derivadas del subsistema “red” se calculan a partir de los valores de las variables de estado, junto a los valores de la corriente i_b , saliente del sistema:

$$\mathbf{i}_b = \mathbf{i}_{\text{maq } 1} + \mathbf{i}_{\text{maq } 2} = \mathbf{i}_{\text{red}} - \mathbf{i}_{C_b}$$

-Las derivadas del subsistema “máquina” se calculan a partir de los valores de las variables de estado, junto a los valores de la tensión del punto de conexión V_b y del ángulo θ . Dicho ángulo sirve para el cambio de referencia: de unos ejes ‘RI’ a otros ejes ‘ab’. La referencia ‘RI’ está alineada con la tensión de la red infinita; mientras que los ejes ‘ab’ son colineales a la tensión V_b . El cambio de referencia viene explicado con más detalle en el 11.

3.2.4 Modelos lineales

Cada sistema matricial queda definido de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \end{aligned}$$

En primer lugar, cada subsistema calcula las matrices de estados del mismo:

$$\begin{aligned} &\mathbf{A}_{\text{maq } 1}, \mathbf{B}_{\text{maq } 1 \text{ u}}, \mathbf{B}_{\text{maq } 1 \text{ v}}, \mathbf{C}_{\text{maq } 1}, \mathbf{D}_{\text{maq } 1 \text{ u}}, \mathbf{D}_{\text{maq } 1 \text{ v}} \\ &\mathbf{A}_{\text{maq } 2}, \mathbf{B}_{\text{maq } 2 \text{ u}}, \mathbf{B}_{\text{maq } 2 \text{ v}}, \mathbf{C}_{\text{maq } 2}, \mathbf{D}_{\text{maq } 2 \text{ u}}, \mathbf{D}_{\text{maq } 2 \text{ v}} \\ &\mathbf{A}_{\text{red}}, \mathbf{B}_{\text{red}} \end{aligned}$$

A continuación, en el código se combinan las matrices para obtener las matrices del modelo completo. Se plantea del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}$$

Una vez desarrolladas las ecuaciones lineales de cada subsistema (definidas en este mismo capítulo en 3.2.2), resulta la matriz de estados del sistema completo:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq 1}} \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{Maq 2}} \\ \Delta \dot{\mathbf{v}}_b \\ \Delta \mathbf{i}_g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{Maq 1}} & 0 & \mathbf{B}_{\text{Maq 1 v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{\text{Maq 2}} & \mathbf{B}_{\text{Maq 2 v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j \omega_0 \omega_S & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} \omega_0 \\ 0 & 0 & -1/L_g \omega_0 & -j \omega_0 \omega_S L_g - \omega_0 R_g & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_{\text{Maq 1}} & 0 & \mathbf{D}_{\text{Maq 1 v}} & 0 & -\mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_{\text{Maq 2}} & \mathbf{D}_{\text{Maq 2 v}} & 0 & 0 & -\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{\text{Maq 1}} \\ \Delta \mathbf{x}_{\text{Maq 2}} \\ \Delta \mathbf{v}_b \\ \Delta \mathbf{i}_g \\ \Delta \mathbf{i}_{\text{Maq 1}} \\ \Delta \mathbf{i}_{\text{Maq 2}} \\ \Delta \mathbf{i}_{C_b} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{Maq 1 u}} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{\text{Maq 2 u}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathbf{I} \\ \mathbf{D}_{\text{Maq 1 u}} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_{\text{Maq 2 u}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_{\text{Maq 1}} \\ \Delta \mathbf{u}_{\text{Maq 2}} \\ \Delta \mathbf{v}_\infty \end{bmatrix}$$

En particular,

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{Maq 1}} & 0 & \mathbf{B}_{\text{Maq 1 v}} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{\text{Maq 2}} & \mathbf{B}_{\text{Maq 2 v}} & 0 \\ 0 & 0 & j \omega_0 \omega_S & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_g} \omega_0 & -j \omega_0 \omega_S L_g - \omega_0 R_g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_b} \omega_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\text{Maq 1}} & 0 & \mathbf{D}_{\text{Maq 1 v}} & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_{\text{Maq 2}} & \mathbf{D}_{\text{Maq 2 v}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} -\mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{I} & \mathbf{I} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{Maq 1 u}} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{\text{Maq 2 u}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{\text{Maq 1 u}} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_{\text{Maq 2 u}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Con objeto de eliminar de la formulación las variables algebraicas, se calculan las matrices del sistema:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{22})^{-1}\mathbf{A}_{21}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 - \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{22})^{-1}\mathbf{B}_2$$

Por último, se definen las matrices **C**, **D** del sistema de acuerdo a la salida deseada, por ejemplo: la corriente de red.

3.3 Métodos de análisis

El proyecto tiene como intención descubrir las limitaciones reales de los aerogeneradores en redes de baja potencia de cortocircuito, con el fin de garantizar que no ocurran interacciones entre generadores.

3.3.1 Simulaciones en el dominio del tiempo

El primer método de análisis de los resultados se trata de la simulación en el dominio del tiempo. En el desarrollo del proyecto, se inicia con un punto de operación estable y se aplica un cambio en las entradas de algún elemento del sistema. El objetivo es que el sistema no se vuelva inestable.

Los tiempos de simulación son cortos, en general, antes de 1 segundo el sistema vuelve a un nuevo régimen estacionario.

Las simulaciones lineales se realizan en Matlab a partir de las ecuaciones diferenciales y algebraicas lineales. En Matlab se ha usado la función 'lsim', especificando las matrices de estados del sistema y la entrada.

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} \\ \Delta\mathbf{y} &= \mathbf{C}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u}\end{aligned}$$

3.3.2 Autovalores y participaciones

Otro método para el análisis de los resultados es comprobar que los autovalores de la matriz de estados del sistema **A**. Los autovalores se relacionan con la respuesta temporal de la siguiente forma:

- Autovalores con parte real negativa dan lugar a respuestas oscilatorias decrecientes, que acaban por desaparecer.
- Autovalores con parte real positiva dan lugar a respuestas oscilantes crecientes en el tiempo.
- Autovalores reales positivos dan una respuesta exponencial decreciente.
- Autovalores reales negativos producen una respuesta exponencial creciente.

- Autovalores con parte real nula (y parte imaginaria distinta de 0) tienen asociada una respuesta senoidal.

Dichos comportamientos quedan reflejados en la Figura 3.4.

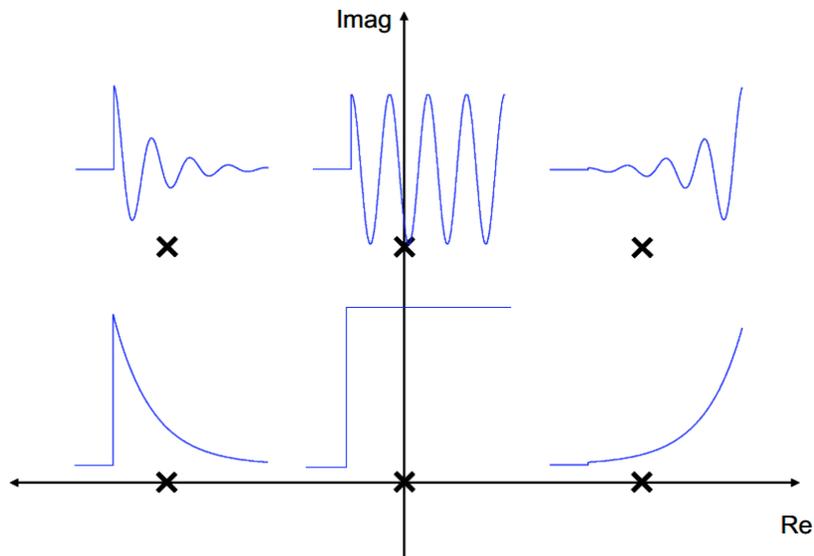


Figura 3.4: Respuestas temporales asociadas a los autovalores de la matriz de estados A [17].

Como conclusión, un sistema es estable si todos los autovalores tienen parte real negativa.

Los módulos de las participaciones permiten relacionar los autovalores de la matriz de estados con las variables de estado. Es una herramienta útil ya que ayuda a detectar cuáles son las interacciones entre variables que dan lugar a inestabilidades.

3.3.3 Lugar de las raíces

Esta técnica consiste en calcular los autovalores del sistema para cada par de valores de los parámetros de la red (R_{red} , X_{red}). La idea es comprobar si la impedancia de la red afecta a la estabilidad de los sistemas considerados “fuertes”. En caso de encontrar inestabilidades, se puede analizar cuáles son los autovalores que se vuelven inestables y los valores límites de los parámetros de la red.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del estudio de las interacciones en parques eólicos. Se han evaluado tres escenarios:

- Estudio de las interacciones entre generadores, basados en máquinas síncronas multipolares, en redes de baja potencia de cortocircuito.
- Estudio de las interacciones entre generadores, basados en máquina síncrona multipolar y con máquina asíncrona doblemente alimentada, en redes de baja potencia de cortocircuito.
- Estudio de las interacciones entre generadores, basados en máquinas asíncronas doblemente alimentadas, en redes de baja potencia de cortocircuito.

El punto de operación elegido es el común a los tres escenarios. Viene definido en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Datos del punto de operación para los tres escenarios

Punto de operación.	
v_b	1.00 pu $\angle 0^\circ$
p_{red}	1.6 pu
q_{red}	0 pu

4.1 MSG-MSG

En este modelo está formado por los siguientes subsistemas:

- Subsistema de la red,
- Subsistema de la máquina síncrona multipolar (MSG 1),
- Subsistema de la máquina síncrona multipolar (MSG 2).

4.1.1 Parámetros del sistema

La Tabla 4.2 recoge los datos de los parámetros de la red.

Tabla 4.2: Parámetros de la red

Parámetros de la red	
r_{red}	0.0016 pu
l_{red}	0.016 pu
c_{red}	0.0021 pu

La Tabla 4.3, Tabla 4.4, Tabla 4.5 y Tabla 4.6 presentan los parámetros del subsistema máquina 1, en este caso, el de la máquina síncrona multipolar adoptados para la simulación del primer escenario.

Tabla 4.3: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
r_s	0.02 pu
l_s	0.1 pu
l_{md}	0.9 pu
l_{mq}	0.5 pu
r_r	0.02 pu
l_r	0.1 pu
H	7 s

Tabla 4.4: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
r_a	0.008 pu
l_a	0.08 pu
c	0.0555 pu

Tabla 4.5: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
n	35
r_{fm}	0 pu
c_{fm}	0.2 pu

Tabla 4.6: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
$l_{línea 1}$	0.08 pu
$r_{línea 1}$	0.016 pu

Tabla 4.7: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
K_{Pa}	0.0143
K_{Ia}	0.9947
K_{Pd}	0.2585
K_{Id}	12.4340
K_{Pq}	0.1471
K_{Iq}	7.4604
K_{Pv}	-0.2393
K_{Iv}	-1.0682
$K_{P\omega_r}$	607.86
$K_{I\omega_r}$	2713.7
$K_{P\theta}$	-0.1393
$K_{I\theta}$	-3.1085

En el caso del subsistema máquina 2, los parámetros de la máquina son idénticos a los del subsistema 1.

Una vez definidos los parámetros del sistema, es posible calcular la relación de cortocircuito (SCR, *short circuit ratio*, en inglés), a partir de la potencia de cortocircuito S_{cc} de la red. Esta relación determina el estado de la red: fuerte o débil.

$$s_{cc} \text{ [pu]} = \frac{1}{z_{cc} \text{ [pu]}}$$

$$S_{cc} = \frac{1}{z_{cc} \text{ [pu]}} S_B$$

$$SCR = \frac{S_{cc}}{P_N} = \frac{\frac{1}{z_{cc}} S_B}{2 P_N}$$

Asumiendo una potencia base S_B , y cada máquina produce P_N , se tiene:

$$SCR = \frac{S_{cc}}{P_N} = \frac{1}{2 z_{cc}} = \frac{1}{2 \sqrt{0.0016^2 + 0.016^2}} = 30.62 \text{ pu}$$

Un SCR mayor de 3 denota que la red es “fuerte”, es decir, la probabilidad de que aparezcan problemas de estabilidad es baja.

4.1.2 Condiciones iniciales

Los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la red se encuentran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Condiciones iniciales del subsistema red en el escenario MSG-MSG.

Condiciones iniciales de la red (pu).	
Ψ_r^{red}	-0.0260
Ψ_i^{red}	-0.0007
v_{br}	0.9997
v_{bi}	0.0261

Los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la máquina 1 están en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Condiciones iniciales del subsistema máquina 1 en el escenario MSG-MSG.

Condiciones iniciales MSG (pu).	
Ψ_{sd}	0.2015
Ψ_{sq}	-0.0921
Ψ_{ad}	-0.0639
Ψ_{aq}	-0.0123
x_{a1}	-0.0012
x_{a2}	-0.0064
x_{a3}	-0.7985
v_c^2	1.0000

x_{s1}	-0.0160
x_{s2}	-0.0031
ω_r	7.9307
x_{ω_r}	-0.1535
v_{cd}	1.0147
v_{cq}	0
Ψ_{tr}	-0.0640
Ψ_{ti}	-0.0018
$x_{\omega_{PLL}}$	0
θ_{PLL}	0.0631

Dado que los parámetros de las máquinas 1 y 2 son idénticas, los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la máquina 2 también lo son (Tabla 4.9).

4.1.3 Simulación en el dominio del tiempo

En este apartado se muestra la respuesta del sistema MSG-MSG, obtenida a partir de la simulación del modelo lineal. El sistema parte de las condiciones iniciales anteriores y en $t=0s$ se aplica un escalón del 10% a la consigna de corriente reactiva del convertidor de red (i_{aq}^{ref}) de la máquina 1.

Las respuestas temporales confirman que el sistema es estable, pues todas las oscilaciones se extinguen tras unos milisegundos.

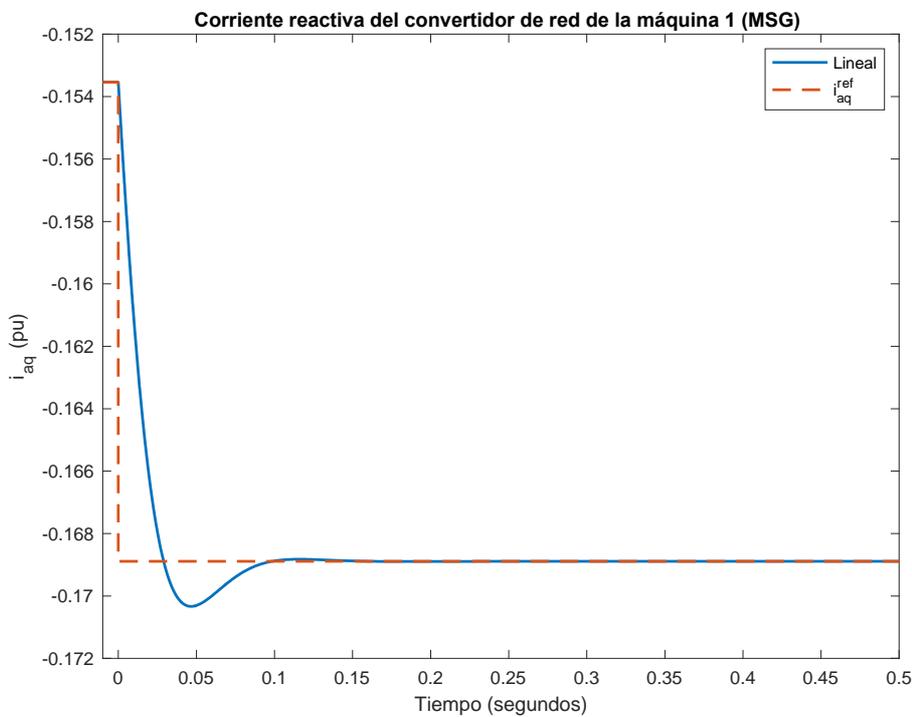


Figura 4.1: Respuesta temporal de la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de la misma (i_{aq}^{ref}), en el modelo MSG-MSG.

La Figura 4.1 muestra la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina que sufre el escalón. Se aprecia como la corriente consigue seguir a la referencia tras un corto periodo de tiempo (0.2 s).

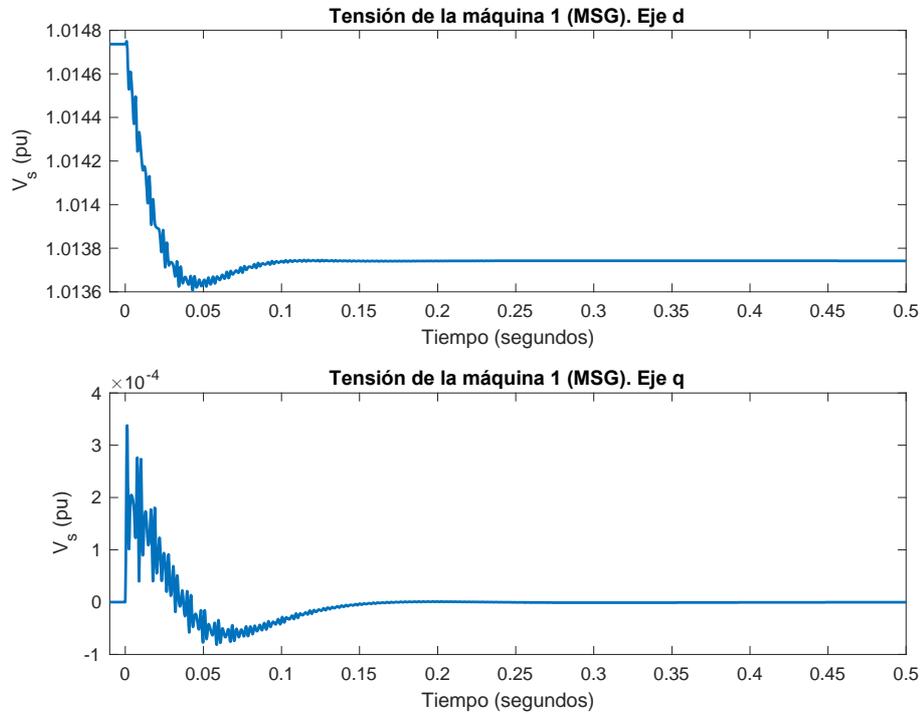


Figura 4.2: Respuesta temporal de la tensión de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG). Escenario MSG-MSG.

En la Figura 4.2 se representan las componentes directa e inversa de la tensión en bornes de la máquina 1. Inicialmente aparece una oscilación y finalmente se extingue. La tensión de la máquina llega a un nuevo régimen permanente en 0.2 s.

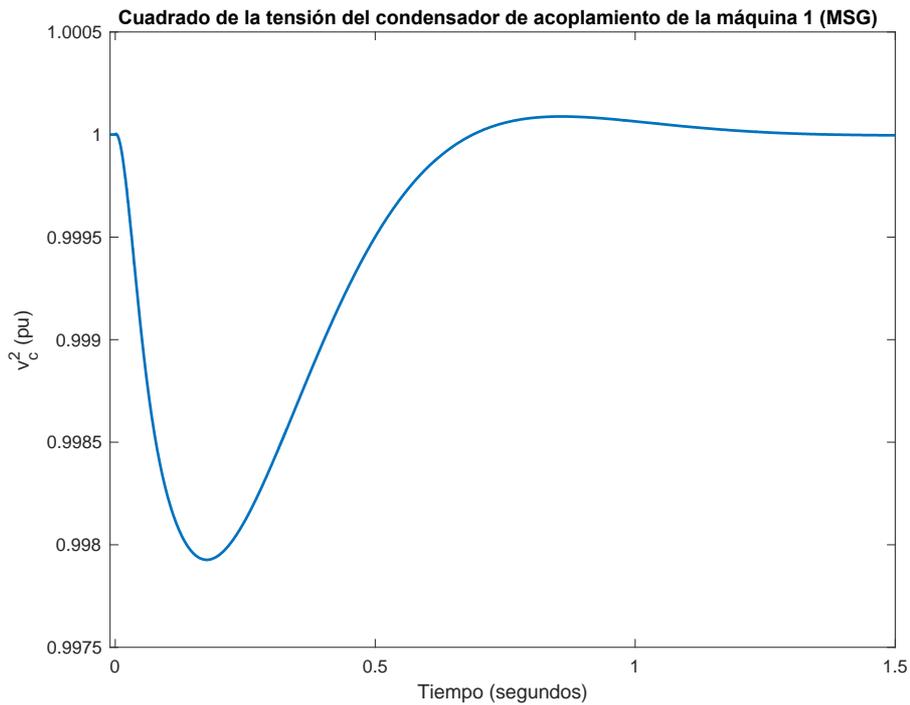


Figura 4.3: Respuesta temporal del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red. Escenario MSG-MSG.

La tensión del condensador de acoplamiento entre los convertidores de la máquina 1 (MSG) se representa en la Figura 4.3. Durante el transitorio se reduce muy levemente el valor de la tensión. Sin embargo, al cabo de 1 segundo retoma su valor nominal.

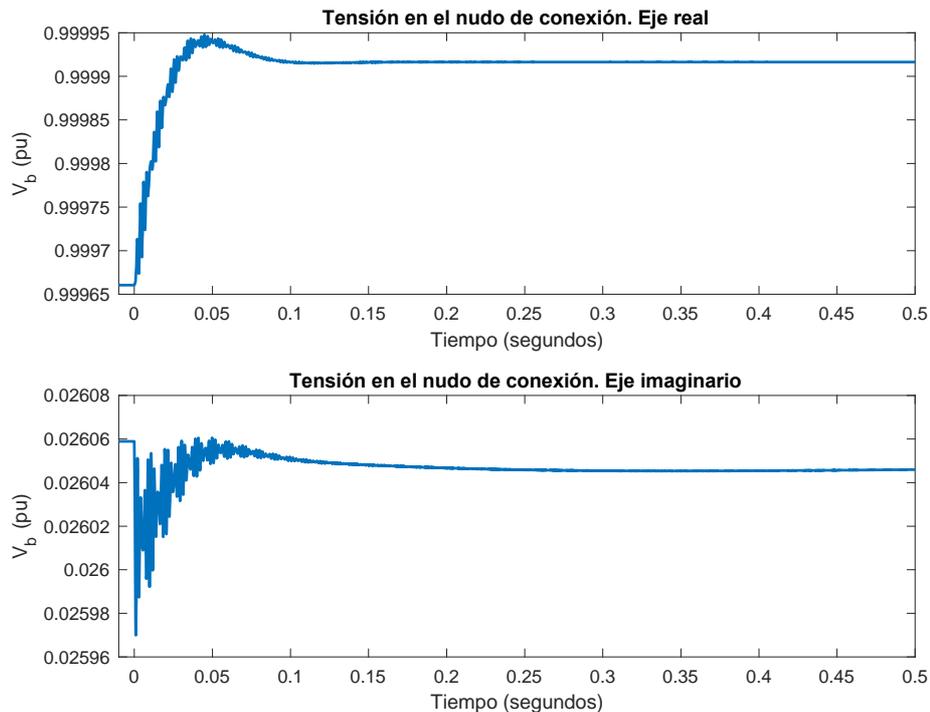


Figura 4.4: Respuesta temporal de la tensión del nudo de conexión ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG). Escenario MSG-MSG.

La red reacciona de forma estable al escalón en la consigna de corriente reactiva de la máquina 1 (MSG). La Figura 4.4 muestra las componentes real e imaginaria de la tensión del nudo de conexión de los aerogeneradores. La oscilación producida es muy breve y se extingue al cabo de pocos milisegundos.

4.1.4 Autovalores de la matriz de estados

El sistema será estable, según el método de los autovalores, si todos tienen parte real negativa.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4.10 y Tabla 4.11, el modelo en el primer escenario es estable.

Tabla 4.10: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG-MSG.

Autovalores complejos				
Número	Parte real	Parte imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
1,2	-4.83	41457.70	0.01	6598.2
3,4	-4.83	40829.38	0.01	6498.2
5,6	-43.83	3533.47	1.24	562.37
7,8	-40.51	2903.20	1.40	462.06
9,10	-33.29	2787.97	1.19	443.72
11,12	-28.90	2156.37	1.34	343.2
13,14	-30.41	59.32	45.62	9.44
15,16	-30.41	59.32	45.62	9.44
17,18	-43.94	45.20	69.71	7.19
19,20	-43.79	45.02	69.73	7.16
21,22	-43.75	44.63	70.00	7.10
23,24	-43.75	44.63	70.00	7.10
25,26	-39.34	45.68	65.26	7.27
27,28	-39.46	45.42	65.58	7.23
29,30	-22.36	22.37	70.68	3.56
31,32	-22.24	22.33	70.56	3.55
35,36	-4.64	4.61	70.95	0.73
37,38	-4.63	4.61	70.94	0.73

Tabla 4.11: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG-MSG.

Autovalores reales		
Número	Parte real	Constante de tiempo (s)
33	-21.21	0.0472
34	-21.21	0.0472
39	-5.47	0.1829
40	-5.47	0.1829

No obstante, hay dos pares de autovalores complejos (1,2) y (3,4) que tienen un amortiguamiento extremadamente bajo (0.01%). Estos autovalores están relacionados con las dinámicas de la red, tal y como muestran los factores de participación (Tabla 4.12, Tabla 4.13 y Tabla 4.14),

Tabla 4.12: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-MSG

Subsistema	VARIABLES DE ESTADO	1,2	3,4	5,6	7,8	9,10	11,12	13,14	15,16	17,18
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.646	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.356
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.350
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.491	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.302	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000
	$v_{c d}$	0.000	0.000	0.129	0.122	0.129	0.121	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.000	0.000	0.122	0.129	0.121	0.129	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.087	0.087	0.217	0.206	0.129	0.121	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.087	0.087	0.208	0.220	0.123	0.132	0.000	0.000	0.005
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.000	0.000	0.005
Máquina 2	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.646	0.000	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.356
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.350
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.491	0.000	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.302	0.000	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000
	$v_{c d}$	0.000	0.000	0.129	0.122	0.129	0.121	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.000	0.000	0.122	0.129	0.121	0.129	0.000	0.000	0.000

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Ψ_{tr}	0.087	0.087	0.217	0.206	0.129	0.121	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ti}	0.087	0.087	0.208	0.220	0.123	0.132	0.000	0.000	0.005
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.000	0.000	0.005
Red	v_{br}	0.251	0.251	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{bi}	0.251	0.251	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.423	0.423	0.178	0.169	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.423	0.423	0.170	0.180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.13: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-MSG (continuación)

Subsistema	Variables de estado	19,20	21,22	23,24	25,26	27,28	29,30	31,32	35,36	37,38
Máquina 1	Ψ_{sd}	0.000	0.677	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{sq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ad}	0.006	0.000	0.000	0.367	0.370	0.001	0.000	0.005	0.005
	Ψ_{aq}	0.353	0.000	0.000	0.005	0.014	0.001	0.001	0.000	0.000
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.044	0.044	0.003	0.002	0.378	0.378
	x_{a1}	0.349	0.000	0.000	0.006	0.016	0.002	0.002	0.000	0.000
	x_{a2}	0.006	0.000	0.000	0.359	0.364	0.004	0.002	0.020	0.020
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.366	0.366
	x_{s1}	0.000	0.677	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{cd}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{cq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{tr}	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ti}	0.005	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.003	0.000	0.000	0.003	0.005	0.355	0.353	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.003	0.000	0.000	0.003	0.006	0.356	0.354	0.000	0.000
Máquina 2	Ψ_{sd}	0.000	0.061	0.677	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{sq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ad}	0.006	0.000	0.000	0.367	0.370	0.001	0.000	0.005	0.005
	Ψ_{aq}	0.353	0.000	0.000	0.005	0.014	0.001	0.001	0.000	0.000
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.044	0.044	0.003	0.002	0.378	0.378
	x_{a1}	0.349	0.000	0.000	0.006	0.016	0.002	0.002	0.000	0.000
	x_{a2}	0.006	0.000	0.000	0.359	0.364	0.004	0.002	0.020	0.020
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.366	0.366
	x_{s1}	0.000	0.061	0.677	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

	x_{s2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.005	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.003	0.000	0.000	0.003	0.005	0.355	0.353	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.003	0.000	0.000	0.003	0.006	0.356	0.354	0.000	0.000
Red	$v_{b r}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{b i}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000

Tabla 4.14: Módulo de las participaciones de los autovalores reales del sistema MSG-MSG

Subsistema	VARIABLES DE ESTADO	33	34	39	40
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.168	0.003	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s1}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.000	0.146	0.003	0.000
	ω_r	0.000	0.935	0.291	0.001
	x_{ω_r}	0.000	0.249	1.295	0.005
	$v_{c d}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.000	0.000	0.000	0.000
$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	
θ_{PLL}	0.000	0.000	0.000	0.000	
Máquina 2	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.168	0.000	0.000	0.003
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.000	0.000

	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s1}	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.146	0.000	0.000	0.003
	ω_r	0.935	0.000	0.001	0.291
	x_{ω_r}	0.249	0.000	0.005	1.295
	$v_{c d}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{tr}	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ti}	0.000	0.000	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.000	0.000
Red	$v_{b r}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{b i}$	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.000	0.000	0.000	0.000

4.1.5 Lugar de las raíces

Una vez se ha comprobado que el escenario MSG-MSG es estable, se hallan los autovalores del sistema para distintos valores de la impedancia de la red, manteniendo la relación R/X constante. En concreto, en la Figura 4.5 se representan las raíces para unos valores de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia del caso anterior. El condensador de la red se mantiene igual en todas las iteraciones.

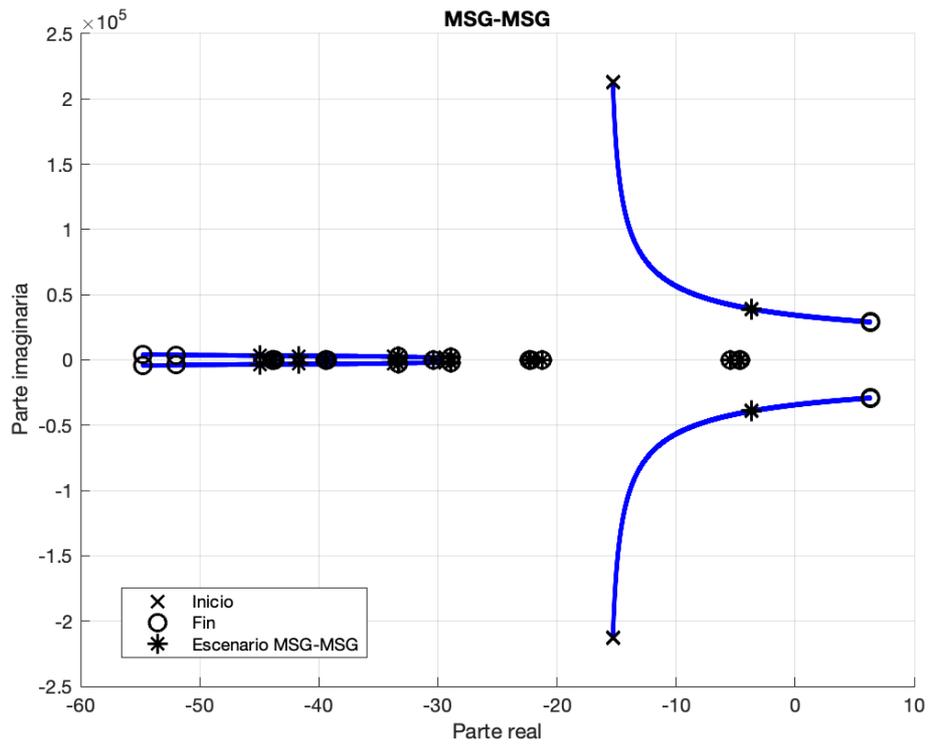


Figura 4.5: Lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia con respecto al escenario MSG-MSG.

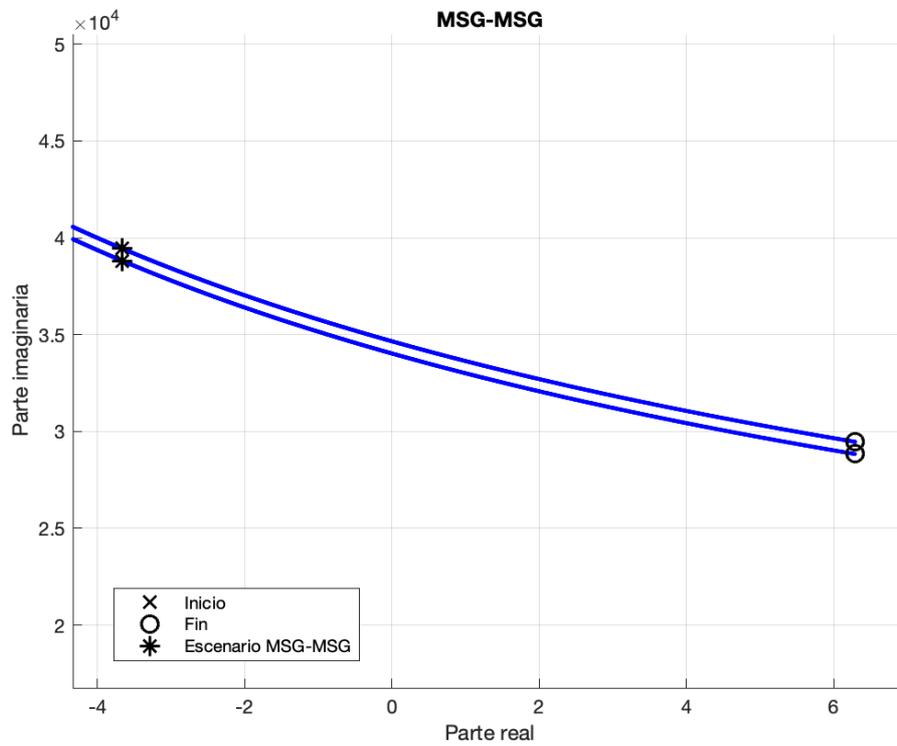


Figura 4.6: Detalle de los autovalores inestables del lugar de las raíces para el sistema MSG-MSG.

La Tabla 4.15 indica que los pares de autovalores complejos (1,2) y (3,4) son los que se vuelven inestables en primer lugar. Se trata de autovalores de alta frecuencia y están relacionados principalmente con las dinámicas de la red (el flujo de la red), según muestran la Tabla 4.17. Esta información se puede comprobar gráficamente en el detalle de la Figura 4.6.

Tabla 4.15: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario MSG-MSG.

Autovalores complejos				
Número	Parte real	Parte imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
1,2	6.29	29464.45	-0.02	4689.41
3,4	6.29	28836.14	-0.02	4589.41
5,6	-54.76	4135.90	1.32	658.25
7,8	-51.97	3506.18	1.48	558.03
9,10	-33.29	2787.97	1.19	443.72
11,12	-28.90	2156.37	1.34	343.20
13,14	-30.41	59.32	45.62	9.44
15,16	-30.41	59.32	45.62	9.44
17,18	-43.94	45.20	69.71	7.19
19,20	-43.73	44.96	69.73	7.16
21,22	-43.75	44.63	70.00	7.10
23,24	-43.75	44.63	70.00	7.10
25,26	-39.29	45.77	65.14	7.28
27,28	-39.46	45.42	65.58	7.23
29,30	-22.36	22.37	70.68	3.56
31,32	-22.19	22.31	70.52	3.55
35,36	-4.64	4.61	70.94	0.73
37,38	-4.63	4.61	70.94	0.73

Tabla 4.16: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario MSG-MSG.

Autovalores reales		
Número	Real	Constante de tiempo (s)
33	-21.21	0.05
34	-21.21	0.05
39	-5.47	0.18
40	-5.47	0.18

Tabla 4.17: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos inestables del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario MSG-MSG.

Subsistema	Variables de estado	1,2	3,4	Subsistema	Variables de estado	1,2	3,4
Máquina 1, Máquina 2	Ψ_{sd}	0.000	0.000	Red	v_{br}	0.253	0.253
	Ψ_{sq}	0.000	0.000		v_{bi}	0.253	0.253

	Ψ_{ad}	0.000	0.000		i_r^{red}	0.600	0.600
	Ψ_{aq}	0.000	0.000		i_i^{red}	0.600	0.600
	v_c^2	0.000	0.000				
	x_{a1}	0.000	0.000				
	x_{a2}	0.000	0.000				
	x_{a3}	0.000	0.000				
	x_{s1}	0.000	0.000				
	x_{s2}	0.000	0.000				
	ω_r	0.000	0.000				
	x_{ω_r}	0.000	0.000				
	v_{cd}	0.001	0.001				
	v_{cq}	0.001	0.001				
	Ψ_{tr}	0.175	0.175				
	Ψ_{ti}	0.175	0.175				
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000				
	θ_{PLL}	0.000	0.000				

El último valor de la impedancia de la red para el cual el sistema mantiene todos sus autovalores con parte real negativa es:

$$R_g = 0.002 \text{ pu}$$

$$L_g = 0.02 \text{ pu}$$

4.2 MSG-DFIG

En este modelo está formado por los siguientes subsistemas:

- Subsistema de la red,
- Subsistema de la máquina síncrona multipolar (MSG),
- Subsistema de la máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG).

4.2.1 Parámetros del sistema

La Tabla 4.18 recoge los datos de los parámetros de la red. La relación entre la resistencia y la reactancia no es la habitual, pero se han escogido estos valores con el fin de que el caso fuera estable.

Tabla 4.18: Parámetros de la red

Parámetros de la red	
r_{red}	0.025 pu
l_{red}	0.0163 pu
c_{red}	0.0085 pu

La Tabla 4.19, Tabla 4.20, Tabla 4.21, Tabla 4.22 y Tabla 4.23 presentan los parámetros del subsistema máquina 1, en este caso, el de la máquina síncrona multipolar.

Tabla 4.19: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
r_s	0.02 pu
l_s	0.1 pu
l_{md}	0.9 pu
l_{mq}	0.5 pu
r_r	0.02 pu
l_r	0.1 pu
H	7 s

Tabla 4.20: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
r_a	0.008 pu
l_a	0.08 pu
c	0.0555 pu

Tabla 4.21: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
n	35
r_{fm}	0 pu
c_{fm}	0.2 pu

Tabla 4.22: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
$l_{\text{línea } 1}$	0.12 pu
$r_{\text{línea } 1}$	0.024 pu

Tabla 4.23: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 1.

Parámetros de MSG	
K_{Pa}	0.0143
K_{Ia}	0.9947
K_{Pd}	0.2585
K_{Id}	12.4340
K_{Pq}	0.1471
K_{Iq}	7.4604
K_{Pv}	-0.2373
K_{Iv}	-1.0594
$K_{P\omega_r}$	603.34
$K_{I\omega_r}$	2693.5
$K_{P\theta}$	-0.1393
$K_{I\theta}$	-3.1085

La

Tabla 4.24, Tabla 4.25, Tabla 4.26, Tabla 4.27 y Tabla 4.28 presentan los parámetros del subsistema máquina 2, que se corresponde con una máquina asíncrona doblemente alimentada.

Tabla 4.24: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 2.

Parámetros de DFIG	
r_s	0.01 pu
l_s	0.15 pu
r_r	0.01 pu
l_r	0.15 pu
l_m	5 pu
H	3 s

Tabla 4.25: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 2.

Parámetros de DFIG	
r_a	0.06 pu
l_a	0.6 pu
c	0.05 pu

Tabla 4.26: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 2.

Parámetros de DFIG	
n	35
r_{fm}	0 pu
c_{fm}	0.0086 pu

Tabla 4.27: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 2.

Parámetros de DFIG	
$l_{\text{línea 1}}$	0.18 pu
$r_{\text{línea 1}}$	0.018 pu

Tabla 4.28: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 2.

Parámetros de DFIG	
K_{Pa}	0.1071
K_{Ia}	7.4604
K_P	0.0723
K_I	3.6759
K_{Pv}	-0.2137
K_{Iv}	-0.9538
K_{Ps}	52.3207
K_{Is}	233.5745
$K_{P\theta}$	-26.2500
$K_{I\theta}$	-351.5625

En este caso, la relación de cortocircuito de la red es:

$$SCR = \frac{S_{cc}}{P_N} = \frac{1}{2 z_{cc}} = \frac{1}{2 \sqrt{0.025^2 + 0.0163^2}} = 16.77 \text{ pu}$$

De nuevo, se tiene un SCR alto. Por tanto, la red se considera como “fuerte”.

4.2.2 Condiciones iniciales

Los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la red se encuentran en la Tabla 4.29.

Tabla 4.29: Condiciones iniciales del subsistema red en el escenario MSG-DFIG.

Condiciones iniciales de la red (pu).	
Ψ_r^{red}	-0.0260
Ψ_i^{red}	-0.0007
v_{br}	0.9996
v_{bi}	0.0271

Los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la máquina síncrona multipolar están en la Tabla 4.30.

Tabla 4.30: Condiciones iniciales del subsistema máquina 1 en el escenario MSG-DFIG.

Condiciones iniciales MSG (pu).	
Ψ_{sd}	0.2030
Ψ_{sq}	0.0321
Ψ_{ad}	-0.0638
Ψ_{aq}	0.0043
x_{a1}	0.0004
x_{a2}	-0.0064
x_{a3}	-0.7970
v_c^2	1.0000
x_{s1}	-0.0159
x_{s2}	0.0011
ω_r	-22.8631
x_{ω_r}	0.0535
v_{cd}	1.0232
v_{cq}	-0.0058
Ψ_{tr}	-0.0960
Ψ_{ti}	-0.0031
$x_{\omega_{PLL}}$	0
θ_{PLL}	0.0941

Los valores de las condiciones iniciales de la máquina asíncrona doblemente alimentada aparecen en la Tabla 4.31.

Tabla 4.31: Condiciones iniciales del subsistema máquina 2 en el escenario MSG-DFIG.

Condiciones iniciales de DFIG (pu).

$\Psi_{s d}$	0.0020
$\Psi_{s q}$	-1.0335
$\Psi_{a d}$	0.1067
$\Psi_{a q}$	0.1813
x_{a1}	0.0181
x_{a2}	0.0107
x_{a3}	0.1778
v_c^2	1.0000
$\Psi_{r d}$	0.2976
$\Psi_{r q}$	-1.0028
x_{r1}	-0.0000
x_{r2}	0.0100
s	0.1641
x_s	1.0000
$v_{c d}$	1.0238
$v_{c q}$	0
$\Psi_{t r}$	-0.1439
$\Psi_{t i}$	-0.0047
$x_{\omega_{PLL}}$	0
θ_{PLL}	0.1412

4.2.3 Simulación en el dominio del tiempo

En este apartado se muestra la respuesta del sistema MSG-DFIG, obtenida a partir de la simulación del modelo lineal. El sistema parte de las condiciones iniciales anteriores y en $t=0s$ se aplica un escalón del 10% a la consigna de corriente reactiva del convertidor de red (i_{aq}^{ref}) de la máquina 1 (MSG).

Las respuestas temporales confirman que el sistema es estable, pues todas las oscilaciones se extinguen tras unos milisegundos.

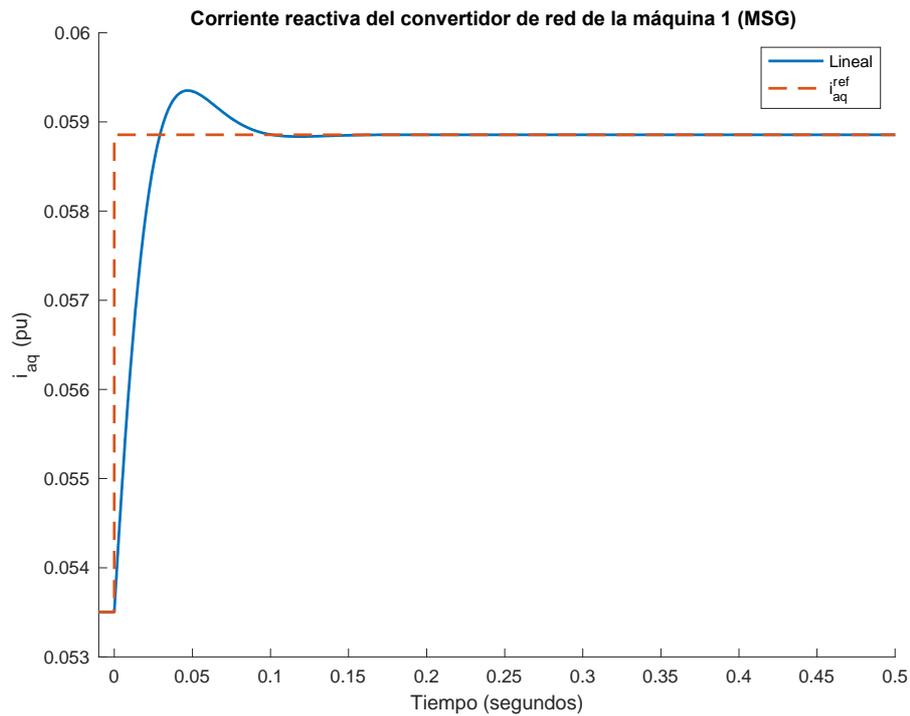


Figura 4.7: Respuesta temporal de la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de la misma (i_{aq}^{ref}). Escenario MSG-DFIG

La Figura 4.7 muestra la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina que sufre el escalón. La corriente consigue seguir a la referencia tras un corto periodo de tiempo (0.2 s).

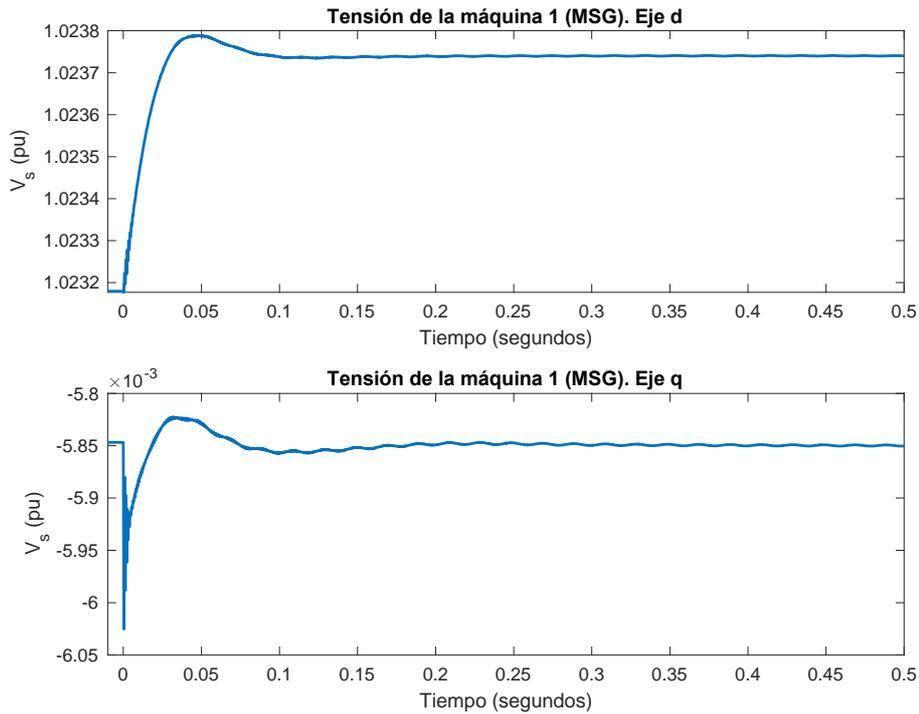


Figura 4.8: Respuesta temporal de la tensión de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG). Escenario MSG-DFIG.

La Figura 4.8 representa las componentes directa y transversa de la tensión de la máquina 1 (MSG) a causa del escalón en la consigna de corriente reactiva. La oscilación que sufre la tensión es prácticamente inapreciable.

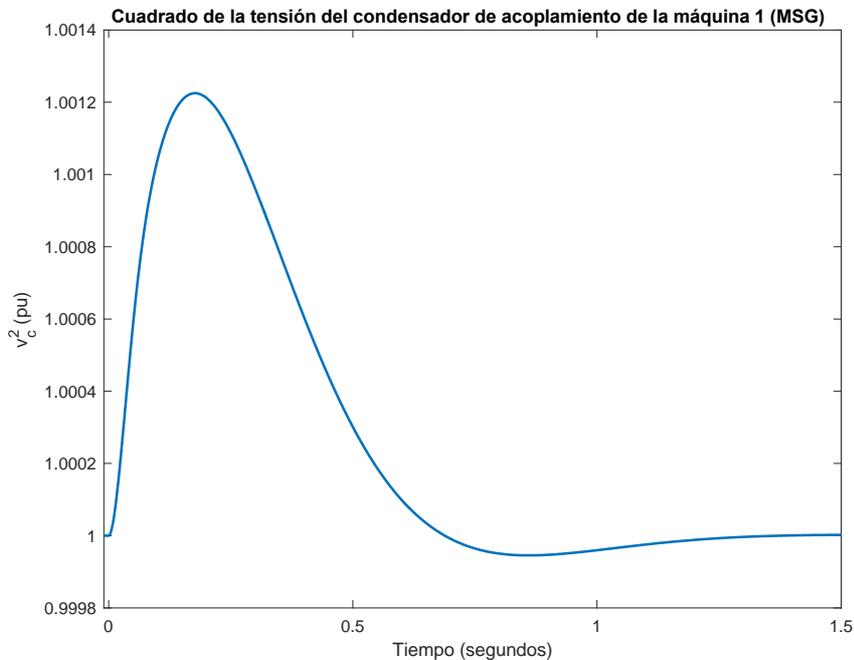


Figura 4.9: Respuesta temporal del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina 1 (MSG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red. Escenario MSG-DFIG.

El cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento entre los convertidores de la máquina 1 (MSG) se ve poco afectado por el escalón, tal y como muestra la Figura 4.9.

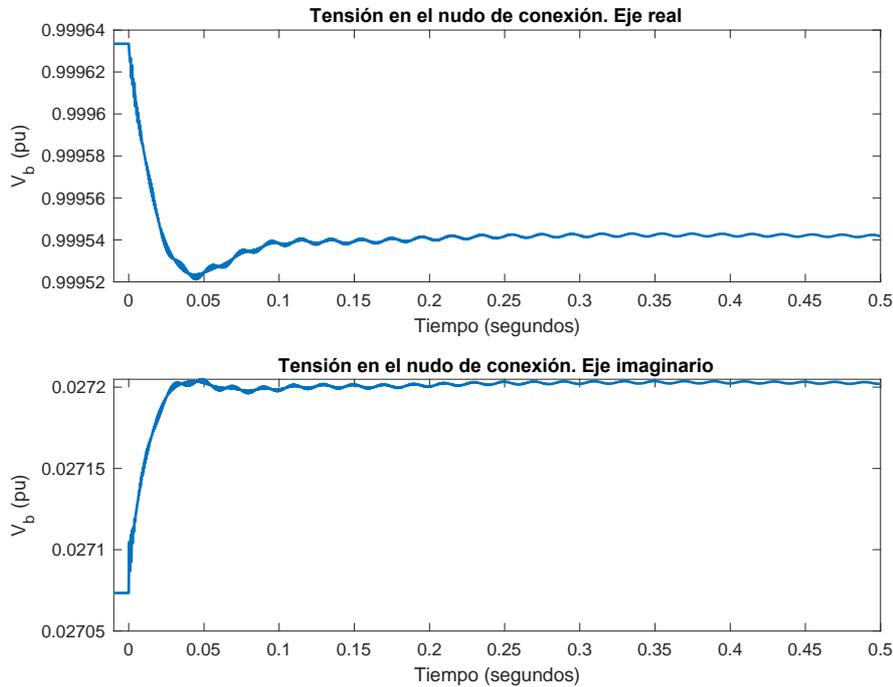


Figura 4.10: Respuesta temporal de la tensión del nudo de conexión ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (MSG), en el modelo MSG-DFIG.

La tensión punto de conexión de los aerogeneradores se representa en la Figura 4.10. Manifiesta un pequeño transitorio hasta que alcanza un nuevo régimen permanente. La oscilación termina desapareciendo en menos de 1 segundo.

4.2.4 Autovalores de la matriz de estados

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4.32 y Tabla 4.33, el modelo formado por la máquina síncrona multipolar y máquina asíncrona doblemente alimentada es estable.

Tabla 4.32: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG-DFIG.

Autovalores complejos				
Número	Parte real	Parte imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
1,2	-227.46	23426.78	0.97	3728.49
3,4	-227.40	22798.53	1.00	3628.50
5,6	-11.52	10950.20	0.11	1742.78
7,8	-15.57	10315.58	0.15	1641.78
9,10	-494.29	7767.47	6.35	1236.23
11,12	-498.13	7128.74	6.97	1134.57
13,14	-16.19	1407.23	1.15	223.97
15,16	-1.94	314.08	0.62	49.99
17,18	-44.38	44.62	70.52	7.10

19,20	-43.75	44.63	70.00	7.10
21,22	-43.75	44.63	70.00	7.10
23,24	-39.35	45.91	65.07	7.31
25,26	-39.89	45.40	66.01	7.23
27,28	-20.57	49.46	38.39	7.87
30,31	-28.60	41.41	56.84	6.59
32,33	-22.36	22.46	70.55	3.57
34,35	-12.40	12.70	69.86	2.02
36,37	-4.37	4.86	66.83	0.77
38,39	-4.60	4.59	70.81	0.73
40,41	-4.40	4.22	72.14	0.67

Tabla 4.33: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema en el escenario MSG1-MSG2.

Autovalores reales		
Número	Parte real	Constante de tiempo (s)
29	-50.65	0.0197
42	-4.47	0.224

En este escenario, sigue habiendo autovalores con un bajo amortiguamiento: los pares (5,6) y (7,8). Estos autovalores están relacionados, según muestran los factores de participación (Tabla 4.34, Tabla 4.35 y Tabla 4.36), con las dinámicas de la máquina doblemente alimentada. En concreto, con el flujo de la línea de conexión y la tensión del condensador del filtro. También el par (15,16) podría dar problemas (0.62%).

Los autovalores relacionados con las dinámicas de la red, los pares (1,2) y (3,4), tienen mayor amortiguamiento, cercano al 1%.

Tabla 4.34: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-DFIG.

Subsistema	VARIABLES de estado	1,2	3,4	5,6	7,8	9,10	11,12	13,14	15,16	17,18	19,20
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.000
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.000	0.745	0.000
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.735	0.000
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.000
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	x_{s2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
	$v_{c d}$	0.005	0.005	0.009	0.008	0.281	0.215	0.000	0.000	0.000	0.000

	$v_{c q}$	0.005	0.005	0.007	0.008	0.215	0.281	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.057	0.057	0.020	0.018	0.328	0.251	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.057	0.057	0.018	0.020	0.256	0.336	0.000	0.000	0.014	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.000	0.000	0.011	0.000
Máquina 2	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.090	0.080	0.005	0.004	0.000	0.324	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.081	0.091	0.004	0.005	0.000	0.318	0.000	0.000
	$\Psi_{r d}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000
	$\Psi_{r q}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.702
	s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.702
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{r1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
	x_{r2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
	x_s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c d}$	0.006	0.006	0.264	0.235	0.007	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.006	0.006	0.235	0.265	0.005	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.041	0.042	0.204	0.182	0.001	0.001	0.000	0.197	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.041	0.041	0.183	0.206	0.000	0.001	0.000	0.211	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Red	$v_{b r}$	0.261	0.261	0.008	0.007	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{b i}$	0.261	0.260	0.007	0.008	0.003	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.348	0.349	0.050	0.044	0.049	0.037	0.000	0.018	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.349	0.348	0.044	0.050	0.038	0.050	0.000	0.019	0.002	0.000

Tabla 4.35: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema MSG-DFIG (continuación).

Subsistema	Variables de estado	21,22	23,24	25,26	27,28	30,31	32,33	34,35	36,37	38,39	40,41
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.702	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.759	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.009	0.000
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.042	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_c^2	0.000	0.083	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063	0.684	0.033

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	x_{a1}	0.000	0.045	0.001	0.002	0.003	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.741	0.002	0.000	0.000	0.004	0.000	0.003	0.037	0.002
	x_{a3}	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.058	0.665	0.035
	x_{s1}	0.702	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{cd}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{cq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{tr}	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
	Ψ_{ti}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.706	0.000	0.000	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.712	0.000	0.000	0.000	0.000
Máquina 2	Ψ_{sd}	0.000	0.000	0.000	0.007	0.004	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{sq}	0.000	0.000	0.000	0.012	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{rd}	0.000	0.000	0.010	0.601	0.032	0.001	0.051	0.005	0.000	0.003
	Ψ_{rq}	0.000	0.001	0.000	0.031	0.615	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ad}	0.000	0.002	0.716	0.013	0.003	0.000	0.004	0.005	0.000	0.003
	Ψ_{aq}	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	s	0.000	0.000	0.001	0.092	0.003	0.000	0.027	0.292	0.033	0.391
	v_c^2	0.000	0.000	0.069	0.011	0.001	0.000	0.037	0.422	0.037	0.299
	x_{a1}	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.002	0.701	0.013	0.003	0.000	0.006	0.023	0.002	0.015
	x_{a3}	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000	0.011	0.387	0.036	0.316
	x_{r1}	0.000	0.001	0.000	0.025	0.618	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000
	x_{r2}	0.000	0.000	0.007	0.498	0.032	0.001	0.068	0.005	0.001	0.006
	x_s	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.008	0.271	0.032	0.411
	v_{cd}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v_{cq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ψ_{tr}	0.000	0.000	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	0.003	0.001	0.003	
Ψ_{ti}	0.000	0.000	0.000	0.024	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.036	0.001	0.000	0.651	0.006	0.001	0.003	
θ_{PLL}	0.000	0.000	0.001	0.135	0.005	0.001	0.620	0.004	0.001	0.002	
Red	v_{br}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{bi}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.36: Módulo de las participaciones de los autovalores reales del sistema MSG-DFIG.

Subsistema	VARIABLES DE ESTADO	29	42	
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	
	$\Psi_{s q}$	0.001	0.000	
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	
	v_c^2	0.000	0.000	
	x_{a1}	0.000	0.000	
	x_{a2}	0.000	0.000	
	x_{a3}	0.000	0.000	
	x_{s1}	0.000	0.000	
	x_{s2}	0.998	0.000	
	ω_r	0.001	0.000	
	x_{ω_r}	0.000	1.000	
	$v_{c d}$	0.000	0.000	
	$v_{c q}$	0.000	0.000	
	Ψ_{tr}	0.000	0.000	
	Ψ_{ti}	0.000	0.000	
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	
	θ_{PLL}	0.000	0.000	
	Máquina 2	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000
		$\Psi_{s q}$	0.000	0.000
$\Psi_{r d}$		0.000	0.000	
$\Psi_{r q}$		0.000	0.000	
$\Psi_{a d}$		0.000	0.000	
$\Psi_{a q}$		0.000	0.000	
s		0.000	0.000	
v_c^2		0.000	0.000	
x_{a1}		0.000	0.000	
x_{a2}		0.000	0.000	
x_{a3}		0.000	0.000	
x_{r1}		0.000	0.000	
x_{r2}		0.000	0.000	
x_s		0.000	0.000	
$v_{c d}$		0.000	0.000	
$v_{c q}$		0.000	0.000	
Ψ_{tr}		0.000	0.000	

	Ψ_{ti}	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.000
Red	v_{br}	0.000	0.000
	v_{bi}	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.000	0.000

4.2.5 Lugar de las raíces

De nuevo se calculan los autovalores del sistema para distintos valores de la impedancia de red con el objetivo de conocer los límites de estabilidad del modelo.

La Figura 4.11 y Figura 4.12 muestran el movimiento de los autovalores según crece el valor de la impedancia de la red, hasta un valor de 1.65 veces. En el detalle se aprecia mejor cómo hay tres pares de autovalores que atraviesan el eje $x=0$.

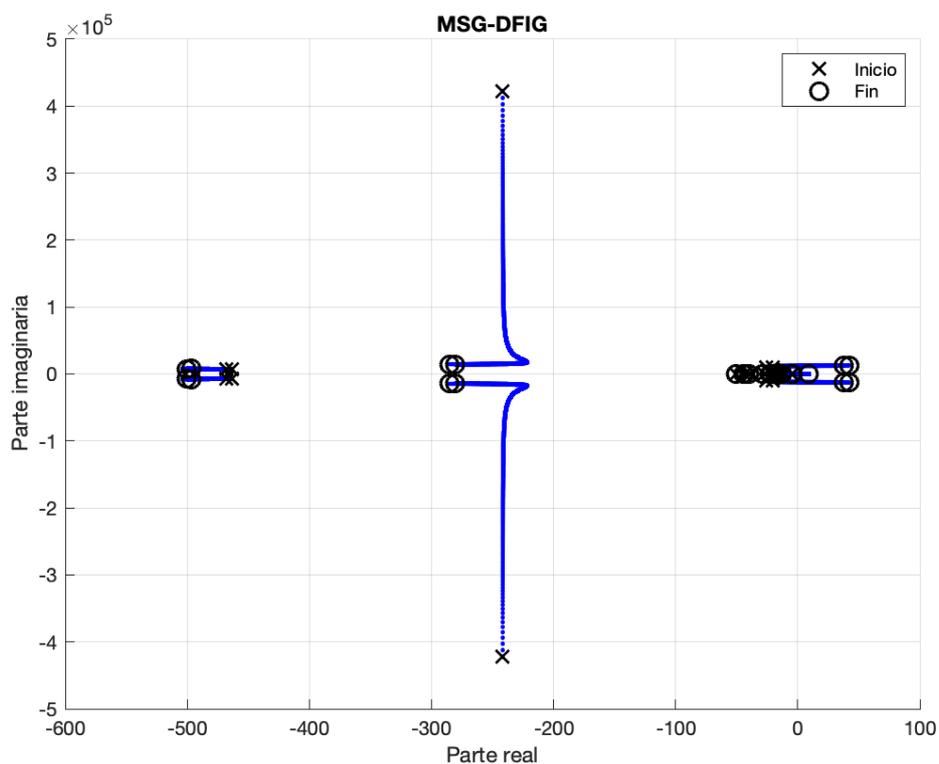


Figura 4.11: Lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.65 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.

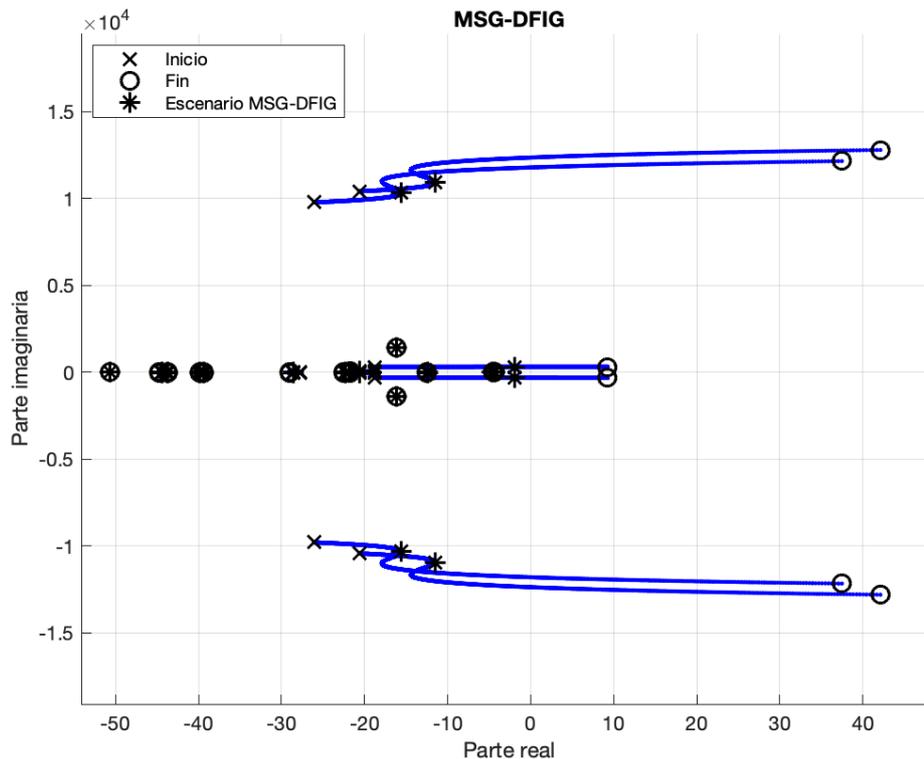


Figura 4.12: Detalle del lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.65 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.

Los pares de autovalores inestables se encuentran en la Tabla 4.37. Se trata de los pares (5,6), (7,8) y (15,16).

Analizando el progreso de los autovalores, se descubre que el par (15,16) es el que primero se mueve a la zona de parte real positiva. Su frecuencia está en el rango de la fundamental, en 50 Hz. Después le siguen los otros pares, con frecuencias altas alrededor de los 2000 Hz.

Tabla 4.37: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.65 veces la del escenario MSG-DFIG.

Autovalores complejos				
Número	Parte real	Parte imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
1,2	-28511	14661.75	1.94	2333.49
3,4	-280.52	14034.47	2.00	2233.66
5,6	42.12	12795.04	-0.33	2036.39
7,8	37.47	12154.82	-0.31	1934.50
9,10	-496.73	8219.73	6.03	1308.21
11,12	-500.60	7581.45	6.59	1206.62
13,14	-16.19	1407.23	1.15	223.97
15,16	9.27	316.45	-2.93	50.36
17,18	-44.78	43.90	71.41	6.99

19,20	-43.75	44.63	70.00	7.10
21,22	-43.75	44.63	70.00	7.10
23,24	-39.42	45.89	65.16	7.30
25,26	-39.89	45.40	66.01	7.23
27,28	-21.68	50.00	39.79	7.96
30,31	-29.05	41.04	57.78	6.53
32,33	-22.58	22.62	70.65	3.60
34,35	-12.47	12.75	69.92	2.03
36,37	-4.31	4.92	65.84	0.78
38,39	-4.60	4.59	70.79	0.73
40,41	-4.35	4.17	72.18	0.66

Tabla 4.38: Autovalores reales de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.65 veces la del escenario MSG-DFIG.

Autovalores reales		
Número	Parte real	Constante de tiempo (s)
29	-50.65	0.02
42	-4.47	0.22

Las participaciones de los autovalores inestables están indicadas en la Tabla 4.39. El par (15,16) está relacionado con las dinámicas de la máquina asíncrona doblemente alimentada (el flujo del estator y de la línea). Los otros pares (5,6) y (7,8) están ligados a los flujos de ambas máquinas y de la red.

Tabla 4.39: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos inestables del sistema cuando la impedancia de red es 1.65 veces la del escenario MSG-DFIG.

Subsistema	Variables de estado	5,6	7,8	15,16
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.001	0.000
	v_c^2	0.000	0.000	0.000
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000
	x_{s1}	0.000	0.000	0.000
	x_{s2}	0.000	0.000	0.000
	ω_r	0.000	0.000	0.000
	x_{ω_r}	0.000	0.000	0.000
	$v_{c d}$	0.143	0.109	0.000

	$v_{c\ q}$	0.101	0.131	0.000	
	$\Psi_{t\ r}$	0.461	0.354	0.000	
	$\Psi_{t\ i}$	0.329	0.427	0.000	
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	
	θ_{PLL}	0.001	0.001	0.000	
Máquina 2	$\Psi_{s\ d}$	0.125	0.096	0.329	
	$\Psi_{s\ q}$	0.093	0.120	0.324	
	$\Psi_{r\ d}$	0.001	0.001	0.000	
	$\Psi_{r\ q}$	0.001	0.001	0.005	
	$\Psi_{a\ d}$	0.000	0.000	0.000	
	$\Psi_{a\ q}$	0.000	0.000	0.000	
	s	0.000	0.000	0.000	
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	
	x_{r1}	0.000	0.000	0.001	
	x_{r2}	0.000	0.000	0.000	
	x_s	0.000	0.000	0.000	
	$v_{c\ d}$	0.503	0.387	0.000	
	$v_{c\ q}$	0.370	0.480	0.000	
	$\Psi_{t\ r}$	0.701	0.540	0.198	
	$\Psi_{t\ i}$	0.513	0.663	0.213	
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	
	θ_{PLL}	0.002	0.003	0.002	
	Red	$v_{b\ r}$	0.363	0.276	0.000
		$v_{b\ i}$	0.253	0.329	0.000
i_r^{red}		1.005	0.768	0.029	
i_i^{red}		0.713	0.926	0.031	

El último valor de la impedancia de la red para el cual el sistema mantiene todos sus autovalores con parte real negativa es:

$$R_g = 0.0278 \text{ pu}$$

$$L_g = 0.0181 \text{ pu}$$

4.3 DFIG-DFIG

En este modelo está formado por los siguientes subsistemas:

- Subsistema de la red,
- Subsistema de la máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG 1),
- Subsistema de la máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG 2).

4.3.1 Parámetros del sistema

La Tabla 4.40 recoge los datos de los parámetros de la red.

Tabla 4.40: Parámetros de la red

Parámetros de la red	
r_{red}	0.0032 pu
l_{red}	0.032 pu
c_{red}	0.0043 pu

La Tabla 4.41,

Tabla 4.42, Tabla 4.43, Tabla 4.44 y Tabla 4.45 presentan los parámetros del subsistema máquina 1, que se corresponde con una máquina asíncrona doblemente alimentada.

Tabla 4.41: Parámetros de la máquina síncrona multipolar en el subsistema máquina 1.

Parámetros de DFIG	
r_s	0.01 pu
l_s	0.15 pu
r_r	0.01 pu
l_r	0.15 pu
l_m	5 pu
H	3 s

Tabla 4.42: Parámetros del convertidor en el subsistema máquina 1.

Parámetros de DFIG	
r_a	0.06 pu
l_a	0.6 pu
c	0.05 pu

Tabla 4.43: Parámetros del filtro en el subsistema máquina 1.

Parámetros de DFIG	
n	35
r_{fm}	0 pu
c_{fm}	0.02 pu

Tabla 4.44: Parámetros de la línea en el subsistema máquina 1.

Parámetros de DFIG	
$l_{línea 1}$	0.18 pu
$r_{línea 1}$	0.018 pu

Tabla 4.45: Parámetros de los controladores PI en el subsistema máquina 1.

Parámetros de DFIG	
K_{Pa}	0.2742
K_{Ia}	29.8416
K_P	0.1547
K_I	14.7035
K_{Pv}	-0.4272
K_{Iv}	-3.8140
K_{Ps}	104.6036
K_{Is}	933.9607
$K_{P\theta}$	-52.5000
$K_{I\theta}$	-1406.2

Respecto al subsistema 2, la máquina se define con los mismos parámetros que la máquina 1.

En este caso, la relación de cortocircuito de la red es:

$$SCR = \frac{S_{cc}}{P_N} = \frac{1}{2 z_{cc}} = \frac{1}{2 \sqrt{0.0032^2 + 0.032^2}} = 15.31$$

Este SCR denota que la red es “fuerte”.

4.3.2 Condiciones iniciales

Los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la red se encuentran en la Tabla 4.46.

Tabla 4.46: Condiciones iniciales del subsistema red en el escenario DFIG-DFIG.

Condiciones iniciales de la red (pu).	
Ψ_r^{red}	-0.0519
Ψ_i^{red}	-0.0027
v_{br}	0.9986
v_{bi}	0.0522

Los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la máquina 1 están en la Tabla 4.47.

Tabla 4.47: Condiciones iniciales del subsistema máquina 1 en el escenario DFIG-DFIG.

Condiciones iniciales DFIG (pu).	
Ψ_{sd}	0.0020
Ψ_{sq}	-1.0339
Ψ_{ad}	0.1069

Ψ_{aq}	0.1756
x_{a1}	0.0176
x_{a2}	0.0107
x_{a3}	0.1781
v_c^2	1.0000
Ψ_{rd}	0.2976
Ψ_{rq}	-1.0032
x_{r1}	0
x_{r2}	0.0100
s	0.1648
x_s	1.0000
v_{cd}	1.0242
v_{cq}	0
Ψ_{tr}	-0.1438
Ψ_{ti}	-0.0079
$x_{\omega_{PLL}}$	0
θ_{PLL}	-0.1411

Dado que los parámetros de las máquinas 1 y 2 son idénticas, los valores de las condiciones iniciales de las variables de estado de la máquina 2 también lo son (Tabla 4.47).

4.3.1 Simulación en el dominio del tiempo

En este apartado se muestran las simulaciones lineales del escenario DFIG-DFIG. El sistema parte de las condiciones iniciales anteriores y en $t=0s$ se aplica un escalón del 10% a la consigna de corriente reactiva del convertidor de red (i_{aq}^{ref}) de la máquina 1 (DFIG).

Las respuestas temporales confirman que el sistema es estable, pues todas las oscilaciones se extinguen tras unos milisegundos.

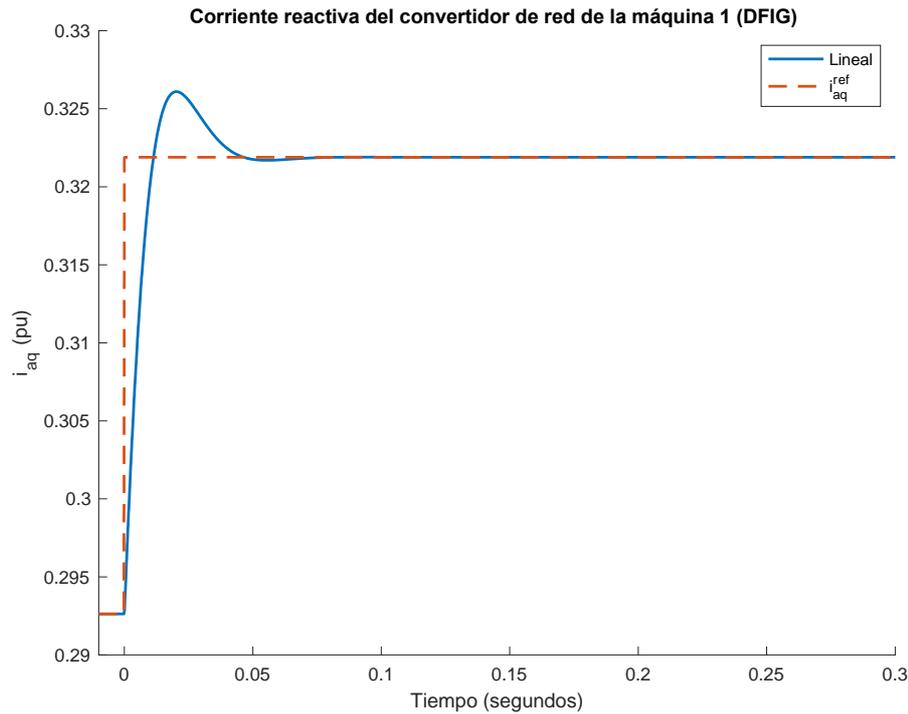


Figura 4.13: Respuesta temporal de la corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (DFIG) ante un escalón en la consigna de la misma (i_{aq}^{ref}). Escenario DFIG-DFIG.

La Figura 4.13 representa la corriente reactiva del convertidor de red tras el escalón. En menos de 100 ms la corriente logra seguir la nueva consigna.

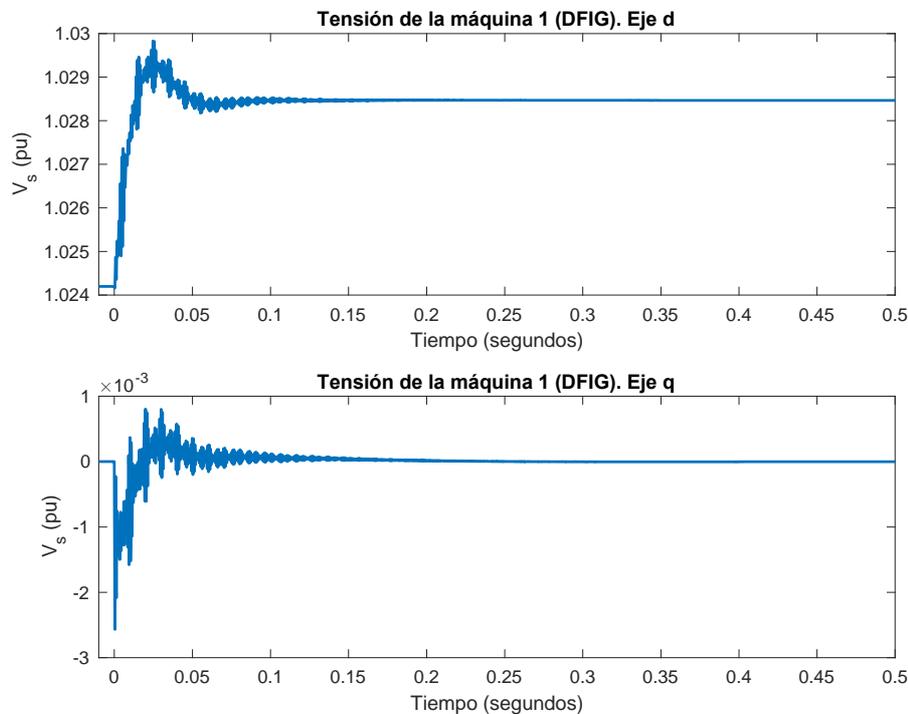


Figura 4.14: Respuesta temporal de la tensión de la máquina 1 (DFIG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (DFIG). Escenario DFIG-DFIG.

La tensión de la máquina (Figura 4.14) presenta una pequeña oscilación tras la perturbación. No obstante, se alcanza un nuevo punto de operación y la oscilación desaparece antes de 200 ms.

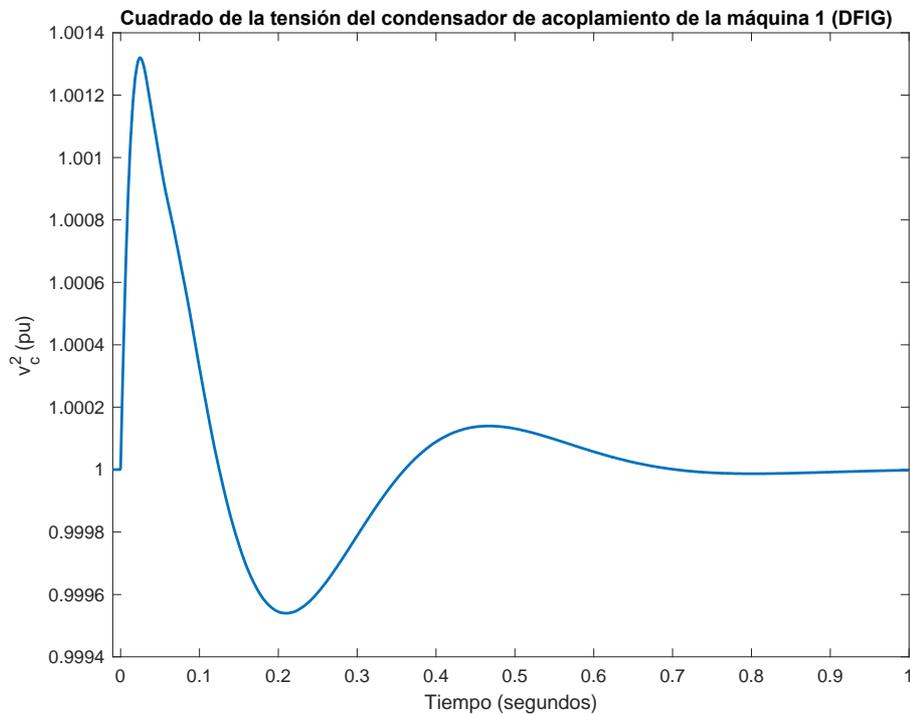


Figura 4.15: Respuesta temporal del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina 1 (DFIG) ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red. Escenario DFIG-DFIG.

En la Figura 4.15 se representa la evolución del cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento de la máquina a la que se aplica el escalón. La magnitud de la oscilación es despreciable y antes de 1 segundo se alcanza de nuevo el valor previo.

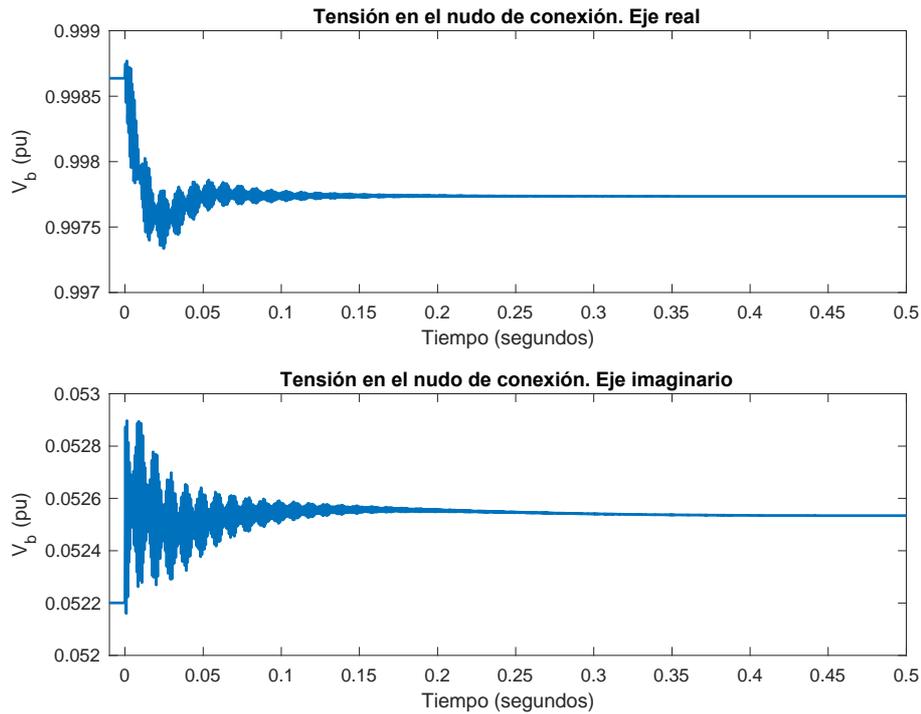


Figura 4.16: Respuesta temporal de la tensión del nudo de conexión ante un escalón en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1 (DFIG). Escenario DFIG-DFIG.

El impacto del escalón en la máquina 1 crea una variación de la tensión del nudo de conexión (Figura 4.16). Dicha variación es prácticamente inapreciable y por tanto, no hay un impacto notable en la red.

4.3.2 Autovalores de la matriz de estados

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 4.48, el caso de estudio formado por dos máquinas asíncronas doblemente alimentadas es estable.

Tabla 4.48: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema en el escenario DFIG-DFIG.

Autovalores complejos				
Número	Parte real	Parte imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
1,2	-16.11	21255.64	0.08	3382.94
3,4	-16.27	20627.37	0.08	3282.95
5,6	-30.27	8183.26	0.37	1302.41
7,8	-21.27	7545.13	0.28	1200.84
9,10	-39.22	6944.92	0.56	1105.32
11,12	-30.35	6303.27	0.48	1003.2
13,14	-18.66	306.61	6.07	48.80
15,16	-16.19	306.55	5.27	48.79
17,18	-87.50	89.27	70.00	14.21
19,20	-87.50	89.27	70.00	14.21

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

21,22	-78.96	93.10	64.68	14.82
23,24	-78.91	93.06	64.67	14.81
25,26	-48.63	103.45	42.54	16.46
27,28	-38.02	102.35	34.82	16.29
29,30	-64.06	85.79	59.83	13.65
31,32	-55.68	82.66	55.87	13.16
33,34	-26.13	25.64	71.37	4.08
35,36	-25.71	25.19	71.44	4.01
37,38	-8.72	9.32	68.30	1.48
39,40	-8.71	9.13	69.01	1.45
41,42	-8.93	8.74	71.46	1.39
43,44	-8.86	8.53	72.02	1.36

En este caso, hay dos pares de autovalores complejos (1,2) y (3,4), que tienen un amortiguamiento extremadamente bajo (0.08%). Estos autovalores están relacionados, según muestran los factores de participación (Tabla 4.49 y Tabla 4.50), con las dinámicas de la red.

Además, en el sistema hay otros autovalores con un amortiguamiento por debajo del 1%. Son, mencionados en orden creciente de amortiguamiento: los pares (7,8), (5,6), (11,12) y (9,10). Están relacionados con la línea de conexión de cada máquina y sus filtros.

En resumen, los autovalores de frecuencias más altas tienen un amortiguamiento bajo, pudiendo generar una inestabilidad en otros escenarios.

Tabla 4.49: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema DFIG-DFIG.

Subsistema	Variables de estado	1,2	3,4	5,6	7,8	9,1	11,12	13,14	15,16	17,18	19,20	21,22	23,24	
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.038	0.033	0.051	0.043	0.164	0.190	0.000	0.000	0.000	0.000	
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.033	0.038	0.044	0.052	0.158	0.186	0.000	0.000	0.000	0.000	
	$\Psi_{r d}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.014	0.013	0.000	0.000	0.010	0.005	
	$\Psi_{r q}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.352	0.356	
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.372	0.355	0.000	
	s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.041
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.372	0.355	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.334	0.338
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
	x_{r1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{r2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.008	0.005
	x_s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$v_{c d}$	0.006	0.006	0.140	0.122	0.134	0.116	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	$v_{c q}$	0.006	0.006	0.122	0.140	0.115	0.135	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.088	0.088	0.169	0.148	0.084	0.072	0.108	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.088	0.088	0.149	0.171	0.072	0.085	0.113	0.131	0.000	0.000	0.001	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Máquina 2	$\Psi_{s d}$	0.000	0.000	0.038	0.033	0.051	0.043	0.164	0.190	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{s q}$	0.000	0.000	0.033	0.038	0.044	0.052	0.158	0.186	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{r d}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.014	0.013	0.000	0.000	0.010	0.005
	$\Psi_{r q}$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.352	0.356
	$\Psi_{a q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.355	0.372	0.000	0.000
	s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001
	v_c^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.041
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.355	0.372	0.000	0.000
	x_{a2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.334	0.338
	x_{a3}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
	x_{r1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{r2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.008	0.005
	x_s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c d}$	0.006	0.006	0.140	0.122	0.134	0.116	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{c q}$	0.006	0.006	0.122	0.140	0.115	0.135	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t r}$	0.088	0.088	0.169	0.148	0.084	0.072	0.108	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{t i}$	0.088	0.088	0.149	0.171	0.072	0.085	0.113	0.131	0.000	0.000	0.001	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	θ_{PLL}	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Red	$v_{b r}$	0.262	0.262	0.013	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$v_{b i}$	0.262	0.262	0.011	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.426	0.427	0.147	0.128	0.000	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_i^{red}	0.427	0.426	0.128	0.148	0.000	0.000	0.000	0.095	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.50: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos del sistema DFIG-DFIG (continuación).

Subsistema	Variables de estado	25,26	27,28	29,3	31,32	33,34	35,36	37,38	39,40	41,42	43,44
Máquina 1	$\Psi_{s d}$	0.016	0.018	0.002	0.002	0.003	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
	$\Psi_{s q}$	0.006	0.006	0.008	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{r d}$	0.314	0.304	0.001	0.003	0.020	0.028	0.003	0.002	0.002	0.001
	$\Psi_{r q}$	0.001	0.003	0.314	0.303	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$\Psi_{a d}$	0.012	0.007	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

	Ψ_{aq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	s	0.050	0.050	0.000	0.001	0.010	0.013	0.152	0.112	0.238	0.196
	v_c^2	0.007	0.006	0.000	0.000	0.013	0.019	0.209	0.246	0.111	0.147
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.010	0.006	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.006	0.003	0.003
	x_{a3}	0.001	0.001	0.000	0.000	0.004	0.006	0.200	0.241	0.114	0.154
	x_{r1}	0.001	0.002	0.313	0.303	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{r2}	0.259	0.244	0.001	0.004	0.026	0.037	0.002	0.002	0.002	0.002
	x_s	0.004	0.004	0.000	0.000	0.003	0.004	0.146	0.110	0.242	0.205
	v_{cd}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{cq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{tr}	0.023	0.018	0.008	0.007	0.001	0.001	0.004	0.008	0.008	0.004
	Ψ_{ti}	0.005	0.008	0.015	0.014	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	$x_{\omega_{PLL}}$	0.015	0.021	0.002	0.002	0.336	0.327	0.003	0.002	0.001	0.002
	θ_{PLL}	0.060	0.079	0.005	0.008	0.322	0.308	0.002	0.002	0.000	0.001
Máquina 2	Ψ_{sd}	0.016	0.018	0.002	0.002	0.003	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
	Ψ_{sq}	0.006	0.006	0.008	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{rd}	0.314	0.304	0.001	0.003	0.020	0.028	0.003	0.002	0.002	0.001
	Ψ_{rq}	0.001	0.003	0.314	0.303	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ψ_{ad}	0.012	0.007	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001
	Ψ_{aq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	s	0.050	0.050	0.000	0.001	0.010	0.013	0.152	0.112	0.238	0.196
	v_c^2	0.007	0.006	0.000	0.000	0.013	0.019	0.209	0.246	0.111	0.147
	x_{a1}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{a2}	0.010	0.006	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.006	0.003	0.003
	x_{a3}	0.001	0.001	0.000	0.000	0.004	0.006	0.200	0.241	0.114	0.154
	x_{r1}	0.001	0.002	0.313	0.303	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x_{r2}	0.259	0.244	0.001	0.004	0.026	0.037	0.002	0.002	0.002	0.002
	x_s	0.004	0.004	0.000	0.000	0.003	0.004	0.146	0.110	0.242	0.205
	v_{cd}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v_{cq}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ψ_{tr}	0.023	0.018	0.008	0.007	0.001	0.001	0.004	0.008	0.008	0.004	
Ψ_{ti}	0.005	0.008	0.015	0.014	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
$x_{\omega_{PLL}}$	0.015	0.021	0.002	0.002	0.336	0.327	0.003	0.002	0.001	0.002	
θ_{PLL}	0.060	0.079	0.005	0.008	0.322	0.308	0.002	0.002	0.000	0.001	
Red	v_{br}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	v_{bi}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	i_r^{red}	0.017	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.006	0.000

	i_i^{red}	0.003	0.000	0.011	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
--	--------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

4.3.3 Lugar de las raíces

Para completar el estudio del caso DFIG-DFIG, se calcula el lugar de las raíces para los distintos valores de la impedancia de red, de 0 a 1.5 veces la del caso base. El resultado se encuentra en la Figura 4.17. La Figura 4.18 es un detalle ampliado de la zona próxima al eje real positivo.

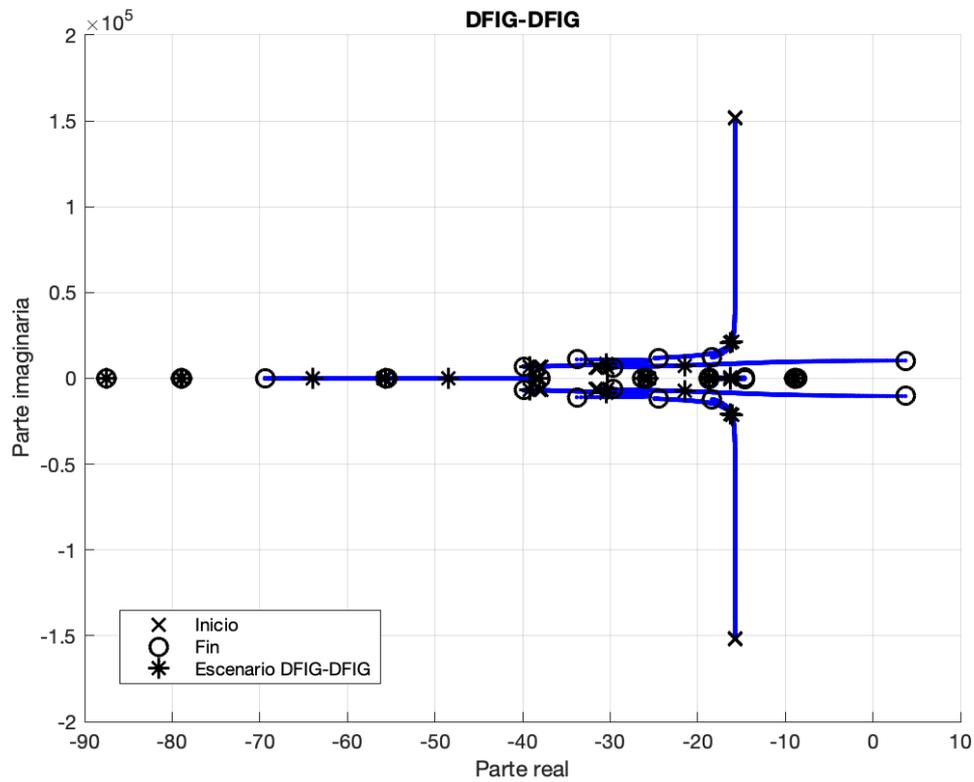


Figura 4.17: Lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.

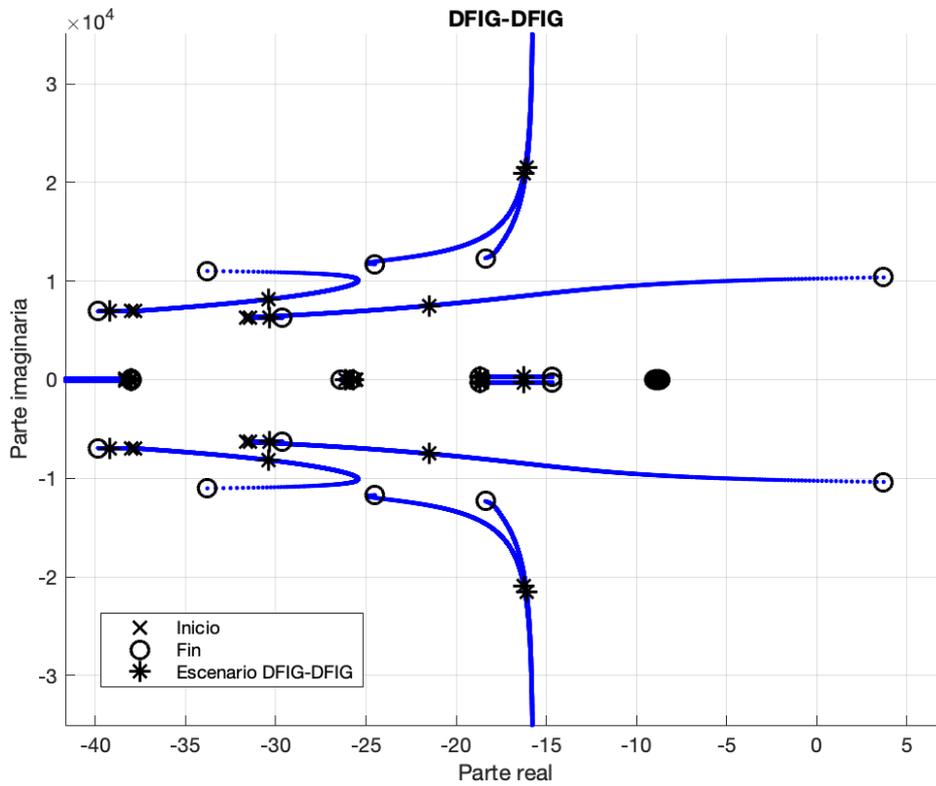


Figura 4.18: Detalle del lugar de las raíces, variando la impedancia de la red entre 0 y 1.5 veces la impedancia con respecto al escenario elegido.

Se aprecia que hay un par que se mueve hacia el eje real positivo. Se trata de los pares de autovalores (7,8), tal y como indica la Tabla 4.51. Este par también es de alta frecuencia.

Tabla 4.51: Autovalores complejos de la matriz de estados del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario DFIG-DFIG.

Autovalores complejos				
Número	Parte real	Parte imaginaria	Amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)
1,2	-18.38	12326.21	0.15	1961.78
3,4	-24.50	11704.81	0.21	1862.88
5,6	-33.80	11022.13	0.31	1754.23
7,8	3.71	10373.65	-0.04	1651.02
9,10	-39.84	6945.06	0.57	1105.34
11,12	-29.65	6303.41	0.47	1003.22
13,14	-18.66	306.61	6.07	48.80
15,16	-14.65	306.69	4.77	48.81
17,18	-87.50	89.27	70.00	14.21
19,20	-87.50	89.27	70.00	14.21
21,22	-79.00	93.16	64.68	14.83
23,24	-78.91	93.06	64.67	14.81

25,26	-55.47	103.46	47.25	16.47
27,28	-69.40	87.28	62.24	13.89
29,30	-38.01	102.40	34.80	16.30
31,32	-55.68	82.66	55.87	13.16
33,34	-26.39	25.91	71.35	4.12
35,36	-25.79	25.18	71.56	4.01
37,38	-8.72	9.32	68.31	1.48
39,40	-8.98	8.83	71.31	1.41
41,42	-8.68	9.06	69.16	1.44
43,44	-8.86	8.54	72.02	1.36

Analizando las participaciones de los autovalores inestables en la Tabla 4.52, se concluye que los autovalores están relacionados con los flujos de la red y de las líneas de cada máquina.

Tabla 4.52: Módulo de las participaciones de los autovalores complejos inestables del sistema cuando la impedancia de red es 1.5 veces la del escenario DFIG-DFIG.

Subsistema	VARIABLES DE ESTADO	7,8	Subsistema	VARIABLES DE ESTADO	7,8
Máquina 1, Máquina 2	$\Psi_{s d}$	0.053	Red	$v_{b r}$	0.514
	$\Psi_{s q}$	0.069		$v_{b i}$	0.649
	$\Psi_{r d}$	0.001		i_r^{red}	2.114
	$\Psi_{r q}$	0.001		i_i^{red}	2.706
	$\Psi_{a d}$	0.000			
	$\Psi_{a q}$	0.000			
	s	0.000			
	v_c^2	0.000			
	x_{a1}	0.000			
	x_{a2}	0.000			
	x_{a3}	0.000			
	x_{r1}	0.000			
	x_{r2}	0.000			
	x_s	0.000			
	$v_{c d}$	0.364			
	$v_{c q}$	0.469			
	$\Psi_{t r}$	1.109			
	$\Psi_{t i}$	1.433			
	$x_{\omega PLL}$	0.000			
	θ_{PLL}	0.004			

El último valor de la impedancia de la red para el cual el sistema mantiene todos sus autovalores con parte real negativa es:

$$R_g = 0.0049 \text{ pu}$$

$$L_g = 0.049 \text{ pu}$$

4.4 Conclusiones parciales

Los escenarios planteados son estables para valores de impedancia de red que se corresponden altas potencias de cortocircuito y, por tanto, son redes “fuertes” (Tabla 4.53).

Tabla 4.53: Relaciones de cortocircuito de los escenarios elegidos

Escenario	SCR (pu)
MSG-MSG	30.62
MSG-DFIG	16.77
DFIG-DFIG	15.31

A continuación se muestran las conclusiones parciales que se extraen de cada metodología.

4.4.1 Respuesta lineal en el dominio del tiempo

En los tres escenarios se ha simulado la introducción de un escalón del 10% en la consigna de corriente reactiva del convertidor de red de la máquina 1.

Los resultados han sido favorables: en un tiempo menor a 1 segundo se llega a un nuevo punto de operación y las oscilaciones se extinguen.

4.4.2 Autovalores y participaciones

El análisis por inspección de los autovalores de la matriz de estados ha sido satisfactorio. Los tres modelos planteados son estables para los parámetros con los que han sido definidos.

- En el escenario MSG-MSG hay 2 pares de autovalores de alta frecuencia con amortiguamiento del 0.01%. Se corresponden con los flujos por la red. Estos autovalores son los que se vuelven inestables tras aumentar la impedancia de la red.

- En el escenario MSG-DFIG hay 3 pares de autovalores con bajo amortiguamiento (menor del 1%). Se relacionan con el flujo de la línea de conexión y la tensión del condensador del filtro en la máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG). De nuevo, estos son los autovalores que se desplazan al eje real positivo tras elevar la impedancia de la red.

- En el escenario DFIG-DFIG hay 6 pares de autovalores con un amortiguamiento inferior al 1%. Dichos autovalores tienen como frecuencias asociadas las más altas del sistema. Están relacionados con los flujos de la red y de las líneas de cada máquina, también con la tensión del condensador del filtro.

4.4.3 Lugar de las raíces

El análisis del lugar de las raíces de cada escenario muestra que aparecen inestabilidades en el sistema.

En la Tabla 4.54 se encuentra un resumen de los resultados del análisis de sensibilidad de la impedancia de la red.

Tabla 4.54: Resultados de los valores límite de la impedancia de red para cada escenario.

Límite de estabilidad para la impedancia de la red		
Escenario	R_g	L_g
MSG-MSG	0.0020	0.0200
MSG-DFIG	0.0278	0.0181
DFIG-DFIG	0.0049	0.0490

Se comprueba que:

-El escenario MSG-MSG admite una impedancia (resistencia y reactancia) de la red relativamente baja.

- El escenario MSG-DFIG tiene unos resultados algo particulares, debido a que se ha mantenido la relación R/X del caso base. En cualquier caso, admite una resistencia alta y una reactancia más ajustada.

- El escenario DFIG-DFIG es el que mayor reactancia de la red permite. Este escenario es el más conveniente para una red convencional, en la cual la reactancia es aproximadamente del orden de 10 veces mayor que la resistencia de la línea.

5. CONCLUSIONES

A continuación se resumen las conclusiones que se han extraído durante el desarrollo del proyecto.

5.1 Conclusiones sobre la metodología

El sistema se ha modelado en espacio de estados, obteniéndose un modelo lineal que integra los submodelos de las máquinas y de la red. Las herramientas usadas en el análisis del problema han sido:

Respuesta lineal en el dominio del tiempo.

Permite simular la respuesta lineal de las variables del sistema a partir de las matrices de estados del sistema ante una entrada determinada. De esta manera, se consiguen buenas aproximaciones de los valores de las variables de estado y algebraicas con un tiempo de simulación corto.

La limitación de esta técnica radica en la magnitud de la perturbación. Es decir, la linealización del modelo alrededor del punto de operación ofrece resultados precisos cuando el nuevo régimen permanente se encuentra próximo. En caso contrario, se debe recurrir a la simulación no lineal. Tampoco se debe usar esta técnica cuando el sistema es inestable.

Autovalores y participaciones.

Los autovalores de la matriz de estados aportan una gran información. En primer lugar, permiten analizar la estabilidad del sistema de forma muy rápida. También ofrecen información complementaria sobre de la respuesta temporal, en función de la parte real de los autovalores.

Otros datos interesantes son sus frecuencias, el amortiguamiento en autovalores complejos o las constantes de tiempo de los autovalores reales.

Los módulos de participaciones de los autovalores permiten relacionar cada autovalor con las variables de estado. Integrando estas relaciones se puede encontrar el origen de la inestabilidad.

Lugar de las raíces.

El lugar de las raíces es útil para realizar un análisis de sensibilidad. Está basado en el cálculo de los autovalores de la matriz de estados en cada valor del parámetro a considerar. Es muy valioso a la hora de validar un sistema.

5.2 Conclusiones sobre los resultados

Los *escenarios* elegidos (MSG-MSG, MSG-DFIG y DFIG-DFIG) son *estables* en redes de alta potencia de cortocircuito. Se verifica a través de las simulaciones lineales en el dominio del tiempo y con el análisis modal de la matriz de estados.

El estudio del *lugar de las raíces* ofrece un resultado inesperado: aparecen dinámicas de rápidas frecuencias que son *inestables*. Este suceso sorprende porque en las redes con alta potencia de cortocircuito no hay constancia de que existan oscilaciones inestables. Además, las normas del acceso a la red solo establecen límites para la conexión de aerogeneradores en redes de baja potencia de cortocircuito.

Se llega a la conclusión de que estos modelos simplificados tienen limitaciones porque no describen la realidad. Por tanto, no sirven para tomar decisiones sobre el funcionamiento de los mismos.

La hipótesis más probable es que la simplificación establecida no es válida. No es correcto representar todos los generadores de un parque de forma agregada.

5.3 Recomendaciones para futuros estudios

Tal y como se ha comentado, los modelos matemáticos expuestos en este proyecto no son un reflejo de la realidad. Se podría plantear el modelo incluyendo todos los generadores del parque en cada subsistema y validar de nuevo la estabilidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [5] Real Decreto 413/2014, de 6 de junio por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos (B.O.E. núm. 140, de 10 de junio de 2014, páginas 43876 a 43978).
- [6] IEEE, “IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities”, IEEE Std. 1204-1997, 1997
- [7] Orden de 5 de septiembre de 1985 por la que se establecen normas administrativas y técnicas para funcionamiento y conexión a las redes eléctricas de centrales hidroeléctricas de hasta 5.000 kVA y centrales de autogeneración eléctrica (B.O.E. No. 219, 12 septiembre 1985, páginas 28810 a 28814).
- [8] CIRCULAR POR LA QUE SE ESTABLECE LA METODOLOGÍA Y CONDICIONES DEL ACCESO Y DE LA CONEXIÓN A LAS REDES DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LAS INSTALACIONES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA disponible en <https://www.cnmc.es/expedientes/cirde00119-1>.
- [9] NERC, Integrating Inverter-Based Resources into Low Short Circuit Strength Systems. Reliability Guideline, December 2017, disponible en <https://www.nerc.com/comm/PC Reliability Guidelines DL/Item 4a. Integrating%20 Inverter-Based Resources into Low Short Circuit Strength Systems - 2017-11-08-FINAL.pdf>.
- [10] R. Ávila-Martínez, L. Rouco, J. García-Aguilar, J. Renedo, L. Sigrist, “Impact of PLL Control on Small-Signal Stability of Wind DFIGs”, IEEE PES General Meeting, 2020.
- [11] 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.
- [12] Petar V. Kokotovic, Hassan K. Khalil (Editors), “Singular Perturbations in Systems and Control”, IEEE Press.
- [13] J. H. Chow (Editor) “Time-Scale Modeling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems”, Springer, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 46.
- [14] Wenjuan Du ; Wenkai Dong ; Haifeng Wang, “Small-signal Stability Limit of a Grid-connected PMSG Wind Farm Dominated by the Dynamics of PLLs”, To appear in IEEE Transactions on Power Systems.

- [15] L. Rouco, “Grid integration of wind power generator”, E.T.S. de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

- [16] Julio Berzal Hernández, “Control de fuentes de energía renovable como máquinas síncronas virtuales”, E.T.S. de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Septiembre 2020.

- [17] Ignacio 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.

- [18] Juan Luis Zamora. Apuntes de Control Digital.

- [19] Asociación Empresarial Eólica, “La energía eólica en España”, disponible en <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana>.

- [20] Organización de las Naciones Unidas, Objetivos del Desarrollo Sostenible, disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

7. Anexo A: Modelos matemáticos en espacio de estado

7.1 Modelos en espacio de estado

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

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}),\end{aligned}\tag{7.1}$$

donde \mathbf{G} y \mathbf{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:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C} \mathbf{X} + \mathbf{D} \mathbf{U}\end{aligned}\tag{7.2}$$

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

7.1.1 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 \mathbf{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 las *autovectores derechos* (\mathbf{v}_i) e *izquierdos* (\mathbf{w}_i), definidos como:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} \mathbf{v}_i &= \mathbf{v}_i \lambda_i \\ \mathbf{w}_i \mathbf{A} &= \lambda_i \mathbf{w}_i,\end{aligned}\tag{7.3}$$

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

$$\mathbf{w}_i^T \cdot \mathbf{v}_i = 1 \quad (7.4)$$

Detrás de estos vectores hay un significado físico:

- Los autovalores derechos señalan la repercusión que tiene cada variable de estado en el modo i-ésimo.
- Los autovalores izquierdos 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 ; \mathbf{V} , matriz de los autovectores derechos y \mathbf{W} , para los autovectores izquierdos.

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

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

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

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

$$e^{At} = \mathbf{V}e^{\Lambda t}\mathbf{W} \quad (7.5)$$

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:

$$\Delta \vec{\mathbf{x}}(t)_h = \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i e^{\lambda_i t} [\mathbf{w}_i^T \Delta \mathbf{x}(t_0)] \quad (7.6)$$

7.1.2 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:

$$p_{ji} = w_{ij}v_{ij} \quad (7.7)$$

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.

$$\sum_{j=1}^n p_{ji} = \sum_{i=1}^n p_{ji} = 1 \quad (7.8)$$

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 :

$$p_{si} = \sum_{j \in S} p_{ji} \quad (7.9)$$

7.1.3 Residuos

Sea un sistema con una variable de salida definido como:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} \Delta u(t) \\ \Delta \vec{y}(t) &= \mathbf{c} \Delta \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (7.10)$$

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

$$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - p_i} \quad (7.11)$$

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

$$R_i = \mathbf{c} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{b} \quad (7.12)$$

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

$$\mathbf{c}_{i,\Delta y} = \mathbf{c} \mathbf{v}_i \quad (7.13)$$

$$\mathbf{b}_{i,\Delta u} = \mathbf{b} \mathbf{w}_i^T \quad (7.14)$$

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:

$$R_{\Delta y / \Delta r, i} = \mathbf{w}_{\Delta x, i}^T \mathbf{b} \mathbf{c}^T \mathbf{v}_{\Delta x, i} \quad (7.15)$$

8. Anexo B: Modelo de la máquina síncrona multipolar (MSG)

En este capítulo se presentan los modelos lineal y no lineal de la máquina síncrona multipolar.

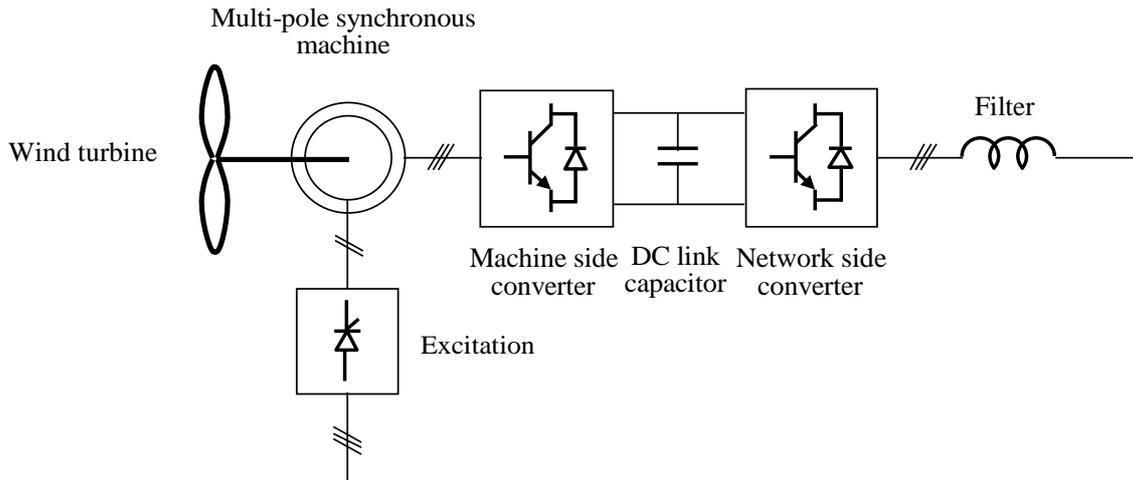


Figura 8.1: Esquema unifilar de la máquina síncrona multipolar [16].

8.1 Modelo no lineal

La máquina síncrona multipolar se modela con ecuaciones electromagnéticas y ecuaciones electromecánicas. Los modelos también incluyen sus convertidores electrónicos.

8.1.1 Modelo electromagnético

El modelo electromagnético de la máquina síncrona está definido de acuerdo a unos ejes móviles 'dq' que giran a la velocidad del rotor.

Las ecuaciones del modelo electromagnético en forma vectorial son las siguientes:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s}{dt} + j\omega_r \boldsymbol{\Psi}_s$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\Psi_{rd}}{dt}$$

donde:

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{md} \\ L_{md}^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ i_{rd} \end{bmatrix}$$

siendo:

$\mathbf{v}_s = v_{sd} + j v_{sq}$ la tensión del estator

v_{sd} y v_{sq} las componentes directa y transversa de la tensión del estator,

$\mathbf{i}_s = i_{sd} + j i_{sq}$ la corriente de estator

i_{sd} y i_{sq} las componentes directa y transversa de la corriente del estator,

$\Psi_s = \Psi_{sd} + j \Psi_{sq}$ el flujo del estator

Ψ_{sd} y Ψ_{sq} las componentes directa y transversa del flujo del estator,

\mathbf{R}_s la matriz de resistencias del estator

R_s la resistencia de arrollamiento del estator,

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

\mathbf{L}_{ss} la matriz de inductancias propia del estator:

$L_d = L_s + L_{md}$ la inductancia propia del estator en eje directo

$L_q = L_s + L_{mq}$ la inductancia propia del estator en eje transverso

L_s la inductancia de dispersión del estator

L_r la inductancia de dispersión del rotor

L_{md} la inductancia de magnetización en eje directo

L_{mq} la inductancia de magnetización en eje transverso

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}$$

\mathbf{L}_{md} la matriz de admitancias mutuas entre los circuitos de estator y rotor en eje directo:

$$\mathbf{L}_{md} = \begin{bmatrix} L_{md} \\ 0 \end{bmatrix}$$

v_{rd} la componente directa de la tensión del rotor (tensión de excitación),

i_{rd} la componente directa de la corriente del rotor (corriente de excitación),

Ψ_{rd} la componente directa del flujo de excitación del rotor (flujo de excitación),

R_r la resistencia de arrollamiento del rotor (devanado de excitación),

$L_{rr} = L_r + L_m$ la inductancia propia del rotor,

$\omega_0 = 2\pi f_0$ la velocidad base en radianes eléctricos por segundo,

ω_r la velocidad del rotor

Dichas ecuaciones escritas en forma rectangular quedan:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} \quad [8.1]$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \quad [8.2]$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{md} \\ 0 \end{bmatrix} i_{rd} \quad [8.3]$$

$$\Psi_{rd} = \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + L_{rr} i_{rd} \quad [8.4]$$

8.1.2 Modelo electromecánico

El modelo electromecánico de la máquina síncrona queda definido por la siguiente ecuación:

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = t_e - t_m \quad [8.5]$$

en la cual:

H es la inercia,

t_e es el par electromagnético:

$$t_e = \text{Im}\{\mathbf{i}_s \Psi_s^*\} = -\Psi_{sq} i_{sd} + \Psi_{sd} i_{sq} \quad [8.6]$$

t_m es el par mecánico.

8.1.3 Control de las corrientes del convertidor de máquina

Este control calcula los valores de las componentes de la tensión que deben ser aplicados por el convertidor al estator. Para ello, actúa sobre la corriente del convertidor de estator i_{sd} , i_{sq} .

Se escoge un sistema de referencia en el cual el eje q está alineado con la corriente del estator.

$$\mathbf{i}_s|_{i_{sd}=0} = j i_{sq}$$

De este modo, el par queda controlado únicamente por la componente del eje transversal del estator, i_{sq} :

$$t_e = \text{Im}\{\mathbf{i}_s \Psi_s^*\} = \Psi_{sd} i_{sq}$$

La tensión que se aplica al estator por medio del convertidor tiene la siguiente expresión (ecuaciones [8.1] y [8.3]):

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} = R_s i_{sd} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (L_d i_{sd} + L_{md} i_{rd}) - \omega_r L_q i_{sq} \\ &= R_s i_{sd} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} L_d i_{sd} - \omega_r L_q i_{sq} \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} = R_s i_{sq} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} L_q i_{sq} + \omega_r (L_d i_{sd} + L_{md} i_{rd}) \end{aligned}$$

Se observa que las ecuaciones para cada componente de la tensión están acopladas. Por ello, se calculan unas variables auxiliares v'_{sd} y v'_{sq} que permiten desacoplarlas. Estas variables se definen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} v'_{sq} &= v_{sq} - \omega_r (L_d i_{sd} + L_{md} i_{rd}) = R_s i_{sq} + L_q \frac{1}{\omega_0} \frac{d i_{sq}}{dt} \\ v'_{sd} &= v_{sd} + \omega_r L_q i_{sq} = R_s i_{sd} + L_d \frac{1}{\omega_0} \frac{d i_{sd}}{dt} \end{aligned}$$

De tal forma, que las componentes de tensión del estator en ejes directo y transversal son:

$$v_{sd} = v'_{sd} - \omega_r L_q i_{sq} \quad [8.7]$$

$$v_{sq} = v'_{sq} + \omega_r(L_d i_{sd} + L_{md} i_{rd}) \quad [8.8]$$

Los controles se diseñan para las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{i_{sq}(s)}{v'_{sq}(s)} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_q}{R_s} s} \quad [8.9]$$

$$\frac{i_{sd}(s)}{v'_{sd}(s)} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_d}{R_s} s} \quad [8.10]$$

Finalmente, las ecuaciones de los reguladores de corriente del regulador de estator quedan:

$$v'_{sd} = \left(K_{Pd} + \frac{K_{Id}}{s} \right) (i_{sd}^{ref} - i_{sd}) \quad [8.11]$$

$$v_{sd} = v'_{sd} - \omega_r L_q i_{sq} \quad [8.12]$$

$$v'_{sq} = \left(K_{Pq} + \frac{K_{Iq}}{s} \right) (i_{sq}^{ref} - i_{sq}) \quad [8.13]$$

$$v_{sq} = v'_{sq} + \omega_r(L_d i_{sd} + L_{md} i_{rd}) \quad [8.14]$$

Los esquemas de control se representan en la Figura 8.2 y la Figura 8.3.

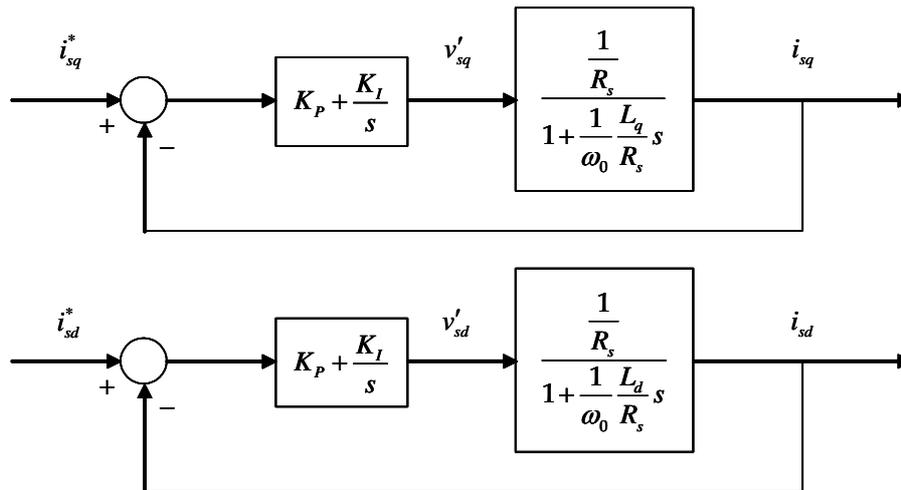


Figura 8.2: Lazos de control de las componentes de la corriente del estator [12].

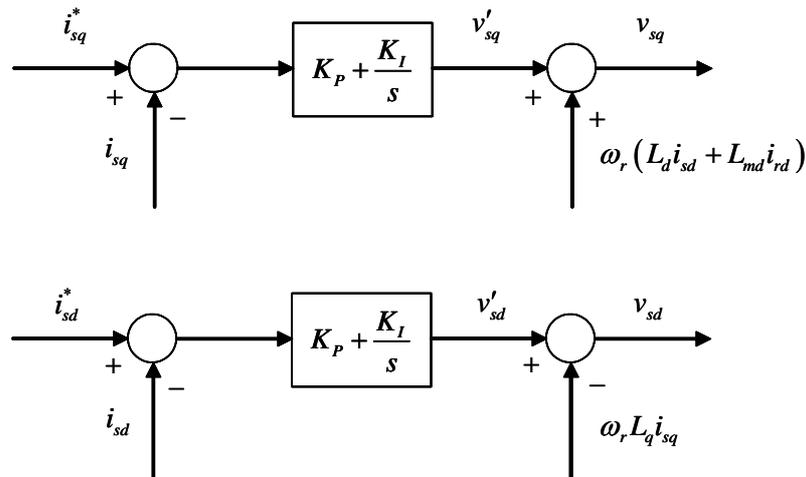


Figura 8.3: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor del estator [12].

8.1.4 Control de velocidad del rotor

La velocidad del rotor se puede calibrar modificando la consigna de la corriente del estator en eje transverso, i_{sq}^{ref} :

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = t_e - t_m$$

$$t_e = \Psi_{sd} i_{sq}$$

Entonces la ecuación del regulador es:

$$i_{sq}^{ref} = \left(K_{P\omega_r} + \frac{K_{I\omega_r}}{s} \right) (\omega_r^{ref} - \omega_r) \quad [8.15]$$

El diagrama del lazo de control de velocidad está representado en la Figura 8.4.

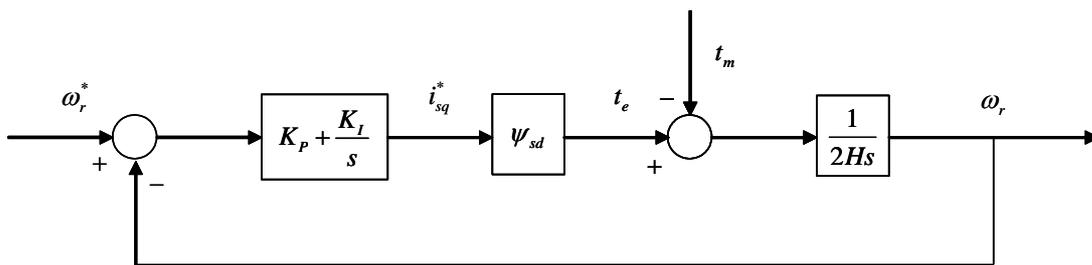


Figura 8.4: Lazo de control de velocidad [16].

8.1.5 Modelo del convertidor de red

Las ecuaciones vectoriales que rigen el funcionamiento del convertidor de red son:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R}_a \mathbf{i}_a + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\mathbf{\Psi}_a}{dt} + j\omega_s \mathbf{\Psi}_a + \mathbf{v}_a$$

$$\mathbf{\Psi}_a = \mathbf{L}_a \mathbf{i}_a$$

siendo:

$\mathbf{v} = v_d + j v_q$ la tensión de salida del convertidor

v_d y v_q las componentes directa y transversa de la tensión de salida del convertidor

$\mathbf{i}_a = i_{ad} + j i_{aq}$ la corriente del convertidor

i_{ad} y i_{aq} las componentes directa y transversa de la tensión de salida del convertidor

$\Psi_a = \Psi_{ad} + j \Psi_{aq}$ el flujo del convertidor

Ψ_{ad} y Ψ_{aq} las componentes directa y transversa del flujo del convertidor

$\mathbf{v}_a = v_{ad} + j v_{aq}$ la tensión del convertidor

\mathbf{R}_a es la matriz de resistencias del convertidor

$$\mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix}$$

L_a la inductancia de dispersión del convertidor

$$\mathbf{L}_a = \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix}$$

ω_s es la velocidad de sincronismo

Y en forma rectangular resultan:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{aq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ad} \\ \Psi_{aq} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ad} \\ \Psi_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ad} \\ v_{aq} \end{bmatrix} \quad [8.16]$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ad} \\ \Psi_{aq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{aq} \end{bmatrix} \quad [8.17]$$

8.1.6 Control de las corrientes del convertidor de red

Este control calcula la tensión de salida de la máquina síncrona multipolar. Su función es doble: compensa la potencia reactiva y controla la tensión del condensador, actuando sobre la corriente del convertidor de red i_{ad} , i_{aq} .

La expresión de la tensión se deduce a partir de la ecuaciones [8.16] y [8.17]:

$$v_d = R_a i_{ad} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{ad}}{dt} - \omega_s L_a i_{aq} + v_{ad}$$

$$v_q = R_a i_{aq} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{aq}}{dt} + \omega_s L_a i_{ad} + v_{aq}$$

Nuevamente, las dinámicas de cada componente están acopladas y es necesario definir unas variables auxiliares v'_{ad} y v'_{aq} para realizar el control adecuadamente:

$$v'_{ad} = v_d + \omega_s L_a i_{aq} - v_{ad} = R_a i_{ad} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{ad}}{dt}$$

$$v'_{aq} = v_q - \omega_s L_a i_{ad} - v_{aq} = R_a i_{aq} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{aq}}{dt}$$

De tal forma, que las componentes de tensión del estator en ejes directo y transverso son:

$$v_{ad} = v_d + \omega_s L_a i_{aq} - v'_{ad} \quad [8.18]$$

$$v_{aq} = -\omega_r L_a i_{ad} - v'_{aq} \quad [8.19]$$

El control de las corrientes del convertidor de red se diseña para las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{i_{sd}(s)}{v'_{sd}(s)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_a}{R_a} s} \quad [8.20]$$

$$\frac{i_{aq}(s)}{v'_{aq}(s)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_a}{R_a} s} \quad [8.21]$$

Finalmente, las ecuaciones de los reguladores de corriente del convertidor de red quedan:

$$v'_{ad} = \left(K_{Pa} + \frac{K_{Ia}}{s} \right) (i_{ad}^{ref} - i_{ad}) \quad [8.22]$$

$$v_{sd} = v_d + \omega_s L_a i_{aq} - v'_{ad} \quad [8.23]$$

$$v'_{aq} = \left(K_{Pa} + \frac{K_{Ia}}{s} \right) (i_{aq}^{ref} - i_{aq}) \quad [8.24]$$

$$v_{sq} = -\omega_s L_a i_{ad} - v'_{aq} \quad [8.25]$$

A continuación, la Figura 8.5 y la Figura 8.6 muestran los diagramas de bloques del sistema de control del convertidor de red.

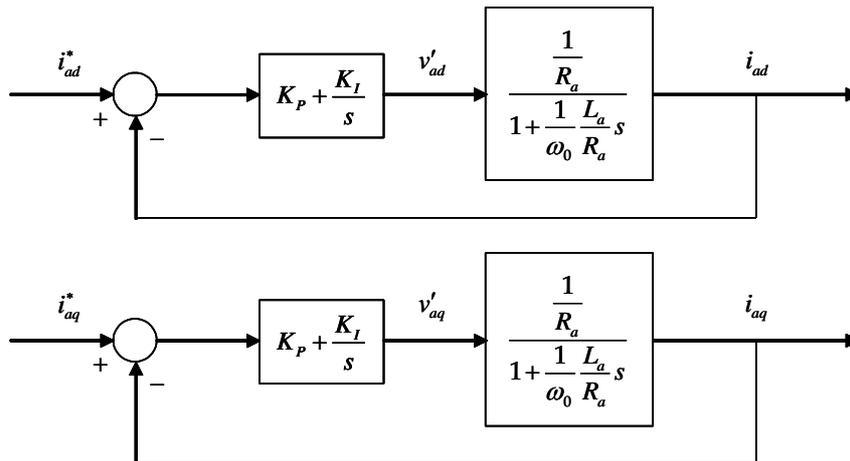


Figura 8.5: Lazos de control de las componentes de la corriente del convertidor de red [16].

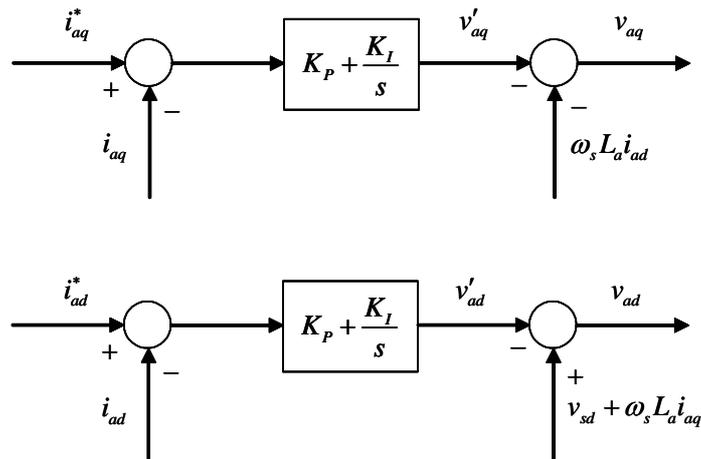


Figura 8.6: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor de red [16].

8.1.7 Modelo del condensador de acoplamiento de los convertidores de red y de máquina

La tensión del condensador de acoplamiento entre los convertidores de red y de estator se rige por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2}C \frac{d(v_c^2)}{dt} = p_s - p_a$$

siendo:

v_c^2 el cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento entre los convertidores,

p_s la potencia activa en el convertidor de estator,

$$p_s = \text{Re}\{\mathbf{v}_s \mathbf{i}_s^*\} = v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}$$

p_a la potencia activa en convertidor de red

$$p_a = \text{Re}\{\mathbf{v}_a \mathbf{i}_a^*\} = v_{ad}i_{ad} + v_{aq}i_{aq}$$

En forma rectangular:

$$\frac{1}{2}C \frac{d(v_c^2)}{dt} = (v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) - (v_{ad}i_{ad} + v_{aq}i_{aq}) \quad [8.26]$$

8.1.8 Control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de red y de máquina

Este control pretende mantener la tensión del condensador constante. Actúa sobre la consigna de corriente del convertidor en eje directo, i_{ad}^{ref} .

Otra forma de plantear el balance de energía en el condensador de acoplamiento entre convertidores es:

$$p_a = \text{Re}\{\mathbf{v} \mathbf{i}_a^*\} - p_a = v_d i_{ad} - p_a$$

$$\frac{1}{2} C \frac{d(v_c^2)}{dt} = p_s - p_a$$

La función de transferencia de este regulador es:

$$\frac{v_c^2(s)}{i_{ad}^{ref}(s)} = -v_d \frac{2}{Cs} \quad [8.27]$$

Y la ecuación del regulador de tensión del condensador de acoplamiento es:

$$i_{ad}^{ref} = \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) ((v_c^2)^{ref} - (v_c^2)) \quad [8.28]$$

En la Figura 8.7 se muestra el diagrama de bloques del regulador.

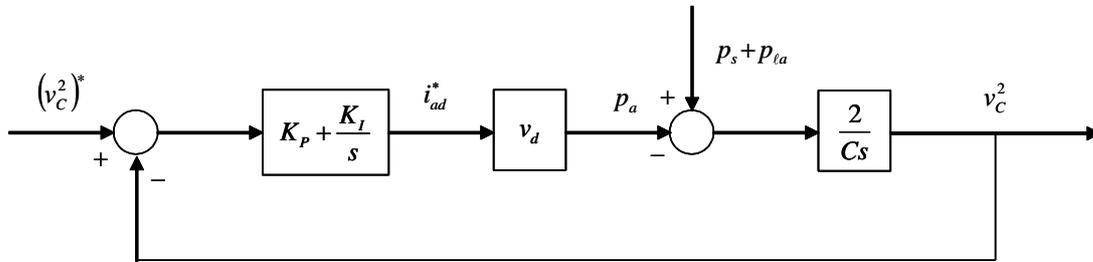


Figura 8.7: Lazo de control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de red y de máquina [16].

8.1.9 Modelo del filtro

El diseño de filtro para reducir el armónico 35 consiste en un condensador en serie con una resistencia:

$$C_f = \frac{1}{x_e n^2}$$

siendo $n=35$ y $x_e = \frac{1}{\frac{1}{l_a} + \frac{1}{l_{linea}}}$

y

$$R_f = \frac{2\zeta_f \omega_{nf} x_e}{\omega_0}$$

$$\omega_{nf} = \frac{1}{\sqrt{x_e C_f}} \omega_0$$

Las ecuaciones del sistema en forma vectorial son:

$$\mathbf{i}_t = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_f$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{R}_f \mathbf{i}_f + \mathbf{v}_{Cf}$$

$$\mathbf{i}_f = \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{C_f} \frac{d \mathbf{v}_{Cf}}{dt} + j\omega_s \mathbf{v}_{Cf}$$

donde:

$\mathbf{i}_t = i_{td} + j i_{tq}$ es la corriente que circula por la línea de salida de la máquina

i_{td} y i_{tq} son las componentes directa y transversa de la corriente que circula por la línea de salida de la máquina

$\mathbf{i}_f = i_{fd} + j i_{fq}$ es la corriente que circula por el filtro de la red

i_{td} y i_{tq} son las componentes directa y transversa de la corriente que circula por que circula por el filtro de la red

$\mathbf{v}_{Cf} = v_{cfd} + j i_{cfq}$ es la tensión del condensador del filtro

v_{cfd} y i_{cfq} son las componentes directa y transversa de la tensión del condensador del filtro

\mathbf{R}_f es la matriz resistencias del filtro

$$\mathbf{R}_f = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_f \end{bmatrix}$$

C_f es el condensador del filtro

Las ecuaciones en forma rectangular del filtro son:

$$\begin{bmatrix} i_{td} \\ i_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} \quad [8.29]$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cfd} \\ v_{cfq} \end{bmatrix} \quad [8.30]$$

$$\begin{bmatrix} i_{cfd} \\ i_{cfq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} C_f & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cfd} \\ v_{cfq} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cfd} \\ v_{cfq} \end{bmatrix} \quad [8.31]$$

8.1.10 Ecuaciones de la PLL

Explicadas en el 11.

8.1.11 Resumen

El modelo no lineal de la máquina síncrona multipolar se puede escribir de forma condensada como:

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

- Variables de estado (18):

$$\mathbf{x}^T = [\Psi_{sd} \ \Psi_{sq} \ \Psi_{ad} \ \Psi_{aq} \ x_{a1} \ x_{a2} \ x_{a3} \ v_c^2 \ x_{r1} \ x_{r2} \ \omega_r \ x_{\omega_r} \ v_{cd} \ v_{cq} \ \Psi_{tr} \ \Psi_{ti} \ x_{\omega_{PLL}} \ \theta_{PLL}]$$

- Variables de entrada (7):

$$\mathbf{u}^T = [t_m \ i_{rd} \ i_{aq}^{ref} \ v_c^{2 \ ref} \ i_{sd}^{ref} \ \omega_r^{ref} \ v_q^{ref}]$$

- Variables algebraicas (26):

$$\mathbf{z}^T = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{ad} \ i_{aq} \ v_{sd} \ v_{sq} \ v'_{sd} \ v'_{sq} \ v_{ad} \ v_{aq} \ v'_{ad} \ v'_{aq} \ i_{ad}^{ref} \ t_e \ p_s \ p_a \ i_{sq}^{ref} \ v_d \ v_q \\ v_r \ v_i \ i_{td} \ i_{tq} \ i_{cfd} \ i_{cfq} \ \omega_{PLL}]$$

8.2 Modelo lineal

El modelo lineal del generador de inducción doblemente alimentado se obtiene por linealización alrededor del punto de funcionamiento del sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales.

8.2.1 Ecuaciones diferenciales

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{sd} \\ \Delta\Psi_{sq} \end{bmatrix} = -\omega_0 \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_{r0} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{sd} \\ \Delta\Psi_{sq} \end{bmatrix} - \omega_0 \Delta\omega_r \begin{bmatrix} \Psi_{sd0} \\ \Psi_{sq0} \end{bmatrix} \\ + \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{sd} \\ \Delta v_{sq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{ad} \\ \Delta\Psi_{aq} \end{bmatrix} = -\omega_0 \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ad} \\ \Delta i_{aq} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{ad} \\ \Delta\Psi_{aq} \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_d \\ \Delta v_q \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{ad} \\ \Delta v_{aq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} \Delta t_e - \frac{1}{2H} \Delta t_m$$

$$\frac{d(\Delta v_c^2)}{dt} = \frac{2}{C} (\Delta p_s - \Delta p_a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_{a1} &= K_{Ia} (\Delta i_{aq}^{ref} - \Delta i_{aq}) \\ \Delta \dot{x}_{a2} &= K_{Ia} (\Delta i_{ad}^{ref} - \Delta i_{ad}) \\ \Delta \dot{x}_{a3} &= K_{IV} ((\Delta v_c^2)^{ref} - \Delta v_c^2) \\ \Delta \dot{x}_{s1} &= K_{Id} (\Delta i_{sd}^{ref} - \Delta i_{sd}) \\ \Delta \dot{x}_{s2} &= K_{Iq} (\Delta i_{sq}^{ref} - \Delta i_{sq}) \\ \Delta \dot{x}_{\omega_r} &= K_{I\omega_r} (\Delta \omega_r^{ref} - \Delta \omega_r) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta v_{cfd} \\ \Delta v_{cfq} \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} 1/C_f & 0 \\ 0 & 1/C_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{cfd} \\ \Delta i_{cfq} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{cfd} \\ \Delta v_{cfq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{tr} \\ \Delta\Psi_{ti} \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{br} \\ \Delta v_{bi} \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_r \\ \Delta v_i \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} R_t & 0 \\ 0 & R_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{tr} \\ \Delta i_{ti} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{tr} \\ \Delta\Psi_{ti} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{PLL}}{dt} &= K_{IPLL} (0 - \Delta v_q) \\ \frac{d\Delta\theta_{PLL}}{dt} &= \omega_0 (\Delta\omega_{PLL} - 1) \end{aligned}$$

8.2.2 Ecuaciones algebraicas

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{sd} \\ \Delta\Psi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{md} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta i_{rd}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{ad} \\ \Delta\Psi_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ad} \\ \Delta i_{aq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{tr} \\ \Delta\Psi_{ti} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_t & 0 \\ 0 & L_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{tr} \\ \Delta i_{ti} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\Delta v_{aq} - \Delta x_{a1} - K_{Pa}(\Delta i_{aq}^{ref} - \Delta i_{aq}) - \omega_s L_a \Delta i_{ad} \\ 0 &= -\Delta v_{ad} - \Delta x_{a2} - K_{Pa}(\Delta i_{ad}^{ref} - \Delta i_{ad}) - \omega_s L_a \Delta i_{aq} + \Delta v_d \\ 0 &= -\Delta i_{ad}^{ref} + \Delta x_{a3} + K_{Pv}((\Delta v_c^2)^{ref} - \Delta v_c^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\Delta v'_{sd} - \Delta x_{s1} + K_{Pd}(\Delta i_{sd}^{ref} - \Delta i_{sd}) \\ 0 &= -\Delta v_{sd} + \Delta v'_{sd} - \omega_{r0} L_q \Delta i_{sq} + \Delta \omega_r L_q \Delta i_{sq0} \\ 0 &= -\Delta v'_{sq} - \Delta x_{s2} + K_{Pq}(\Delta i_{sq}^{ref} - \Delta i_{sq}) \\ 0 &= -\Delta v_{sq} + \Delta v'_{sq} - \omega_{r0} (L_d \Delta i_{sq} + L_{md} \Delta i_{rd}) + \Delta \omega_r (L_d \Delta i_{sd0} + L_{md} \Delta i_{rd0}) \end{aligned}$$

$$0 = -\Delta i_{sq}^{ref} + \Delta x_{\omega_r} + K_{P\omega_r}(\Delta \omega_r^{ref} - \Delta \omega_r)$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\Delta t_e - \Psi_{sq0} \Delta i_{sd} + \Psi_{sd0} \Delta i_{sq} - \Delta \Psi_{sq} i_{sd0} + \Delta \Psi_{sd} i_{sq0} \\ 0 &= -\Delta p_s + v_{sd0} \Delta i_{sd} + v_{sq0} \Delta i_{sq} - \Delta v_{sd} i_{sd0} + \Delta v_{sq} i_{sq0} \\ 0 &= -\Delta p_a - v_{ad0} \Delta i_{ad} + v_{aq0} \Delta i_{aq} - \Delta v_{ad} i_{ad0} + \Delta v_{aq} i_{aq0} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta i_{ad} \\ \Delta i_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta i_{fd} \\ \Delta i_{fq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta v_{sd} \\ \Delta v_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{fd} \\ \Delta i_{fq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta v_{Cfd} \\ \Delta v_{Cfq} \end{bmatrix}$$

$$0 = -\Delta x_{PLL} + \Delta \omega_{PLL} - K_{p\theta}(0 - \Delta v_q)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta v_d \\ \Delta v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL0} & \sin \theta_{PLL0} \\ -\sin \theta_{PLL0} & \cos \theta_{PLL0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_r \\ \Delta v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \theta_{PLL0} & \cos \theta_{PLL0} \\ \cos \theta_{PLL0} & -\sin \theta_{PLL0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{r0} \\ \Delta v_{i0} \end{bmatrix} \Delta \theta_{PLL}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL0} & \sin \theta_{PLL0} \\ -\sin \theta_{PLL0} & \cos \theta_{PLL0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{tr} \\ \Delta i_{ti} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \theta_{PLL0} & \cos \theta_{PLL0} \\ \cos \theta_{PLL0} & -\sin \theta_{PLL0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{tr0} \\ \Delta i_{ti0} \end{bmatrix} \Delta \theta_{PLL}$$

9. Anexo C. Modelo de la máquina asíncrona doblemente alimentada (DFIG)

En este capítulo se presentan los modelos lineal y no lineal de la máquina asíncrona doblemente alimentada.

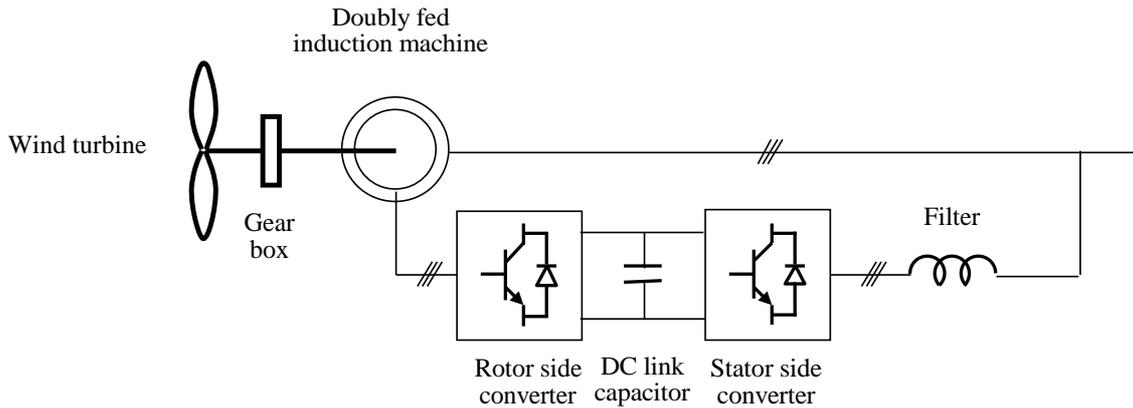


Figura 9.1: Esquema unifilar de la máquina asíncrona doblemente alimentada [17].

9.1 Modelo no lineal

La máquina asíncrona doblemente alimentada se modela con ecuaciones electromagnéticas y ecuaciones electromecánicas. Los modelos también incluyen sus convertidores electrónicos.

9.1.1 Modelo electromagnético

El modelo electromagnético de la máquina síncrona está definido de acuerdo a unos ejes móviles ‘dq’ que giran a la velocidad de sincronismo.

Las ecuaciones del modelo electromagnético en forma vectorial son las siguientes:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s}{dt} + j\omega_s \boldsymbol{\Psi}_s$$

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \boldsymbol{\Psi}_r$$

donde:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_s \\ \boldsymbol{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_m \\ L_m & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix}$$

siendo:

$\mathbf{v}_s = v_{sd} + j v_{sq}$ la tensión del estator

v_{sd} y v_{sq} las componentes directa y transversa de la tensión del estator,

$\mathbf{v}_r = v_{rd} + j v_{rq}$ la tensión del rotor

v_{rd} y v_{rq} las componentes directa y transversa de la tensión del rotor,

$\mathbf{i}_s = i_{sd} + j i_{sq}$ la corriente de estator

i_{sd} y i_{sq} las componentes directa y transversa de la corriente del estator,

$\mathbf{i}_r = i_{rd} + j i_{rq}$ la corriente de rotor

i_{rd} y i_{rq} las componentes directa y transversa de la corriente del rotor,

$\Psi_s = \Psi_{sd} + j \Psi_{sq}$ el flujo del estator

Ψ_{sd} y Ψ_{sq} las componentes directa y transversa del flujo del estator,

$\Psi_r = \Psi_{rd} + j \Psi_{rq}$ el flujo del rotor

Ψ_{rd} y Ψ_{rq} las componentes directa y transversa del flujo del rotor,

\mathbf{R}_s la matriz de resistencias del estator

R_s la resistencia de arrollamiento del estator,

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

\mathbf{R}_r la matriz de resistencias del rotor

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix}$$

R_r la resistencia de arrollamiento del rotor,

$L_{ss} = L_s + L_m$ la inductancia propia del estator,

$L_{rr} = L_r + L_m$ la inductancia propia del rotor,

L_m la inductancia de magnetización,

L_s la inductancia de dispersión del estator,

L_r la inductancia de dispersión del rotor,

$\omega_0 = 2\pi f_0$ la velocidad base en radianes eléctricos por segundo,

ω_s la velocidad del campo del estator expresada en magnitudes unitarias, $\omega_s = 1$

$\omega_s - \omega_r = s \omega_s$ la velocidad del campo del rotor respecto a un sistema de referencia que gira a la velocidad de sincronismo

s es el deslizamiento

Escribiendo las ecuaciones en forma rectangular, se tiene:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} \quad [9.1]$$

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + (\omega_s - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} \quad [9.2]$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 \\ 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad [9.3]$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 \\ 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad [9.4]$$

9.1.2 Modelo electromecánico

El modelo electromecánico de la máquina síncrona queda definido por la siguiente ecuación:

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = t_e - t_m \quad [9.5]$$

en la cual:

H es la inercia,

t_e es el par electromagnético:

$$t_e = \text{Im}\{\mathbf{i}_s \Psi_s^*\} = \text{Im}\{-\mathbf{i}_r \Psi_r^*\} = -\Psi_{sq} i_{sd} + \Psi_{sd} i_{sq} \quad [9.6]$$

$$t_e = \text{Im}\{-\mathbf{i}_r \Psi_r^*\} = \Psi_{rq} i_{rd} - \Psi_{rd} i_{rq} \quad [9.7]$$

t_m es el par mecánico.

9.1.3 Control de las corrientes del convertidor del rotor

Este control calcula los valores de las componentes de la tensión del rotor que deben ser aplicados por el convertidor del rotor al mismo. Permite modificar el par y la potencia reactiva. Para ello, se actúa sobre la corriente del convertidor del rotor: i_{rd} , i_{rq} .

Se escoge un sistema de referencia solidario al flujo del estator, en el cual:

- El *eje d* está alineado con el flujo del estator. Además, la corriente del rotor (corriente de excitación) queda alineada también con el eje *d*.

$$\begin{aligned} \Psi_s |_{\Psi_{sq}=0} &= \Psi_{sd} + j\Psi_{sq} |_{\Psi_{sq}=0} = \Psi_{sd} \\ \mathbf{i}_r |_{\Psi_{sq}=0} &= i_{rd} + j i_{rq} |_{\Psi_{sq}=0} = i_{rd} = i_{exc} \end{aligned}$$

De este modo, la potencia reactiva queda controlada únicamente por la componente directa de la corriente del rotor, i_{rd} .

$$q_r = v_{rq} i_{rd} - v_{rd} i_{rq} = v_{rq} i_{rd}$$

- Por otra parte, i_{rq} , la componente de *eje transverso* de la corriente del rotor, que se encuentra en cuadratura con el flujo del estator, controla el par.

$$t_e = \text{Im}\{\mathbf{i}_s \Psi_s^*\} = -\Psi_{sq} i_{sd} + \Psi_{sd} i_{sq} = \Psi_{sd} i_{sq}$$

Combinando la ecuación [9.3] con el la elección del sistema de referencia, resulta:

$$\Psi_{sq} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} = 0 \quad [9.8]$$

$$(i_{sq})^{\Psi_s} = -\frac{L_m}{L_{ss}} (i_{rq})^{\Psi_s} \quad [9.9]$$

$$\Psi_{sd} = L_{ss} i_{sd} + L_m i_{rd} = L_m i_{sm} \quad [9.10]$$

$$(i_{sd})^{\Psi_s} = \frac{L_m i_{sm} - L_m (i_{rd})^{\Psi_s}}{L_{ss}} \quad [9.11]$$

Finalmente, el par definido a partir de la componente de la corriente del rotor, i_{qr} , es:

$$t_e = \Psi_{sd} i_{sq} = -\Psi_{sd} \frac{L_m}{L_{ss}} i_{rq}$$

El flujo del rotor se calcula desarrollando la ecuación [9.4], calculándolo en el sistema de referencia elegido:

$$\begin{aligned} (\Psi_{rd})^{\Psi_s} &= L_{rr}(i_{rd})^{\Psi_s} + L_m(i_{sd})^{\Psi_s} = \left(L_{rr} - \frac{L_m^2}{L_{ss}} \right) (i_{rd})^{\Psi_s} + \frac{L_m^2}{L_{ss}} i_{sm} \\ &= L_{rr}\sigma(i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr}(1 - \sigma)i_{sm} \end{aligned} \quad [9.12]$$

$$\begin{aligned} (\Psi_{rq})^{\Psi_s} &= L_{rr}(i_{rq})^{\Psi_s} + L_m(i_{sq})^{\Psi_s} = \left(L_{rr} - \frac{L_m^2}{L_{ss}} \right) (i_{rq})^{\Psi_s} \\ &= L_{rr}\sigma(i_{rq})^{\Psi_s} \end{aligned} \quad [9.13]$$

siendo $\sigma = \frac{L_m^2}{L_{rr} L_{ss}}$.

La tensión que se aplica al rotor por medio del convertidor tiene la siguiente expresión (ecuaciones [9.2], [9.12],[9.13]):

$$\begin{aligned} (v_{rd})^{\Psi_s} &= R_r(i_{rd})^{\Psi_s} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \left(L_{rr}\sigma(i_{rd})^{\Psi_s} + \frac{L_m^2}{L_{ss}} i_{sm} \right) \\ &\quad - (\omega_s - \omega_r)L_{rr}\sigma(i_{rq})^{\Psi_s} \\ &\approx R_r(i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr}\sigma \frac{1}{\omega_0} \frac{d(i_{rd})^{\Psi_s}}{dt} \\ &\quad - (\omega_s - \omega_r)L_{rr}\sigma(i_{rq})^{\Psi_s} \end{aligned} \quad [9.14]$$

$$\begin{aligned} (v_{rq})^{\Psi_s} &= R_r(i_{rq})^{\Psi_s} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (L_{rr}\sigma(i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr}(1 - \sigma)i_{sm}) \\ &= R_r(i_{rq})^{\Psi_s} + L_{rr}\sigma \frac{1}{\omega_0} \frac{d(i_{rd})^{\Psi_s}}{dt} \\ &\quad + (\omega_s - \omega_r)(L_{rr}\sigma(i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr}(1 - \sigma)i_{sm}) \end{aligned} \quad [9.15]$$

Se observa que las dinámicas de las componentes de corriente del rotor están acopladas. Para solucionarlo, se definen unas variables auxiliares v'_{rd}, v'_{rq} :

$$\begin{aligned} v'_{rd} &= (v_{rd})^{\Psi_s} + (\omega_s - \omega_r)L_{rr}\sigma(i_{rq})^{\Psi_s} \\ &= R_r \frac{d(i_{rd})^{\Psi_s}}{dt} + L_{rr}\sigma \frac{1}{\omega_0} \frac{d(i_{rd})^{\Psi_s}}{dt} \end{aligned} \quad [9.16]$$

$$\begin{aligned} v'_{rq} &= (v_{rq})^{\Psi_s} - (\omega_s - \omega_r)(L_{rr}\sigma(i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr}(1 - \sigma)i_{sm}) \\ &= R_r(i_{rq})^{\Psi_s} + L_{rr}\sigma \frac{1}{\omega_0} \frac{d(i_{rd})^{\Psi_s}}{dt} \end{aligned} \quad [9.17]$$

De tal forma, que las componentes de tensión del rotor en ejes directo y transversal son:

$$(v_{rd})^{\Psi_s} = v'_{rd} - (\omega_s - \omega_r)L_{rr}\sigma(i_{rq})^{\Psi_s} \quad [9.18]$$

$$(v_{rq})^{\Psi_s} = v'_{rq} + (\omega_s - \omega_r)(L_{rr}\sigma(i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr}(1 - \sigma)i_{sm}) \quad [9.19]$$

Los controles se diseñan para las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{(i_{rd})^{\Psi_s}(s)}{v'_{rd}(s)} = \frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_{rr}\sigma}{R_r} s} \quad [9.20]$$

$$\frac{(i_{rq})^{\Psi_s}(s)}{v'_{rq}(s)} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_{rr}\sigma}{R_r} s} \quad [9.21]$$

Finalmente, las ecuaciones de los reguladores de corriente del regulador de rotor quedan:

$$v'_{rd} = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \left((i_{rd}^{ref})^{\Psi_s} - (i_{rd})^{\Psi_s} \right) \quad [9.22]$$

$$(v_{rd})^{\Psi_s} = v'_{rd} - (\omega_s - \omega_r) L_{rr} \sigma (i_{rq})^{\Psi_s} \quad [9.23]$$

$$v'_{rq} = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \left((i_{rq}^{ref})^{\Psi_s} - (i_{rq})^{\Psi_s} \right) \quad [9.24]$$

$$(v_{rq})^{\Psi_s} = v'_{rq} + (\omega_s - \omega_r) (L_{rr} \sigma (i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr} (1 - \sigma) i_{sm}) \quad [9.25]$$

Los esquemas de control se representan en la Figura 9.2 y la Figura 9.3.

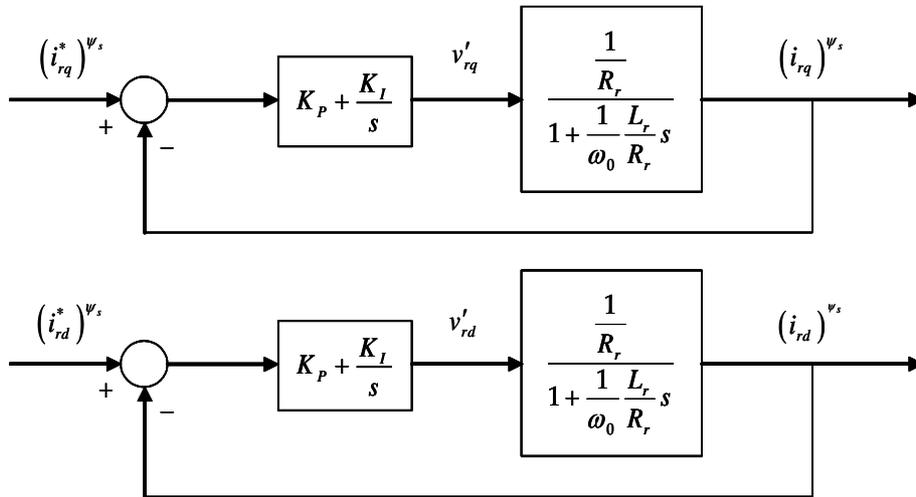


Figura 9.2: Lazos de control de las componentes de la corriente del rotor [17].

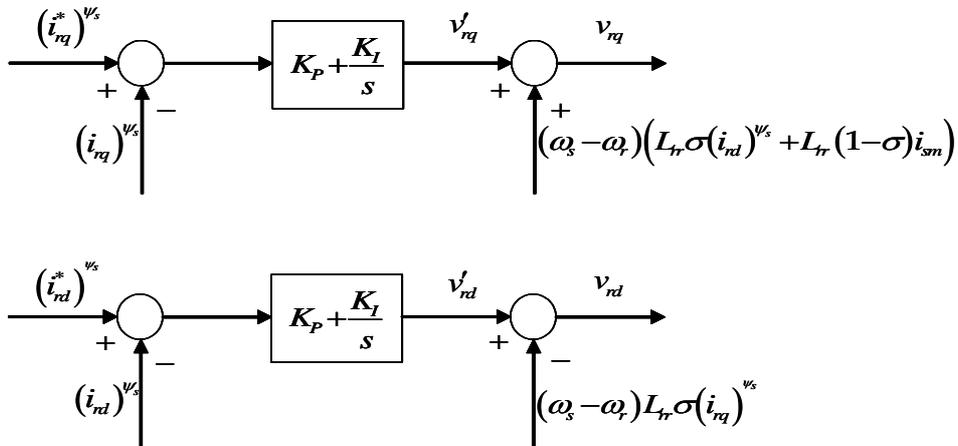


Figura 9.3: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor del rotor [17].

9.1.4 Control de velocidad del rotor

La velocidad del rotor se puede calibrar modificando la consigna de la corriente del rotor en eje transverso, i_{rq}^{ref} .

$$2H\omega_s \frac{d s}{dt} = t_m - t_e$$

$$t_e = -\Psi_s \frac{L_m}{L_{ss}} (i_{rq}^{ref})^{\Psi_s}$$

El control se diseña para la siguiente función de transferencia:

$$\frac{s(s)}{i_{rq}^{ref}(s)} = \Psi_s \frac{L_m}{L_{ss}} \frac{1}{2H\omega_s s} \quad [9.26]$$

Entonces la ecuación del regulador es:

$$i_{rq}^{ref} = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) (s^{ref} - s) \quad [9.27]$$

El diagrama del lazo de control de velocidad está representado en la Figura 9.4.

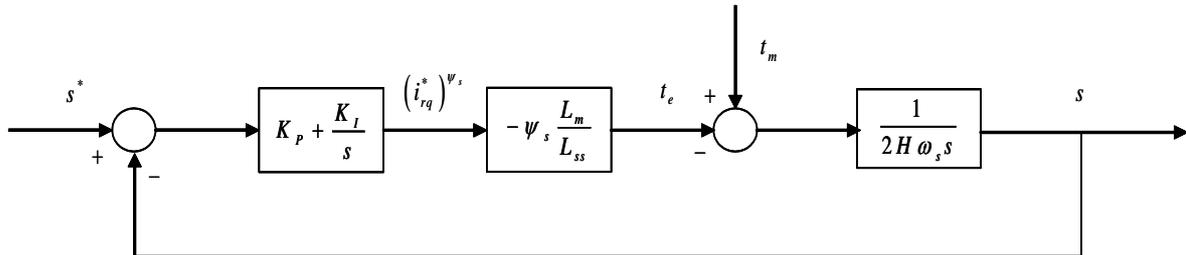


Figura 9.4: Lazo de control de velocidad [17].

9.1.5 Modelo de convertidor del estator

9.1.6 Las ecuaciones vectoriales que rigen el funcionamiento del convertidor de estator son:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_a \mathbf{i}_a + \frac{1}{\omega_0} \frac{d \Psi_a}{dt} + j\omega_s \Psi_a + \mathbf{v}_a$$

$$\Psi_a = \mathbf{L}_a \mathbf{i}_a$$

siendo:

$\mathbf{v}_s = v_d + j v_q$ la tensión del estator

v_d y v_q las componentes directa y transversa de la tensión del estator

$\mathbf{i}_a = i_{ad} + j i_{aq}$ la corriente del convertidor

i_{ad} y i_{aq} las componentes directa y transversa de la tensión de salida del convertidor

$\Psi_a = \Psi_{ad} + j \Psi_{aq}$ el flujo del convertidor

Ψ_{ad} y Ψ_{aq} las componentes directa y transversa del flujo del convertidor

$v_a = v_{ad} + j v_{aq}$ la tensión del convertidor

R_a es la matriz de resistencias del convertidor

$$R_a = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix}$$

L_a la inductancia de dispersión del convertidor

$$L_a = \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix}$$

ω_s es la velocidad de sincronismo

En forma rectangular:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{aq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ad} \\ \Psi_{aq} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ad} \\ \Psi_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ad} \\ v_{aq} \end{bmatrix} \quad [9.28]$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ad} \\ \Psi_{aq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{aq} \end{bmatrix} \quad [9.29]$$

9.1.7 Control de las corrientes del convertidor de estator

Este control calcula la tensión de salida de la máquina asíncrona doblemente alimentada: v_{sd} . Su cometido es regular la potencia reactiva y la tensión del condensador de acoplamiento. Para ello, actúa sobre la corriente del convertidor i_{ad} , i_{aq} .

La expresión de la tensión se deduce a partir de la ecuaciones [9.28] y [9.29]:

$$v_{sd} = R_a i_{ad} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{ad}}{dt} - \omega_s L_a i_{aq} + v_{ad}$$

$$0 = R_a i_{aq} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{aq}}{dt} + \omega_s L_a i_{ad} + v_{aq}$$

Nuevamente, las dinámicas de cada componente están acopladas y es necesario definir unas variables auxiliares v'_{ad} y v'_{aq} para realizar el control adecuadamente:

$$v'_{ad} = v_{sd} + \omega_s L_a i_{aq} - v_{ad} = R_a i_{ad} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{ad}}{dt}$$

$$v'_{aq} = -\omega_s L_a i_{ad} - v_{aq} = R_a i_{aq} + \frac{1}{\omega_0} L_a \frac{di_{aq}}{dt}$$

De tal forma, que las componentes de tensión del estator en ejes directo y transverso son:

$$v_{ad} = v_{sd} + \omega_s L_a i_{aq} - v'_{ad}$$

$$v_{aq} = -\omega_s L_a i_{ad} - v'_{aq}$$

El control de las corrientes del convertidor de red se diseña para las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{i_{sd}(s)}{v'_{sd}(s)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_a}{R_a} s} \quad [9.30]$$

$$\frac{i_{aq}(s)}{v'_{aq}(s)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{L_a}{R_a} s} \quad [9.31]$$

Finalmente, se obtienen las siguientes ecuaciones de los reguladores de corriente del estator:

$$v'_{aq} = \left(K_{Pa} + \frac{K_{Ia}}{s} \right) (i_{aq}^{ref} - i_{aq}) \quad [9.32]$$

$$v_{aq} = -\omega_s L_a i_{ad} - v'_{aq} \quad [9.33]$$

$$v'_{ad} = \left(K_{Pa} + \frac{K_{Ia}}{s} \right) (i_{ad}^{ref} - i_{ad}) \quad [9.34]$$

$$v_{ad} = v_{sd} + \omega_s L_a i_{aq} - v'_{ad} \quad [9.35]$$

A continuación, la Figura 9.5 y la Figura 9.6 muestran los diagramas de bloques del sistema de control del convertidor de red.

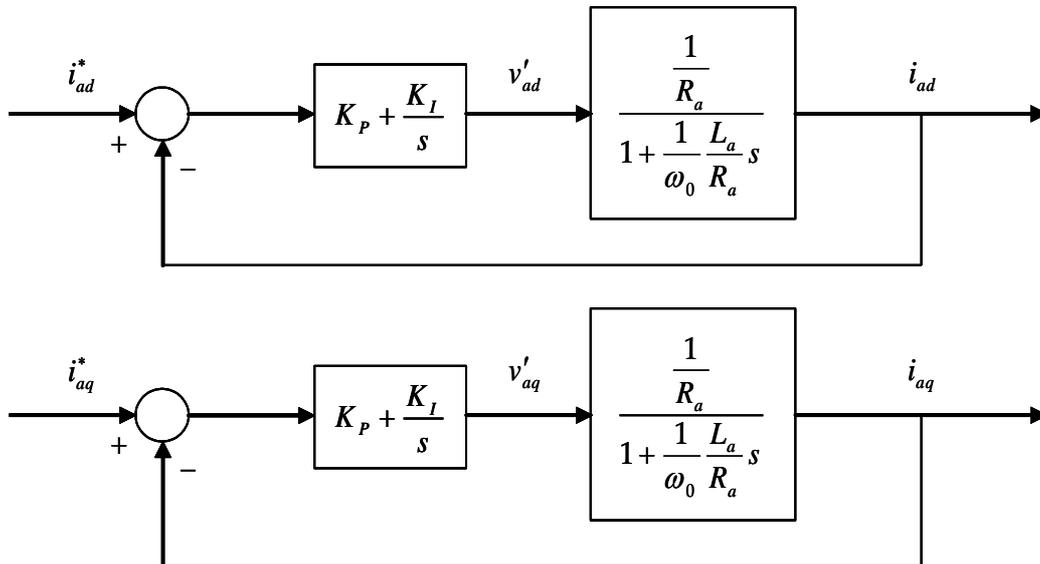


Figura 9.5: Lazos de control de las componentes de la corriente del convertidor del estator [17].

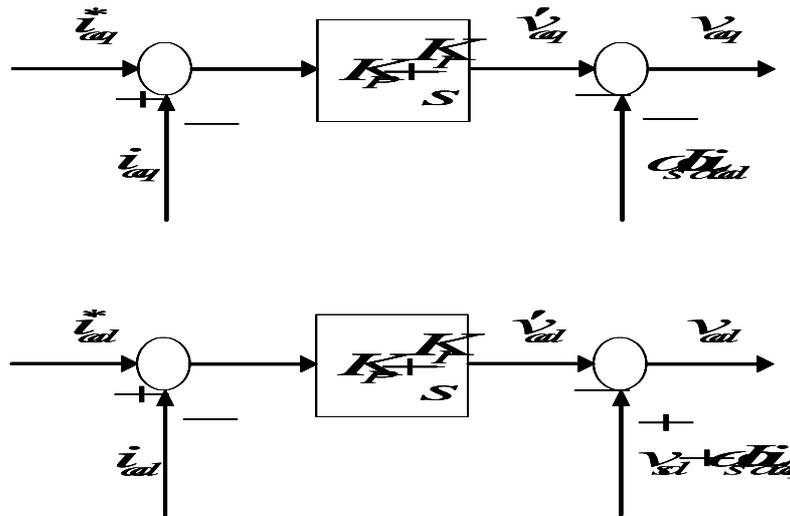


Figura 9.6: Diagramas de los reguladores de corriente del convertidor del estator [17].

9.1.8 Modelo del condensador de acoplamiento de los convertidores de estator y de rotor

La tensión del condensador de acoplamiento entre los convertidores de red y de estator se rige por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} C \frac{d v_c^2}{dt} = p_r - p_a$$

Siendo:

v_c^2 el cuadrado de la tensión del condensador de acoplamiento entre los convertidores,

p_r la potencia activa en el convertidor de rotor,

$$p_r = \text{Re}\{\mathbf{v}_r \mathbf{i}_r^*\} = v_{rd} i_{rd} + v_{rq} i_{rq}$$

p_a la potencia activa en convertidor de red

$$p_a = \text{Re}\{\mathbf{v}_a \mathbf{i}_a^*\} = v_{ad} i_{ad} + v_{aq} i_{aq}$$

En forma rectangular:

$$\frac{1}{2} C \frac{d (v_c^2)}{dt} = (v_{rd} i_{rd} + v_{rq} i_{rq}) - (v_{ad} i_{ad} + v_{aq} i_{aq}) \quad [9.36]$$

9.1.9 Control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de estator y de rotor

Este control pretende mantener la tensión del condensador constante. Actúa sobre la consigna de corriente del convertidor en eje directo, i_{ad}^{ref} .

Otra forma de plantear el balance de energía en el condensador de acoplamiento entre convertidores es:

$$p_a = \text{Re}\{\mathbf{v} \mathbf{i}_a^*\} = v_{sd} i_{ad}$$

$$\frac{1}{2} C \frac{d(v_c^2)}{dt} = p_r - p_a$$

La función de transferencia de este regulador es:

$$\frac{v_c^2(s)}{i_{ad}^{\text{ref}}(s)} = -v_{sd} \frac{2}{Cs} \quad [9.37]$$

Finalmente, la ecuación del regulador de tensión del condensador de acoplamiento es:

$$i_{ad}^{\text{ref}} = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) ((v_c^2)^{\text{ref}} - v_c^2) \quad [9.38]$$

En la Figura 9.7 se muestra el diagrama de bloques del regulador.

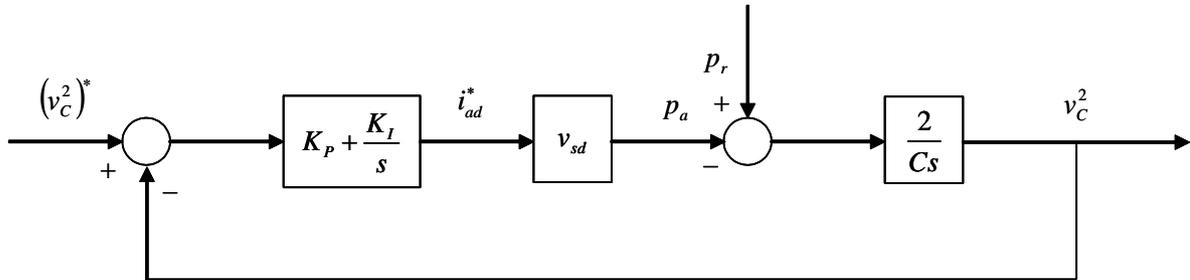


Figura 9.7: Lazo de control de la tensión del condensador de acoplamiento de los convertidores de estator y de rotor [17].

9.1.10 Modelo del filtro

El diseño de filtro para reducir el armónico 35 consiste en un condensador en serie con una resistencia:

$$C_f = \frac{1}{x_e n^2}$$

siendo $n=35$ y $x_e = \frac{1}{\frac{1}{l_a} + \frac{1}{l_{\text{linea}}} + \frac{1}{l_s + l_r}}$

y

$$R_f = \frac{2\zeta_f \omega_{nf} x_e}{\omega_0}$$

$$\omega_{nf} = \frac{1}{\sqrt{x_e C_f}} \omega_0$$

donde $\zeta_f = 0.1$.

Las ecuaciones del sistema en forma vectorial son:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_t &= \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_f \\ \mathbf{v}_s &= \mathbf{R}_f \mathbf{i}_f + \mathbf{v}_{Cf} \\ \mathbf{i}_f &= \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{c_f} \frac{d \mathbf{v}_{Cf}}{dt} + j\omega_s \mathbf{v}_{Cf} \end{aligned}$$

donde:

$\mathbf{i}_t = i_{td} + j i_{tq}$ es la corriente que circula por la línea de salida de la máquina

i_{td} y i_{tq} son las componentes directa y transversa de la corriente que circula por la línea de salida de la máquina

$\mathbf{i}_f = i_{fd} + j i_{fq}$ es la corriente que circula por el filtro de la red

i_{td} y i_{tq} son las componentes directa y transversa de la corriente que circula por que circula por el filtro de la red

$\mathbf{v}_{Cf} = v_{cfd} + j i_{cfq}$ es la tensión del condensador del filtro

v_{cfd} y i_{cfq} son las componentes directa y transversa de la tensión del condensador del filtro

\mathbf{R}_f es la matriz resistencias del filtro

$$\mathbf{R}_f = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_f \end{bmatrix}$$

c_f es el condensador del filtro

Las ecuaciones en forma rectangular del filtro son:

$$\begin{bmatrix} i_{td} \\ i_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} \quad [9.39]$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cfd} \\ v_{cfq} \end{bmatrix} \quad [9.40]$$

$$\begin{bmatrix} i_{cfd} \\ i_{cfq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} C_f & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cfd} \\ v_{cfq} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cfd} \\ v_{cfq} \end{bmatrix} \quad [9.41]$$

9.1.11 Ecuaciones de la PLL

Explicadas en el 11.

9.1.12 Resumen

- Variables de estado (20):

$$\mathbf{x}^T = [\Psi_{sd} \ \Psi_{sq} \ \Psi_{ad} \ \Psi_{aq} \ x_{a1} \ x_{a2} \ x_{a3} \ v_c^2 \ \Psi_{rd} \ \Psi_{rq} \ x_{r1} \ x_{r2} \ s \ x_s \ v_{cd} \ v_{cq} \ \Psi_{tr} \ \Psi_{ti} \ x_{\omega_{PLL}} \ \theta_{PLL}]$$

- Variables de entrada (7):

$$\mathbf{u}^T = [v_{br} \quad v_{bi} \quad t_m \quad i_{aq}^{ref} \quad v_c^{2ref} \quad i_{rd}^{ref} \quad \psi_s \quad s^{ref} \quad v_{sq}^{ref}]$$

- Variables algebraicas (32):

$$\mathbf{z}^T = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq} \quad i_{ad} \quad i_{aq} \quad v_{ad} \quad v_{aq} \quad i_{ad}^{ref} \quad i_{sm} \quad \Psi_s \quad \varphi \quad v_{rd} \psi_s \quad v_{rq} \psi_s \quad v_{rd} \quad v_{rq} \quad i_{rd} \psi_s \quad i_{rq} \psi_s \quad t_e \quad p_r \quad p_a \quad i_{rq}^{ref} \psi_s \quad v_{sd} \quad v_{sq} \quad i_{cfd} \quad i_{cfq} \quad i_{td} \quad i_{tq} \quad v_{sr} \quad v_{si} \quad i_{tr} \quad i_{ti}]$$

9.2 Modelo lineal

El modelo lineal del generador de inducción doblemente alimentado se obtiene por linealización alrededor del punto de funcionamiento del sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales.

9.2.1 Ecuaciones diferenciales

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{sd} \\ \Delta \Psi_{sq} \end{bmatrix} = -\omega_0 \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{sd} \\ \Delta \Psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{sd} \\ \Delta v_{sq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{rd} \\ \Delta \Psi_{rq} \end{bmatrix} = -\omega_0 \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{rd} \\ \Delta i_{rq} \end{bmatrix} - \omega_0 \Delta s \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{rd} \\ \Delta \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{rd} \\ \Delta v_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{ad} \\ \Delta \Psi_{aq} \end{bmatrix} = -\omega_0 \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ad} \\ \Delta i_{aq} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{ad} \\ \Delta \Psi_{aq} \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{sd} \\ \Delta v_{sq} \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{ad} \\ \Delta v_{aq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\Delta s}{dt} = \frac{1}{2H\omega_s} \Delta t_m - \frac{1}{2H\omega_s} \Delta t_e$$

$$\frac{d(\Delta v_c^2)}{dt} = \frac{2}{C} (\Delta p_r - \Delta p_a)$$

$$\Delta \dot{x}_{a1} = K_{Ia} (\Delta i_{aq}^{ref} - \Delta i_{aq})$$

$$\Delta \dot{x}_{a2} = K_{Ia} (\Delta i_{ad}^{ref} - \Delta i_{ad})$$

$$\Delta \dot{x}_{a3} = K_{Iv} ((\Delta v_c^2)^{ref} - \Delta v_c^2)$$

$$\Delta \dot{x}_{r1} = K_I ((\Delta i_{rd}^{ref})^{\Psi_s} - (\Delta i_{rd})^{\Psi_s})$$

$$\Delta \dot{x}_{r2} = K_I ((\Delta i_{rq}^{ref})^{\Psi_s} - (\Delta i_{rq})^{\Psi_s})$$

$$\Delta \dot{x}_s = K_{Is} (\Delta s^{ref} - \Delta s)$$

9.2.2 Ecuaciones algebraicas

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{ds} \\ \Delta\Psi_{qs} \\ \Delta\Psi_{dr} \\ \Delta\Psi_{qr} \\ \Delta\Psi_{ad} \\ \Delta\Psi_{aq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta i_{ad} \\ \Delta i_{aq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\Delta v_{aq} - \Delta x_{a1} - K_{Pa}(\Delta i_{aq}^{\text{ref}} - \Delta i_{aq}) - \omega_s L_a \Delta i_{ad} \\ 0 &= -\Delta v_{ad} - \Delta x_{a2} - K_{Pa}(\Delta i_{ad}^{\text{ref}} - \Delta i_{ad}) + \omega_s L_a \Delta i_{aq} + \Delta v_{sd} \\ 0 &= -\Delta i_{ad}^{\text{ref}} + \Delta x_{a3} + K_{Pv}((\Delta v_c^2)^{\text{ref}} - \Delta v_c^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &= -(\Delta v_{rd})^{\Psi_s} + \Delta x_{r1} + K_P \left((\Delta i_{rd}^{\text{ref}})^{\Psi_s} - (\Delta i_{rd})^{\Psi_s} \right) - (-\Delta \omega_r) L_{rr} \sigma (i_{rq0})^{\Psi_s} \\ &\quad - (-\omega_{r0}) L_{rr} \sigma (\Delta i_{rq})^{\Psi_s} \\ 0 &= -(\Delta v_{rq})^{\Psi_s} + \Delta x_{r2} + K_P \left((\Delta i_{rq}^{\text{ref}})^{\Psi_s} - (\Delta i_{rq})^{\Psi_s} \right) \\ &\quad + (-\Delta \omega_r) (L_{rr} \sigma (i_{rd0})^{\Psi_s} + L_{rr} (1 - \sigma) i_{sm0}) \\ &\quad + (-\omega_{r0}) (L_{rr} \sigma (\Delta i_{rd})^{\Psi_s} + L_{rr} (1 - \sigma) \Delta i_{sm}) \\ 0 &= -(\Delta i_{rd})^{\Psi_s} + \Delta x_s + K_{Ps} (\Delta s^{\text{ref}} - \Delta s) \end{aligned}$$

$$\Delta i_{sm} = \frac{\Delta \Psi_s}{L_m}$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\Psi_{s0} \Delta \Psi_s + \Psi_{sd0} \Delta \Psi_{sd} + \Psi_{sq0} \Delta \Psi_{sq} \\ 0 &= \frac{1}{\cos^2 \phi_0} \Delta \phi + \frac{\Delta \Psi_{sq}}{\Psi_{sd0}} - \frac{\Psi_{sq0}}{\Psi_{sd0}^2} \Delta \Psi_{sd} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta v_{rd} \\ \Delta v_{rq} \end{bmatrix}^{\Psi_s} + \begin{bmatrix} \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 \\ \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{rd} \\ \Delta v_{rq} \end{bmatrix}^{\Psi_s} + \begin{bmatrix} -\sin \phi_0 & -\cos \phi_0 \\ \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{rd0} \\ v_{rq0} \end{bmatrix}^{\Psi_s} \Delta \phi$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\Delta t_e + (\Delta \Psi_{qr} i_{dr0} + \Delta i_{dr} \Psi_{qr0} - \Delta \Psi_{dr} i_{qr0} - \Delta i_{qr} \Psi_{dr0}) \\ 0 &= -\Delta p_r + (i_{dr0} \Delta v_{rd} + v_{rd0} \Delta i_{rd} + i_{qr0} \Delta v_{rq} + v_{rq0} \Delta i_{rq}) \\ 0 &= -\Delta p_a + (i_{ad0} \Delta v_{ad} + v_{ad0} \Delta i_{ad} + i_{aq0} \Delta v_{aq} + v_{aq0} \Delta i_{aq}) \end{aligned}$$

10. Anexo D: Modelo de la red

Ambas máquinas se conectan a través de una línea que contiene un transformador elevador al punto de conexión v_b . A continuación, hay una línea que conecta el punto común con la red, representada por una red de potencia infinita v_∞ .

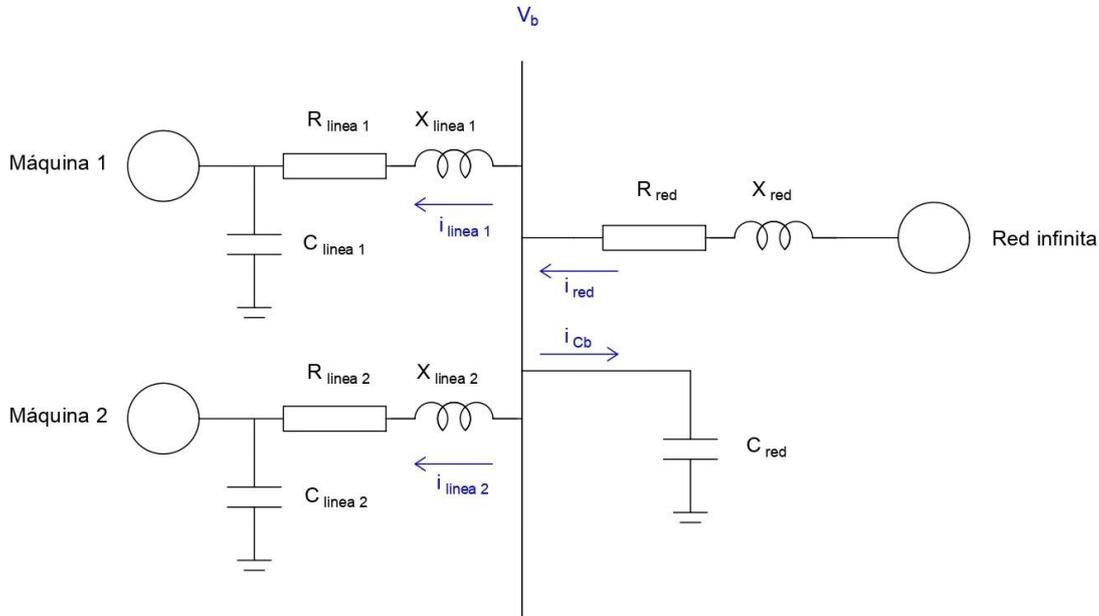


Figura 10.1: Esquema unifilar del sistema de estudio

10.1 Modelo no lineal

10.1.1 Modelo de la línea de conexión con la red de potencia infinita

Las ecuaciones vectoriales de la línea se plantean en ejes RI (la tensión de la red de potencia infinita v_∞ está alineada con el eje R):

$$\mathbf{v}_b = \mathbf{R}_g \mathbf{i}_g + \frac{1}{\omega_0} \frac{d \Psi_g}{dt} + j \omega_s \Psi_g + v_\infty$$

$$\Psi_g = \mathbf{L}_g \mathbf{i}_g$$

$$\frac{d \mathbf{v}_b}{dt} = \frac{1}{C_b} \omega_0 \mathbf{i}_{C_b} - j \omega_0 \omega_s \mathbf{v}_b$$

siendo:

$\mathbf{v}_b = v_{br} + j v_{bi}$ la tensión del punto de conexión de las máquinas

v_{br} y v_{bi} las componentes directa y transversa de la tensión del punto de conexión de las máquinas

$\Psi_g = \Psi_{gr} + j \Psi_{gi}$ el flujo de la línea de conexión con la red de potencia infinita

Ψ_{gr} y Ψ_{gi} las componentes directa y transversa del flujo de la línea de conexión con la red de potencia infinita

$\mathbf{v}_\infty = v_{\infty r} + j v_{\infty i}$ la tensión de la red de potencia infinita, donde $v_{\infty i} = 0$

$v_{\infty r}$ y $v_{\infty i}$ las componentes directa y transversa de la tensión de la red de potencia infinita

$\mathbf{i}_{C_b} = i_{C_b r} + j i_{C_b i}$ la corriente que fluye por la admitancia de la línea

$i_{C_b r}$ y $i_{C_b i}$ las componentes directa y transversa de la corriente que fluye por la admitancia de la línea

\mathbf{R}_g la matriz de resistencias de la línea de conexión

$$\mathbf{R}_g = \begin{bmatrix} R_g & 0 \\ 0 & R_g \end{bmatrix}$$

\mathbf{L}_g es la matriz de impedancias de la línea de conexión

$$\mathbf{L}_g = \begin{bmatrix} L_g & 0 \\ 0 & L_g \end{bmatrix}$$

C_b la admitancia de la línea

En formato rectangular, las ecuaciones son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} v_{br} \\ v_{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{gr} \\ v_{gi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_g & 0 \\ 0 & R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gr} \\ i_{gi} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{gr} \\ \Psi_{gi} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{gr} \\ \Psi_{gi} \end{bmatrix} \quad [10.1]$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{gr} \\ \Psi_{gi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_g & 0 \\ 0 & L_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gr} \\ i_{gi} \end{bmatrix} \quad [10.2]$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{br} \\ v_{bi} \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} 1/C_b & 0 \\ 0 & 1/C_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{C_b r} \\ i_{C_b i} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{br} \\ v_{bi} \end{bmatrix} \quad [10.3]$$

10.1.2 Resumen

- Variables de estado (4):

$$\mathbf{x}^T = [\Psi_{gr} \ \Psi_{gi} \ v_{br} \ v_{bi}]$$

- Variables de entrada (2):

$$\mathbf{u}^T = [v_{gr} \ v_{gi}]$$

10.2 Modelo lineal

10.2.1 Ecuaciones diferenciales

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{gr} \\ \Delta \Psi_{gi} \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{br} \\ \Delta v_{bi} \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} \Delta v_{gr} \\ \Delta v_{gi} \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} R_g & 0 \\ 0 & R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{gd} \\ \Delta i_{gq} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{gr} \\ \Delta \Psi_{gi} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta v_{br} \\ \Delta v_{bi} \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} 1/C_b & 0 \\ 0 & 1/C_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{C_b r} \\ \Delta i_{C_b i} \end{bmatrix} - \omega_0 \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{br} \\ \Delta v_{bi} \end{bmatrix}$$

10.2.2 Ecuaciones algebraicas

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}^* = \begin{pmatrix} \mathbf{p} + j \mathbf{q} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}^*$$

11. Anexo E: Phase Locked Loop (PLL) y cambios de referencia

En este capítulo se presenta la PLL, una tecnología común a los dos tipos de máquinas. También se indica

11.1 Modelo no lineal

11.1.1 Ecuaciones de la PLL

La misión del PLL (Phase Locked Loop) consiste en alinear el sistema de referencia ‘dq’ con la tensión de salida del convertidor de estator.

$$\mathbf{v}_s|_{v_{sq}=0} = v_{sd} + j v_{sq} = v_{sd}$$

Las ecuaciones son:

$$\omega_{PLL} = (v_q^{ref} - v_q) \left(K_{P\theta} + \frac{K_{I\theta}}{s} \right) \quad [11.1]$$

$$\theta_{PLL} = \frac{\omega_0}{s} (\omega_{PLL} - 1) \quad [11.2]$$

El diagrama de bloques del regulador se aprecia en la Figura 11.1.

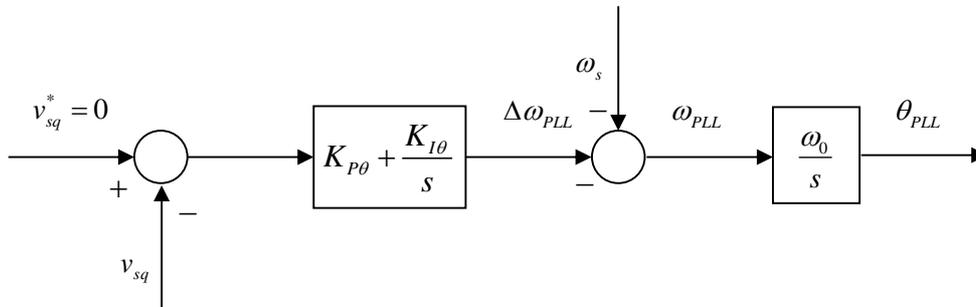


Figura 11.1: Diagrama de bloques de la PLL [16].

11.1.2 Transformación del sistema de referencia (RI-dq)

Tal y como se ha planteado el modelo hay tres sistemas de referencia:

- RI. Los ejes ‘RI’ son fijos. Están alineados con la tensión de la red de potencia infinita.
- ab. Los ejes ‘ab’ son móviles, giran a la velocidad de sincronismo. Están alineados con la tensión del punto de conexión v_b .
- dq. Los ejes ‘dq’ son móviles, giran a la velocidad de sincronismo. Están alineados con la tensión de cada máquina v_{maq} .

A raíz de estos sistemas de referencia, se definen unos ángulos que permiten el cambio de un sistema de referencia a otro (Figura 11.2).

- θ . Este ángulo define el giro del sistema de referencia 'RI' a 'ab'.
- θ_{PLL} . Este ángulo define el giro del sistema de referencia 'ab' a 'dq'.

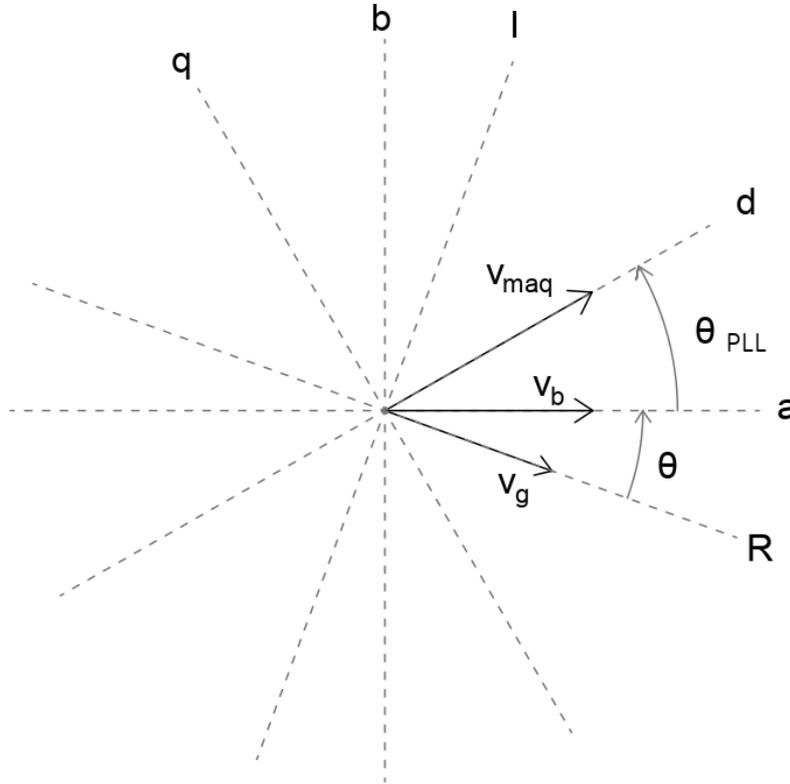


Figura 11.2: Relación entre los sistemas de referencia

Las ecuaciones para el cambio de referencia 'RI-ab' son:

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad [11.3]$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_i \end{bmatrix} \quad [11.4]$$

Las ecuaciones para el cambio de referencia 'dq-ab' son:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL} & \sin \theta_{PLL} \\ -\sin \theta_{PLL} & \cos \theta_{PLL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad [11.5]$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{PLL} & -\sin \theta_{PLL} \\ \sin \theta_{PLL} & \cos \theta_{PLL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad [11.6]$$

Y finalmente, para el cambio 'RI-dq'

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \theta_{PLL}) & \sin(\theta + \theta_{PLL}) \\ -\sin(\theta + \theta_{PLL}) & \cos(\theta + \theta_{PLL}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad [11.7]$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \theta_{PLL}) & -\sin(\theta + \theta_{PLL}) \\ \sin(\theta + \theta_{PLL}) & \cos(\theta + \theta_{PLL}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_i \end{bmatrix} \quad [11.8]$$

11.2 Modelo lineal

11.2.1 Ecuaciones de la PLL

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{PLL}}{dt} &= K_{I PLL}(0 - \Delta v_q) \\ \frac{d\Delta\theta_{PLL}}{dt} &= \omega_0(\Delta\omega_{PLL} - 1) \end{aligned}$$

12. Anexo F: Objetivos del desarrollo sostenible

El concepto “desarrollo sostenible” se refiere a aquel desarrollo que no compromete acabar con los recursos, para que las futuras generaciones también puedan satisfacer sus necesidades. En otras palabras, el desarrollo sostenible trata de equilibrar el desarrollo económico y social con la protección para el medioambiente. Dicho término fue utilizado por primera vez en el Informe Brundtland, publicado por las Naciones Unidas en 1987.

Los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) fueron publicados en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas, en colaboración con los estados miembro y personal civil. Recogen 17 compromisos y 169 metas que idealmente deben ser cumplidos antes del 2030. Estos objetivos engloban temáticas diversas: pobreza, desigualdad, paz o problemas medioambientales.

12.1 Implicación del proyecto en el cumplimiento de los ODS.

Este proyecto tiene como objetivo definir algunas de las limitaciones de la conexión a la red de aerogeneradores para aumentar la capacidad instalada del sistema eléctrico. La energía eólica es una de las energías renovables más empleadas en España. En 2020, se llegó a cubrir un 21% de la demanda gracias a esta energía [19].

Específicamente, las implicaciones del proyecto se pueden relacionar con los siguientes Objetivos del Desarrollo Sostenible [20]:

Objetivo 3. Salud y bienestar.

La contaminación tiene un efecto directo en la salud de las personas. Gracias a las energías renovables se puede prescindir de tecnologías que liberan grandes emisiones a la atmósfera, por ejemplo las centrales térmicas de carbón. Este aspecto queda reflejado en la meta 3.9: “*Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo*”.

Objetivo 7. Energía asequible y no contaminante.

Este objetivo es el más evidente en el desarrollo del proyecto. La energía eólica transforma el movimiento de las hélices de los aerogeneradores en energía eléctrica. El coste de esta energía es muy bajo: no requiere ningún combustible y la tecnología está muy avanzada. La energía eólica es, por tanto, una energía asequible y no contaminante. Dentro de los ODS es especialmente importante el desarrollo de los países más pobres. En este objetivo en concreto, se hace hincapié en el acceso a la electricidad de los mismos.

Son relevantes las siguientes metas:

7.1 “*De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos*”.

7.2 “*De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas*”.

En este proyecto se trata directamente este asunto, ya que el objetivo es demostrar que sí es posible un acceso a la red más permisivo sin comprometer el funcionamiento de la red. La consecuencia directa es que la capacidad eólica instalada aumenta. Y por tanto, cuando hay producción de esta energía, se termina desplazando a energías más contaminantes.

Objetivo 13. Acción por el clima.

El cambio climático se manifiesta en un aumento de la temperatura medial mundial, lo cual implica consecuencias devastadoras como el deshielo de los polos, y consecuentemente, la subida del nivel del mar.

Una de las acciones más eficaces para reducir el cambio climático de forma directa es minimizar las emisiones mediante la producción de energía limpia. Se estima que el 60% de las emisiones mundiales provienen del sector de la energía. Esta decisión corresponde a los gobiernos según sugiere la meta 13.2: “Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”. Aquí cobra especial relevancia la energía eólica, siendo evidente la necesidad de aumentar la capacidad eólica instalada para desplazar a las energías que producen emisiones. De este modo, se conseguiría limitar el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C.