



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE ESTABILIZADORES ROBUSTOS PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS

Autor: Francisco de Borja Montesino-Espartero Lamo de Espinosa
Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid
Mayo de 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**DISEÑO DE ESTABILIZADORES ROBUSTOS PARA SISTEMAS DE
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS**
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023-2024 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.: Francisco de Borja Montesino-Espartero Lamo de Espinosa

Fecha: 23/05/2024



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Luis Rouco Rodríguez

Fecha: 23/05/2024



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO
DISEÑO DE ESTABILIZADORES ROBUSTOS
PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA EN BATERÍAS**

Autor: Francisco de Borja Montesino-Espartero Lamo de Espinosa
Director: Luis Rouco Rodríguez

Madrid
Mayo de 2024

DISEÑO DE ESTABILIZADORES ROBUSTOS PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS

Autor: Montesino-Espartero Lamo de Espinosa, Francisco de Borja.

Director: Rouco Rodríguez, Luis.

RESUMEN DEL PROYECTO

Extracto

El objetivo de este proyecto es el diseño de estabilizadores robustos acoplables a baterías para el amortiguamiento de oscilaciones en un sistema eléctrico. El sistema sujeto de estudio será el de 39 nudos de Nueva Inglaterra y se realizará el diseño coordinado de varios dispositivos shunt (como sistemas de almacenamiento de energía en baterías) a fin de optimizar sus valores de ganancia y lograr el amortiguamiento deseado para todas las oscilaciones que se buscan amortiguar. Se analizará el alcance de la capacidad amortiguadora de estos dispositivos, sus limitaciones, el impacto del diseño coordinado frente al individual, y el de modos inter-área frente a los locales.

La metodología que se ha seguido es progresiva yendo desde el diseño más básico hasta el más complejo, avanzando en la línea de investigación. La principal herramienta de trabajo ha sido la Small Signal Stability Toolbox (SSST) desarrollada por el profesor Luis Rouco Rodríguez, sobre la que se han desarrollado nuevas funciones y algoritmos para este proyecto.

Las conclusiones obtenidas reflejan que, en diseños para diversas contingencias y modos de oscilación, sólo se pueden realizar diseños razonables y efectivos de dispositivos shunt para los modos inter-área del sistema, dejando el control de los modos locales a otros dispositivos (como los PSS). Además, se ha comprobado la efectividad del diseño coordinado de dispositivos shunt frente al diseño individual de los mismos, asistiendo a la “colaboración” entre los mismos para lograr el mínimo valor de ganancia conjunto y el máximo amortiguamiento en las oscilaciones objetivo.

Palabras Clave

Estabilizadores robustos, diseño coordinado, dispositivos shunt, autovalores, autovectores, FACTS

Introducción

En los sistemas eléctricos, de igual forma que en los mecánicos, las oscilaciones son algo constitutivo y habitual. Sin embargo, estas oscilaciones deben ser controladas y amortiguadas a fin de que no presenten un riesgo para los sistemas eléctricos y garantizar un adecuado funcionamiento de la red.

Cuando se produce una determinada perturbación en el sistema se produce la variación en aceleración de los rotores de los generadores, rompiendo el equilibrio que existía

previamente. Se produce un desajuste entre el campo del rotor y el campo asociado a la frecuencia del sistema, que es el campo rotante del estátor. Así, la máquina pierde sincronismo, perdiendo la capacidad de trabajar a la frecuencia de trabajo del sistema, causando desajustes en tensión, corriente y potencia.

De esta forma, unas máquinas comienzan a girar más rápido y otras más lento, con la correspondiente diferencia angular entre ellas. Esto llevará a la importación de carga hacia las máquinas más rápidas desde las más lentas en base a esta relación angular. Asimismo, este hecho ayudará a la progresiva reducción de esta diferencia y a la restauración del equilibrio de velocidades de los rotores.

Sin embargo, a partir de ciertos valores de diferencia angular, un aumento en esta variable llevará directamente a una reducción de la transferencia de potencia, lo cual aumentará la diferencia más todavía. Aquí surge la inestabilidad. Dado que la diferencia angular es una magnitud no lineal surge este fenómeno y el estudio tradicional de estabilidad consiste en analizar si los rotores de las máquinas del sistema son capaces de realizar la transferencia de potencia suficiente para amortiguar las oscilaciones que surgen. Y de este estudio sale el diseño de los PSS (Power System Stabilisers), que se incorporan en los generadores.

Sin embargo, en el presente proyecto, conscientes del proceso actual de transición energética y descarbonización, se busca diseñar estabilizadores no en generadores, si no incorporados a dispositivos shunt, como las baterías, para amortiguar mediante éstos las oscilaciones de pequeña perturbación que se producen como consecuencia de la pérdida de sincronismo de los generadores al producirse una contingencia en el sistema. Cabe destacar que el término “contingencia” en este proyecto se refiere en todo momento a casos de apertura de una determinada línea del sistema que no cuente con transformador. Se estudiará su alcance, capacidad de amortiguamiento y respuesta para diversos casos y supuestos.

Objetivos del proyecto

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de métodos para el diseño de estabilizadores robustos; es decir, que sus prestaciones son válidas para varios puntos de funcionamiento del sistema eléctrico determinados por la variación de la topología de la red. Más concretamente, se busca hacer un diseño conjunto de varios dispositivos shunt acoplados en baterías para amortiguar la red sujeto de estudio para el caso base, y para diversas contingencias de apertura de líneas que puedan darse en el sistema. El objetivo fundamental del proyecto se concreta en dos objetivos secundarios:

El primer objetivo del proyecto es la obtención de los datos de entrada para la fase de diseño: la generación de un programa que brinde los flujos de cargas de todos los casos de contingencias posibles del sistema, y la obtención de una matriz con todos los autovalores de interés de cada uno de los casos.

El segundo objetivo es el principal: el diseño coordinado de varios dispositivos shunt capaces de amortiguar los modos de interés de la red de Nueva Inglaterra para diversas contingencias que puedan tener lugar en el sistema. Se programará la función que permita el diseño coordinado de los dispositivos shunt para las diversas contingencias, se estudiará el emplazamiento de los mismos, sus parámetros, y su impacto en el conjunto

del sistema y para los casos de contingencias analizados.

Contenido del proyecto

El proyecto consta de una primera parte en la que se desarrolla la base teórica en la que se sustenta toda la investigación posterior (análisis de pequeña perturbación, autovalores y sensibilidades, y diseño de estabilizadores), y una segunda parte en la que se desarrolla la misma.

La investigación comienza por la generación de los distintos casos de contingencias posibles del sistema sujeto de estudio, continúa por la determinación del controlador más efectivo para el amortiguamiento de oscilaciones y el análisis detallado de varios diseños para diversos nudos y contingencias, y termina por el diseño coordinado de varios dispositivos shunt para el amortiguamiento de todas las oscilaciones que se busca amortiguar en el sistema.

Todo ello ha sido posible gracias al desarrollo de varias funciones en MATLAB (que han sido introducidas en SSST) a fin de poder realizar este estudio de optimización y diseño de controladores.

Conclusiones

Tras la realización del proyecto, se concluye que cuando se realiza el diseño coordinado de varios dispositivos shunt, y para los casos de varias contingencias posibles del sistema, se debe realizar sólo para modos inter-área, puesto que los modos locales interactúan entre ellos y con los inter-área y no se consigue un diseño razonable y valores de amortiguamiento óptimos.

En diseño coordinado de dispositivos shunt para el amortiguamiento de modos inter-área existe “colaboración” entre los dispositivos y se puede conseguir, con un correcto emplazamiento de los mismos, valores de ganancia inferiores que cuando se realiza un diseño individual para éstos. Sin embargo, esto puede darse o no, y no necesariamente se reduce la ganancia individual al realizar un diseño coordinado. Precisamente la reducción de ganancia se produce cuando se introducen modos de oscilación similares a los anteriores para los que se diseñaba. Es decir, para aquellos asociados a las mismas zonas donde se colocaban los dispositivos shunt. Sin embargo, cuando se busca que varios dispositivos shunt amortigüen modos de oscilación de zonas diferentes a las de un diseño anterior o para contingencias de zonas diferentes, la ganancia del controlador que esté próximo a esa nueva zona aumentará, dado que asumirá el amortiguamiento de dichos modos.

Un diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt es capaz de controlar todas las posibles oscilaciones inter-área que se produzcan para cada una de las posibles contingencias del sistema de Nueva Inglaterra, lo que da una idea de la gran capacidad de amortiguamiento que tienen estos dispositivos a la hora de estabilizar redes eléctricas en sus modos inter-área. Se concluye, por tanto, que se ha logrado el objetivo del proyecto diseñando cuatro dispositivos shunt robustos en cuanto a la topología de la red, y para todos los modos inter-área del sistema.

DESIGN OF ROBUST STABILIZERS FOR ENERGY STORAGE BATTERY SYSTEMS

Abstract

The purpose of this project is the design of robust stabilizers which can be installed in batteries for the damping of oscillations in an electric system. The system subject of study will be the 39-Bus New England Test System, and a coordinated design of several shunt devices will be carried out in order to optimize their gain values and reach the desired damping for all the oscillations which must be damped. The damping power of these devices will be analysed, as well as their limits, the impact of coordinated design vs individual design, and the one of inter-area modes compared to local.

The methodology which has been followed is progressive going from the most basic design to the most complex, advancing in the story of the research. The main tool has been the Small Signal Stability Toolbox (SSST) developed by Prof. Luis Rouco Rodríguez, over which new functions and algorithms have been programmed for this project.

Conclusions reflect that, in designs for several contingencies and oscillation modes, reasonable and effective shunt device designs can only be obtained for inter-area modes, leaving the control of local modes to other devices (such as PSS). In addition, the effectiveness of the coordinated design compared to the individual design has been tested, seeing the “collaboration” between devices to reach the minimum gain value as a whole and the maximum damping in the objective oscillations.

Keywords

Robust stabilizers, coordinated design, shunt devices, eigenvalues, eigenvectors, FACTS

Introduction

In electric power systems, similarly to mechanical systems, oscillations are something constitutive and usual. Nonetheless, these oscillations must be controlled and damped in order to avoid that they present a risk for electric systems and to guarantee a correct grid behaviour.

When a certain disturbance occurs in the system, a change in the acceleration of the rotors of generators takes place, breaking the previous equilibrium. An imbalance between the magnetic field of the rotor and the one of the frequencies of the system (the rotating field of stator) is produced. In this way the machine loses synchronism, losing the capability to work at the frequency of the system, causing imbalances in voltage, current and power.

In this way, some machines start to spin faster and others slower, with the corresponding phase mismatch between them. This will lead to the importation of flow to the quicker machines from the slower ones, based on this phase relationship. Additionally, this will

contribute to the progressive reduction of this difference and the restoration of the equilibrium of the speed of rotors.

However, from certain values of phase mismatch, an increase in this variable leads directly to a reduction in power transfer, which will increase the difference even more. Instability arises at this point. Since the phase difference is a non-linear magnitude instability arises and the traditional study of instability consists in analysing if the rotors of the machines of a system are capable of making the sufficient power transfer to damp the oscillations that arise. And from this study, PSS (Power System Stabilisers) design arise, which are included in generators.

Nevertheless, in this project, being aware of the current process of energy transition and decarbonization, the aim is to design stabilisers, not in generators, but connected to batteries via shunt devices, to damp with them the small signal oscillations which occur as a consequence of the loss of synchronism of generators when a contingency takes place in a system. It should be noted that the term “contingency” in this project refers to cases of openings of certain lines of a system which don't have a transformer. Its range of action, damping power and response to different cases and hypothesis will be studied.

Project objectives

The aim of this project is the design of methods for robust stabilizer designs: those whose features are valid for different work spots of the electric system, determined by the variation of the topology of the network. More specifically, the aim is to make a joint design of several shunt devices attached to batteries to damp the grid subject of study for the base case, and for various contingencies of line openings which can occur in the system. The main objective of the project materializes in two secondary objectives:

The first target is to obtain the input data for the design phase: the creation of a program which gives the load flows of all the possible cases of contingencies of the system, and the creation of a matrix with all the eigenvalues of interest for each of the cases.

The second target is the main one: the coordinated design of various shunt devices which can be able to damp all the modes of interest in 39-Bus New England Test System for diverse contingencies which can occur in the system. The function which calculates the coordinated design of several shunt devices for several contingencies will be programmed; and their location, parameters, impact in the system as a whole, and for the cases of analysis, will be studied and developed.

Project contents

The first part of the project provides the theoretical base in which all the subsequent research is sustained (analysis of small signal disturbance, eigenvalues and sensitivities, and stabilizer design), and a second part in which the investigation is carried out.

The research starts by the creation of the possible cases of contingencies of the grid subject of study, continues with the selection of the most effective controller for damping the oscillations, with the detailed analysis of several designs for different nodes and

contingencies, and ends with the coordinated design of several shunt devices for the damping of all the oscillations which are sought to be dampened.

All of this has been possible thanks to the development of several functions in MATLAB (which have been implemented in SSST) in order to carry out this study of optimization and controller design.

Conclusions

After the project execution, it can be concluded that when a coordinated design of several shunt devices is made, and for the cases of several contingencies of a system, it must only be done for the inter-area modes, because the local modes interact between them and with the inter-area modes, and a feasible design with optimal damping values can't be obtained.

In the coordinated design of shunt devices for the damping of inter-area modes exists "collaboration" between the devices, and gain values which are lower than when an individual design is made can be obtained, with a proper location of the devices. However, this can take place or not, and not necessarily do the individual gains reduce when a coordinated design is made. The reduction of gains takes place when new modes of oscillation to control are introduced, which are similar to the ones for which we were designing. That is to say, for those associated to the same areas where shunt devices were located. Nonetheless, when the aim is that several shunt devices dampen oscillatory modes of different areas of a previous design, or for contingencies of different areas, the gain of the controller which is near to that new area will increase, as it will take control of the dampening of those modes.

A coordinated design of four shunt devices is able to control all the possible inter-area oscillations which can take place for each of the possible contingencies in the 39 Bus New England Test System, which gives an idea of the high damping power of these devices when referring to damping grids in their inter-area modes. It can be concluded that the objective of the project has been fulfilled, designing four shunt devices which are robust in grid topology, and for all the inter-area modes of the system.

Índice del proyecto

1	Introducción.....	15
	i. Motivación y tema de estudio.....	15
	ii. Objetivos del proyecto	17
	iii. Estructura del proyecto.....	18
2	Estabilidad de pequeña perturbación	19
3	Autovalores y sensibilidades	23
4	Diseño de estabilizadores.....	27
5	Caso de estudio.....	31
	i. Generación del programa que crea los flujos de cargas de contingencias y construcción de la matriz de autovalores de interés	32
	ii. Generación del programa que realiza el diseño coordinado de los dispositivos shunt y elección previa del tipo de controlador a emplear	36
	iii. Realización del primer diseño de un dispositivo shunt para los dos modos de oscilación de interés de cada uno de los casos de contingencias del sistema	37
	iv. Determinación de las áreas de diseño para dispositivos shunt	43
	v. Diseño de dispositivo shunt para nudos 19 y 29 para los modos local e inter-área asociados a los nudos y casos de estudio correspondientes	44
	vi. Diseño de dispositivo shunt para nudos 2 y 23 para los modos local e inter-área asociados a los nudos y casos de estudio correspondientes	47
	vii. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 para modos local e inter-área asociados a los nudos y casos de estudio.....	49
	viii. Conclusiones sobre el diseño coordinado de dispositivos shunt para modos local e inter-área	52
	ix. Diseño de dispositivos shunt para nudos 19 y 29 usando sólo los modos inter-área asociados a los nudos y casos de estudio.....	53
	x. Diseño de dispositivos shunt para nudos 2 y 23 usando sólo los modos inter-área asociados a los nudos y casos de estudio.....	54
	xi. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 sólo para los modos inter-área asociados a los nudos y a los casos de estudio	56
	xii. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 para todos los modos inter-área asociados a los casos de estudio	60
	xiii. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 para todos los modos inter-área asociados a todos los casos posibles de contingencias	65
6	Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	67
7	Conclusiones	68
8	Bibliografía	71

9 Anexo: Comprobación de la efectividad de los cuatro dispositivos shunt diseñados para todos los modos inter-área de todas las contingencias posibles de NE (caso de estudio XIII)	73
---	----

Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de bloques modelo para un PSS [20]	28
Figura 2: Diagrama de bloques modelo para un SVC [20]	28
Figura 3: Red de Nueva Inglaterra 39 nudos	31
Figura 4: Representación gráfica del modo local asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo nº 26)	34
Figura 5: Representación gráfica del modo inter-área asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo nº29)	35
Figura 6: Representación gráfica de los residuos normalizados obtenidos para dispositivo shunt en el n29 y para cada caso de contingencia en el sistema.....	39

Lista de tablas

Tabla 1: Matriz de autovalores de interés locales e inter-área para el diseño de un dispositivo shunt en el nudo 29.....	33
Tabla 2: Ejemplo de autovalores asociados a los modos de oscilación del rotor.....	33
Tabla 3: Análisis en forma polar del modo local de oscilación asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo nº 26).....	34
Tabla 4: Análisis en forma polar del modo inter-área de oscilación asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo nº29).....	35
Tabla 5: Resultados de diseño y autovalores para un dispositivo con control P-f.....	36
Tabla 6: Resultados de diseño y autovalores para un dispositivo con control P-v	36
Tabla 7: Resultados de diseño y autovalores para un dispositivo con control Q-v	37
Tabla 8: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para el modo local e inter-área principales asociados a todos los casos de estudio	37
Tabla 9: Residuos para dispositivo shunt en el n29 para cada caso de contingencia en el sistema	39
Tabla 10: Análisis de los factores de participación de generadores sobre el modo inter-área del caso base y del caso de apertura de línea 16-17	40
Tabla 11: Análisis de los factores de participación de generadores sobre el modo inter-área del caso de apertura de líneas 26-28, 26-29 y 28-29.....	41
Tabla 12: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para el modo local e inter-área principales de todos los casos de estudio salvo para el modo inter-área del caso 22	42
Tabla 13: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para el modo local e inter-área principales de todos los casos de estudio salvo para el modo local e inter-área del caso 22	42
Tabla 14: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 29 para los modos locales e inter-área principales asociados al caso base y a los casos de apertura de líneas 26-28, 28-29 y 26-29	43

Tabla 15: Modos de oscilación local e inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 19: caso base y 9023 // dispositivo shunt en el nudo 29: caso base y 9035) y sus diseños asociados.....	44
Tabla 16: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 19 para los modos locales e inter-área principales asociados al caso base y al caso 9023	44
Tabla 17: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 29 para los modos locales e inter-área principales asociados al caso base y al caso 9035	44
Tabla 18: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 19 y en el nudo 29 para controlar los modos local e inter-área principales asociados al caso base, caso 9023 y 9036	45
Tabla 19: Autovalores del caso base sin los dos dispositivos shunt diseñados	46
Tabla 20: Autovalores del caso base con los dos dispositivos shunt diseñados	46
Tabla 21: Autovalores del caso 9023 sin los dos dispositivos shunt diseñados	46
Tabla 22: Autovalores del caso 9023 con los dos dispositivos shunt diseñados.....	46
Tabla 23: Autovalores del caso 9035 sin los dos dispositivos shunt diseñados	47
Tabla 24: Autovalores del caso 9035 con los dos dispositivos shunt diseñados.....	47
Tabla 25: Modos de oscilación local e inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 2: caso base y 9004 // dispositivo shunt en el nudo 23: caso base y 9030) y sus diseños asociados.....	47
Tabla 26: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 2 para los modos local e inter-área principales asociados al caso base y 9004.....	48
Tabla 27: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 23 para los modos local e inter-área principales asociados al caso base y 9030.....	48
Tabla 28: Diseño coordinado de dos dispositivos shunt en los nudos 2 y 23 para los modos local e inter-área principales asociados a los casos 9001, 9004 y 9030	48
Tabla 29: Modos de oscilación locales e inter-área asociados a los cuatro dispositivos shunt que se diseñan.....	49
Tabla 30: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,19,23 y 29) para los modos locales e inter-área principales asociados a los casos 9001,9004,9023,9030 y 9035	49
Tabla 31: Matriz AKS asociada al diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt realizado	50
Tabla 32: Matriz AKS resultante del diseño coordinado sin los modos de oscilación con residuos positivos.....	51
Tabla 33: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt sin los modos de oscilación con residuos positivos	51
Tabla 34: Modos de oscilación inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 19: caso base y 9023 // dispositivo shunt en el nudo 29: caso base y 9035) y sus diseños asociados	53
Tabla 35: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 19 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9023	53
Tabla 36: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9035	53
Tabla 37: Diseño coordinado de dos dispositivos shunt en los nudos 19 y 29 para los modos inter-área principales asociados a los casos base, 9023 y 9035	54
Tabla 38: Modos de oscilación inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 2: caso base y 9004 // dispositivo shunt en el nudo 23: caso base y 9030) y diseños individuales de dispositivos shunt asociados	54

Tabla 39: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 2 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9004	55
Tabla 40: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 23 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9030	55
Tabla 41: Diseño coordinado de dos dispositivos shunt (nudos 2 y 23) para los modos inter-área principales asociados a los casos base, 9004 y 9030	55
Tabla 42: Diseño coordinado previo, pero sin el modo oscilación 28 del caso base.....	56
Tabla 43: Modos de oscilación inter-área asociados a los cuatro dispositivos shunt que se diseñan sólo para los modos inter-área de sus respectivos casos	56
Tabla 44: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,19,23 y 29) para los modos inter-área principales asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035	57
Tabla 45: Análisis de sensibilidades de los modos de oscilación del caso de estudio XI59	
Tabla 46: Matriz de autovalores de interés asociada a todos los modos inter-área de los casos de contingencias utilizados para el diseño	60
Tabla 47: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,19,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035	60
Tabla 48: Diseño coordinado para cinco dispositivos shunt (nudos 2,11,19,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035	61
Tabla 49: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,11,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035	61
Tabla 50: Autovalores del caso base sin dispositivos shunt.....	62
Tabla 51: Autovalores del caso base con los dispositivos shunt diseñados	62
Tabla 52: Autovalores del caso 9004 sin dispositivos shunt.....	62
Tabla 53: Autovalores del caso 9004 con los dispositivos shunt diseñados	62
Tabla 54: Autovalores del caso 9023 sin dispositivos shunt.....	63
Tabla 55: Autovalores del caso 9023 con los dispositivos shunt diseñados	63
Tabla 56: Autovalores del caso 9030 sin dispositivos shunt.....	63
Tabla 57: Autovalores del caso 9030 con los dispositivos shunt diseñados	63
Tabla 58: Autovalores del caso 9035 sin dispositivos shunt.....	64
Tabla 59: Autovalores del caso 9035 con los dispositivos shunt diseñados	64
Tabla 60: Matriz de autovalores de interés con todos los modos inter-área asociados a todos los casos de contingencias posibles en la red de Nueva Inglaterra	65
Tabla 61: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,11,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a todos los casos posibles de contingencias	65

1 Introducción

El presente capítulo explica la motivación del proyecto y explica brevemente el tema sujeto de estudio. También se detallan los objetivos del proyecto y la estructura del mismo.

i. Motivación y tema de estudio

En los sistemas eléctricos, de igual forma que en los mecánicos, las oscilaciones son algo constitutivo y habitual. Sin embargo, estas oscilaciones deben ser controladas y amortiguadas a fin de que no presenten un riesgo para los sistemas eléctricos y garantizar un adecuado funcionamiento de la red. En Europa se tienen dos modos fundamentales de oscilación. El Norte-Sur, de 0.25 Hz, y el Este-Oeste, de 0.15 Hz.

El 1 de diciembre de 2016 se produjo la apertura de la línea de 400kV Argia-Cantegrit a las 11:18 a.m. (hora peninsular) como consecuencia de la apertura del interruptor de circuito de la subestación primera. Esta contingencia en la red de transporte de interconexión entre España y Francia produjo unas oscilaciones no amortiguadas donde España (y Turquía a 70° de la misma) oscilaba en contra de todo el sistema eléctrico europeo en contrafase.

Tal y como recoge ENTSO-E en su informe de 2017 [1], a la hora referida se produjo el incidente en la zona oeste de la interconexión, que causó el reajuste del intercambio de potencia entre los dos países a través de las otras líneas existentes. De los 2.250MW de exportación España-Francia programados previos al incidente, España continuó suministrando en torno a 2.000MW, surgiendo unas oscilaciones de 0.15 Hz (modo Este-Centro oeste), registrándose peligrosas oscilaciones de frecuencia sobre todo en Francia, Turquía, Dinamarca, Alemania... y en la Península Ibérica, donde se registraron los valores máximos, con hasta 140 mHz de oscilaciones pico-pico.

A las 11:20 a.m. RTE y REE redujeron la potencia de intercambio a 1.000 MW. Un minuto más tarde empezó a amortiguarse y a las 11:24 se amortiguaron por completo. En resumen, tres minutos de oscilaciones desamortiguadas y cinco en total bajo sus efectos. A las 11:45 RTE cerró la línea que se había abierto, restaurando la conexión de 400 kV Argia-Cantegrit. Como recoge el informe previamente citado, una de las principales conclusiones que se extraen de este suceso es la vital importancia del estudio de los PSS (Power System Stabilisers) para amortiguar los modos de oscilación desarmortiguados que pueden surgir cuando abordamos casos de transporte a través de líneas largas con alta impedancia.

Un año más tarde, el 3 de diciembre de 2017, en Italia, comienza una oscilación a las 01:05 a.m. que registra su máximo a las 01:15 a.m. superando los 300 mHz. Tras 10 minutos de aplicación de medidas por parte del operador se consiguió estabilizar la red y solventar el incidente. Se trataba de un momento por la noche de baja demanda,

con la indisponibilidad de ciertos generadores del sureste del sistema y con un flujo sustancial de potencia desde la zona suroeste del país.

La conjunción de estos factores, con la diferencia de fase sustancial entre zonas, dio lugar a un modo de oscilación desamortiguado en el que Italia (el sur fundamentalmente), Austria, Suiza y el Este de Europa estaban oscilando en contrafase con la Península Ibérica, Francia, Alemania y Dinamarca. En este suceso de 2017 asistimos a un incremento sustancial del flujo de potencia en el eje Norte-Sur de Europa, con prácticamente ningún cambio en el Este-Oeste. Como queda recogido en el informe de 2018 de ENTSOE-E [2], esto llevó a alteraciones graves en el perfil de tensiones de numerosos países como España, que varió sus tensiones en +7-12kV.

Las conclusiones que extrae ENTSOE-E de estos sucesos son fundamentalmente cuatro:

1. La baja carga contribuye negativamente al origen y amortiguamiento de los modos de oscilación descontrolados
2. Es fundamental mantener un control constante y coordinado del perfil de ángulos del sistema, dado que a mayor desfase entre los mismos más probable es la aparición de riesgos como éste
3. Además, esta diferencia de ángulos reduce la efectividad de los PSS, junto con los puntos de poca generación y los flujos de potencia reactiva con baja carga
4. Es de vital importancia el estudio de las tecnologías de monitorización y amortiguamiento de las oscilaciones a fin de garantizar la seguridad del sistema eléctrico y evitar incidentes como los estudiados

Al observar estos fenómenos la pregunta que surge directamente es cuál es el origen de estas oscilaciones de frecuencia, potencia y tensiones. Y éste se encuentra en las oscilaciones de los rotores de los generadores, como explica Kundur [3]. Cuando el sistema se encuentra en régimen permanente la velocidad de las máquinas se mantiene, y existe un equilibrio entre el torque eléctrico de salida y el torque mecánico entrante. Cuando se produce una determinada perturbación en el sistema se produce la variación en aceleración de los rotores de los generadores, rompiendo el status-quo que existía previamente. Se produce un desajuste entre el campo del rotor y el campo asociado a la frecuencia del sistema, que es el campo rotante del estátor. Así, la máquina pierde sincronismo, perdiendo la capacidad de trabajar a la frecuencia de trabajo del sistema, causando desajustes en tensión, corriente y potencia.

De esta forma, unas máquinas comienzan a girar más rápido y otras más lento, con la correspondiente diferencia angular entre ellas. Esto llevará a la importación de carga hacia las máquinas más rápidas desde las más lentas en base a esta relación angular. Asimismo, este hecho ayudará a la progresiva reducción de esta diferencia y a la restauración del equilibrio de velocidades de los rotores.

Sin embargo, a partir de ciertos valores de diferencia angular, un aumento en esta variable llevará directamente a una reducción de la transferencia de potencia, lo cual aumentará la diferencia más todavía. Aquí surge la inestabilidad. Dado que la diferencia angular es una magnitud no lineal surge este fenómeno y el estudio tradicional de estabilidad consiste en analizar si los rotores de las máquinas de nuestro sistema son capaces de realizar la transferencia de potencia suficiente para amortiguar las oscilaciones que surgen. Y de este estudio sale el diseño de los PSS (Power System Stabilisers), que se incorporan en los generadores.

Sin embargo, en el presente proyecto, conscientes del proceso actual de transición energética y descarbonización, se busca diseñar estabilizadores no en generadores, si no incorporados en baterías mediante dispositivos shunt, para amortiguar mediante éstos las oscilaciones de pequeña perturbación que se producen como consecuencia de la pérdida de sincronismo de los generadores al producirse una contingencia en el sistema. Cabe destacar que el término “contingencia” en este proyecto se refiere a casos de apertura de una determinada línea del sistema que no cuente con transformador. Se ha definido así el término contingencia puesto que se trata del tipo de falta más habitual en las líneas de un sistema (frente a la caída de un transformador), es una maniobra que puede realizar (y realiza a diario en España) el operador del sistema; y, por último, porque se busca realizar el estudio siempre contando con los mismos generadores (ya que la mayoría de los transformadores sirven para acoplar la generación al sistema eléctrico). Se estudiará el alcance de los dispositivos diseñados, capacidad de amortiguamiento y respuesta para diversos casos y supuestos.

ii. Objetivos del proyecto

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de métodos para el diseño de estabilizadores robustos; es decir, que sus prestaciones son válidas para varios puntos de funcionamiento del sistema eléctrico determinados por la variación de la topología de la red. Más concretamente, se busca hacer un diseño conjunto de varios dispositivos shunt acoplados en baterías para amortiguar la red sujeto de estudio para el caso base, y para diversas contingencias de apertura de líneas que puedan darse en el sistema. La red que se analizará y que servirá como modelo para este trabajo será la red de 39 nudos de Nueva Inglaterra.

El objetivo fundamental del proyecto se concreta en dos objetivos secundarios:

El primer objetivo del proyecto es la generación de un programa que nos brinde los flujos de cargas de todos los casos de contingencias posibles del sistema. Es decir, la apertura de cada una de las líneas del mismo; todas las líneas que no cuentan con transformadores. De igual forma, se obtendrá una matriz con todos los autovalores de interés de cada uno de los casos. Ambos servirán como dato de entrada para el

programa posterior, centro del proyecto.

El segundo objetivo es el principal: el diseño coordinado de varios dispositivos shunt capaces de amortiguar los modos de interés de la red de Nueva Inglaterra para diversas contingencias que puedan tener lugar en el sistema. Se programará la función que permita el diseño coordinado de los dispositivos shunt para las diversas contingencias, se estudiará el emplazamiento de los mismos, sus parámetros, y su impacto en el conjunto del sistema y para los casos de contingencias analizados.

iii. Estructura del proyecto

El trabajo consta de siete capítulos.

El capítulo 1 explica la motivación del proyecto e introduce el tema sujeto de estudio. Además, se explican los objetivos y organización del mismo.

El capítulo 2 presenta el marco teórico de la estabilidad de pequeña perturbación, su relevancia e impacto en los sistemas eléctricos, las variables que intervienen y las ecuaciones que rigen el comportamiento de los elementos del sistema.

El capítulo 3 presenta la forma de aproximación y estudio de la estabilidad de pequeña perturbación en la que se basa el proyecto: autovalores y sensibilidades.

El capítulo 4 se centra en el diseño de estabilizadores y se explica el método de diseño que se seguirá en el caso de estudio a fin de obtener un diseño coordinado y robusto.

El capítulo 5 aborda el caso de estudio de este proyecto: el diseño coordinado de diversos dispositivos shunt para amortiguar determinados modos de interés para los diversos casos de contingencias posibles en el sistema eléctrico de Nueva Inglaterra.

El capítulo 6 muestra cómo el proyecto llevado a cabo está en línea con los ODS, los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas.

El capítulo 7 presenta las conclusiones que se extraen tras la consecución del proyecto.

El capítulo 8 contiene la bibliografía en la que se sustenta la investigación llevada a cabo.

El capítulo 9 es el Anexo que desarrolla los resultados obtenidos en la última parte de la investigación y que muestra cómo el diseño realizado en la misma funciona correctamente y sirve para aquello para lo que se diseñó.

2 Estabilidad de pequeña perturbación

Las oscilaciones de pequeña perturbación ocurren constantemente en los sistemas eléctricos por ligeras variaciones en las magnitudes del sistema, y tienen la ventaja de que su comportamiento puede ser linealizado. Distinguimos cuatro tipos de modos de oscilación, y analizaremos en el proyecto el comportamiento de los dos primeros:

- Modos locales: modos asociados a una determinada máquina, que oscila contra todo el resto del sistema
- Modos inter-área: modos asociados a la oscilación de varias máquinas de una zona del sistema contra otras
- Modos de control: asociados a las unidades de control y generación
- Modos torsionales: asociados a los componentes rotacionales que participan en la conversión de la energía mecánica de la turbina y la energía eléctrica del generador cuando están acoplados al mismo eje.

A fin de analizar la estabilidad de pequeña perturbación, y que ésta no ponga en peligro el sistema, es de enorme importancia el cálculo de la frecuencia y el amortiguamiento de las oscilaciones. Los amortiguamientos habrán de ser siempre positivos dado que se busca que las oscilaciones se vayan reduciendo y no aumentando, y la frecuencia mantenerla siempre dentro de los márgenes admisibles de nuestro sistema para estabilidad de pequeña perturbación.

El origen de estas oscilaciones de la frecuencia, de las potencias y de las tensiones lo encontramos en las oscilaciones de los rotores de los generadores. Es decir, estabilizar el sistema implica que los rotores de los generadores vuelvan a estar en sincronismo. En esta misma línea está la definición de estabilidad de pequeña perturbación: “is the ability of the power system to maintain synchronism when subjected to small disturbances” [es la capacidad de un sistema de potencia para mantener sincronismo cuando está sujeto a pequeñas perturbaciones] [3]. En este sentido, nos referimos a pequeña perturbación si las ecuaciones que modelan la respuesta del sistema pueden ser linealizadas.

Un sistema dinámico puede ser descrito mediante una serie de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden, donde n es el número de ecuaciones diferenciales (el orden del sistema) y r es el número de entradas.

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad , \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

El vector \mathbf{x} es el vector de estados, x_i son variables de estado, el vector \mathbf{u} es el de

entradas (inputs externos que tienen impacto en el funcionamiento del sistema), y t es el tiempo. Si un sistema es autónomo sus ecuaciones no son funciones explícitas del tiempo y el sistema queda así:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

También se pueden calcular las variables de salida:

$$y = g(x, u)$$

“The state of a system represents the minimum amount of information about a system at any instant in time t_0 that is necessary so that its future behaviour can be determined without reference to the input before t_0 ” [El estado de un sistema representa la mínima cantidad de información sobre el sistema, en cualquier instante t_0 , que es necesaria para determinar su comportamiento futuro sin referencia sobre el input antes de t_0] [3]. Y son las variables de estado cada una de las n variables linealmente independientes que describen ese estado del sistema. Las variables de estado (que no son únicas), junto con el vector de entradas u , nos permiten conocer el valor de cualquier variable del sistema.

El punto de equilibrio de un sistema será aquel donde:

$$f(x_0) = 0$$

Es decir, aquel donde todas las derivadas se hagan cero al mismo tiempo: todas las variables son invariantes con el tiempo y constantes, a velocidad cero en su trayectoria. Mientras que en un sistema no lineal pueden existir varios puntos de equilibrio, en uno lineal sólo existe uno. Y es que la estabilidad del primero depende de la entrada y del estado inicial, mientras que la estabilidad del segundo es independiente de éstos.

En sistemas de control se clasifica la estabilidad de un sistema dinámico en:

- Estabilidad local en torno a un punto de equilibrio: el sistema se mantiene en torno a una pequeña región cercana al punto de equilibrio. La gran ventaja de la estabilidad local es que sus ecuaciones no lineales pueden ser linealizadas en torno al punto de equilibrio.
- Estabilidad finita en torno a una región
- Estabilidad global: si la región cubre todo el espacio finito

Se procede ahora a mostrar el proceso de linealización de un sistema, siendo x_0 el vector de estados inicial y u_0 el vector de entradas del punto de equilibrio que estamos estudiando. Si alteramos el sistema con una pequeña perturbación, tendríamos:

$$\begin{aligned}
x &= x_0 + \Delta x \\
u &= u_0 + \Delta u \\
\dot{x} &= \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)]
\end{aligned}$$

Al tratarse de pequeña perturbación, se puede desarrollar los términos en serie de Taylor, y como $\dot{x}_{i0} = f_i(x_0, u_0)$, se obtiene:

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{x}_i &= \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \\
\Delta y_j &= \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r
\end{aligned}$$

Obteniendo así:

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

Donde:

- Δx : vector espacial de dimensión n
- Δy : vector de salida de dimensión m
- Δu : vector de entradas de dimensión r
- A : matriz de estados de tamaño n x n
- B : matriz de entradas o control de tamaño n x r
- C : matriz de salidas de tamaño m x n
- D : matriz que marca la proporción de entradas que aparecen directamente en las salidas, de tamaño m x r

Estas derivadas parciales se evalúan donde la pequeña perturbación es analizada, en el punto de equilibrio. Y aplicando la Transformada de Laplace a las ecuaciones, obtenemos:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s)$$

Resolviendo para $\Delta x(s)$ y evaluando $\Delta y(s)$, se obtiene:

$$\Delta y(s) = C \frac{adj(sI - A)}{\det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] + D\Delta u(s)$$

Se observan dos componentes de las transformadas de Laplace de ambas variables, una que depende de las entradas (u) y otra en las condiciones iniciales ($x(0)$). Los polos de $\Delta x(s)$ y de $\Delta y(s)$ son las raíces del $\det(sI - A) = 0$. Esta ecuación es la ecuación característica de A , y los valores de s que cumplen esta igualdad son los autovalores de A .

En definitiva, para analizar la estabilidad de pequeña señal se considera un sistema dinámico de ecuaciones diferenciales no lineales en forma explícita. Dado que se trata de pequeña perturbación se puede linealizar el sistema, y se hace en torno a un punto de operación. La solución de este sistema será la solución linealizada para unas determinadas condiciones iniciales, que dependerá de la matriz de estados.

3 Autovalores y sensibilidades

A fin de garantizar la estabilidad de la red, será de vital importancia el cálculo de la frecuencia y el amortiguamiento de las oscilaciones, como se ha explicado en el apartado anterior. La forma de realizar este cálculo es a través del cómputo de los autovalores del modelo lineal, como queda desarrollado en el manual de referencia de SSST [20].

Es el estudio de los autovalores de esta matriz, y el cálculo de los autovectores izquierdo y derecho, lo que permite llegar a una solución numérica robusta del problema (frente a métodos como el desarrollo en serie de Taylor). El sistema de ecuaciones no lineales que se tiene como punto de partida tiene un grado de libertad, que se elimina introduciendo una ecuación de normalización entre los autovectores izquierdo y derecho. Así, resolviendo este sistema, se obtiene una solución dependiente de los autovalores (que determinan la estabilidad y marcan los ceros de la función de transferencia), los autovectores izquierdos (ponderan las condiciones iniciales en cada modo y permiten calcular la controlabilidad de cada uno) y autovectores derechos (miden la actividad de cada variable en cada modo y permiten calcular la observabilidad de cada uno).

Los factores de controlabilidad y observabilidad permitirán también calcular los residuos de las funciones de transferencia, que tendrán especial importancia de cara a reconocer si los parámetros diseñados para el controlador son o no coherentes, entre otras cosas. Por último, en la línea de este estudio en torno a los autovalores y las funciones de transferencia, cabe destacar que se puede medir la sensibilidad de un determinado autovalor respecto a un parámetro determinado, la cual muestra la dirección y magnitud del movimiento en el plano complejo de un determinado autovalor al cambiar ese parámetro [10].

A fin de garantizar la estabilidad de la red, los autovalores que se busca mover de posición dado que indican comportamientos oscilatorios crecientes son: los reales positivos y los complejos de parte real positiva. Sin embargo, el presente proyecto se centrará sólo en los autovalores complejos asociados a los modos de oscilación del rotor dado que son los que van a generar la inestabilidad de pequeña perturbación, y es controlando estos modos como se estabiliza el sistema.

Debido a que la mayoría de los sistemas dinámicos son la suma de otros subsistemas, cobran especial relevancia en este estudio los factores de participación. Estos miden la participación de todas las variables de un subsistema sobre el sistema en su conjunto. Así, podemos medir qué máquinas o zonas tienen más influencia sobre otras.

De forma numérica, se ve lo que arriba se ha comentado:

$$A\Phi = \lambda\Phi$$

A : matriz de estados (real para un sistema de potencia físico) de tamaño n x n

λ : autovalores de A (n en total)

Φ : vector columna de tamaño n x 1

Se calculan los autovalores (complejos y reales) con: $(A - \lambda I)\Phi = 0 \rightarrow \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \dots \lambda_n$

Para cada autovalor, se encuentra un autovector derecho y un autovector izquierdo:

- Autovector derecho Φ_i (1 x n): $A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i$
- Autovector izquierdo Ψ_i (n x 1): $\Psi_i A = \lambda_i\Psi_i$

En el caso de un autovector derecho e izquierdo que corresponden al mismo λ_i , se cumple $\Psi_i\Phi_i = C_i$, siendo el término de la derecha una constante distinta de cero. Estos autovectores pueden ser también normalizados para que $C_i = 1 \rightarrow \Psi_i\Phi_i = 1$

Las propiedades de estos vectores se pueden expresar mediante:

$$A\Phi = \Phi\Lambda // \Psi\Phi = I // \Psi = \Phi^{-1}$$

$$\Phi^{-1}A\Phi = \Lambda$$

Siendo Λ una matriz diagonal que contiene a los autovalores como elementos de la diagonal principal.

Realizando el proceso de definición, transformación y combinación que desarrolla Kundur para movimiento libre (sin entradas al sistema) [3], se obtiene que la respuesta en el dominio del tiempo para una variable de estado cualquiera es:

$$\Delta x_i(t) = \Phi_{i1}c_1e^{\lambda_1 t} + \Phi_{i2}c_2e^{\lambda_2 t} + \dots + \Phi_{in}c_n e^{\lambda_n t} ,, \quad c_i = \Psi_i\Delta x(0)$$

Se obtiene así una expresión en el dominio del tiempo que define el movimiento libre del sistema en función de una combinación lineal de modos dinámicos (n, en concreto) asociados a los autovalores de la matriz de estados (y sus respectivos autovectores).

A la vista de la expresión podemos afirmar que la estabilidad de un modo vendrá determinada por $e^{\lambda_i t}$. Así, un modo de oscilación complejo vendrá determinado por una pareja conjugada de autovalores complejos. “The real component of the eigenvalues gives the damping, and the imaginary component gives the frequency of the oscillation. A negative real part represents a damped oscillation whereas a positive real part represents oscillation of increasing amplitude” [La componente real de los

autovalores da el amortiguamiento y la parte imaginaria da la frecuencia de la oscilación. Una parte real negativa representa una oscilación amortiguada mientras que una parte real positiva representa una oscilación con amplitud creciente] [3].

El factor de amortiguamiento de estos modos será también determinante para conocer el ritmo de crecimiento/ decrecimiento de la oscilación:

$$\zeta = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$$

Como se ha mencionado previamente, se puede calcular la sensibilidad de un determinado autovalor respecto de cualquier elemento de la matriz de estados, lo cual permite conocer cuánto cambiará dicho autovalor en base al parámetro o variable que se cambie en la matriz de estados. Además, su magnitud dará información sobre la mejor ubicación del controlador a instalar, y su fase sobre la compensación de fase necesaria para maximizar el amortiguamiento del dispositivo [18]. La sensibilidad vendrá determinada por los autovectores izquierdo y derecho:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \Psi_{ik} \Phi_{ji}$$

Por otro lado, de cara al estudio de estabilidad se cuenta también con los factores de participación, que son de ayuda puesto que los autovectores son dependientes de las escalas y unidades de las variables de estado, y es la matriz de participaciones (P) la que ofrece la relación entre los modos de oscilación y las variables de estado:

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_n], \quad p_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix}, \quad p_{ki} = \Phi_{ki} \Psi_{ik}$$

El último término de la derecha, p_{ki} , es el factor de participación (adimensional): mide la participación neta de la variable de estado k en el modo de oscilación i . Como se puede observar, los factores de participación y las sensibilidades guardan una estrecha relación, que no puede ser desdeñada.

Por último, se debe señalar que hasta este punto sólo se ha tenido en cuenta el análisis de autovalores para el estudio de estabilidad. Sin embargo, en diseño de controladores, trabajamos con funciones de transferencia. Kundur [3] desarrolla la relación entre ambos llegando a:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i}, \quad R_i = c \Phi_i \Psi_i b$$

Como se puede observar, los polos de la función de transferencia vienen dados por los autovalores de la matriz de estados y ésta es directamente proporcional a los residuos, que dependen de los autovectores (c es un vector fila y b un vector columna). Los ceros de la función de transferencia vendrán determinados por los residuos y los polos.

4 Diseño de estabilizadores

La pregunta fundamental que se plantea es: ¿cómo se puede lograr amortiguar las oscilaciones? La respuesta que se ha dado tradicionalmente dado el estado de la técnica es simple: incorporando unos sistemas de control suplementarios denominados estabilizadores del sistema de potencia (PSS: Power System Stabilizers) a los sistemas de excitación de los generadores. Estos sistemas crean una componente adicional al torque amortiguador creando un torque eléctrico proporcional al cambio de velocidad, mediante un compensador de red de adelanto que implementa la fase que necesitamos. Y lo hacen para un determinado rango de frecuencias, que suele ser amplio. Todo ello queda explicado y analizado con detalle en el manual de Rogers [4].

Los PSS, frente a otros dispositivos amortiguadores, son dispositivos muy eficientes en términos de costes puesto que están integrados en el propio generador. Su diseño ha de tener en cuenta: efectividad para los modos para los que se diseña, pero sin desamortiguar en exceso otros modos del sistema; y no dañar la recuperación del sistema ante falta.

Hay diferentes métodos de diseño de PSS. Un método de diseño está basado en las sensibilidades de los autovalores. Para el cálculo de estas sensibilidades [20] el sistema sujeto de estudio puede estar escrito en forma explícita o implícita, aunque la ventaja de esta última es que se puede encontrar más fácilmente la relación con la matriz de estados. Por otro lado, para sistemas eléctricos muy grandes con muchos nudos se puede utilizar la representación del sistema a través de función de transferencia, que facilita el diseño del PSS. Y, por último, cabe la posibilidad de la representación del sistema mediante una forma híbrida, explícita o implícita, para el cálculo de las sensibilidades y residuos.

La forma de utilizar las sensibilidades de los autovalores para el diseño del PSS puede ser mediante un paso o dos pasos, como queda desarrollado en el manual de referencia de SSST [20]. En la de un solo paso se tiene un bloque con polinomio general como numerador y en el denominador la representación de los filtros de medida mediante el producto de varios polinomios de primer orden. En resumen, el cálculo mediante un solo paso se refiere a la forma de ganancias dinámicas de la compensación del dispositivo. Sin embargo, en la de dos pasos se utiliza la forma de compensación habitual, con un bloque de ganancia y uno o varios de lead/lag (avance/retraso) de primer orden.

Para el diseño mediante sensibilidades de autovalores de un controlador para amortiguar un modo se siguen dos pasos: el diseño de la red de adelanto/retraso y el cómputo de la ganancia. Para lo primero, se busca que el ángulo de la sensibilidad, a la frecuencia natural, sea de 180° . Para lo segundo, se calcula la ganancia en base al amortiguamiento que se busque dar a las oscilaciones. La aproximación en dos pasos

para diseñar un controlador para varios modos de oscilación se realiza de forma similar: un primer paso de diseño de las redes de lead/lag de forma independiente, y un segundo paso de cálculo coordinado de ganancias.

Se trata, por tanto, de un problema de optimización donde la función objetivo busca minimizar las ganancias de los controladores ponderadas por sus sensibilidades:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{N_c} \gamma_j \Delta K_{Sj}, \quad \Delta K_{Sj} = K_{Sj} - K_{Sj}^0, \quad \gamma_j = \sum_{i=1}^{N_E} \left| \frac{\partial \lambda_i}{\partial K_{Sj}} \right|$$

Donde N_c es el número de controladores que diseñamos y ΔK son las ganancias de los controladores. Las restricciones a este problema de optimización serán los límites de ganancia para cada controlador que se introduzcan, así como los valores mínimos de la parte real de los autovalores que se busque amortiguar.

Por otro lado, según lo expuesto, el diagrama de bloques modelo de un PSS y de un SVC con funciones de transferencia quedaría así:

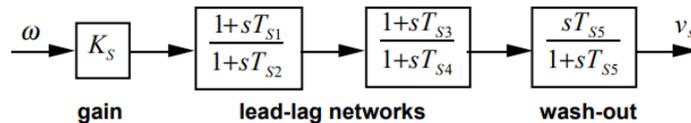


Figura 1: Diagrama de bloques modelo para un PSS [20]

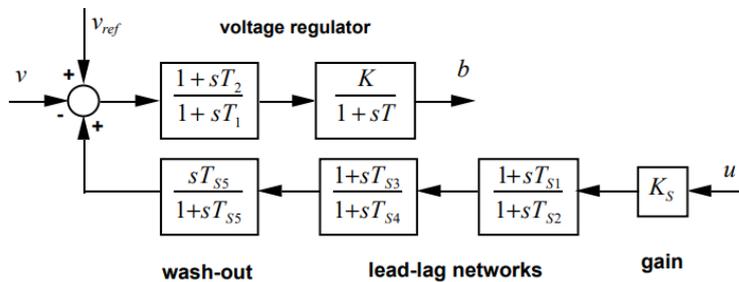


Figura 2: Diagrama de bloques modelo para un SVC [20]

Este diseño de los estabilizadores se realiza en un punto de funcionamiento del generador, para lo que uno de los inputs indispensables será el flujo de cargas del sistema. Es decir, no basta con el fichero dinámico que describe el sistema eléctrico (parámetros de generadores, shunt, cargas, líneas...) sino que se diseña el controlador para un determinado funcionamiento de la red, para un determinado punto de funcionamiento de los generadores y las máquinas. Esto es, para una determinada posición de los polos y ceros de las funciones de transferencia de las máquinas.

Por último, cabe destacar un último factor que cobra relevancia en el diseño: la determinación del signo de la realimentación del PSDC (Power System Damping Controller). Este puede ser obtenido mediante el análisis de los ceros y polos ya comentado, junto con el estudio de la respuesta en frecuencia de la función de lazo abierto [9].

Aparte de estabilizadores del sistema de potencia incorporados a los generadores existen otros dispositivos en los que se pueden incorporar estabilizadores. Es el caso de los FACTS, basados en control electrónico y que actúan como controladores de flujo de potencia y tensiones a través del sistema de transmisión. Sin embargo, el propósito fundamental de estos sistemas es el control de potencia o tensiones, y no el amortiguamiento de oscilaciones, aunque puedan ser usados para esto. Es por esto que el diseño de la acción amortiguadora de estos dispositivos se hace más compleja (entre otras cosas, se dificulta la determinación del signo de la realimentación previamente comentado). En efecto, se ha investigado sobre el amortiguamiento de oscilaciones mediante dispositivos como los enlaces en corriente continua o los controladores por tiristores (TCSC), con resultados satisfactorios para sistemas modelo [6]. Sin embargo, en sistemas reales de gran tamaño se encuentran los problemas comentados, dado que el amortiguamiento no es una acción directa sino indirecta de estos controladores.

Por ejemplo, en el caso del HVDC se trata de un dispositivo de gran tamaño y, por tanto, con gran capacidad de amortiguamiento de oscilaciones. Sin embargo, al estar su diseño determinado por parámetros que no son el amortiguamiento de oscilaciones, se pueden amortiguar oscilaciones, pero solo unos modos concretos y determinados que se deben estudiar y analizar [7]. Sin embargo, se ha de reiterar que, para ciertas aplicaciones y sistemas, y para determinados modos de oscilación, los FACTS comentados sí que son dispositivos útiles y brindan resultados óptimos para la estabilización de la red [10], por lo que resulta de vital importancia su estudio y análisis de cara a su implementación en la red. De hecho, es el amortiguamiento mediante FACTS (como el shunt – SVC, las reactancias serie – TCSC, etc.) y no mediante los tradicionales PSS lo que está cogiendo fuerza en el sector eléctrico y estos dispositivos están teniendo una relevancia y auge considerables. Es por esto que en este proyecto se busca diseñar controladores shunt acoplados a baterías para amortiguar el sistema eléctrico sujeto de estudio.

Y más allá de los motivos técnicos, viendo la aplicación las baterías con estabilizadores desde una escala más global y estratégica, la actual transición energética necesita sistemas de almacenamiento a fin de aprovechar el excedente de generación renovable que en muchas ocasiones se produce en las horas centrales del día, y que puede ser desperdiciado si no se introducen estos sistemas. En efecto, las baterías permiten almacenar y verter esa energía a la red en otros momentos de la jornada, y así aumentar la oferta de energía limpia en las horas de menos luz, viento,

etc. Así, se contribuye a un mayor peso y aprovechamiento de las energías limpias en el mix energético.

Los dispositivos que se van a investigar para conseguir estabilidad en la red de Nueva Inglaterra ante contingencias, como ya se ha comentado, son dispositivos shunt. Los dispositivos shunt son un tipo de dispositivo FACT que controla una magnitud de un determinado nudo usando como variable de entrada la tensión o frecuencia de ese mismo nudo, o una variable de un nudo adyacente. Algunos dispositivos shunt ampliamente extendidos son el SVC, el STATCOM, o los SMES. Éstos últimos serán los empleados en este proyecto. Cabe destacar que son capaces de controlar la potencia activa y reactiva, y que cuentan para ello con dos lazos independientes de control.

De forma analítica, la representación de estados de un dispositivo shunt es:

$$\Delta \dot{x}_{sh,j} = A_{sh,j} \Delta x_{sh,j} + B_{sh,j} \begin{bmatrix} \Delta v_j \\ \Delta v_k \end{bmatrix}$$

$$\Delta i_{sh,j} = C_{sh,j} \Delta x_{sh,j} + D_{sh,j} \begin{bmatrix} \Delta v_j \\ \Delta v_k \end{bmatrix}$$

La herramienta utilizada en esta investigación, SSST (Small Signal Stability Toolbox) utiliza el método, comentado anteriormente, de las sensibilidades de autovalores para el diseño de controladores.

5 Caso de estudio

En el presente capítulo, tras haber estudiado el fenómeno de la estabilidad de pequeña perturbación, la forma de aproximarnos a su estudio a través de autovalores y sensibilidades, y el método de diseño de estabilizadores, se presenta el transcurso y desarrollo de la investigación llevada a cabo.

Antes de nada, se muestra la red utilizada como caso de estudio:

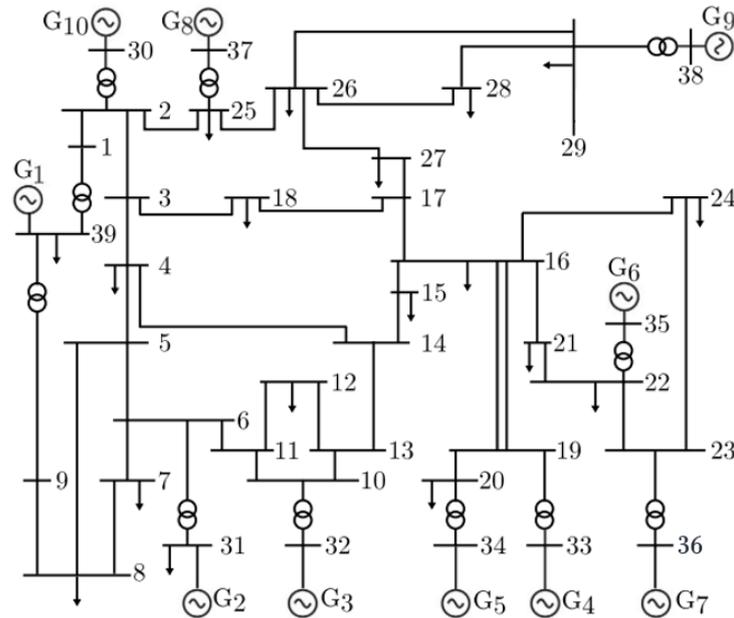


Figura 3: Red de Nueva Inglaterra 39 nudos

La red utilizada como referencia en el presente proyecto ha sido la de Nueva Inglaterra. Como se ve en la imagen, tiene 39 nudos, siendo los nudos 30 a 39 nudos de generación síncrona (nudos PV), mientras que los demás son nudos PQ de demanda.

Cabe destacar especialmente el hecho de que entre los nudos 16 y 19 no hay sólo una línea (como se muestra en algunos estudios para este mismo caso base) si no dos líneas en paralelo. Cada una de ellas con unos parámetros en pu de:

- $r = 0.0032$ pu
- $x = 0.039$ pu
- $b = 0.152$ pu

Por otro lado, a la hora de realizar el diseño de cualquier dispositivo shunt, se utilizarán los siguientes parámetros:

- [t1 t2 k t tw to-bus ckt]: [1 1 0 0.05 5 0 0]
- Número de redes de adelanto/retraso: 1
- Signo de la ganancia: positivo
- Amortiguamiento de los modos de oscilación: 15%
- Límite de ganancia del controlador: 1000000000 (número muy elevado para que ésta no sea una restricción que limite el problema de optimización)

A fin de llevar a cabo la investigación, se utiliza la Small Signal Stability Toolbox (SSST) desarrollada por el profesor Luis Rouco Rodríguez.

La SSST es una colección de funciones en Matlab que permiten el análisis detallado y completo de la estabilidad de pequeña perturbación en sistemas eléctricos. En concreto, permite: correr y analizar el flujo de cargas de un sistema, realizar el modelo lineal del mismo, su análisis de autovalores detallado y el de orden reducido, estudiar la respuesta lineal, los ceros de sus funciones de transferencia, los factores de observabilidad y controlabilidad, y las sensibilidades de sus autovalores. Además, permite diseñar un controlador de amortiguamiento para uno o varios modos de oscilación, y existe también la opción de un estudio de autovalores para aplicaciones de energía eólica.

En definitiva, toda una serie de herramientas que permitirán realizar un estudio en profundidad en relación al amortiguamiento de modos oscilación en sistemas eléctricos.

i. Generación del programa que crea los flujos de cargas de contingencias y construcción de la matriz de autovalores de interés

En primer lugar, se ha desarrollado un programa que permite obtener cada uno de los casos de contingencias posibles en el sistema. En concreto, se ha creado una función que genera los ficheros de 36 flujos de cargas distintos: el caso base es el primero, y después vienen 35 casos en los que en cada uno se abre una línea del sistema (estos son todos los casos posibles de apertura de líneas en Nueva Inglaterra, dado que solo se tienen en cuenta las líneas sin transformadores, como se ha explicado con anterioridad).

Como primera aproximación se busca introducir un shunt en el nudo 29, como continuación del estudio publicado en 2023 por el *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* con el título “Power oscillation damping method suitable for network reconfigurations based on converter interfaced generation and combined use of active and reactive powers” [12]. Sin embargo, en vez de analizar únicamente el efecto del shunt sobre los modos local e inter-área asociados a la zona de este nudo

para el caso base, aquí se busca diseñar un shunt que amortigüe los modos local e inter-área asociados a la misma para cada uno de los casos de contingencias. Es decir, un efecto amortiguador no para 2 modos, sino para 72. Obtenemos así una matriz de 36 filas, una para cada caso, y 2 columnas; dado que buscamos amortiguar el modo local e inter-área asociados a la zona del nudo 29. La matriz resultante la llamamos *eigint* y contiene los índices de los modos de oscilación local e inter-área para cada uno de los casos de estudio.

```
eigint = [
30 31;          30 31;          28 30;          29 30;
29 30;          30 31;          28 30;          29 30;
29 30;          30 31;          28 30;          29 30;
29 30;          30 31;          30 31;          29 30;
29 30;          30 31;          28 30;          29 30;
29 30;          29 30;          28 30;          29 30;
29 30;          30 31;          29 30;          30 31;
30 31;          30 31;          29 30;          30 31;
29 30;          30 31;          29 30;          29 30];
```

Tabla 1: Matriz de autovalores de interés locales e inter-área para el diseño de un dispositivo shunt en el nudo 29

A fin de clarificar cómo se realiza la selección de estos modos, se muestra un ejemplo sencillo para explicar cómo se realiza la selección del modo local e inter-área para cada caso. En Matlab y mediante la *Small Signal Stability Toolbox* se carga el fichero de flujo de cargas del caso de estudio que se analiza y se obtienen los autovalores asociados a los modos de oscilación del rotor:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4161	8.8988	4.6708	1.4178	omega	ROT	36
24	-0.4243	8.7250	4.8578	1.3903	omega	ROT	37
25	-0.3294	8.5802	3.8364	1.3666	omega	ROT	33
26	-0.2699	7.5056	3.5931	1.1953	omega	ROT	32
27	-0.2924	7.0679	4.1337	1.1259	omega	ROT	35
28	0.0027	6.9859	-0.0393	1.1118	delta	ROT	30
29	-0.2617	6.4017	4.0841	1.0197	omega	ROT	31
30	-0.2670	6.0386	4.4169	0.9620	omega	ROT	38
31	-0.2856	3.8644	7.3693	0.6167	omega	ROT	39

Tabla 2: Ejemplo de autovalores asociados a los modos de oscilación del rotor

En el caso que se ha comentado interesaría ver los autovectores asociados a esos autovalores a fin de ver dónde el generador 38 adquiere su mayor participación (o la segunda más grande), dado que el generador 38 es el más cercano al nudo 29, que es donde se coloca el dispositivo shunt. Así, se localiza el modo local (como aquel en que se produce una determinada oscilación, en este caso, del generador 38 contra otro de su misma área) y el modo inter-área (como aquel en que se produce una oscilación del generador 38 con alguna otra área y contra otras). Se ve más claramente con el siguiente ejemplo.

Supongamos que se busca colocar un shunt en el nudo 11. Los dos generadores más próximos son el 31 y el 32 por lo que probablemente los modos de oscilación asociados serán el 26 y el 29, puesto que son los que corresponden a los generadores de los nudos 31 y 32. Sin embargo, esto no siempre es así, y se debe comprobar mediante los autovectores. Además, son los autovectores los que permiten determinar qué modos son locales y cuáles inter-área.

Se dibujan gráficamente los autovectores asociados a los modos de oscilación arriba mostrados y se detecta el modo local. Este es aquel en que el generador 31 o 32 tiene la máxima participación y oscila uno contra otro: es decir, que la oscilación es local al área en cuestión (es interna a esa área). Se ve claramente en la Figura 4 y Tabla 3, en que se ve que las mayores participaciones con diferencia en el modo n°26 las tienen los generadores 31 y 32, y uno oscila en fase contraria al otro. Se ha localizado, por tanto, el modo local: el modo n° 26.

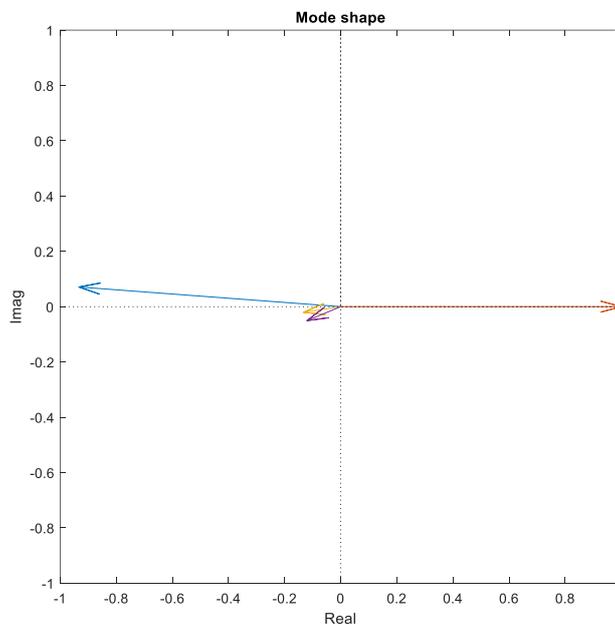


Figura 4: Representación gráfica del modo local asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo n° 26)

Gen	Mag	Phase
30	0.04019	166.99
31	0.93566	175.65
32	1.00000	0.00
33	0.01299	-159.03
34	0.02023	50.96
35	0.13415	-171.30
36	0.13074	-157.20
37	0.01152	92.70
38	0.00527	-150.69
39	0.00177	-111.10

Tabla 3: Análisis en forma polar del modo local de oscilación asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo n° 26)

En cuanto al inter-área, se siguen analizando los autovectores y se encuentra el modo inter-área en aquel modo en que el generador 31 o 32 alcanza máxima participación y oscilan con la misma fase contra otras áreas del sistema. Se ve claramente en la Figura 5 y Tabla 4 en que vemos que los generadores 31 y 32 oscilan con la misma fase y con alta participación contra el generador 34 (y en menor medida contra el 38, el 33 y el 30). Es decir, unas áreas contra otras. Éste, el modo n°29, será por tanto el modo inter-área asociado a la colocación de un shunt en el nudo 11 para el caso base:

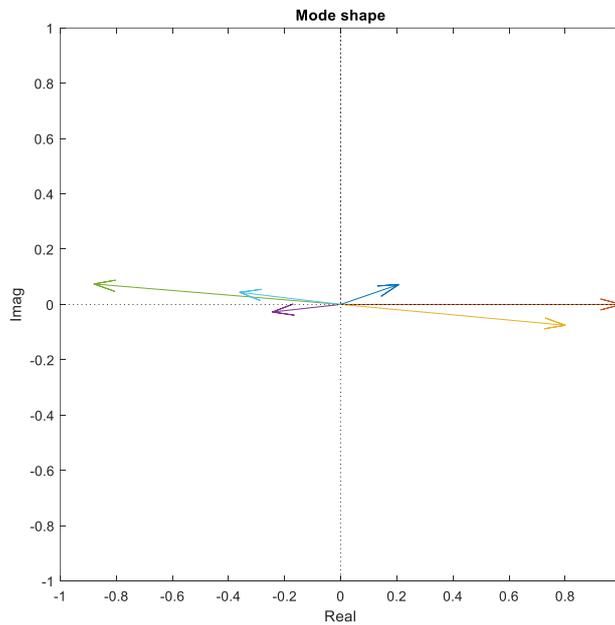


Figura 5: Representación gráfica del modo inter-área asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo n°29)

Gen	Mag	Phase
30	0.21922	19.28
31	1.00000	0.00
32	0.80352	-5.38
33	0.24457	-173.60
34	0.88246	175.19
35	0.07025	-111.02
36	0.06787	-110.68
37	0.09050	2.11
38	0.36292	173.08
39	0.04697	177.43

Tabla 4: Análisis en forma polar del modo inter-área de oscilación asociado al caso base para un dispositivo shunt en el n11 (modo n°29)

De esta forma, se eligen los modos de oscilación 26 y 29 como local e inter-área para un shunt en el nudo 11 para el flujo de cargas del caso base (sin apertura de ninguna línea). Este es el procedimiento que se ha seguido para la elección de todos los modos de oscilación de interés contenidos en la matriz eigint, pero para un shunt en el nudo 29.

ii. Generación del programa que realiza el diseño coordinado de los dispositivos shunt y elección previa del tipo de controlador a emplear

Una vez elegidos los modos de oscilación de interés, se programa la función *rdcmm_evolution_ne*, que dará como resultado el diseño del shunt en cuestión. Antes de diseñar uno, se comprueba que el controlador que mejor amortigua las oscilaciones es el control potencia activa-frecuencia, frente a los reactiva-tensión, activa-tensión, o reactiva-frecuencia.

Se ve claramente en las simulaciones que se muestran a continuación que para un shunt en el nudo 29 en el caso base y amortiguando los modos de oscilación 30 y 31, es el control P-f el que registra los valores de amortiguamiento más acordes con el deseado (15%) y con un valor de ganancia razonable.

CONTROL P-f:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	29	945.2615	0.1237	0.0970				
30		-0.9634	6.3428	15.0173	1.0211	omega	ROT	38
31		-0.6554	4.0135	16.1159	0.6472	omega	ROT	39

Tabla 5: Resultados de diseño y autovalores para un dispositivo con control P-f

CONTROL P-v:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	29	611.5444	0.0447	2.7129				
30		-0.2678	6.0624	4.4125	0.9658	omega	ROT	38
31		-0.2887	3.8857	7.4081	0.6201	omega	ROT	39

Tabla 6: Resultados de diseño y autovalores para un dispositivo con control P-v

CONTROL Q-f:

No es posible obtener un diseño de un shunt con control Q-f para esos modos de oscilación debido a que las restricciones del problema de optimización son demasiado acotadas.

CONTROL Q-v:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	29	8.5019	1.0000	0.0264				

30	-0.2678	6.0624	4.4125	0.9658	omega	ROT	38
31	-0.2887	3.8857	7.4081	0.6201	omega	ROT	39

Tabla 7: Resultados de diseño y autovalores para un dispositivo con control Q-v

Al introducir estos diseños realizados en el fichero dinámico del sistema y correr el caso, se observa que los mejores resultados de amortiguamiento se consiguen para el control P-f. Por ello, se decide usar este, aunque las ganancias obtenidas sean superiores a los de los otros controles, aunque dentro de valores razonables.

Estos resultados y la elección del control están alineados con investigaciones anteriores: “Simulation results, as well as the stability study, show the superiority of the POD-P stabilizer over the POD-Q, but at a cost of having to use some kind of energy supply in the DC bus to support the power interchange during system stabilization” [Los resultados de las simulaciones, así como el estudio de estabilidad, muestran la superioridad del estabilizador de potencia activa sobre el de reactiva, pero con el coste de tener que añadir algún tipo de fuente de energía en el bus de continua para apoyar el intercambio de potencia durante la estabilización del sistema] [13]. Otros estudios también utilizan dispositivos shunt con potencia activa por ser los más efectivos para esta funcionalidad [18].

iii. Realización del primer diseño de un dispositivo shunt para los dos modos de oscilación de interés de cada uno de los casos de contingencias del sistema

Se realiza ahora el primer diseño de un shunt en el nudo 29 para todos los modos de oscilación elegidos (matriz *eigint*). Se obtienen los siguientes resultados:

```

Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1         TS2         TS3         TS4         TS5         TS6
-----
29  5852.6705  0.1144     0.1037     0.1144     0.1037

```

Tabla 8: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para el modo local e inter-área principales asociados a todos los casos de estudio

Se observa que el valor de *KS* obtenido en el diseño es extremadamente elevado (del orden de 5.000 frente al orden de 900 del diseño para dos modos de oscilación en el caso base). Esto es debido a que se tienen algunos residuos muy pequeños que obligan a unas ganancias muy grandes para mover los autovalores. Se tiene el polo que queremos mover al lado de un cero a su izquierda muy cerca suyo. El polo va a irse hacia el cero, pero no se va a conseguir el amortiguamiento deseado y que indica la *KS* porque el residuo asociado a ese autovalor es muy pequeño. Se ve, por tanto, que el controlador diseñado no va a servir para amortiguar todos los modos de oscilación que se buscaban para todos los casos. Se ve la necesidad de acotar el problema para así obtener un modelo de optimización que se sepa que sí tiene solución.

Es decir, los resultados obtenidos en el diseño llevan a seleccionar exactamente qué autovalores se van a poder mover como se busca y diseñar uno o varios shunt para ellos. Lo que se ha visto es que no es posible controlar el modo local y el modo inter-área en un sistema para todos los casos posibles de apertura de líneas que pueden ocurrir. La razón numérica que puede haber detrás de esto, como se ha explicado, son los muy bajos residuos que aparecen asociados a los autovalores sujeto de estudio (al haber un solo shunt para controlar un número muy elevado de modos de oscilación locales e inter-área). A fin de analizar esto, se realiza una tabla que recoge todos los posibles casos de apertura de líneas, y los residuos asociados a los autovalores principales del modo local e inter-área para cada caso y asociados a la colocación del shunt en el nudo 29:

FICHERO	CASO	MÓDULO	MÓDULO NORMALIZADO	FASE	TIPO
pc9001	ninguna	0.000630425128042	0.5614	169.13	local
		0.000376165791317	0.3350	179.66	inter-área
pc9002	1 a 2	0.000562926632322	0.5013	167.62	local
		0.000467580586850	0.4164	-161.11	inter-área
pc9003	1 a 39	0.000557107841189	0.4961	167.46	local
		0.000466453986083	0.4154	-160.68	inter-área
pc9004	2 a 3	0.000572568403920	0.5098	157.78	local
		0.000340949470612	0.3036	179.68	inter-área
pc9005	2 a 25	0.000548034422298	0.4880	170.65	local
		0.000833331021339	0.7420	-172.04	inter-área
pc9006	3 a 4	0.000551265376778	0.4909	163.03	local
		0.000403248102590	0.3591	179.93	inter-área
pc9007	3 a 18	0.000564461888318	0.5026	166.33	local
		0.000375203593447	0.3341	-178.82	inter-área
pc9008	4 a 5	0.000659890876087	0.5876	167.15	local
		0.000400536691271	0.3567	179.71	inter-área
pc9009	4 a 14	0.000650277583973	0.5790	168.75	local
		0.000358462657846	0.3192	-179.51	inter-área
pc9010	5 a 6	0.000678374069958	0.6041	168.8	local
		0.000362067515821	0.3224	-179.94	inter-área
pc9011	5 a 8	0.000636675267098	0.5669	169.29	local
		0.000370580732763	0.3300	-179.32	inter-área
pc9012	6 a 7	0.000644646990661	0.5740	169.36	local
		0.000364360435938	0.3244	-179.21	inter-área
pc9013	6 a 11	0.000662547532518	0.5900	169	local
		0.000349438550297	0.3112	-178.25	inter-área
pc9014	7 a 8	0.000640191036634	0.5701	169.3	local
		0.000368989156219	0.3286	-179.7	inter-área
pc9015	8 a 9	0.000720718105897	0.6418	169.71	local
		0.000356446831505	0.3174	-172.23	inter-área
pc9016	9 a 39	0.000718897473103	0.6401	169.69	local
		0.000356074626941	0.3171	-172.13	inter-área
pc9017	10 a 11	0.000653981259544	0.5823	169.07	local
		0.000357134553381	0.3180	-178.96	inter-área
pc9018	10 a 13	0.000687297415904	0.6120	166.53	local
		0.000381073783324	0.3393	179.58	inter-área
pc9019	13 a 14	0.000340543507828	0.3032	162.93	local
		0.000385773655309	0.3435	179.53	inter-área
pc9020	14 a 15	0.000607484526799	0.5409	170.68	local
		0.000388765866542	0.3462	-179.1	inter-área
pc9021	15 a 16	0.000594367118456	0.5293	171.73	local
		0.000377390324184	0.3360	-175.64	inter-área

pc9022	16 a 17	0.001093684712408 0.000037873912943	0.9739 0.0337	169.45 -154.93	local inter-área
pc9023	16 a 19 (línea 1)	0.000261535969353 0.000315088679757	0.2329 0.2806	168.16 -176.87	local inter-área
pc9024	16 a 19 (línea 2)	0.000261535969353 0.000315088679757	0.2329 0.2806	168.16 -176.87	local inter-área
pc9025	16 a 21	0.000620752967242 0.000276227896273	0.5528 0.2460	166.16 -178.49	local inter-área
pc9026	16 a 24	0.000669115519455 0.000354632116124	0.5958 0.3158	168.6 179.77	local inter-área
pc9027	17 a 18	0.000568107094735 0.000372528791754	0.5059 0.3317	166.36 -177.77	local inter-área
pc9028	17 a 27	0.001054986397322 0.000345753252886	0.9394 0.3079	170.48 -177.4	local inter-área
pc9029	21 a 22	0.000621254957591 0.000217259164354	0.5532 0.1935	166.57 -175.66	local inter-área
pc9030	22 a 23	0.000631493380757 0.000376167436374	0.5623 0.3350	169.1 179.73	local inter-área
pc9031	23 a 24	0.000688255818778 0.000323538359633	0.6129 0.2881	168.25 -179.04	local inter-área
pc9032	25 a 26	0.000789248515805 0.000657822455673	0.7028 0.5858	170.74 -177.57	local inter-área
pc9033	26 a 27	0.000967235395159 0.000507772733834	0.8613 0.4521	171.55 179.44	local inter-área
pc9034	26 a 28	0.000937791951744 0.000761381037529	0.8351 0.6780	171.18 -178.3	local inter-área
pc9035	26 a 29	0.000956051378817 0.000856724108061	0.8513 0.7629	171.02 -177.64	local inter-área
pc9036	28 a 29	0.000886439831772 0.001123022050861	0.7893 1.0000	171.56 -175.63	local inter-área

Tabla 9: Residuos para dispositivo shunt en el n29 para cada caso de contingencia en el sistema

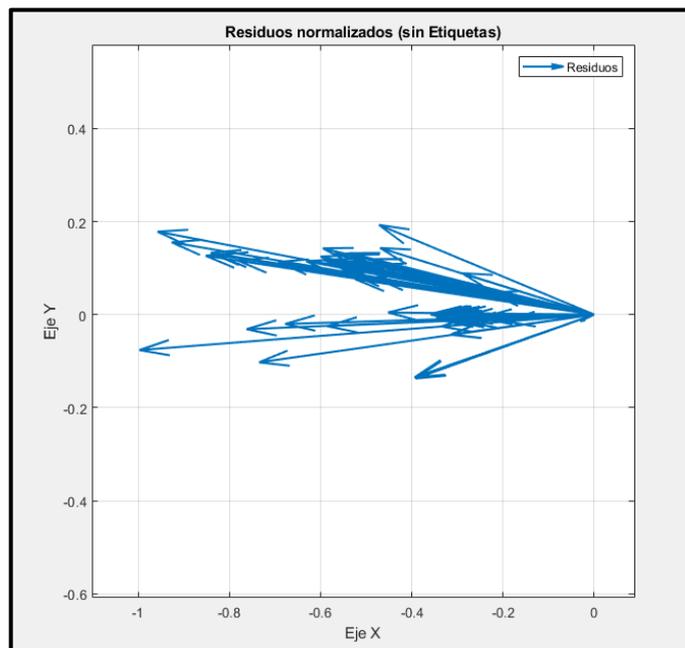


Figura 6: Representación gráfica de los residuos normalizados obtenidos para dispositivo shunt en el n29 y para cada caso de contingencia en el sistema

Se observa en la tabla y en el gráfico que todas las fases obtenidas son hacia el eje horizontal negativo. Es decir, tienden a amortiguar las oscilaciones, por lo que no presentarán problema las fases de los autovalores.

En cuanto a los módulos, vemos claramente que todos los residuos normalizados obtenidos están en el orden de magnitud de la decena; salvo el residuo del modo inter-área del caso 22 (apertura de la línea 16-17) marcado en gris oscuro en la Tabla 9, que está en un orden de magnitud menos. Viendo el esquema de la red de NE se ve que tiene sentido puesto que la apertura de esta línea separa claramente el sistema en dos: toda la zona de los generadores 30, 37, 38 y 39 frente a la de los demás.

De forma analítica, a fin de encontrar el sentido del resultado obtenido por la Tabla 9, se calculan los factores de participación de los generadores del sistema sobre el modo inter-área (el autovalor de índice 31). Los resultados para el modo local no se muestran puesto que en todos los casos el mayor factor de participación en los modos locales de *eigint* se alcanza en el generador del nudo 38. Se obtiene lo siguiente:

Factores de participación en el modo inter-área para el CASO BASE (sin apertura de líneas)	Factores de participación en el modo inter-área para el CASO 22 (apertura línea 16-17)
Generator Magnitude	Generator Magnitude
-----	-----
30 0.030072	30 0.002882
31 0.032264	31 0.021499
32 0.047815	32 0.035052
33 0.060976	33 0.108163
34 0.105650	34 0.167168
35 0.091441	35 0.162955
36 0.055725	36 0.095793
37 0.021161	37 0.001737
38 0.139205	38 0.010850
39 0.422534	39 0.413821

Tabla 10: Análisis de los factores de participación de generadores sobre el modo inter-área del caso base y del caso de apertura de línea 16-17

Se ve cómo, para el caso 22, mientras que la participación de los demás generadores no varía en exceso, la participación del generador 38 se derrumba hasta un 1%, frente al 14% que presentaba en el caso base. Es decir, para el caso de la apertura de la línea 16-17 el generador del nudo 38 no hace prácticamente nada. Es decir, que un dispositivo shunt colocado en el nudo 29 para el caso de la apertura de esa línea tiene una participación prácticamente nula sobre el amortiguamiento de oscilaciones del sistema. Esto da sentido a lo que se concluía sobre la tabla de residuos: para el caso 22 se tiene un residuo muy muy bajo y el controlador querrá poner una ganancia muy muy elevada para amortiguar las oscilaciones, dado que su participación en el amortiguamiento es prácticamente nula.

Precisamente lo contrario es lo que se observa en los casos de la apertura de las líneas

más cercanas al nudo 29 (donde se coloca el shunt). Como se ve en la Tabla 9 marcados en gris claro, los residuos normalizados asociados a la apertura de las líneas 26-28, 28-29 y 26-29 son de los más altos del sistema. Estos residuos elevados implican sensibilidades elevadas y, por tanto, ganancias del controlador más bajas y razonables. Se calculan a continuación los factores de participación asociados a esos tres flujos de cargas y para sus modos inter-área de *eigint*:

Factores de participación en el modo inter-área para el CASO 34 (apertura línea 26-28)	Factores de participación en el modo inter-área para el CASO 35 (apertura línea 26-29)	Factores de participación en el modo inter-área para el CASO 36 (apertura línea 28-29)
Generator Magnitude -----	Generator Magnitude -----	Generator Magnitude -----
30 0.020690	30 0.012637	30 0.018831
31 0.022003	31 0.015565	31 0.020370
32 0.032973	32 0.022768	32 0.030475
33 0.044439	33 0.032164	33 0.041544
34 0.077127	34 0.058482	34 0.072516
35 0.067962	35 0.051018	35 0.063929
36 0.040617	36 0.029794	36 0.038090
37 0.015870	37 0.010709	37 0.014768
38 0.254220	38 0.321734	38 0.271391
39 0.431045	39 0.452934	39 0.434936

Tabla 11: Análisis de los factores de participación de generadores sobre el modo inter-área del caso de apertura de líneas 26-28, 26-29 y 28-29

Se ve claramente que para todos estos casos de desconexión de líneas cercanas al emplazamiento del dispositivo shunt, el generador 38 (es decir, el nudo 29) tiene una gran capacidad de control sobre los modos inter-área, con factores de participación del 25-30%. Estos altos factores de participación implican altas sensibilidades de los autovalores respecto del nudo 29, lo cual lleva a mayores residuos y a ganancias más bajas.

En definitiva, lo que se muestra con los datos obtenidos a lo largo de este ensayo es que el modelo de optimización que se utiliza para el diseño del controlador está basado en las sensibilidades y que nos brinda resultados óptimos y precisos. Sin embargo, con todos los casos de contingencias posibles de un sistema sería de gran ayuda el uso de los factores de participación, a fin de descartar ciertos autovalores que, debido a la baja participación del nudo del shunt en el amortiguamiento de las oscilaciones para ciertos casos, llevan a residuos anormalmente reducidos y, en consecuencia, a obtener un diseño de controlador con unas ganancias desorbitadas (como se ha obtenido para el diseño del comienzo de este ensayo).

En otras palabras, se ha de acotar el problema, dado que no se va a poder diseñar un solo controlador que sea efectivo para el amortiguamiento de todas las posibles contingencias del sistema. Y, para ello, se hace uso de los residuos (sensibilidades) y los factores de participación (que el modelo de optimización no tiene cuenta pero que

se ha analizado a fin de ver la explicación de por qué el residuo obtenido es tan bajo).

Se comprueba ahora que, efectivamente, el residuo tan bajo del modo inter-área del caso 22 está haciendo que la ganancia se dispare. Se diseña para todos los modos de la matriz *eigint* salvo para este modo. Se obtiene el siguiente diseño:

```
Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1      TS2      TS3      TS4      TS5      TS6
-----
  1  29  2497.5472  0.1145  0.1037  0.1145  0.1037
```

Tabla 12: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para el modo local e inter-área principales de todos los casos de estudio salvo para el modo inter-área del caso 22

Se observa que se ha mejorado notablemente la situación; desde una ganancia de 5800 a una de 2500. Sin embargo, continúa siendo un valor de ganancia excesivamente elevado para los parámetros de diseño habituales de un controlador. Se prueba entonces a quitar también el modo local del caso 22, obteniendo el siguiente diseño:

```
Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1      TS2      TS3      TS4      TS5      TS6
-----
  1  29  2503.4411  0.1137  0.1032  0.1137  0.1032
```

Tabla 13: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para el modo local e inter-área principales de todos los casos de estudio salvo para el modo local e inter-área del caso 22

Se puede observar que no ha habido una diferencia notable respecto al caso anterior y encontramos unos parámetros de diseño prácticamente idénticos al caso en que sólo se quitaba el modo inter-área. Esto lleva a pensar que hay otros modos de oscilación que están generando esta ganancia tan elevada: se debe restringir el control del shunt a un menor número de casos de contingencias. Además, dado que el nudo donde se coloque el shunt sólo tendrá factores de participación altos para unos determinados modos de oscilación, se puede afirmar que serán necesarios más dispositivos shunt, y un diseño coordinado de los mismos, para poder amortiguar todos los modos de oscilación de la matriz definida.

A fin de comprobar si esto es lo que se necesita en el sistema (que cada shunt controle sólo los modos de oscilación asociados a las contingencias cercanas al nudo donde está colocado), se realiza el diseño de un shunt para el caso base y los tres casos de apertura de líneas cercanas al nudo 29 (26-28, 28-29, 26-29) para ver si el valor de ganancia que se obtiene es razonable y en el mismo orden de magnitud que los 950 de referencia para este nudo. El diseño obtenido es:

```
Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1      TS2      TS3      TS4      TS5      TS6
-----
  1  29    984.5780  0.1177  0.1041
```

Original and Estimated Eigenvalues:

No.	Real	Imag	Damp	Real	Imag	Damp
1	-0.2670	6.0386	4.4169	-0.9058	6.1222	14.6358
2	-0.2856	3.8644	7.3693	-0.6619	3.8489	16.9481
3	-0.2568	5.3278	4.8143	-1.2044	5.4205	21.6895
4	-0.2739	3.7297	7.3240	-1.0332	3.6722	27.0852
5	-0.2540	5.2833	4.8018	-1.2193	5.3807	22.1007
6	-0.2690	3.6998	7.2508	-1.1224	3.6256	29.5741
7	-0.2568	5.1682	4.9632	-1.1517	5.2504	21.4255
8	-0.2622	3.5911	7.2830	-1.3760	3.4557	36.9935

Tabla 14: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 29 para los modos locales e inter-área principales asociados al caso base y a los casos de apertura de líneas 26-28, 28-29 y 26-29

Se ve que el diseño obtenido es efectivo, y muy parecido al shunt diseñado para el caso base en cuanto a ganancia, por lo que se da por válido el diseño y se concluye que lo lógico va a ser colocar varios dispositivos shunt en el sistema y así amortiguar el sistema por áreas.

iv. Determinación de las áreas de diseño para dispositivos shunt

La ubicación de los dispositivos shunt, a diferencia de otros dispositivos de estabilización como las reactancias serie, es decisiva [14]. En estudios realizados por diversos expertos se ha utilizado como criterio de selección de emplazamiento de dispositivos shunt la búsqueda de las líneas del sistema con las mayores sensibilidades para cada uno de los autovalores respecto a la reactancia serie de éstas [18]. Sin embargo, se ha realizado en investigaciones para un número de modos de oscilación muy reducido (dos en el caso del estudio citado) que permitía ir modo a modo calculando y comprobando las sensibilidades de cada uno respecto a cada línea.

Sin embargo, para el caso de este proyecto, en que se diseña para un número de modos de oscilación muy superior a dos, se hace imposible el uso de este método tan lento y artesanal. Se busca, por tanto, el mejor emplazamiento de los dispositivos shunt con otro criterio: el de los generadores coherentes. El sistema de Nueva Inglaterra ya ha sido estudiado con detalle y analizado siguiendo este criterio [5]. Siguiendo las áreas determinadas mediante este criterio en la citada tesis para cuatro áreas de trabajo, se observa que lo más razonable sería colocar cuatro dispositivos shunt en los siguientes nudos (y se diseñará cada uno sólo para los casos de las siguientes contingencias):

- Nudo 29 / Caso base + Caso apertura línea 26-29 / 9001+9035
- Nudo 19 / Caso base + Caso apertura línea 16-19 / 9001+9023
- Nudo 2 / Caso base + Caso apertura línea 2-3 / 9001+9004
- Nudo 23 / Caso base + Caso apertura línea 22-23 / 9001+9030

Es decir, como primera aproximación, se buscará diseñar cuatro dispositivos shunt

por separado y luego introducirlos en un mismo fichero dinámico y correr los 36 casos y ver cómo responde el sistema. El objetivo final será diseñar estos cuatro dispositivos shunt de forma conjunta y así que los dispositivos shunt “se ayuden” entre ellos para amortiguar los modos de oscilación de interés.

v. Diseño de dispositivo shunt para nudos 19 y 29 para los modos local e inter-área asociados a los nudos y casos de estudio correspondientes

		LOCAL	IA	KS	TS1	TS2
SHUNT N19	CASO BASE	25	31	3910.4678	0.107	0.0773
	9023	24	29	2476.4423	0.1059	0.0653
SHUNT N29	CASO BASE	30	31	945.2615	0.1237	0.097
	9035	30	31	547.921	0.1214	0.107

Tabla 15: Modos de oscilación local e inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 19: caso base y 9023 // dispositivo shunt en el nudo 29: caso base y 9035) y sus diseños asociados

En esta tabla se muestran los diseños de dispositivos shunt para los nudos y casos especificados. Un dispositivo shunt para cada caso (dos modos de oscilación). Como se puede observar, los parámetros cambian considerablemente entre colocar un shunt en un nudo u otro. Es por ello que estos cuatro diseños base son necesarios puesto que se necesita una referencia con la que comparar los valores de ganancia que nos brinde el diseño coordinado para ver si se tratan de valores razonables.

Se realiza ahora el diseño de dos dispositivos shunt por separado para estos dos nudos, teniendo en cuenta los autovalores que se han indicado en la tabla:

- Diseño dispositivo shunt nudo 19 para caso base + caso 9023 y sus 4 autovalores

```

Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1      TS2      TS3      TS4      TS5      TS6
-----
1  19  3795.8195  0.1076  0.0716

```

Tabla 16: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 19 para los modos locales e inter-área principales asociados al caso base y al caso 9023

- Diseño dispositivo shunt nudo 29 para caso base + caso 9035 y sus 4 autovalores

```

Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1      TS2      TS3      TS4      TS5      TS6
-----
1  29   968.6002  0.1210  0.1023

```

Tabla 17: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 29 para los modos locales e inter-área principales asociados al caso base y al caso 9035

Se observa para el nudo 29 que al poner a un mismo shunt independiente a controlar más modos de oscilación (han pasado de controlar dos modos de oscilación a controlar cuatro), la ganancia aumenta, lo cual era de esperar y es lógico. Además, aumenta en términos razonables, como se puede ver entre los valores de los diseños y los de la tabla.

Sin embargo, en el shunt del nudo 19 se observa algo extraño: al añadir dos modos de oscilación más y mantener los anteriores, pasamos a una ganancia menor respecto al controlador del caso base (y mayor respecto del caso 9023). *A priori* no existe ningún motivo razonable que pueda explicar esto. Sin embargo, cabe destacar que se trata de una diferencia en el valor de ganancia de tan sólo un 5%, que no va a distorsionar la línea de proyecto que se está siguiendo.

Se realiza ahora, por tanto, el diseño coordinado de dos dispositivos shunt en esos nudos, poniendo a los dos a controlar los 7 autovalores de la tabla (no 8 ya que el modo inter-área de los nudos 19 y 29 para el caso base coinciden): es decir, se trata de que “se ayuden” entre ellos a amortiguar esos siete autovalores con la expectativa de que así se reduzca la ganancia de los controladores y obtener un diseño más óptimo:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	19	3855.2326	0.1102	0.0777				
2	29	191.6896	0.1242	0.1010				

Tabla 18: Diseño de un dispositivo shunt en el nudo 19 y en el nudo 29 para controlar los modos local e inter-área principales asociados al caso base, caso 9023 y 9036

Los resultados obtenidos se ajustan a lo esperado, viendo cómo la ganancia del shunt 19 aumenta ligeramente para “ayudar” al nudo 29, mientras que la del nudo 29 baja de unos 900 a 200 gracias a esta colaboración. Esto muestra que al realizar el diseño coordinado de dos dispositivos shunt se consigue un diseño mucho más óptimo que si se hacen de forma independiente dado que el shunt del nudo 19 ha ayudado de forma significativa al shunt del nudo 29 en el control de los modos de oscilación que inicialmente se le habían atribuido a este segundo. Así, la ganancia del nudo 29 se reduce significativamente, mientras que la del 19 aumenta ligeramente con el fin de colaborar con el nudo 29.

Se comprueba ahora que efectivamente realicen su función estos dos controladores introduciendo los dos dispositivos shunt en el fichero dinámico y corriendo el flujo de cargas haciendo el modelo lineal.

- Autovalores del caso base sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4161	8.8988	4.6708	1.4178	omega	ROT	36
24	-0.4243	8.7250	4.8578	1.3903	omega	ROT	37
25	-0.3294	8.5802	3.8364	1.3666	omega	ROT	33
26	-0.2699	7.5056	3.5931	1.1953	omega	ROT	32
27	-0.2924	7.0679	4.1337	1.1259	omega	ROT	35
28	0.0027	6.9859	-0.0393	1.1118	delta	ROT	30
29	-0.2617	6.4017	4.0841	1.0197	omega	ROT	31
30	-0.2670	6.0386	4.4169	0.9620	omega	ROT	38
31	-0.2856	3.8644	7.3693	0.6167	omega	ROT	39

Tabla 19: Autovalores del caso base sin los dos dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso base con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
24	-0.6773	9.1273	7.3998	1.4566	omega	ROT	33
25	-0.4114	8.8997	4.6180	1.4179	omega	ROT	36
26	-0.4292	8.7150	4.9193	1.3887	omega	ROT	37
27	-0.2701	7.5057	3.5961	1.1953	omega	ROT	32
28	-0.2924	7.0770	4.1284	1.1273	omega	ROT	35
29	-0.0017	6.9830	0.0245	1.1114	delta	ROT	30
30	-0.6690	6.5982	10.0878	1.0555	omega	ROT	34
31	-0.3451	6.3163	5.4555	1.0068	omega	ROT	38
32	-0.9301	4.9738	18.3813	0.8053	omega	ROT	38
33	-0.6974	2.2510	29.5937	0.3751	omega	ROT	39

Tabla 20: Autovalores del caso base con los dos dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9023 sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4144	8.8950	4.6532	1.4172	omega	ROT	36
23	-0.4291	8.7156	4.9175	1.3888	omega	ROT	37
24	-0.3380	8.3589	4.0401	1.3315	omega	ROT	33
25	-0.2686	7.5098	3.5740	1.1960	omega	ROT	32
26	-0.0008	7.0005	0.0121	1.1142	delta	ROT	30
27	-0.2648	6.9697	3.7970	1.1101	omega	ROT	35
28	-0.2509	6.2769	3.9944	0.9998	omega	ROT	38
29	-0.2753	5.7580	4.7764	0.9175	omega	ROT	34
30	-0.3038	3.7580	8.0570	0.6001	omega	ROT	39

Tabla 21: Autovalores del caso 9023 sin los dos dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9023 con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.7450	9.1359	8.1278	1.4588	omega	ROT	33
24	-0.4129	8.8950	4.6371	1.4172	omega	ROT	36
25	-0.4296	8.7135	4.9242	1.3885	omega	ROT	37
26	-0.2687	7.5098	3.5751	1.1960	omega	ROT	32
27	-0.0048	6.9996	0.0680	1.1140	delta	ROT	30
28	-0.2649	6.9703	3.7977	1.1102	omega	ROT	35
29	-0.7411	6.6599	11.0601	1.0665	omega	ROT	34
30	-0.3322	6.2671	5.2937	0.9988	omega	ROT	38
31	-0.6448	4.8352	13.2184	0.7764	omega	ROT	38
32	-11.3938	2.1873	98.2068	1.8465	smesp2	SMES	29
33	-0.4939	2.0986	22.9105	0.3431	omega	ROT	39

Tabla 22: Autovalores del caso 9023 con los dos dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9035 sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4166	8.8958	4.6778	1.4174	omega	ROT	36
24	-0.4229	8.6976	4.8562	1.3859	omega	ROT	37
25	-0.3292	8.5692	3.8386	1.3648	omega	ROT	33
26	-0.2689	7.5100	3.5781	1.1960	omega	ROT	32
27	-0.2772	7.0590	3.9238	1.1243	omega	ROT	35
28	-0.0133	6.9277	0.1919	1.1026	delta	ROT	30
29	-0.2664	6.3744	4.1760	1.0154	omega	ROT	34
30	-0.2540	5.2833	4.8018	0.8418	omega	ROT	38
31	-0.2690	3.6998	7.2508	0.5904	omega	ROT	39

Tabla 23: Autovalores del caso 9035 sin los dos dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9035 con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
24	-0.6741	9.1177	7.3729	1.4551	omega	ROT	33
25	-0.4118	8.8963	4.6242	1.4174	omega	ROT	36
26	-0.4294	8.6847	4.9386	1.3839	omega	ROT	37
27	-0.2691	7.5100	3.5807	1.1960	omega	ROT	32
28	-0.2739	7.0676	3.8720	1.1257	omega	ROT	35
29	-0.0159	6.9241	0.2302	1.1020	delta	ROT	30
30	-0.6460	6.5676	9.7885	1.0503	omega	ROT	34
31	-0.5183	5.9531	8.6739	0.9510	omega	ROT	32
32	-0.9570	4.4020	21.2446	0.7170	omega	ROT	38
33	-10.7825	2.8196	96.7468	1.7738	smesp2	SMES	29
34	-0.7275	2.3239	29.8740	0.3876	omega	ROT	39

Tabla 24: Autovalores del caso 9035 con los dos dispositivos shunt diseñados

Como se puede observar, los modos de oscilación del caso base y de los casos 9023 y 9035 para los que se ha diseñado el shunt, mejoran sustancialmente su amortiguamiento. Los demás modos de oscilación también mejoran su amortiguamiento, aunque de forma más suave. Como conclusión general de los tres, también se puede apuntar que el modo que siempre mejora su comportamiento de forma muy notable es el modo inter-área del sistema asociado al nudo 39, lo cual no es de extrañar puesto que los dispositivos shunt se han diseñado para que en el caso base y en el caso 9035 se amortigüe este modo de oscilación, y esa acción amortiguadora ayuda también a que en el caso 9023 aumente el amortiguamiento de este modo.

vi. Diseño de dispositivo shunt para nudos 2 y 23 para los modos local e inter-área asociados a los nudos y casos de estudio correspondientes

		LOCAL	IA	KS	TS1	TS2
SHUNT N2	CASO BASE	24	28	13231.5816	0.3374	0.1567
	9004	23	27	6870.5034	0.416	0.1532
SHUNT N23	CASO BASE	23	27	259920.371	0.1213	0.0642
	9030	24	26	1579.4661	0.1251	0.0598

Tabla 25: Modos de oscilación local e inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 2: caso base y 9004 // dispositivo shunt en el nudo 23: caso base y 9030) y sus diseños asociados

Paralelamente al apartado anterior y de igual forma, se realiza el diseño en primer lugar para un shunt en el nudo 2 y sus cuatro autovalores asociados:

```

Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1         TS2         TS3         TS4         TS5         TS6
-----
  1   2 11995.4301  0.3843  0.1557

```

Tabla 26: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 2 para los modos local e inter-área principales asociados al caso base y 9004

Y para el nudo 23 y sus cuatro autovalores asociados:

```

Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1         TS2         TS3         TS4         TS5         TS6
-----
  1  23 209364.1325  0.1236  0.0611

```

Tabla 27: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 23 para los modos local e inter-área principales asociados al caso base y 9030

De nuevo, se observa lo mismo que se veía para el shunt en el nudo 19 del apartado anterior pero ahora para los dos controladores: el valor de ganancia del nuevo shunt para cuatro autovalores está contenido entre los dos valores de ganancias de controlador para un shunt en ese nudo, pero controlando solo dos de los cuatro autovalores y el shunt para los otros dos:

$$\Delta K_{shunt\ n2\ 9004} < \Delta K_{shunt\ n2\ CB+9004} < \Delta K_{shunt\ n2\ CB}$$

$$6870.50 < 11995.43 < 13231.58$$

$$\Delta K_{shunt\ n23\ 9030} < \Delta K_{shunt\ n23\ CB+9030} < \Delta K_{shunt\ n23\ CB}$$

$$1579.47 < 209364.13 < 259920.37$$

Y el diseño coordinado para los dos dispositivos shunt y los ocho autovalores:

```

Stabilizers of the devices:
-----
DEV Bus      KS          TS1         TS2         TS3         TS4         TS5         TS6
-----
  1   2 22651.6329  0.3830  0.1585
  2  23 227306.9995  0.1217  0.0616

```

Tabla 28: Diseño coordinado de dos dispositivos shunt en los nudos 2 y 23 para los modos local e inter-área principales asociados a los casos 9001, 9004 y 9030

Como se puede observar, al realizar el diseño coordinado, las ganancias de ambos controladores aumentan, no obteniendo lo esperado: que los controladores contribuyan entre ellos y uno o ambos reduzcan su ganancia. El motivo de que esto ocurra puede ser que los modos que se están introduciendo en el diseño entren en conflicto entre ellos y causen que los dispositivos shunt tengan que introducir unas ganancias muy superiores.

En cuanto al análisis de autovalores tras implementar los dos dispositivos shunt en la red, se observan las mismas conclusiones que en el apartado anterior en cuanto a su efectividad, que es patente, por lo que no se incluye aquí. Sin embargo, unas ganancias del orden de 200.000 no son realistas y no se podrían implementar en un dispositivo shunt en la realidad.

La explicación detrás de que para estos controladores las ganancias sean tan elevadas (comparativamente con el orden de magnitud de 900 del controlador del nudo 29 que se diseñaba en el apartado anterior) se intuye que puede deberse a que existen nudos y contingencias más críticas para el sistema que otras, y debido también a los factores de participación que ya se han comentado. Se desprende que la topología de la red y sus contingencias asociadas son determinantes para los valores de ganancias de los dispositivos shunt.

vii. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 para modos local e inter-área asociados a los nudos y casos de estudio

En este punto de la investigación, tras haber estudiado los diseños coordinados de cuatro dispositivos shunt, dos a dos, se realiza el diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt de forma conjunta y para amortiguar sus 15 modos de oscilación asociados (no 16, ya que el inter-área del caso base para nudos 19 y 29 coincide):

Nudo	2	2	19	19	23	23	29	29
Tipo y caso	L 9004	IA 9004	L 9023	IA 9023	L 9030	IA 9030	L 9035	IA 9035
9001	24	28	25	31	23	27	30	31
9004	23	27						
9023			24	29				
9030					24	26		
9035							30	31

Tabla 29: Modos de oscilación locales e inter-área asociados a los cuatro dispositivos shunt que se diseñan

Se obtiene el siguiente diseño:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	105252.0332	0.1572	0.0894				
2	19	0.0000	0.1102	0.0762				
3	23	902509.3330	0.1130	0.0738				
4	29	0.0000	0.1353	0.1176				

Tabla 30: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,19,23 y 29) para los modos locales e inter-área principales asociados a los casos 9001,9004,9023,9030 y 9035

Se puede observar que los valores de ganancias que se obtienen para los nudos 2 y 23 son disparatados (pasamos de 22.000 a 105.000 y de 230.000 a 900.000) mientras que los dispositivos shunt de los nudos 19 y 29 no actúan (tienen ganancia cero; es como si no estuviesen). *A priori* que un nudo tenga ganancia cero no es algo extraño si no que indica que los otros controladores del diseño son capaces de amortiguar los modos de entrada por ellos mismos y el shunt en ese nudo no es necesario [10].

Sin embargo, dos dispositivos shunt con ganancia cero y con otros dos con una ganancia disparatada es un resultado que debe hacernos pensar que hay algo en los datos de entrada que no es correcto. Es decir, no es posible amortiguar estos autovalores con un diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt. La razón puede ser la misma que se apuntaba en el diseño anterior: se están introduciendo unos autovalores que entran en conflicto entre ellos y no es posible amortiguarlos (no es posible ya que las ganancias de 105.000 y 900.000 no son valores de ganancia realistas que puedan ser implementados).

Para encontrar una explicación a esto se estudia la matriz AKS, donde se puede ver si hay alguno de los autovalores de input que sería mejor no introducir puesto que va a distorsionar el diseño. Y es que las ganancias se obtienen a través de la resolución de un sistema entre AKS y BKS:

$$AKS * \begin{bmatrix} \Delta k2 \\ \Delta k19 \\ \Delta k23 \\ \Delta k29 \end{bmatrix} \leq BKS$$

La matriz AKS del diseño es la siguiente:

AKS*100=

0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000
-0.0049	-0.0004	0.0000	-0.0000
-0.0006	-0.0250	-0.0006	-0.0000
0.0010	-0.0001	-0.0451	-0.0004
-0.0178	-0.0000	0.0020	-0.0021
-0.0017	-0.0133	-0.0063	-0.0659
-0.0096	-0.0373	-0.0393	-0.0385
-0.0082	0.0001	0.0000	0.0000
-0.0239	-0.0000	0.0000	-0.0246
-0.0001	-0.0359	-0.0006	-0.0000
-0.0056	-0.0333	0.0001	-0.0492
-0.0000	0.0001	-0.0453	0.0000
0.0010	-0.0000	-0.0533	-0.0005
-0.0010	-0.0211	-0.0187	-0.0993
-0.0066	-0.0268	-0.0285	-0.0872

Tabla 31: Matriz AKS asociada al diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt realizado

Esta matriz tiene 15 filas y cuatro columnas. Las cuatro columnas son los cuatro shunt y las quince filas son los 15 autovalores que se están amortiguando. Cada término de la

matriz AKS mide el residuo de un determinado autovalor para un determinado nudo donde se coloca el shunt.

Se observa que son todos unos residuos extraordinariamente bajos, con ni un solo autovalor alcanzando un 1% de sensibilidad. Además, se observan sensibilidades positivas y negativas, cuando para obtener un diseño óptimo y con ganancias razonables todos los valores de AKS deberían ser negativos por la propia ecuación que rige el cómputo de ganancias y la relación entre éstas y AKS y BKS. Se eliminan entonces los modos de oscilación que tienen residuos positivos (14 de ellos) y se realiza un nuevo diseño. Se obtiene la siguiente matriz AKS, ya con todos los términos negativos:

AKS =

1.0e-03 *

-0.0038	-0.2521	-0.0059	-0.0002
-0.0130	-0.1335	-0.0596	-0.6595
-0.0858	-0.3736	-0.3853	-0.3843
-0.0005	-0.3621	-0.0051	-0.0000
-0.0077	-0.2115	-0.1773	-0.9934
-0.0598	-0.2680	-0.2811	-0.8705

Tabla 32: Matriz AKS resultante del diseño coordinado sin los modos de oscilación con residuos positivos

Y el siguiente diseño coordinado:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	0.0000	0.4012	0.4371				
2	19	3798.8123	0.1121	0.0766				
3	23	0.0000	0.1406	0.1297				
4	29	199.7955	0.1210	0.1023				

Tabla 33: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt sin los modos de oscilación con residuos positivos

Este diseño sí que es un diseño óptimo, con valores razonables de ganancia, y muy similar al obtenido para el diseño coordinado del apartado V. Sin embargo, no es de extrañar puesto que la matriz *eigint* al quitar los modos con términos de AKS positivos ha quedado reducida a:

- Para caso base: modos 25, 30 y 31 (exactamente los mismos que en V)
- Para caso 9004: ninguno (igual que en V)
- Para caso 9023: modo 24 (igual que en V, pero con un modo menos)
- Para caso 9030: ninguno (igual que en V)
- Para caso 9035: modos 30 y 31 (igual que en V)

Esto encaja con los resultados anómalos que se registraban en el apartado VI sobre sus modos de oscilación. La conclusión principal que se puede extraer es que los autovalores de *input* del diseño son críticos, pasando de un diseño razonable y óptimo, a un diseño disparatado con autovalores que no pueden ser controlados.

viii. Conclusiones sobre el diseño coordinado de dispositivos shunt para modos local e inter-área

Tras haber realizado el diseño coordinado de varios dispositivos shunt para modos local e inter-área de diversas contingencias, se ha visto que las ganancias obtenidas son muy elevadas para algunos de los controladores, y es imposible implementar unos dispositivos shunt con tales valores de ganancia. En otras palabras, parece que unos dispositivos shunt están recibiendo la tarea de amortiguar una serie de modos de oscilación que: o no les corresponde amortiguarlos, o no pueden por la propia naturaleza y capacidad del shunt.

La primera opción queda descartada puesto que se ha analizado que esas contingencias son las más cercanas al nudo que controla sus modos de oscilación y son precisamente estos nudos los que tienen mayor factor de participación de cara a amortiguarlos. La hipótesis en este punto de la investigación es la segunda: hay ciertos autovalores que no pueden ser amortiguados por los dispositivos shunt cuando se aborda un diseño coordinado para múltiples contingencias y modos de oscilación.

Se puede leer en diferentes estudios de investigación el método para el diseño de un controlador para amortiguar un modo local y uno inter-área [19]. Sin embargo, se trata de diseños sólo para un determinado flujo de cargas y amortiguando sólo uno o dos modos de oscilación. En otras investigaciones que amortiguan más modos locales e inter-área (hasta 5 autovalores en total) se utilizan de forma conjunta PSS y dispositivos FACTS, comprobando que “the damping of the inter-area modes is mainly controlled by FACTS devices whereas the damping of the local modes is controlled by generators G1, G3 and G5” [el amortiguamiento de los modos inter-área está fundamentalmente controlado por los dispositivos FACTS mientras que el amortiguamiento de los modos locales está controlado por los generadores G1, G3 y G5] [10].

Y cuando se diseñan solo FACTS (sin PSS) se diseña solo para modos inter-área [15-18] porque se comprueba con las sensibilidades de los autovalores que “the local modes are hardly affected by the designed damping controllers” [los modos locales permanecen prácticamente inalterados por el diseño de los controladores de amortiguamiento][10].

La conclusión que se extrae a la luz de los resultados obtenidos y de la bibliografía estudiada es que los dispositivos shunt no son capaces de amortiguar los modos locales de diversas partes y contingencias del sistema, ya que entran en conflicto con los modos inter-área y distorsionan el diseño. Esto puede ser debido a que se trata de modos de

mayor frecuencia, en comparación con los de más baja frecuencia que son los inter-área, y que hace que estas ganancias aumenten considerablemente al tratar de amortiguar varios modos locales. Se debe, por tanto, en diseño coordinado de diversos dispositivos shunt y contingencias (flujos de cargas), utilizar los dispositivos shunt sólo para el amortiguamiento de modos inter-área.

Se realizan ahora los mismos diseños que se han realizado hasta ahora pero sólo para los modos inter-área.

ix. Diseño de dispositivos shunt para nudos 19 y 29 usando sólo los modos inter-área asociados a los nudos y casos de estudio

		IA	KS	TS1	TS2
SHUNT N19	CASO BASE	31	750.7686	0.3984	0.3538
	9023	29	1672.5959	0.2600	0.2130
SHUNT N29	CASO BASE	31	775.4111	0.3776	0.3731
	9035	31	353.3334	0.3752	0.4074

Tabla 34: Modos de oscilación inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 19: caso base y 9023 // dispositivo shunt en el nudo 29: caso base y 9035) y sus diseños asociados

Se observa que los valores de ganancia para los diseños individuales son notablemente más bajos frente a los que se obtenían para estos mismos diseños, pero con modo local e inter-área. Se realizan ahora los diseños conjuntos y el coordinado:

Diseño para el nudo 19 y sus dos modos de oscilación asociados:

Stabilizers of the devices:

```

-----
DEV Bus      KS          TS1          TS2          TS3          TS4          TS5          TS6
-----
1  19  1798.8108  0.1460  0.1249

```

Tabla 35: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 19 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9023

Diseño para el nudo 29 y sus dos modos de oscilación asociados:

Stabilizers of the devices:

```

-----
DEV Bus      KS          TS1          TS2          TS3          TS4          TS5          TS6
-----
1  29   813.5096  0.4002  0.4222

```

Tabla 36: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 29 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9035

Se ve claramente que, a diferencia de los resultados no comprensibles para el diseño con modos locales e inter-área, para estos dos diseños se observa que al introducir al controlador más modos de oscilación a amortiguar, su ganancia aumenta (como era de esperar de forma intuitiva, ya que tiene que controlar el mismo autovalor que antes y uno más). Vista la coherencia de estos diseños, se realiza ahora el diseño coordinado de los dos dispositivos shunt para los tres autovalores (ya que el modo inter-área de los casos 9023 y 9035 coincide):

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	19	1817.1193	0.1437	0.1262				
2	29	0.0000	0.1093	0.1007				

Tabla 37: Diseño coordinado de dos dispositivos shunt en los nudos 19 y 29 para los modos inter-área principales asociados a los casos base, 9023 y 9035

El diseño coordinado ofrece mejores resultados que el diseño individual ya que el shunt del nudo 19 aumenta muy ligeramente su ganancia y con esto se puede no colocar el shunt del nudo 29, y lograr el amortiguamiento que se buscaba en los tres modos. Es decir, el nudo 19 “ha ayudado” al nudo 29 a controlar sus modos de oscilación hasta tal punto que el shunt del nudo 29 no controla ningún modo: se puede quitar, con el consiguiente ahorro que esto supone.

x. Diseño de dispositivos shunt para nudos 2 y 23 usando sólo los modos inter-área asociados a los nudos y casos de estudio

		IA	KS	TS1	TS2
SHUNT N2	CASO BASE	28	4098.9005	0.2506	0.0818
	9004	27	1787.2030	0.3892	0.0821
SHUNT N23	CASO BASE	27	1356.8479	0.2471	0.1441
	9030	26	1573.0483	0.1917	0.1823

Tabla 38: Modos de oscilación inter-área para los nudos y casos elegidos (dispositivo shunt en el nudo 2: caso base y 9004 // dispositivo shunt en el nudo 23: caso base y 9030) y diseños individuales de dispositivos shunt asociados

De nuevo, se observa que los valores de ganancia para los diseños individuales son notablemente más bajos frente a los que se obtienen para estos mismos diseños, pero con modo local e inter-área. Se realizan ahora los diseños conjuntos y el coordinado:

Diseño para el nudo 2 y sus dos modos de oscilación asociados:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	3097.8056	0.3721	0.0943				

Tabla 39: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 2 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9004

Diseño para el nudo 23 y sus dos modos de oscilación asociados:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	23	1627.4102	0.2140	0.1632				

Tabla 40: Diseño de dispositivo shunt en el nudo 23 para los modos inter-área principales asociados a los casos base y 9030

En estos dos diseños se observa lo mismo que en el apartado anterior en cuanto al diseño 23 (su ganancia aumenta al haber introducido más modos de oscilación a controlar). Sin embargo, para el shunt en el nudo 2 se observa que la ganancia del nudo 2 para el diseño de los dos modos de oscilación en cuestión, está contenida entre los valores de los diseños individuales para uno y otro modo. Sucede precisamente como consecuencia del modo más inestable del sistema base, que es el modo 28 (que tiene amortiguamiento negativo en el flujo de cargas del caso base sin dispositivos shunt). El motivo detrás de esto trasciende a este proyecto, pero resultaría de interés de cara a una futura investigación.

Se realiza ahora el diseño coordinado para los dos dispositivos shunt y sus cuatro autovalores inter-área asociados:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	3201.8942	0.3719	0.0948				
2	23	1930.1829	0.1228	0.0977				

Tabla 41: Diseño coordinado de dos dispositivos shunt (nudos 2 y 23) para los modos inter-área principales asociados a los casos base, 9004 y 9030

En el diseño coordinado observamos que los valores de ganancia para ambos dispositivos shunt han crecido los dos ligeramente. Lo esperable sería que los dos disminuyesen, o que uno aumentase ligeramente y la ganancia del otro bajase notablemente o llegase a cero, como en el apartado IX. Estos resultados se cree que pueden ser debidos a ese modo de oscilación 28, que es muy inestable y que, igual que distorsionaba el diseño individual de shunt para nudo 2, distorsiona ahora también a éstos, haciendo también al nudo 23 aumentar su ganancia. Para comprobar si es este modo es el causante de ello, realizamos el diseño sin él (contando sólo con los otros tres modos):

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	2191.2017	0.2846	0.0596				
2	23	1707.6987	0.2138	0.1631				

Tabla 42: Diseño coordinado previo, pero sin el modo oscilación 28 del caso base

Se observa que ahora el controlador del nudo 2 ha disminuido su ganancia en 1000 unidades, mientras que el del nudo 23 ha aumentado ligeramente en 400. Esto es un resultado acorde con lo esperado y satisfactorio en el que vemos que el diseño conjunto es mejor que el diseño individual puesto que la ganancia de los controladores, en global, ha disminuido. Se puede afirmar que el modo que distorsionaba el diseño era el modo 28 del caso base, aunque el motivo detrás de ello es objeto de una futura investigación y no del presente proyecto.

xi. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 sólo para los modos inter-área asociados a los nudos y a los casos de estudio

Nudo	2	19	23	29
Tipo y caso	IA 9004	IA 9023	IA 9030	IA 9035
9001	28	31	27	31
9004	27			
9023		29		
9030			26	
9035				31

Tabla 43: Modos de oscilación inter-área asociados a los cuatro dispositivos shunt que se diseñan sólo para los modos inter-área de sus respectivos casos

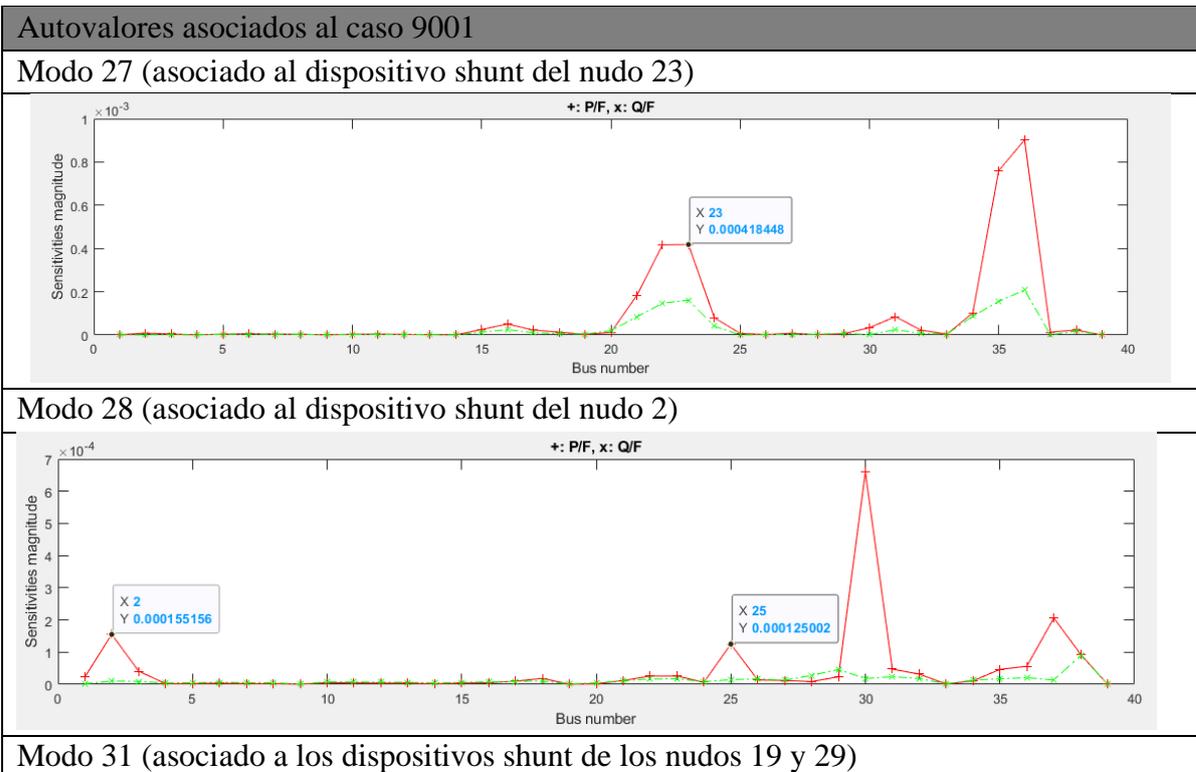
Tras las conclusiones obtenidas en los apartados anteriores, se realiza ahora el diseño coordinado sólo para los modos inter-área asociados a los nudos donde se colocan los dispositivos shunt y para los casos de contingencias ya analizados (se incluye también el modo 28 del caso base dado que al ser el autovalor más inestable tendremos que amortiguarlo, a pesar de las distorsiones en el diseño que pueda causar). La matriz *eigint* pasa ahora a tener sólo los términos de los modos inter-área para caso base, 9004, 9023, 9030 y 9035 asociados a los dispositivos shunt que se colocan. Es decir, para el caso 9004 el autovalor del modo inter-área asociado al nudo 2, para el 9023 el modo inter-área del nudo 19, para el 9030 el modo inter-área asociado al nudo 23, y para el 9035 el modo inter-área asociado al nudo 38. En definitiva, los mismos modos que antes se usaban, pero quitando los locales de cada caso y quedando sólo los inter-área. El diseño que se obtiene es:

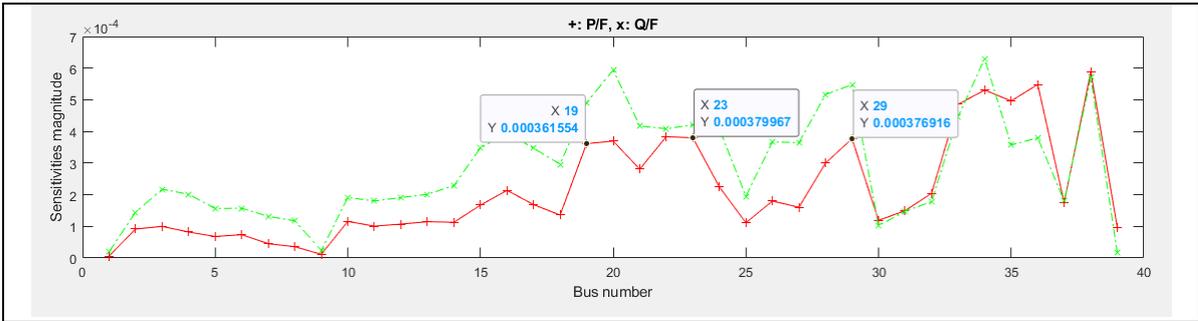
Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	5777.3411	0.1445	0.0640				
2	19	818.4548	0.1357	0.1180				
3	23	2007.9193	0.1102	0.0954				
4	29	0.0000	0.5930	0.6047				

Tabla 44: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,19,23 y 29) para los modos inter-área principales asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035

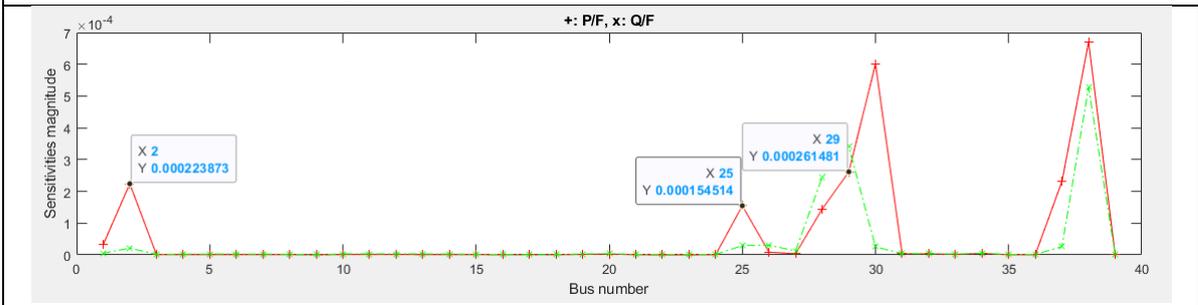
Comparando los dos diseños coordinados de dos dispositivos shunt (19 y 29 con 2 y 23) con el diseño coordinado de cuatro, se observa que la ganancia del shunt 2 ha crecido en 3000 unidades, la del 19 se ha reducido en 1000 unidades, la del 23 ha aumentado en 300, y la del 29 sigue en cero. La ganancia global, por tanto, ha aumentado. Sin embargo, a diferencia de los ensayos con modos locales en que se tenían valores disparatados de ganancia, aquí se mantienen siempre los valores de ganancia en valores razonables y en orden de magnitud con los diseños individuales. Es probable que el motivo de que las ganancias del diseño tomen estos valores sea el emplazamiento de los dispositivos shunt, dado que se observa que unos dispositivos shunt aumentan su ganancia y otros la reducen. Se analizan para ello las sensibilidades de los autovalores respecto de los nudos:





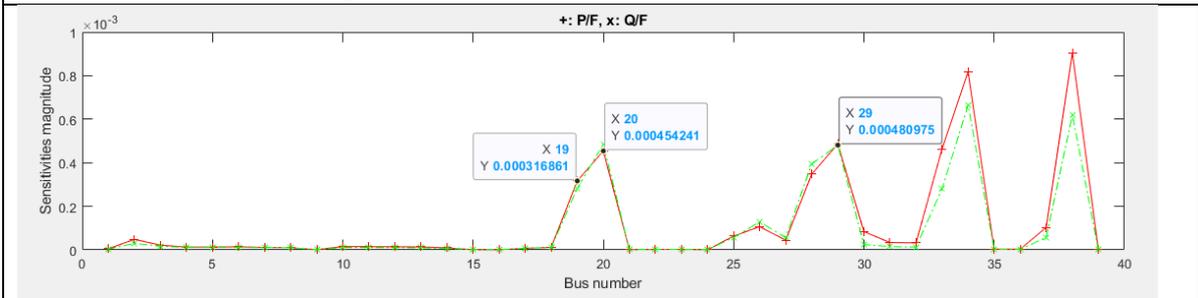
Autovalores asociados al caso 9004

Modo 27 (asociado al dispositivo shunt en el nudo 2)



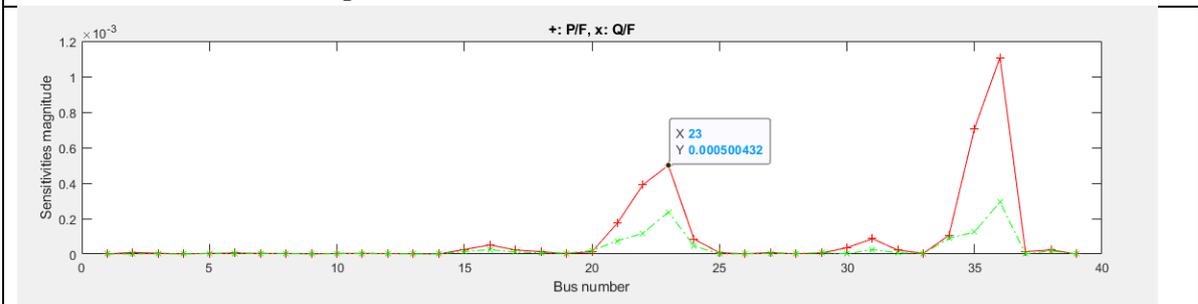
Autovalores asociados al caso 9023

Modo 29 (asociado al dispositivo shunt en el nudo 19)



Autovalores asociados al caso 9030

Modo 26 (asociado al dispositivo shunt en el nudo 23)



Autovalores asociados al caso 9035

Modo 31 (asociado al dispositivo shunt en el nudo 29)

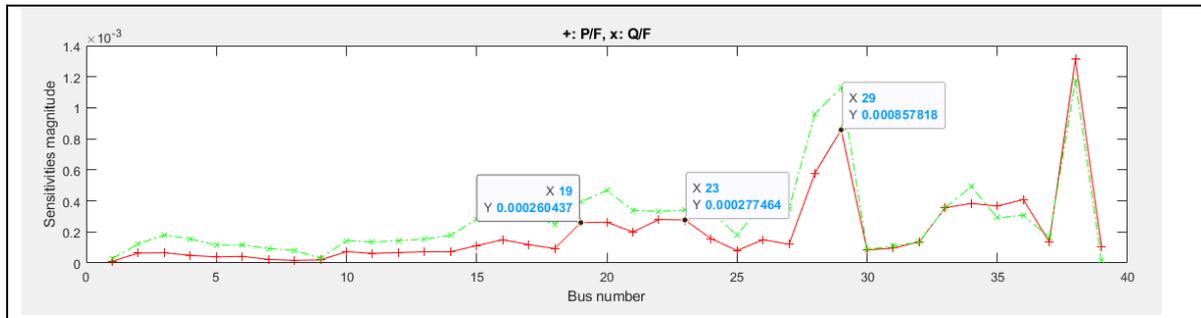


Tabla 45: Análisis de sensibilidades de los modos de oscilación del caso de estudio XI

Cabe destacar que en las gráficas contenidas en la tabla sólo se analizan los nudos 1 a 29, dado que éstos son los nudos sin generación donde se pueden colocar dispositivos shunt (a diferencia de los PSS, que deberían ser colocados en los nudos 30 a 39, aunque estos dispositivos no son sujeto de esta investigación). Se observa en la tabla lo siguiente:

- Caso base: sus modos de oscilación registran las mayores sensibilidades en los nudos para los que diseñamos
- Caso 9004: El nudo 29 registra una sensibilidad algo mayor que el nudo 2, aunque se trata de una diferencia despreciable. El nudo 2, para el que se diseña, alcanza prácticamente el mismo valor de sensibilidad
- Caso 9023: El nudo 29 registra una sensibilidad algo mayor que el nudo 19, aunque también una diferencia no significativa. El nudo 19, para el que se diseña, alcanza un valor de sensibilidad muy cercano a la del 29
- Caso 9030: su modo de oscilación registra su pico de sensibilidad en el nudo 23, para el que se diseña
- Caso 9035: su modo de oscilación registra su pico de sensibilidad en el nudo 29, para el que se diseña

En conclusión, tras haber analizado las sensibilidades de los autovalores del diseño respecto de los nudos en que se colocan los dispositivos shunt, se puede afirmar que no es el emplazamiento de los dispositivos shunt lo que está generando que la ganancia global de los controladores aumente respecto al diseño dos a dos de los dispositivos shunt. Sin embargo, se trata en todo momento de valores de ganancia razonables y dentro del orden de magnitud esperado, por lo que se puede ir un paso más allá realizando un diseño para todos los modos inter-área asociados a los casos de estudio de interés (no sólo para los asociados a los nudos y casos para los que diseñamos).

xii. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 para todos los modos inter-área asociados a los casos de estudio

Dados los resultados satisfactorios del apartado anterior para ciertos modos inter-área del sistema, se realiza ahora el diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para todos los modos inter-área asociados a los casos de contingencias de interés, tanto los asociados al nudo donde se coloca el shunt, como a todos los demás. La matriz *eigint* queda así:

9001	27	28	29	30	31
9004	26	27	28	29	30
9023	26	27	28	29	30
9030	26	27	28	29	30
9035	27	28	29	30	31

Tabla 46: Matriz de autovalores de interés asociada a todos los modos inter-área de los casos de contingencias utilizados para el diseño

Con estos autovalores y para los mismos nudos de los diseños anteriores, se obtiene:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	6352.8974	0.1244	0.0701				
2	19	11446.5552	0.1524	0.1301				
3	23	2131.7873	0.1130	0.0941				
4	29	1456.8686	0.1295	0.1050				

Tabla 47: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,19,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035

Se puede observar que los valores de ganancia respecto al caso anterior han aumentado, lo cual era de esperar puesto que hemos aumentado la cantidad de autovalores a controlar. Sin embargo, se trata de valores de ganancia dentro de márgenes razonables en base a los órdenes de magnitud de referencia. Lo que más llama la atención, debido a que está fuera del rango de magnitud esperado, es el valor tan elevado de la ganancia del nudo 19, que estará tratando de amortiguar unos autovalores que no le corresponde amortiguar (y que puede estar también causando que la ganancia del nudo 29 aumente por encima de lo esperable).

Observando la red de Nueva Inglaterra (Figura 3), se detecta que no se ha colocado ningún dispositivo shunt en la zona de los generadores 31 y 32, y ahora (a diferencia de los casos anteriores) sí se están teniendo en cuenta modos de oscilación asociados a esa área (que es un área grande y relevante donde aparecerán modos inter-área asociados a esos generadores que tendremos que amortiguar). Se realiza, en consecuencia, un diseño para cinco dispositivos shunt en los mismos nudos que antes, pero ahora con uno más en el nudo 11 (nudo de la zona de interés en un punto intermedio entre los generadores 31 y 32. Podría haberse elegido otro nudo de esa misma zona). El diseño obtenido es:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	6381.1037	0.1244	0.0701				
2	11	3761.8370	0.1212	0.0887				
3	19	0.0000	0.1524	0.1301				
4	23	2075.3639	0.1130	0.0941				
5	29	551.6815	0.1295	0.1050				

Tabla 48: Diseño coordinado para cinco dispositivos shunt (nudos 2,11,19,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035

El diseño obtenido en la Tabla 48 es mucho más razonable puesto que se ha conseguido pasar de una ganancia de 11.400 en el nudo 19 a una ganancia de 3800 con el nudo 11. Además, la ganancia del nudo 29 está por debajo de su valor de ganancia para diseño individual, y se consigue mantener sólo cuatro dispositivos shunt ya que al introducir el shunt del nudo 11 se reducen las ganancias de los controladores 23 y 29, aumenta mínimamente la del nudo 2, y la del nudo 19 se va a cero (no es necesario).

Lo que llama más la atención son los valores de ganancia de los controladores 2 y 23 (sobre todo la del primero, que es considerablemente mayor que la del diseño individual o del coordinado con dos dispositivos shunt). Sin embargo, se ha de tener en cuenta que se ha aumentado considerablemente el número de modos de oscilación a controlar, introduciendo modos de oscilación asociados a otros nudos y es el nudo 2, junto con el 11 y el 23, los que van a tomar el protagonismo en amortiguar estos modos, con el consiguiente aumento de sus ganancias, como es de esperar. Cabe destacar que estos valores de ganancia son superiores, pero reales y aplicables, a diferencia de algunos valores de ganancia que se obtenían para diseño con modos locales, que eran disparatados e irreales.

El diseño final, queda, por tanto:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	6381.1037	0.1244	0.0701				
2	11	3761.8370	0.1212	0.0887				
4	23	2075.3639	0.1130	0.0941				
5	29	551.6815	0.1295	0.1050				

Tabla 49: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,11,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a los casos base, 9004,9023,9030 y 9035

Se procede ahora a analizar si verdaderamente el diseño de estos cuatro dispositivos shunt es efectivo para amortiguar los modos de oscilación inter-área del sistema de Nueva Inglaterra. Se introducen en el fichero dinámico del sistema los cuatro dispositivos shunt y se corre el flujo de cargas y el modelo lineal obteniendo los siguientes resultados de autovalores para los diversos casos que han servido de input:

- Autovalores del caso base sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4161	8.8988	4.6708	1.4178	omega	ROT	36
24	-0.4243	8.7250	4.8578	1.3903	omega	ROT	37
25	-0.3294	8.5802	3.8364	1.3666	omega	ROT	33
26	-0.2699	7.5056	3.5931	1.1953	omega	ROT	32
27	-0.2924	7.0679	4.1337	1.1259	omega	ROT	35
28	0.0027	6.9859	-0.0393	1.1118	delta	ROT	30
29	-0.2617	6.4017	4.0841	1.0197	omega	ROT	31
30	-0.2670	6.0386	4.4169	0.9620	omega	ROT	38
31	-0.2856	3.8644	7.3693	0.6167	omega	ROT	39

Tabla 50: Autovalores del caso base sin dispositivos shunt

- Autovalores del caso base con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
27	-0.4081	8.9382	4.5615	1.4240	omega	ROT	36
28	-0.6160	8.8606	6.9356	1.4136	omega	ROT	37
29	-0.3415	8.5907	3.9724	1.3683	omega	ROT	33
30	-0.1897	7.5613	2.5086	1.2038	delta	ROT	30
31	-1.0894	7.5293	14.3198	1.2108	omega	ROT	35
32	-0.3411	7.4955	4.5460	1.1942	omega	ROT	32
33	-0.6621	6.9709	9.4556	1.1145	omega	ROT	31
34	-0.5871	6.2291	9.3832	0.9958	omega	ROT	34
35	-1.2389	6.0287	20.1290	0.9795	omega	ROT	38
36	-8.5656	3.2376	93.5411	1.4574	smesp2	SMES	29
37	-0.4425	2.9590	14.7906	0.4762	omega	ROT	39

Tabla 51: Autovalores del caso base con los dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9004 sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4178	8.8899	4.6940	1.4164	omega	ROT	36
23	-0.3927	8.6234	4.5492	1.3739	omega	ROT	37
24	-0.3219	8.5542	3.7605	1.3624	omega	ROT	33
25	-0.2634	7.5207	3.4995	1.1977	omega	ROT	32
26	-0.3077	7.0483	4.3612	1.1228	omega	ROT	35
27	-0.0626	6.5549	0.9552	1.0433	delta	ROT	30
28	-0.2718	6.3774	4.2574	1.0159	omega	ROT	34
29	-0.1664	5.6112	2.9640	0.8934	omega	ROT	38
30	-0.2795	3.8906	7.1645	0.6208	omega	ROT	39

Tabla 52: Autovalores del caso 9004 sin dispositivos shunt

- Autovalores del caso 9004 con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
27	-0.4067	8.9257	4.5521	1.4220	omega	ROT	36
28	-0.6546	8.8556	7.3721	1.4133	omega	ROT	37
29	-0.3333	8.5564	3.8919	1.3628	omega	ROT	33
30	-0.3309	7.5118	4.4007	1.1967	omega	ROT	32
31	-0.2278	7.4989	3.0363	1.1940	delta	ROT	30
32	-1.0759	7.4734	14.2491	1.2017	omega	ROT	35
33	-0.7380	6.9307	10.5886	1.1093	omega	ROT	31
34	-0.6484	6.2649	10.2952	1.0024	omega	ROT	34
35	-1.2935	5.9836	21.1292	0.9743	omega	ROT	38
36	-8.5061	3.2257	93.5024	1.4479	smesp2	SMES	29
37	-0.4496	2.9566	15.0331	0.4760	omega	ROT	39

Tabla 53: Autovalores del caso 9004 con los dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9023 sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4144	8.8950	4.6532	1.4172	omega	ROT	36
23	-0.4291	8.7156	4.9175	1.3888	omega	ROT	37
24	-0.3380	8.3589	4.0401	1.3315	omega	ROT	33
25	-0.2686	7.5098	3.5740	1.1960	omega	ROT	32
26	-0.0008	7.0005	0.0121	1.1142	delta	ROT	30
27	-0.2648	6.9697	3.7970	1.1101	omega	ROT	35
28	-0.2509	6.2769	3.9944	0.9998	omega	ROT	38
29	-0.2753	5.7580	4.7764	0.9175	omega	ROT	34
30	-0.3038	3.7580	8.0570	0.6001	omega	ROT	39

Tabla 54: Autovalores del caso 9023 sin dispositivos shunt

- Autovalores del caso 9023 con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
27	-0.4054	8.9327	4.5341	1.4231	omega	ROT	36
28	-0.6209	8.8589	6.9913	1.4134	omega	ROT	37
29	-0.3498	8.3598	4.1806	1.3317	omega	ROT	33
30	-0.1914	7.5723	2.5272	1.2056	delta	ROT	30
31	-1.1445	7.5465	14.9951	1.2148	omega	ROT	35
32	-0.3397	7.4997	4.5247	1.1948	omega	ROT	32
33	-0.6729	6.9939	9.5774	1.1182	omega	ROT	31
34	-0.9956	6.0854	16.1455	0.9814	omega	ROT	38
35	-0.7719	5.4956	13.9089	0.8832	omega	ROT	34
36	-8.5578	3.2392	93.5248	1.4563	smesp2	SMES	29
37	-0.4359	2.9573	14.5830	0.4758	omega	ROT	39

Tabla 55: Autovalores del caso 9023 con los dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9030 sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4240	8.7247	4.8539	1.3902	omega	ROT	37
23	-0.3346	8.5699	3.9016	1.3650	omega	ROT	33
24	-0.3069	7.6020	4.0334	1.2109	omega	ROT	36
25	-0.2681	7.5080	3.5690	1.1957	omega	ROT	32
26	-0.2834	7.0688	4.0057	1.1259	omega	ROT	35
27	0.0030	6.9871	-0.0423	1.1120	delta	ROT	30
28	-0.2616	6.4018	4.0822	1.0197	omega	ROT	31
29	-0.2669	6.0383	4.4151	0.9620	omega	ROT	38
30	-0.2850	3.8652	7.3537	0.6168	omega	ROT	39

Tabla 56: Autovalores del caso 9030 sin dispositivos shunt

- Autovalores del caso 9030 con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
26	-0.6157	8.8603	6.9322	1.4136	omega	ROT	37
27	-0.3400	8.5869	3.9563	1.3677	omega	ROT	33
28	-0.7958	8.4451	9.3814	1.3500	omega	ROT	36
29	-0.1864	7.5607	2.4647	1.2037	delta	ROT	30
30	-0.3449	7.5075	4.5898	1.1961	omega	ROT	32
31	-0.4226	7.2908	5.7861	1.1623	omega	ROT	35
32	-0.6529	6.9249	9.3866	1.1070	omega	ROT	31
33	-0.6210	6.1570	10.0357	0.9849	omega	ROT	34
34	-1.1049	5.8137	18.6701	0.9418	omega	ROT	38
35	-8.5487	3.2500	93.4729	1.4556	smesp2	SMES	29
36	-0.4648	2.9585	15.5219	0.4766	omega	ROT	39

Tabla 57: Autovalores del caso 9030 con los dispositivos shunt diseñados

- Autovalores del caso 9035 sin dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4166	8.8958	4.6778	1.4174	omega	ROT	36
24	-0.4229	8.6976	4.8562	1.3859	omega	ROT	37
25	-0.3292	8.5692	3.8386	1.3648	omega	ROT	33
26	-0.2689	7.5100	3.5781	1.1960	omega	ROT	32
27	-0.2772	7.0590	3.9238	1.1243	omega	ROT	35
28	-0.0133	6.9277	0.1919	1.1026	delta	ROT	30
29	-0.2664	6.3744	4.1760	1.0154	omega	ROT	34
30	-0.2540	5.2833	4.8018	0.8418	omega	ROT	38
31	-0.2690	3.6998	7.2508	0.5904	omega	ROT	39

Tabla 58: Autovalores del caso 9035 sin dispositivos shunt

- Autovalores del caso 9035 con dispositivos shunt:

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
26	-0.4077	8.9344	4.5584	1.4234	omega	ROT	36
27	-0.6341	8.8336	7.1600	1.4095	omega	ROT	37
28	-0.3409	8.5826	3.9686	1.3670	omega	ROT	33
29	-0.2034	7.5939	2.6774	1.2090	delta	ROT	30
30	-1.1172	7.5130	14.7087	1.2089	omega	ROT	35
31	-0.3401	7.4998	4.5305	1.1949	omega	ROT	32
32	-0.6815	6.9778	9.7201	1.1158	omega	ROT	31
33	-0.6785	6.0886	11.0746	0.9750	omega	ROT	34
34	-1.6529	5.3357	29.5906	0.8890	omega	ROT	38
35	-7.4166	3.2139	91.7554	1.2864	smesp2	SMES	29
36	-0.4286	2.9419	14.4156	0.4732	omega	ROT	39

Tabla 59: Autovalores del caso 9035 con los dispositivos shunt diseñados

Se observa que, para los cinco casos de diseño, se mejor el amortiguamiento para todos los autovalores. Destaca el modo inter-área del nudo 30, que siempre queda lejos del 15% de amortiguamiento y llega solo a un 2.5% aproximadamente. Esto es debido a que se trata del modo inter-área más inestable ya antes de introducir los dispositivos shunt registrando amortiguamientos muy próximos a cero o incluso negativos. Es por ello que un 2.5% de amortiguamiento, siendo este autovalor en concreto, se puede considerar como un resultado satisfactorio dado que porcentualmente el incremento de amortiguamiento es muy elevado. Por otro lado, algún autovalor no llega a alcanzar el 15% y se quedan entre un 6% y un 15%. Sin embargo, esto no es algo inesperado, si no acorde a las demás investigaciones que se han llevado a cabo sobre diseño de SVCs y TCSCs (dispositivos shunt y reactancias serie, respectivamente), en las que se registran amortiguamientos del orden de un 9-10% cuando se busca un amortiguamiento de un 15% [10]. En este caso, al controlar veinte autovalores más que en el citado estudio, no es de extrañar que el amortiguamiento pueda caer hasta un 5-6% en vez de un 9-10%.

En cuanto a los demás autovalores, los locales, se observa que de forma colateral mejoran también ligeramente su amortiguamiento y en ningún caso se inestabiliza el sistema al introducir uno o varios dispositivos shunt.

Una vez diseñados cuatro dispositivos shunt para amortiguar los modos de oscilación inter-área del caso base y cuatro casos de contingencias, se realiza ahora un último diseño:

el diseño de cuatro dispositivos shunt para amortiguar los modos de oscilación inter-área de todas las contingencias posibles que se pueden dar en el sistema, junto con el caso base. Se trata del diseño más completo posible que es posible realizar y con el que se puede asegurar la estabilidad del sistema en sus modos inter-área, suceda la contingencia que suceda.

xiii. Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt para nudos 2, 19, 23 y 29 para todos los modos inter-área asociados a todos los casos posibles de contingencias

La nueva matriz *eigint* queda así:

eigint=

[27 28 29 30 31	27 28 29 30 31	26 27 28 29 30
26 27 28 29 30	26 27 28 29 30	26 27 28 29 30
26 27 28 29 30	27 28 29 30 31	26 27 28 29 30
26 27 28 29 30	27 28 29 30 31	26 27 28 29 30
26 27 28 29 30	27 28 29 30 31	26 27 28 29 30
26 27 28 29 30	26 27 28 29 30	26 27 28 29 30
26 27 28 29 30	26 27 28 29 30	26 27 28 29 30
27 28 29 30 31	26 27 28 29 30	27 28 29 30 31
26 27 28 29 30	27 28 29 30 31	27 28 29 30 31
27 28 29 30 31	26 27 28 29 30	26 27 28 29 30]
27 28 29 30 31	26 27 28 29 30	
27 28 29 30 31	26 27 28 29 30	
27 28 29 30 31	26 27 28 29 30	

Tabla 60: Matriz de autovalores de interés con todos los modos inter-área asociados a todos los casos de contingencias posibles en la red de Nueva Inglaterra

El diseño que se obtiene para dicha matriz *eigint* y todos los casos posibles de contingencias es el siguiente:

Stabilizers of the devices:

DEV	Bus	KS	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
1	2	6440.8998	0.1203	0.0720				
2	11	9586.4295	0.1201	0.0908				
3	23	2098.3838	0.1087	0.0899				
4	29	498.0678	0.1228	0.1022				

Tabla 61: Diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt (nudos 2,11,23 y 29) para todos los modos inter-área asociados a todos los casos posibles de contingencias

Este diseño amortigua 180 autovalores (cinco por cada uno de los 36 casos). Estos 180 autovalores se corresponden con todos los modos inter-área del caso base y de cada una de las contingencias que pueden darse en el sistema de Nueva Inglaterra (con la definición de contingencia que se ha dado en este proyecto).

Se puede observar que el valor de ganancia del nudo 23 y 29 baja todavía más respecto al diseño del apartado X, mientras que la ganancia asociada al nudo 2 se mantiene prácticamente igual, y la del nudo 11 se dispara. Esto es razonable puesto que antes se tenían en cuenta sólo contingencias de las zonas del nudo 2, 23 y 29. Sin embargo, ahora se están también teniendo en cuenta numerosas contingencias que se producen en el entorno del nudo 11, que empezará ahora a jugar un mayor protagonismo en el amortiguamiento de estos nuevos modos de oscilación.

Se prueba ahora a introducir estos cuatro dispositivos shunt en el fichero dinámico del sistema y se observa la respuesta del mismo. Se comprueba que efectivamente los dispositivos shunt diseñados son efectivos para los 180 autovalores que se busca amortiguar, alcanzando siempre un amortiguamiento mayor para todos ellos (consultar Anexo). Destaca que en varios casos no se alcanza el amortiguamiento del 15%. El modo más llamativo en esto es el modo asociado al nudo 30, que nunca llega ni a acercarse en ningún caso al 15% buscado. Y algunos modos se quedan en un 5-6% de amortiguamiento, o en un 9-10%, y no llegan al 15%. Sin embargo, esto no es algo inesperado sino coherente con los estudios en este campo y razonable, como se ha explicado detalladamente en el apartado *XII*.

A la vista de los datos obtenidos se puede afirmar que se ha logrado el objetivo buscado: amortiguar todas las oscilaciones inter-área posibles del sistema con cuatro dispositivos shunt y ante cualquier contingencia. Por último, a fin de ratificar las conclusiones del apartado *VIII*, en relación a los modos locales, se realiza un diseño para todos los modos locales e inter-área de todos los casos posibles de contingencias del sistema para los mismos emplazamientos de dispositivos shunt para los que hemos encontrado una solución satisfactoria para todos los modos inter-área. Al correr el programa avisa de que no es posible alcanzar una solución debido a exceso de restricciones.

A priori podemos pensar que es porque se necesitan más dispositivos shunt para amortiguar tantos modos de oscilación. Introducimos otros cuatro dispositivos shunt, teniendo así uno en cada uno de los nudos 2,4,8,11,16,19,23 y 29. Y al correr el programa vuelve a alertar de que no es posible alcanzar una solución.

Se ratifica así lo que se concluía entonces: no es posible amortiguar todos los modos locales e inter-área de todas las contingencias posibles porque: los dispositivos shunt no se conciben para ello, y porque el amortiguamiento de los modos locales e inter-área entra en conflicto y no es posible realizar un amortiguamiento de tantos modos de los dos tipos al mismo tiempo. Para el amortiguamiento de modos locales lo más efectivo será usar dispositivos PSS [17] y utilizar dispositivos shunt para los modos inter-área, como se ha realizado y concluido en esta investigación. Por tanto, el diseño coordinado de dispositivos shunt para múltiples contingencias ha de realizarse sólo para sus modos inter-área.

6 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Se detallan a continuación los 3 objetivos principales de la lista de Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas a los que este proyecto contribuye:

- nº 7: Energía asequible y no contaminante. Los sistemas estudiados y analizados en este proyecto contribuyen, citando el análisis de este objetivo por Naciones Unidas, a “garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos”. En efecto, dan lugar a sistemas eléctricos: modernos, puesto que estos sistemas están en constante proceso de mejora y evolución; fiables, dado que la misión fundamental de estos dispositivos es la de estabilizar la red; y asequibles, dado que el precio de las baterías y estabilizadores se va reduciendo progresivamente a medida que aumenta su desarrollo y demanda. Además, los PSS basados en baterías contribuyen a la eficiencia energética y a una mayor integración de generación renovable al permitir el almacenamiento de excedentes de producción, que pueden ser vertidos a la red en otros momentos del día de menor generación limpia.
- nº 9: Industria, innovación e infraestructura. El presente estudio contribuye al avance de la investigación científica y a la mejora tecnológica del sector energético, que tiene repercusión directa en todos los sectores de la industria. Del mismo modo, los sistemas estudiados podrán ser implementados en países en desarrollo a fin de incrementar la seguridad de sus sistemas eléctricos, con la correspondiente mejora de su calidad de vida, prosperidad económica e industrialización. Además, los sistemas sujeto de estudio cumplen con el apartado 4 de Naciones Unidas en referencia a este punto 9: “De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales”.
- nº 12: Producción y consumo responsables. Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías contribuyen a “lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales” como explica el segundo apartado de este punto 12 de las Naciones Unidas, dado que se trata de un sistema que no contamina en su funcionamiento y que favorece el aprovechamiento energético, como ya se viene haciendo con las plantas de energía fotovoltaica. Del mismo modo, se trata de dispositivos que buscan garantizar la seguridad de los sistemas eléctricos, permitiendo el propio consumo y producción energética.

7 Conclusiones

Tras la investigación llevada a cabo en este proyecto, se extraen las siguientes conclusiones:

- El diseño de un shunt está determinado por la topología de la red y los autovalores que se busca amortiguar. Cuando se realiza un diseño coordinado de varios dispositivos shunt, y para los casos de varias contingencias posibles del sistema, se debe realizarlo sólo para modos inter-área, puesto que los modos locales interactúan entre ellos y con los inter-área y no se consigue un diseño razonable y valores de amortiguamiento óptimos. Para estos últimos sería mejor utilizar sistemas como PSS acoplados a la generación, mientras que para los primeros es efectivo el uso de dispositivos shunt como se ha investigado en este proyecto.
- En diseño coordinado de dispositivos shunt para el amortiguamiento de modos inter-área existe “colaboración” entre los dispositivos y se pueden conseguir, con un correcto emplazamiento de los mismos, valores de ganancia inferiores que cuando se realiza un diseño individual para los mismos. Esta es la gran ventaja del diseño coordinado, que permite diseñar unos controladores con ganancias más reducidas al permitir la “colaboración” entre dispositivos shunt según las sensibilidades de los nudos elegidos en los modos de oscilación. Sin embargo, esto puede darse o no, y no necesariamente se reduce la ganancia individual al realizar un diseño coordinado.
- Lo anteriormente descrito sobre la reducción de ganancia se produce cuando se introducen modos de oscilación similares a los anteriores para los que se diseñaba. Es decir, para aquellos asociados a las mismas zonas donde se colocan los dispositivos shunt. Sin embargo, cuando se busca que varios dispositivos shunt amortigüen modos de oscilación de zonas diferentes a las de un diseño anterior o para contingencias de zonas diferentes, la ganancia del controlador que esté en esa nueva zona aumentará, dado que asumirá el amortiguamiento de dichos modos.
- Un diseño coordinado de cuatro dispositivos shunt es capaz de controlar todas las posibles oscilaciones inter-área que se produzcan para cada una de las posibles contingencias del sistema de Nueva Inglaterra, lo que brinda una idea de la gran capacidad de amortiguamiento que tienen estos dispositivos a la hora de estabilizar redes eléctricas en sus modos inter-área. Además, en base a esto, se puede señalar que se trata de un diseño robusto en cuanto a la topología de la red; es decir, válido para distintos esquemas de red dado que el sistema no se hace inestable para ninguno de los treinta y seis casos de contingencias analizados. Sin embargo, a fin de confirmar la robustez del diseño en cuanto a puntos de funcionamiento, sería interesante un posterior

estudio en que se corriesen distintos flujos de cargas del sistema con los dispositivos shunt diseñados y comprobar que efectivamente éstos cumplen su misión de amortiguamiento de los modos inestables para cada uno de esos flujos de cargas distintos (dado que en este proyecto sólo se ha empleado un determinado flujo de cargas sobre el que se han realizado variaciones en la topología de la red).

- Una línea de investigación futura que se abre tras este proyecto es la profundización en los criterios de selección de emplazamiento para dispositivos shunt, dado que se ha visto que el criterio utilizado de generadores coherentes, a pesar de que sirve de orientación, no ha resultado del todo efectivo (al haber tenido que cambiar la ubicación del shunt del nudo 19 al 11). Se han desarrollado ya diversas investigaciones sobre ello, tanto para un sistema de dos áreas (donde lo más efectivo es situar el shunt en medio de ambas) [17], como para sistemas más complejos, donde lo más efectivo puede ser situarlos en un nudo de generación [16]. Sin embargo, todavía hay mucho camino que recorrer en este campo y sería de interés una investigación en este tema a fin de clarificar un método sistemático, preciso y automatizable (no artesanal y manual como el de las sensibilidades de los autovalores) que permita determinar el emplazamiento más efectivo para la máxima eficacia de estos dispositivos.
- Otra posible investigación que se desprende de este proyecto es el estudio del motivo por el cual un controlador de dos modos de oscilación inter-área puede tener una ganancia intermedia entre el diseño individual para uno y otro modo (como sucede con el shunt de nudo 2 en el diseño del apartado X), dado que lo esperable sería que tuviese siempre una ganancia mayor a los dos puesto que estamos introduciendo un modo de oscilación más a controlar.
- Otra línea de investigación sería la realización de este mismo proyecto, pero utilizando reactancias serie en vez de dispositivos shunt (CSCs en vez de SVCs) y comparar resultados; dado que la eficiencia en términos de amortiguamiento por $Mvar$ instalado es mayor en los primeros según muestran algunos estudios [14].

Las anteriores conclusiones dan luz en el panorama energético actual, ya que los dispositivos estudiados permiten garantizar la seguridad del proceso de descarbonización actual, asegurando la estabilidad de las redes eléctricas al introducir nuevas fuentes de generación, o con las ya existentes. Y lo realizan de forma efectiva, con facilidad de instalación y sin tener que alterar la red existente en sus líneas o generación.

Además, estos dispositivos acoplados a las baterías, permiten una doble función: la ya mencionada de la estabilización, junto con el almacenamiento de energía, a fin de reducir el desperdicio energético de energías limpias, y conseguir el alargamiento del ciclo diario

de las renovables, y la alimentación mediante energías no contaminantes. Por último, contribuyen también, no sólo a la transición energética, si no a la seguridad energética. En efecto, estos dispositivos ayudan a garantizar el suministro temporalmente en caso de reducción o parada de una fuente de generación, y con su uso correcto pueden servir para lograr una energía más asequible, fiable y sostenible.

8 Bibliografía

Informes sobre eventos

- [1] ENTSO-E, “ANALYSIS OF CE INTER-AREA OSCILLATIONS OF 1ST DECEMBER 2016”, disponible en https://www.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Regional__Groups_Continental_Europe/2017/CE_inter-area_oscillations_Dec_1st_2016_PUBLIC_V7.pdf
- [2] ENTSO-E, “Oscillation Event 03.12.2017”, disponible en https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/OSCILLATION_REPORT_SPD.pdf

Libros

- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", Mc Graw Hill, New York 1994.
- [4] G.J. Rogers, "Power System Oscillations", Kluwer Academic Publishers, 1999.

Artículos

- [5] L. Rouco. “Estudio de la estabilidad oscilatoria en sistemas eléctricos multi-área”. Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, 1991
- [6] L. Rouco, F.L. Pagola. “An eigenvalue sensitivity approach to location and controller design controllable series capacitors for damping power systems electromechanical oscillations”. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 12, nº. 4, pp. 1660 - 1666, November 1997
- [7] J. Renedo, A. García-Cerrada, L. Rouco, L. Sigríst, “Coordinated design of supplementary controllers in VSC-HVDC multi-terminal systems to damp electromechanical oscillations”. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 36, No. 1, pp. 712 - 721, January 2021.
- [8] L. Rouco, T. Margotin, “Robust damping controllers of power system oscillations”. 13th Power Systems Computation Conference - PSCC 1999, Trondheim (Norway), 28 June - 2 July 1999.
- [9] L. Rouco, F.L. Pagola, “On the sign of the feedback applied by power system damping controllers”, Proceedings of the 2001 IEEE Porto Power Tech, 10-13 September 2001, Porto, Portugal.
- [10] L. Rouco, “Coordinated design of multiple controllers for damping power system oscillations”, International journal of electrical power & energy systems, 23(7), 517-530.
- [11] L. Rouco, “Coordinated design of multiple controllers for damping power system oscillations”, International journal of electrical power & energy systems, 23(7),

- 517-530. 2001.
- [12] N. Jankovic, J. Roldan-Perez, M. Prodanovic, J.A. Suul, S. D'Arco, L. Rouco, "Power oscillation damping method suitable for network reconfigurations based on converter interfaced generation and combined use of active and reactive powers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 149, 109010. 2023.
 - [13] J.L. Rodríguez-Amenedo, S.A. Gómez, "Damping low-frequency oscillations in power systems using grid-forming converters". *IEEE Access*, 9, 158984-158997. 2021.
 - [14] L. Angquist, B. Lundin, J. Samuelsson, "Power oscillation damping using controlled reactive power compensation-a comparison between series and shunt approaches", *IEEE Transactions on Power systems*, 8(2), 687-700. 1993.
 - [15] J.J. Sanchez-Gasca, "Coordinated control of two FACTS devices for damping interarea oscillations". *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(2), 428-434. 1998.
 - [16] N. Martins, L.T. Lima, "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*", 5(4), 1455-1469. 1990.
 - [17] E.Z. Zhou, "Application of static var compensators to increase power system damping". *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2), 655-661. 1993.
 - [18] R. Criado, L. Rouco, J.M. Rodríguez, M. Noroozian, "Improvement of the Dynamic Performance of the Spanish Power System with FACTS Devices". *Cigre paper*, 14-109. 1998.
 - [19] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability". *IEEE Transactions of Power Systems*, Vol. PWRS-4, No. 2, May 1986, pp. 614-626.

Manuales

- [20] L. Rouco, *Small Signal Stability Toolbox*, IIT, May 2022.

9 Anexo: Comprobación de la efectividad de los cuatro dispositivos shunt diseñados para todos los modos inter-área de todas las contingencias posibles de NE (caso de estudio XIII)

Columna izquierda: análisis de autovalores sin dispositivos shunt

Columna derecha: análisis de autovalores con dispositivos shunt

CASO 9001

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4161	8.8988	4.6708	1.4178	omega	ROT	36	25	-0.4082	8.9386	4.5618	1.4241	omega	ROT	36
24	-0.4243	8.7250	4.8578	1.3903	omega	ROT	37	26	-0.6116	8.8576	6.8883	1.4131	omega	ROT	37
25	-0.3294	8.5802	3.8364	1.3666	omega	ROT	33	27	-0.3414	8.5914	3.9706	1.3684	omega	ROT	33
26	-0.2699	7.5056	3.5931	1.1953	omega	ROT	32	28	-0.4000	7.5702	5.2764	1.2065	omega	ROT	32
27	-0.2924	7.0679	4.1337	1.1259	omega	ROT	35	29	-1.1082	7.5546	14.5144	1.2152	omega	ROT	35
28	0.0027	6.9859	-0.0393	1.1118	delta	ROT	30	30	-0.1867	7.5530	2.4717	1.2025	delta	ROT	30
29	-0.2617	6.4017	4.0841	1.0197	omega	ROT	31	31	-0.4028	7.1705	5.6091	1.1430	omega	ROT	31
30	-0.2670	6.0386	4.4169	0.9620	omega	ROT	38	32	-0.5640	6.2165	9.0360	0.9935	omega	ROT	34
31	-0.2856	3.8644	7.3693	0.6167	omega	ROT	39	33	-1.1362	5.9179	18.8553	0.9591	omega	ROT	38
								34	-9.1076	3.0815	94.7249	1.5302	smesp2	SMES	29
								35	-0.3660	2.9549	12.2907	0.4739	omega	ROT	39

CASO 9002

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4163	8.8976	4.6733	1.4176	omega	ROT	36	26	-0.4079	8.9370	4.5597	1.4239	omega	ROT	36
23	-0.4076	8.6912	4.6847	1.3848	omega	ROT	37	27	-0.6302	8.8413	7.1103	1.4107	omega	ROT	37
24	-0.3290	8.5737	3.8346	1.3655	omega	ROT	33	28	-0.3405	8.5884	3.9618	1.3680	omega	ROT	33
25	-0.2685	7.5091	3.5740	1.1959	omega	ROT	32	29	-0.2170	7.6013	2.8531	1.2103	delta	ROT	30
26	-0.2925	7.0741	4.1311	1.1268	omega	ROT	35	30	-0.3987	7.5722	5.2581	1.2068	omega	ROT	32
27	-0.0324	6.8504	0.4733	1.0903	delta	ROT	30	31	-1.1101	7.5531	14.5406	1.2150	omega	ROT	35
28	-0.2532	6.3778	3.9664	1.0159	omega	ROT	31	32	-0.4024	7.1749	5.5999	1.1437	omega	ROT	31
29	-0.2652	6.0093	4.4084	0.9573	omega	ROT	38	33	-0.5629	6.2135	9.0225	0.9930	omega	ROT	34
30	-0.1698	2.6026	6.5106	0.4151	omega	ROT	39	34	-1.1575	5.9201	19.1878	0.9601	omega	ROT	38
								35	-9.0992	3.0812	94.7169	1.5290	smesp2	SMES	29
								36	-0.1489	2.1147	7.0259	0.3374	omega	ROT	39

CASO 9003

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4160	8.8990	4.6700	1.4179	omega	ROT	36	26	-0.4081	8.9388	4.5605	1.4241	omega	ROT	36
23	-0.3992	8.6905	4.5893	1.3846	omega	ROT	37	27	-0.6193	8.8512	6.9792	1.4122	omega	ROT	37
24	-0.3304	8.5754	3.8495	1.3658	omega	ROT	33	28	-0.3413	8.5922	3.9691	1.3686	omega	ROT	33
25	-0.2693	7.5076	3.5845	1.1956	omega	ROT	32	29	-0.3989	7.5698	5.2620	1.2064	omega	ROT	32
26	-0.2938	7.0752	4.1486	1.1270	omega	ROT	35	30	-1.1083	7.5539	14.5165	1.2151	omega	ROT	35
27	-0.0291	6.8269	0.4256	1.0865	delta	ROT	30	31	-0.2101	7.5474	2.7823	1.2017	delta	ROT	30
28	-0.2526	6.3778	3.9568	1.0159	omega	ROT	31	32	-0.4034	7.1737	5.6139	1.1435	omega	ROT	31
29	-0.2658	6.0104	4.4179	0.9575	omega	ROT	38	33	-0.5611	6.2129	8.9952	0.9928	omega	ROT	34
30	-0.1697	2.5991	6.5156	0.4145	omega	ROT	39	34	-1.1598	5.9159	19.2381	0.9595	omega	ROT	38
								35	-9.1071	3.0797	94.7301	1.5301	smesp2	SMES	29
								36	-0.1480	2.1166	6.9751	0.3377	omega	ROT	39

CASO 9004

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4178	8.8899	4.6940	1.4164	omega	ROT	36	28	-0.4068	8.9261	4.5523	1.4221	omega	ROT	36
23	-0.3927	8.6234	4.5492	1.3739	omega	ROT	37	29	-0.6508	8.8507	7.3328	1.4124	omega	ROT	37
24	-0.3219	8.5542	3.7605	1.3624	omega	ROT	33	30	-0.3333	8.5578	3.8914	1.3631	omega	ROT	33
25	-0.2634	7.5207	3.4995	1.1977	omega	ROT	32	31	-0.3894	7.5813	5.1302	1.2082	omega	ROT	32
26	-0.3077	7.0483	4.3612	1.1228	omega	ROT	35	32	-1.1166	7.5070	14.7118	1.2079	omega	ROT	35
27	-0.0626	6.5549	0.9552	1.0433	delta	ROT	30	33	-0.2268	7.4885	3.0271	1.1924	delta	ROT	30
28	-0.2718	6.3774	4.2574	1.0159	omega	ROT	34	34	-0.4235	7.1684	5.8975	1.1429	omega	ROT	31
29	-0.1664	5.6112	2.9640	0.8934	omega	ROT	38	35	-0.6253	6.2262	9.9934	0.9959	omega	ROT	34
30	-0.2795	3.8906	7.1645	0.6208	omega	ROT	39	36	-1.1237	5.8782	18.7770	0.9525	omega	ROT	38
								37	-9.0508	3.0776	94.6763	1.5215	smesp2	SMES	29
								38	-0.3858	2.9634	12.9106	0.4756	omega	ROT	39

CASO 9005

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4168	8.8969	4.6801	1.4175	omega	ROT	36	28	-0.4082	8.9355	4.5632	1.4236	omega	ROT	36
23	-0.3253	8.5838	3.7872	1.3671	omega	ROT	33	29	-0.3374	8.5851	3.9265	1.3674	omega	ROT	33
24	-0.3687	7.6100	4.8390	1.2126	omega	ROT	37	30	-0.3913	7.6050	5.1391	1.2120	omega	ROT	37
25	-0.2694	7.5074	3.5861	1.1956	omega	ROT	32	31	-0.4015	7.5722	5.2955	1.2068	omega	ROT	32
26	-0.2997	7.0651	4.2387	1.1255	omega	ROT	35	32	-1.0927	7.5629	14.2993	1.2162	omega	ROT	35
27	0.0448	6.8431	-0.6550	1.0891	delta	ROT	30	33	-0.1837	7.4989	2.4496	1.1938	delta	ROT	30
28	-0.2560	6.3609	4.0214	1.0132	omega	ROT	34	34	-0.4054	7.1713	5.6444	1.1432	omega	ROT	31
29	-0.2574	5.5198	4.6590	0.8795	omega	ROT	38	35	-0.5482	6.1018	8.9484	0.9750	omega	ROT	34
30	-0.2762	3.2747	8.4034	0.5230	omega	ROT	39	36	-1.6630	4.6678	33.5601	0.7886	omega	ROT	38
								37	-8.5357	3.1423	93.8429	1.4476	smesp2	SMES	29
								38	-0.3589	2.9215	12.1921	0.4685	omega	ROT	39

CASO 9006

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4161	8.8991	4.6705	1.4179	omega	ROT	36	27	-0.4082	8.9391	4.5614	1.4242	omega	ROT	36
23	-0.4010	8.7022	4.6027	1.3865	omega	ROT	37	28	-0.6097	8.8614	6.8644	1.4137	omega	ROT	37
24	-0.3306	8.5759	3.8527	1.3659	omega	ROT	33	29	-0.3422	8.5923	3.9790	1.3686	omega	ROT	33
25	-0.2587	7.5192	3.4379	1.1974	omega	ROT	32	30	-0.3787	7.5747	4.9938	1.2071	omega	ROT	32
26	-0.2758	7.0639	3.9020	1.1251	omega	ROT	35	31	-1.1120	7.5557	14.5610	1.2155	omega	ROT	35
27	-0.0359	6.8070	0.5273	1.0834	delta	ROT	30	32	-0.1996	7.5134	2.6559	1.1962	delta	ROT	30
28	-0.2796	6.2070	4.5006	0.9889	omega	ROT	34	33	-0.4543	7.1384	6.3513	1.1384	omega	ROT	31
29	-0.2224	5.8242	3.8162	0.9276	omega	ROT	38	34	-0.5643	6.2110	9.0488	0.9926	omega	ROT	34
30	-0.2823	3.8487	7.3142	0.6142	omega	ROT	39	35	-1.1492	5.9276	19.0334	0.9610	omega	ROT	38
								36	-9.1189	3.0812	94.7380	1.5319	smesp2	SMES	29
								37	-0.3615	2.9547	12.1434	0.4738	omega	ROT	39

CASO 9007

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4164	8.8999	4.6731	1.4180	omega	ROT	36	24	-0.4084	8.9390	4.5642	1.4242	omega	ROT	36
23	-0.4180	8.7096	4.7938	1.3878	omega	ROT	37	25	-0.6168	8.8591	6.9459	1.4134	omega	ROT	37
24	-0.3277	8.5731	3.8196	1.3654	omega	ROT	33	26	-0.3401	8.5772	3.9617	1.3662	omega	ROT	33
25	-0.2680	7.5066	3.5675	1.1955	omega	ROT	32	27	-0.2045	7.5708	2.7008	1.2054	delta	ROT	30
26	-0.3156	7.0120	4.4958	1.1171	omega	ROT	35	28	-0.3972	7.5703	5.2396	1.2065	omega	ROT	32
27	-0.0021	6.9098	0.0307	1.0997	delta	ROT	30	29	-1.1268	7.4868	14.8832	1.2050	omega	ROT	35
28	-0.2375	6.2987	3.7680	1.0032	omega	ROT	31	30	-0.4067	7.1676	5.6654	1.1426	omega	ROT	31
29	-0.2586	5.9984	4.3078	0.9556	omega	ROT	38	31	-0.5945	6.2307	9.4983	0.9961	omega	ROT	34
30	-0.2895	3.7400	7.7178	0.5970	omega	ROT	39	32	-1.2503	5.7745	21.1618	0.9403	omega	ROT	38
								33	-9.0628	3.0755	94.6960	1.5232	smesp2	SMES	29
								34	-0.3742	2.9412	12.6198	0.4719	omega	ROT	39

CASO 9008

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4163	8.8974	4.6735	1.4176	omega	ROT	36	25	-0.4079	8.9369	4.5598	1.4238	omega	ROT	36
24	-0.4224	8.7195	4.8389	1.3894	omega	ROT	37	26	-0.6162	8.8535	6.9432	1.4125	omega	ROT	37
25	-0.3285	8.5730	3.8292	1.3654	omega	ROT	33	27	-0.3412	8.5856	3.9705	1.3675	omega	ROT	33
26	-0.2725	7.5006	3.6312	1.1945	omega	ROT	32	28	-0.4031	7.5764	5.3126	1.2075	omega	ROT	32
27	-0.2700	7.0301	3.8372	1.1197	omega	ROT	35	29	-0.1925	7.5677	2.5428	1.2048	delta	ROT	30
28	-0.0270	6.9373	0.3890	1.1041	delta	ROT	30	30	-1.1221	7.5457	14.7084	1.2141	omega	ROT	35
29	-0.2628	6.2249	4.2172	0.9916	omega	ROT	31	31	-0.4243	7.0835	5.9797	1.1294	omega	ROT	31
30	-0.2552	6.0169	4.2380	0.9585	omega	ROT	38	32	-0.5642	6.2160	9.0392	0.9934	omega	ROT	34
31	-0.2790	3.8462	7.2358	0.6137	omega	ROT	39	33	-1.1525	5.9199	19.1097	0.9599	omega	ROT	38
								34	-9.1046	3.0831	94.7166	1.5299	smesp2	SMES	29
								35	-0.3612	2.9408	12.1893	0.4716	omega	ROT	39

CASO 9009

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4161	8.8993	4.6709	1.4179	omega	ROT	36	25	-0.4083	8.9390	4.5629	1.4242	omega	ROT	36
23	-0.4242	8.7216	4.8582	1.3897	omega	ROT	37	26	-0.6151	8.8547	6.9298	1.4127	omega	ROT	37
24	-0.3292	8.5804	3.8342	1.3666	omega	ROT	33	27	-0.3414	8.5906	3.9713	1.3683	omega	ROT	33
25	-0.2673	7.4804	3.5715	1.1913	omega	ROT	32	28	-0.1934	7.5739	2.5527	1.2058	delta	ROT	30
26	-0.2951	7.0627	4.1749	1.1250	omega	ROT	35	29	-1.1087	7.5438	14.5404	1.2135	omega	ROT	35
27	0.0042	6.9737	-0.0604	1.1099	delta	ROT	30	30	-0.4114	7.5397	5.4478	1.2018	omega	ROT	32
28	-0.2620	6.4017	4.0895	1.0197	omega	ROT	31	31	-0.3914	7.1840	5.4400	1.1451	omega	ROT	31
29	-0.2630	6.0186	4.3659	0.9588	omega	ROT	38	32	-0.5737	6.2151	9.1924	0.9934	omega	ROT	34
30	-0.2878	3.8113	7.5289	0.6083	omega	ROT	39	33	-1.1412	5.9076	18.9675	0.9576	omega	ROT	38
								34	-9.1046	3.0814	94.7220	1.5298	smesp2	SMES	29
								35	-0.3622	2.9355	12.2458	0.4707	omega	ROT	39

CASO 9010

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4165	8.8965	4.6762	1.4175	omega	ROT	36	26	-0.4079	8.9358	4.5597	1.4237	omega	ROT	36
24	-0.4256	8.7225	4.8734	1.3899	omega	ROT	37	27	-0.6156	8.8544	6.9352	1.4126	omega	ROT	37
25	-0.3280	8.5739	3.8222	1.3656	omega	ROT	33	28	-0.3403	8.5850	3.9612	1.3674	omega	ROT	33
26	-0.2708	7.5074	3.6053	1.1956	omega	ROT	32	29	-0.3969	7.5792	5.2300	1.2079	omega	ROT	32
27	-0.2837	7.0448	4.0243	1.1221	omega	ROT	35	30	-0.1910	7.5697	2.5219	1.2051	delta	ROT	30
28	-0.0089	6.9650	0.1280	1.1085	delta	ROT	30	31	-1.1143	7.5534	14.5947	1.2152	omega	ROT	35
29	-0.2622	6.2620	4.1843	0.9975	omega	ROT	31	32	-0.4276	7.1070	6.0058	1.1332	omega	ROT	31
30	-0.2586	6.0252	4.2884	0.9598	omega	ROT	38	33	-0.5639	6.2167	9.0329	0.9935	omega	ROT	34
31	-0.2852	3.8400	7.4058	0.6128	omega	ROT	39	34	-1.1334	5.9221	18.7969	0.9596	omega	ROT	38
								35	-9.1033	3.0826	94.7170	1.5296	smesp2	SMES	29
								36	-0.3607	2.9344	12.2010	0.4705	omega	ROT	39

CASO 9011

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4161	8.8986	4.6714	1.4178	omega	ROT	36	26	-0.4082	8.9383	4.5616	1.4241	omega	ROT	36
24	-0.4242	8.7252	4.8558	1.3903	omega	ROT	37	27	-0.6114	8.8575	6.8861	1.4131	omega	ROT	37
25	-0.3292	8.5794	3.8339	1.3665	omega	ROT	33	28	-0.3413	8.5907	3.9698	1.3683	omega	ROT	33
26	-0.2682	7.5100	3.5695	1.1960	omega	ROT	32	29	-0.3974	7.5723	5.2404	1.2068	omega	ROT	32
27	-0.2925	7.0681	4.1341	1.1259	omega	ROT	35	30	-0.1873	7.5556	2.4779	1.2029	delta	ROT	30
28	0.0029	6.9858	-0.0409	1.1118	delta	ROT	30	31	-1.1082	7.5533	14.5160	1.2150	omega	ROT	35
29	-0.2612	6.3889	4.0843	1.0177	omega	ROT	31	32	-0.4063	7.1731	5.6548	1.1435	omega	ROT	31
30	-0.2664	6.0382	4.4082	0.9619	omega	ROT	38	33	-0.5641	6.2175	9.0362	0.9936	omega	ROT	34
31	-0.2834	3.7611	7.5151	0.6003	omega	ROT	39	34	-1.1407	5.9169	18.9305	0.9590	omega	ROT	38
								35	-9.1073	3.0816	94.7245	1.5302	smesp2	SMES	29
								36	-0.3408	2.8898	11.7137	0.4631	omega	ROT	39

CASO 9012

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4163	8.8977	4.6735	1.4177	omega	ROT	36	26	-0.4081	8.9373	4.5610	1.4239	omega	ROT	36
24	-0.4252	8.7249	4.8673	1.3903	omega	ROT	37	27	-0.6126	8.8566	6.9001	1.4129	omega	ROT	37
25	-0.3286	8.5776	3.8283	1.3662	omega	ROT	33	28	-0.3408	8.5886	3.9654	1.3680	omega	ROT	33
26	-0.2682	7.5119	3.5679	1.1963	omega	ROT	32	29	-0.3957	7.5753	5.2167	1.2073	omega	ROT	32
27	-0.2921	7.0651	4.1314	1.1254	omega	ROT	35	30	-0.1882	7.5612	2.4879	1.2038	delta	ROT	30
28	0.0023	6.9857	-0.0334	1.1118	delta	ROT	30	31	-1.1087	7.5539	14.5214	1.2151	omega	ROT	35
29	-0.2613	6.3705	4.0985	1.0147	omega	ROT	31	32	-0.4115	7.1646	5.7338	1.1422	omega	ROT	31
30	-0.2654	6.0368	4.3926	0.9617	omega	ROT	38	33	-0.5642	6.2177	9.0366	0.9936	omega	ROT	34
31	-0.2842	3.7608	7.5365	0.6003	omega	ROT	39	34	-1.1377	5.9186	18.8771	0.9592	omega	ROT	38
								35	-9.1057	3.0818	94.7219	1.5300	smesp2	SMES	29
								36	-0.3409	2.8934	11.6998	0.4637	omega	ROT	39

CASO 9013

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4165	8.8967	4.6764	1.4175	omega	ROT	36	27	-0.4079	8.9359	4.5600	1.4237	omega	ROT	36
24	-0.4255	8.7247	4.8709	1.3902	omega	ROT	37	28	-0.6139	8.8556	6.9156	1.4128	omega	ROT	37
25	-0.3278	8.5747	3.8196	1.3657	omega	ROT	33	29	-0.3400	8.5853	3.9568	1.3675	omega	ROT	33
26	-0.2967	7.0841	4.1846	1.1285	omega	ROT	35	30	-0.1901	7.5687	2.5114	1.2050	delta	ROT	30
27	-0.0018	6.9854	0.0253	1.1118	delta	ROT	30	31	-1.1061	7.5562	14.4839	1.2154	omega	ROT	35
28	-0.2301	6.9458	3.3113	1.1061	omega	ROT	31	32	-0.4943	7.5355	6.5461	1.2019	omega	ROT	32
29	-0.2710	6.3866	4.2394	1.0174	omega	ROT	32	33	-0.2374	6.7842	3.4966	1.0804	omega	ROT	31
30	-0.2634	6.0285	4.3649	0.9604	omega	ROT	38	34	-0.5676	6.2160	9.0937	0.9934	omega	ROT	34
31	-0.2850	3.6959	7.6878	0.5900	omega	ROT	39	35	-1.1455	5.9004	19.0589	0.9566	omega	ROT	38
								36	-9.1042	3.0823	94.7188	1.5298	smesp2	SMES	29
								37	-0.3734	2.7709	13.3559	0.4450	omega	ROT	39

CASO 9014

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4162	8.8985	4.6715	1.4178	omega	ROT	36	26	-0.4081	8.9382	4.5615	1.4240	omega	ROT	36
24	-0.4245	8.7250	4.8598	1.3903	omega	ROT	37	27	-0.6118	8.8574	6.8903	1.4131	omega	ROT	37
25	-0.3292	8.5795	3.8338	1.3665	omega	ROT	33	28	-0.3412	8.5906	3.9691	1.3683	omega	ROT	33
26	-0.2694	7.5074	3.5855	1.1956	omega	ROT	32	29	-0.3978	7.5712	5.2472	1.2067	omega	ROT	32
27	-0.2922	7.0660	4.1315	1.1256	omega	ROT	35	30	-0.1872	7.5556	2.4772	1.2029	delta	ROT	30
28	0.0026	6.9845	-0.0367	1.1116	delta	ROT	30	31	-1.1080	7.5544	14.5121	1.2152	omega	ROT	35
29	-0.2614	6.3762	4.0965	1.0156	omega	ROT	31	32	-0.4093	7.1632	5.7043	1.1419	omega	ROT	31
30	-0.2660	6.0373	4.4015	0.9618	omega	ROT	38	33	-0.5640	6.2171	9.0351	0.9935	omega	ROT	34
31	-0.2839	3.7970	7.4567	0.6060	omega	ROT	39	34	-1.1374	5.9174	18.8753	0.9590	omega	ROT	38
								35	-9.1071	3.0816	94.7242	1.5302	smesp2	SMES	29
								36	-0.3512	2.9033	12.0080	0.4654	omega	ROT	39

CASO 9015

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4165	8.8962	4.6765	1.4174	omega	ROT	36	25	-0.4078	8.9352	4.5592	1.4236	omega	ROT	36
23	-0.4272	8.7233	4.8919	1.3900	omega	ROT	37	26	-0.6154	8.8537	6.9336	1.4125	omega	ROT	37
24	-0.3271	8.5734	3.8122	1.3655	omega	ROT	33	27	-0.3397	8.5842	3.9540	1.3673	omega	ROT	33
25	-0.2622	7.5230	3.4829	1.1980	omega	ROT	32	28	-0.3804	7.5771	5.0136	1.2075	omega	ROT	32
26	-0.2926	7.0602	4.1405	1.1246	omega	ROT	35	29	-0.1893	7.5684	2.5004	1.2049	delta	ROT	30
27	0.0022	6.9853	-0.0322	1.1117	delta	ROT	30	30	-1.1043	7.5487	14.4752	1.2142	omega	ROT	35
28	-0.2630	6.2317	4.2159	0.9927	omega	ROT	34	31	-0.4461	7.1356	6.2397	1.1379	omega	ROT	31
29	-0.2574	6.0223	4.2702	0.9594	omega	ROT	38	32	-0.5657	6.2214	9.0553	0.9943	omega	ROT	34
30	-0.2369	3.0183	7.8260	0.4819	omega	ROT	39	33	-1.1605	5.9039	19.2878	0.9576	omega	ROT	38
								34	-9.1021	3.0830	94.7144	1.5295	smesp2	SMES	29
								35	-0.2851	2.1794	12.9688	0.3498	omega	ROT	39

CASO 9016

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4163	8.8972	4.6741	1.4176	omega	ROT	36	25	-0.4079	8.9364	4.5600	1.4238	omega	ROT	36
24	-0.4263	8.7238	4.8804	1.3901	omega	ROT	37	26	-0.6140	8.8548	6.9173	1.4127	omega	ROT	37
25	-0.3277	8.5757	3.8185	1.3659	omega	ROT	33	27	-0.3402	8.5866	3.9588	1.3677	omega	ROT	33
26	-0.2646	7.5165	3.5176	1.1970	omega	ROT	32	28	-0.3823	7.5709	5.0427	1.2065	omega	ROT	32
27	-0.2926	7.0609	4.1398	1.1247	omega	ROT	35	29	-0.1884	7.5629	2.4906	1.2041	delta	ROT	30
28	0.0025	6.9828	-0.0352	1.1114	delta	ROT	30	30	-1.1031	7.5496	14.4580	1.2143	omega	ROT	35
29	-0.2641	6.2319	4.2342	0.9927	omega	ROT	34	31	-0.4485	7.1279	6.2800	1.1367	omega	ROT	31
30	-0.2578	6.0229	4.2764	0.9594	omega	ROT	38	32	-0.5653	6.2213	9.0489	0.9942	omega	ROT	34
31	-0.2364	3.0191	7.8068	0.4820	omega	ROT	39	33	-1.1615	5.9020	19.3087	0.9574	omega	ROT	38
								34	-9.1040	3.0826	94.7177	1.5297	smesp2	SMES	29
								35	-0.2841	2.1816	12.9142	0.3501	omega	ROT	39

CASO 9017

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4164	8.8973	4.6746	1.4176	omega	ROT	36	26	-0.4080	8.9368	4.5607	1.4238	omega	ROT	36
24	-0.4252	8.7247	4.8682	1.3902	omega	ROT	37	27	-0.6131	8.8560	6.9065	1.4128	omega	ROT	37
25	-0.3283	8.5765	3.8250	1.3660	omega	ROT	33	28	-0.3401	8.5865	3.9576	1.3677	omega	ROT	33
26	-0.2678	7.1124	3.7627	1.1328	omega	ROT	32	29	-0.1889	7.5644	2.4962	1.2043	delta	ROT	30
27	-0.2686	7.0624	3.8011	1.1248	omega	ROT	31	30	-1.0831	7.5616	14.1788	1.2157	omega	ROT	35
28	0.0014	6.9844	-0.0198	1.1116	delta	ROT	30	31	-0.2583	7.2186	3.5759	1.1496	omega	ROT	31
29	-0.2687	6.3867	4.2032	1.0174	omega	ROT	32	32	-0.3703	6.7153	5.5065	1.0704	omega	ROT	32
30	-0.2644	6.0319	4.3795	0.9609	omega	ROT	38	33	-0.6003	6.2220	9.6033	0.9949	omega	ROT	38
31	-0.2855	3.7513	7.5900	0.5988	omega	ROT	39	34	-1.2717	5.7861	21.4666	0.9429	omega	ROT	38
								35	-9.1041	3.0830	94.7165	1.5298	smesp2	SMES	29
								36	-0.3667	2.9509	12.3332	0.4733	omega	ROT	39

CASO 9018

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	Complex eigenvalues:							
-----								N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4164	8.8966	4.6758	1.4175	omega	ROT	36	27	-0.4078	8.9358	4.5594	1.4237	omega	ROT	36
24	-0.4257	8.7223	4.8748	1.3899	omega	ROT	37	28	-0.6158	8.8542	6.9380	1.4126	omega	ROT	37
25	-0.3279	8.5696	3.8231	1.3649	omega	ROT	33	29	-0.3408	8.5809	3.9688	1.3668	omega	ROT	33
26	-0.2505	7.4295	3.3695	1.1831	omega	ROT	31	30	-0.1899	7.5630	2.5101	1.2041	delta	ROT	30
27	-0.2853	7.0186	4.0613	1.1180	omega	ROT	35	31	-1.1294	7.5401	14.8136	1.2134	omega	ROT	35
28	-0.0143	6.9692	0.2052	1.1092	delta	ROT	30	32	-0.3755	7.4494	5.0342	1.1871	omega	ROT	32
29	-0.2688	6.1257	4.3831	0.9759	omega	ROT	32	33	-0.4603	7.1963	6.3836	1.1477	omega	ROT	31
30	-0.2554	6.0296	4.2323	0.9605	omega	ROT	38	34	-0.5699	6.2121	9.1353	0.9928	omega	ROT	34
31	-0.2826	3.8717	7.2801	0.6178	omega	ROT	39	35	-1.1560	5.9148	19.1819	0.9592	omega	ROT	38
								36	-9.1033	3.0832	94.7150	1.5297	smesp2	SMES	29

CASO 9019

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
-----								-----							
22	-0.4163	8.8972	4.6744	1.4176	omega	ROT	36	28	-0.4079	8.9364	4.5595	1.4238	omega	ROT	36
23	-0.4255	8.7219	4.8729	1.3898	omega	ROT	37	29	-0.6163	8.8538	6.9446	1.4125	omega	ROT	37
24	-0.3281	8.5689	3.8263	1.3648	omega	ROT	33	30	-0.3412	8.5803	3.9735	1.3667	omega	ROT	33
25	-0.2465	7.4293	3.3160	1.1831	omega	ROT	31	31	-0.1901	7.5628	2.5123	1.2040	delta	ROT	30
26	-0.2803	7.0038	3.9994	1.1156	omega	ROT	34	32	-1.1354	7.5316	14.9073	1.2122	omega	ROT	35
27	-0.0215	6.9657	0.3083	1.1086	delta	ROT	30	33	-0.3785	7.4513	5.0724	1.1874	omega	ROT	32
28	-0.2802	6.0536	4.6244	0.9645	omega	ROT	34	34	-0.4614	7.2038	6.3917	1.1489	omega	ROT	31
29	-0.2403	5.9708	4.0216	0.9511	omega	ROT	32	35	-0.5733	6.2106	9.1913	0.9926	omega	ROT	34
30	-0.2813	3.8742	7.2411	0.6182	omega	ROT	39	36	-1.1705	5.9114	19.4241	0.9591	omega	ROT	38
								37	-9.1034	3.0835	94.7143	1.5297	smesp2	SMES	29
								38	-0.3670	2.9481	12.3535	0.4728	omega	ROT	39

CASO 9020

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
-----								-----							
22	-0.4161	8.9004	4.6698	1.4181	omega	ROT	36	26	-0.4083	8.9395	4.5631	1.4243	omega	ROT	36
23	-0.4263	8.7231	4.8809	1.3900	omega	ROT	37	27	-0.6136	8.8563	6.9116	1.4129	omega	ROT	37
24	-0.3282	8.5654	3.8290	1.3642	omega	ROT	33	28	-0.3423	8.5732	3.9892	1.3655	omega	ROT	33
25	-0.2572	7.4880	3.4323	1.1924	omega	ROT	31	29	-0.1872	7.5576	2.4763	1.2032	delta	ROT	30
26	-0.0014	6.9909	0.0195	1.1126	delta	ROT	30	30	-0.3784	7.5407	5.0116	1.2017	omega	ROT	32
27	-0.3037	6.9540	4.3625	1.1078	omega	ROT	34	31	-1.1653	7.4584	15.4371	1.2014	omega	ROT	35
28	-0.2537	6.0646	4.1799	0.9660	omega	ROT	38	32	-0.4574	7.1433	6.3907	1.1392	omega	ROT	31
29	-0.2560	5.8430	4.3763	0.9308	omega	ROT	32	33	-0.6142	6.2048	9.8499	0.9924	omega	ROT	34
30	-0.2840	3.7298	7.5933	0.5953	omega	ROT	39	34	-1.2762	5.8594	21.2807	0.9544	omega	ROT	38
								35	-9.1043	3.0823	94.7188	1.5298	smesp2	SMES	29
								36	-0.3655	2.9469	12.3094	0.4726	omega	ROT	39

CASO 9021

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4142	8.9133	4.6421	1.4201	omega	ROT	36	27	-0.4101	8.9551	4.5752	1.4267	omega	ROT	36
23	-0.4234	8.7306	4.8436	1.3912	omega	ROT	37	28	-0.6099	8.8565	6.8697	1.4129	omega	ROT	37
24	-0.3357	8.5906	3.9051	1.3683	omega	ROT	33	29	-0.3498	8.6000	4.0640	1.3699	omega	ROT	33
25	-0.2489	7.5187	3.3092	1.1973	omega	ROT	31	30	-0.1928	7.5897	2.5395	1.2083	delta	ROT	30
26	-0.0030	7.0024	0.0427	1.1145	delta	ROT	30	31	-0.3748	7.5809	4.9377	1.2080	omega	ROT	32
27	-0.3030	6.9539	4.3538	1.1078	omega	ROT	34	32	-1.1605	7.4426	15.4070	1.1988	omega	ROT	35
28	-0.2534	6.0689	4.1717	0.9667	omega	ROT	38	33	-0.4424	7.1644	6.1637	1.1424	omega	ROT	31
29	-0.2484	5.8496	4.2433	0.9318	omega	ROT	32	34	-0.6181	6.2107	9.9039	0.9933	omega	ROT	38
30	-0.2951	3.5433	8.3000	0.5659	omega	ROT	39	35	-1.3697	5.8205	22.9069	0.9517	omega	ROT	38
								36	-9.1086	3.0800	94.7308	1.5303	smesp2	SMES	29
								37	-0.3539	2.9275	12.0008	0.4693	omega	ROT	39

CASO 9022

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4170	8.8991	4.6805	1.4179	omega	ROT	36	25	-0.4085	8.9361	4.5663	1.4237	omega	ROT	36
24	-0.4104	8.6717	4.7270	1.3817	omega	ROT	37	26	-0.6287	8.8420	7.0924	1.4108	omega	ROT	37
25	-0.3241	8.5508	3.7879	1.3619	omega	ROT	33	27	-0.3394	8.5506	3.9659	1.3619	omega	ROT	33
26	-0.2672	7.5098	3.5557	1.1960	omega	ROT	32	28	-0.3982	7.5754	5.2487	1.2073	omega	ROT	32
27	-0.3192	6.9386	4.5957	1.1055	omega	ROT	34	29	-0.2026	7.5538	2.6811	1.2027	delta	ROT	30
28	-0.0152	6.9105	0.2195	1.0998	delta	ROT	30	30	-1.2089	7.2993	16.3387	1.1775	omega	ROT	35
29	-0.2495	6.3865	3.9045	1.0172	omega	ROT	31	31	-0.4016	7.1767	5.5875	1.1440	omega	ROT	31
30	-0.2179	5.0297	4.3279	0.8013	omega	ROT	38	32	-0.9913	5.9725	16.3741	0.9636	omega	ROT	38
31	-0.3170	3.4314	9.1994	0.5484	omega	ROT	39	33	-1.2085	5.8861	20.1116	0.9563	omega	ROT	34
								34	-9.0110	3.1301	94.4633	1.5182	smesp2	SMES	29
								35	-0.3938	2.9387	13.2811	0.4719	omega	ROT	39

CASO 9023

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4144	8.8950	4.6532	1.4172	omega	ROT	36	25	-0.4055	8.9330	4.5344	1.4232	omega	ROT	36
23	-0.4291	8.7156	4.9175	1.3888	omega	ROT	37	26	-0.6164	8.8558	6.9441	1.4128	omega	ROT	37
24	-0.3380	8.3589	4.0401	1.3315	omega	ROT	33	27	-0.3499	8.3600	4.1817	1.3317	omega	ROT	33
25	-0.2686	7.5098	3.5740	1.1960	omega	ROT	32	28	-1.1548	7.5749	15.0713	1.2195	omega	ROT	35
26	-0.0008	7.0005	0.0121	1.1142	delta	ROT	30	29	-0.3985	7.5734	5.2539	1.2070	omega	ROT	32
27	-0.2648	6.9697	3.7970	1.1101	omega	ROT	35	30	-0.1885	7.5640	2.4909	1.2042	delta	ROT	30
28	-0.2509	6.2769	3.9944	0.9998	omega	ROT	38	31	-0.4062	7.1760	5.6515	1.1439	omega	ROT	31
29	-0.2753	5.7580	4.7764	0.9175	omega	ROT	34	32	-0.8832	6.0443	14.4592	0.9722	omega	ROT	38
30	-0.3038	3.7580	8.0570	0.6001	omega	ROT	39	33	-0.7739	5.4274	14.1163	0.8725	omega	ROT	34
								34	-9.1003	3.0834	94.7110	1.5292	smesp2	SMES	29
								35	-0.3619	2.9533	12.1628	0.4735	omega	ROT	39

CASO 9024

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4144	8.8950	4.6532	1.4172	omega	ROT	36	25	-0.4055	8.9330	4.5344	1.4232	omega	ROT	36
23	-0.4291	8.7156	4.9175	1.3888	omega	ROT	37	26	-0.6164	8.8558	6.9441	1.4128	omega	ROT	37
24	-0.3380	8.3589	4.0401	1.3315	omega	ROT	33	27	-0.3499	8.3600	4.1817	1.3317	omega	ROT	33
25	-0.2686	7.5098	3.5740	1.1960	omega	ROT	32	28	-1.1548	7.5749	15.0713	1.2195	omega	ROT	35
26	-0.0008	7.0005	0.0121	1.1142	delta	ROT	30	29	-0.3985	7.5734	5.2539	1.2070	omega	ROT	32
27	-0.2648	6.9697	3.7970	1.1101	omega	ROT	35	30	-0.1885	7.5640	2.4909	1.2042	delta	ROT	30
28	-0.2509	6.2769	3.9944	0.9998	omega	ROT	38	31	-0.4062	7.1760	5.6515	1.1439	omega	ROT	31
29	-0.2753	5.7580	4.7764	0.9175	omega	ROT	34	32	-0.8832	6.0443	14.4592	0.9722	omega	ROT	38
30	-0.3038	3.7580	8.0570	0.6001	omega	ROT	39	33	-0.7739	5.4274	14.1163	0.8725	omega	ROT	34
								34	-9.1003	3.0834	94.7110	1.5292	smesp2	SMES	29
								35	-0.3619	2.9533	12.1628	0.4735	omega	ROT	39

CASO 9025

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.3805	8.8759	4.2829	1.4139	omega	ROT	36	26	-0.3807	8.9126	4.2681	1.4198	omega	ROT	36
23	-0.4252	8.7237	4.8685	1.3901	omega	ROT	37	27	-0.6144	8.8516	6.9246	1.4122	omega	ROT	37
24	-0.3255	8.4620	3.8440	1.3478	omega	ROT	33	28	-0.3385	8.4855	3.9858	1.3516	omega	ROT	33
25	-0.2641	7.5056	3.5168	1.1953	omega	ROT	32	29	-0.3915	7.5717	5.1636	1.2067	omega	ROT	32
26	0.0076	6.9696	-0.1084	1.1092	delta	ROT	30	30	-0.1941	7.5662	2.5646	1.2046	delta	ROT	30
27	-0.2837	6.3939	4.4321	1.0186	omega	ROT	34	31	-1.6891	7.1793	22.9017	1.1738	omega	ROT	35
28	-0.2681	6.2894	4.2592	1.0019	omega	ROT	34	32	-0.4033	7.1684	5.6169	1.1427	omega	ROT	31
29	-0.2208	5.8328	3.7834	0.9290	omega	ROT	38	33	-0.4931	6.2078	7.9182	0.9911	omega	ROT	34
30	-0.2757	3.6798	7.4722	0.5873	omega	ROT	39	34	-1.0272	5.9958	16.8867	0.9682	omega	ROT	38
								35	-9.0817	3.0938	94.6582	1.5270	smesp2	SMES	29
								36	-0.3713	2.9350	12.5515	0.4708	omega	ROT	39

CASO 9026

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4360	8.9233	4.8806	1.4219	omega	ROT	36	24	-0.4338	8.9697	4.8305	1.4292	omega	ROT	36
23	-0.4258	8.7236	4.8758	1.3901	omega	ROT	37	25	-0.6151	8.8528	6.9313	1.4124	omega	ROT	37
24	-0.3215	8.4955	3.7814	1.3531	omega	ROT	33	26	-0.3401	8.5169	3.9903	1.3566	omega	ROT	33
25	-0.2650	7.5041	3.5289	1.1951	omega	ROT	32	27	-1.3573	7.5869	17.6099	1.2267	omega	ROT	35
26	0.0136	6.9768	-0.1946	1.1104	delta	ROT	30	28	-0.3958	7.5710	5.2204	1.2066	omega	ROT	32
27	-0.2875	6.6474	4.3212	1.0590	omega	ROT	34	29	-0.1921	7.5667	2.5382	1.2047	delta	ROT	30
28	-0.2548	6.4031	3.9756	1.0199	omega	ROT	31	30	-0.4018	7.1689	5.5961	1.1428	omega	ROT	31
29	-0.2553	6.0012	4.2510	0.9560	omega	ROT	38	31	-0.5324	6.1994	8.5571	0.9903	omega	ROT	34
30	-0.2831	3.8312	7.3692	0.6114	omega	ROT	39	32	-1.0522	5.9199	17.4990	0.9570	omega	ROT	38
								33	-9.0810	3.0935	94.6583	1.5268	smesp2	SMES	29
								34	-0.3733	2.9464	12.5699	0.4727	omega	ROT	39

CASO 9027

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4162	8.9017	4.6701	1.4183	omega	ROT	36	24	-0.4088	8.9412	4.5669	1.4245	omega	ROT	36
23	-0.4154	8.7156	4.7603	1.3887	omega	ROT	37	25	-0.6122	8.8600	6.8931	1.4135	omega	ROT	37
24	-0.3287	8.5766	3.8300	1.3660	omega	ROT	33	26	-0.3415	8.5808	3.9764	1.3668	omega	ROT	33
25	-0.2671	7.5111	3.5536	1.1962	omega	ROT	32	27	-0.2084	7.5964	2.7420	1.2095	delta	ROT	30
26	-0.3153	7.0129	4.4915	1.1173	omega	ROT	35	28	-0.3955	7.5735	5.2152	1.2070	omega	ROT	32
27	-0.0023	6.9161	0.0339	1.1007	delta	ROT	30	29	-1.1251	7.4810	14.8717	1.2040	omega	ROT	35
28	-0.2371	6.2941	3.7643	1.0025	omega	ROT	31	30	-0.4077	7.1718	5.6755	1.1433	omega	ROT	31
29	-0.2591	6.0036	4.3124	0.9564	omega	ROT	38	31	-0.5926	6.2335	9.4636	0.9966	omega	ROT	34
30	-0.2944	3.6767	7.9810	0.5870	omega	ROT	39	32	-1.2887	5.7484	21.8757	0.9376	omega	ROT	38
								33	-9.0645	3.0738	94.7031	1.5233	smesp2	SMES	29
								34	-0.3692	2.9345	12.4819	0.4707	omega	ROT	39

CASO 9028

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4166	8.8974	4.6777	1.4176	omega	ROT	36	24	-0.4081	8.9359	4.5626	1.4237	omega	ROT	36
23	-0.4232	8.7062	4.8554	1.3873	omega	ROT	37	25	-0.6182	8.8485	6.9699	1.4117	omega	ROT	37
24	-0.3264	8.5691	3.8063	1.3648	omega	ROT	33	26	-0.3397	8.5757	3.9576	1.3659	omega	ROT	33
25	-0.2691	7.5068	3.5831	1.1955	omega	ROT	32	27	-0.4005	7.5703	5.2825	1.2065	omega	ROT	32
26	-0.2956	7.0261	4.2030	1.1192	omega	ROT	35	28	-0.1892	7.5583	2.5021	1.2033	delta	ROT	30
27	0.0026	6.9793	-0.0379	1.1108	delta	ROT	30	29	-1.1569	7.4834	15.2783	1.2052	omega	ROT	35
28	-0.2667	6.3957	4.1659	1.0188	omega	ROT	34	30	-0.4083	7.1724	5.6841	1.1434	omega	ROT	31
29	-0.2494	5.1845	4.8057	0.8261	omega	ROT	38	31	-0.7474	5.9612	12.4402	0.9562	omega	ROT	34
30	-0.2854	3.8639	7.3655	0.6166	omega	ROT	39	32	-1.2117	5.6323	21.0324	0.9169	omega	ROT	38
								33	-8.6255	3.1751	93.8438	1.4628	smesp2	SMES	29
								34	-0.3693	2.9560	12.3955	0.4741	omega	ROT	39

CASO 9029

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.3731	8.8488	4.2132	1.4096	omega	ROT	36	26	-0.3711	8.8831	4.1736	1.4150	omega	ROT	36
23	-0.4328	8.7170	4.9592	1.3891	omega	ROT	37	27	-0.6260	8.8427	7.0614	1.4109	omega	ROT	37
24	-0.3148	8.4252	3.7333	1.3419	omega	ROT	33	28	-0.3265	8.4434	3.8644	1.3448	omega	ROT	33
25	-0.2606	7.5226	3.4617	1.1980	omega	ROT	32	29	-0.1999	7.6027	2.6285	1.2104	delta	ROT	30
26	0.0047	6.9838	-0.0667	1.1115	delta	ROT	30	30	-0.3853	7.5873	5.0712	1.2091	omega	ROT	32
27	-0.2825	6.4008	4.4099	1.0197	omega	ROT	34	31	-0.4059	7.1792	5.6442	1.1444	omega	ROT	31
28	-0.2685	6.2436	4.2961	0.9946	omega	ROT	34	32	-1.7921	7.1661	24.2603	1.1756	omega	ROT	35
29	-0.2081	5.7366	3.6243	0.9136	omega	ROT	38	33	-0.4723	6.2177	7.5747	0.9924	omega	ROT	34
30	-0.2653	3.5255	7.5049	0.5627	omega	ROT	39	34	-1.0196	6.0442	16.6338	0.9755	omega	ROT	38
								35	-9.0590	3.0988	94.6176	1.5238	smesp2	SMES	29
								36	-0.3695	2.9190	12.5570	0.4683	omega	ROT	39

CASO 9030

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4240	8.7247	4.8539	1.3902	omega	ROT	37	25	-0.6112	8.8573	6.8847	1.4130	omega	ROT	37
23	-0.3346	8.5699	3.9016	1.3650	omega	ROT	33	26	-0.3399	8.5877	3.9544	1.3678	omega	ROT	33
24	-0.3069	7.6020	4.0334	1.2109	omega	ROT	36	27	-0.7956	8.4515	9.3726	1.3510	omega	ROT	36
25	-0.2681	7.5080	3.5690	1.1957	omega	ROT	32	28	-0.3933	7.5808	5.1810	1.2081	omega	ROT	32
26	-0.2834	7.0688	4.0057	1.1259	omega	ROT	35	29	-0.1829	7.5528	2.4206	1.2024	delta	ROT	30
27	0.0030	6.9871	-0.0423	1.1120	delta	ROT	30	30	-0.4009	7.2576	5.5156	1.1568	omega	ROT	31
28	-0.2616	6.4018	4.0822	1.0197	omega	ROT	31	31	-0.4562	7.1664	6.3536	1.1429	omega	ROT	31
29	-0.2669	6.0383	4.4151	0.9620	omega	ROT	38	32	-0.5893	6.1509	9.5375	0.9834	omega	ROT	38
30	-0.2850	3.8652	7.3537	0.6168	omega	ROT	39	33	-0.9779	5.7400	16.7950	0.9267	omega	ROT	38
								34	-9.0906	3.0918	94.6741	1.5282	smesp2	SMES	29
								35	-0.3776	2.9536	12.6820	0.4739	omega	ROT	39

CASO 9031

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4418	8.8893	4.9634	1.4165	omega	ROT	36	26	-0.4284	8.9256	4.7947	1.4222	omega	ROT	36
23	-0.4264	8.7234	4.8824	1.3900	omega	ROT	37	27	-0.6158	8.8528	6.9391	1.4124	omega	ROT	37
24	-0.3183	8.4893	3.7466	1.3521	omega	ROT	33	28	-0.3361	8.5116	3.9454	1.3557	omega	ROT	33
25	-0.2647	7.5076	3.5235	1.1956	omega	ROT	32	29	-1.4137	7.5843	18.3236	1.2279	omega	ROT	35
26	0.0123	6.9735	-0.1765	1.1099	delta	ROT	30	30	-0.3941	7.5735	5.1968	1.2070	omega	ROT	32
27	-0.2905	6.6016	4.3957	1.0517	omega	ROT	34	31	-0.1928	7.5682	2.5465	1.2049	delta	ROT	30
28	-0.2492	6.4009	3.8904	1.0195	omega	ROT	31	32	-0.4037	7.1716	5.6209	1.1432	omega	ROT	31
29	-0.2505	5.9876	4.1796	0.9538	omega	ROT	38	33	-0.5203	6.2087	8.3502	0.9916	omega	ROT	34
30	-0.2838	3.7607	7.5255	0.6002	omega	ROT	39	34	-1.0547	5.9629	17.4168	0.9638	omega	ROT	38
								35	-9.0824	3.0929	94.6616	1.5270	smesp2	SMES	29
								36	-0.3695	2.9381	12.4777	0.4713	omega	ROT	39

CASO 9032

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4166	8.8971	4.6777	1.4176	omega	ROT	36	26	-0.4080	8.9360	4.5613	1.4237	omega	ROT	36
23	-0.3403	8.5908	3.9581	1.3683	omega	ROT	33	27	-0.6438	8.7365	7.3493	1.3942	omega	ROT	37
24	-0.3482	8.5520	4.0683	1.3622	omega	ROT	37	28	-0.3375	8.5844	3.9288	1.3673	omega	ROT	33
25	-0.2691	7.5087	3.5821	1.1958	omega	ROT	32	29	-0.2342	7.6096	3.0761	1.2117	delta	ROT	30
26	-0.3007	7.0719	4.2487	1.1265	omega	ROT	35	30	-0.3997	7.5717	5.2712	1.2068	omega	ROT	32
27	-0.0332	6.7399	0.4919	1.0727	delta	ROT	30	31	-1.1074	7.5582	14.4974	1.2158	omega	ROT	35
28	-0.2461	6.3279	3.8857	1.0079	omega	ROT	34	32	-0.4051	7.1737	5.6383	1.1435	omega	ROT	31
29	-0.2532	5.7228	4.4205	0.9117	omega	ROT	38	33	-0.5476	6.1426	8.8801	0.9815	omega	ROT	34
30	-0.2792	3.6516	7.6232	0.5829	omega	ROT	39	34	-1.4502	5.3091	26.3499	0.8759	omega	ROT	38
								35	-8.3725	3.0835	93.8384	1.4200	smesp2	SMES	29
								36	-0.3696	2.9399	12.4730	0.4716	omega	ROT	39

CASO 9033

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4176	8.8902	4.6917	1.4165	omega	ROT	36	27	-0.4067	8.9267	4.5513	1.4222	omega	ROT	36
23	-0.4013	8.7196	4.5973	1.3892	omega	ROT	37	28	-0.5913	8.8562	6.6613	1.4126	omega	ROT	37
24	-0.3209	8.5527	3.7489	1.3622	omega	ROT	33	29	-0.3349	8.5580	3.9100	1.3631	omega	ROT	33
25	-0.2667	7.5211	3.5442	1.1978	omega	ROT	32	30	-0.2007	7.6204	2.6333	1.2132	delta	ROT	30
26	-0.2953	7.0220	4.2015	1.1186	omega	ROT	35	31	-0.3923	7.5813	5.1675	1.2082	omega	ROT	32
27	-0.0017	6.9929	0.0236	1.1129	delta	ROT	30	32	-1.1600	7.4928	15.2994	1.2067	omega	ROT	35
28	-0.2662	6.3913	4.1619	1.0181	omega	ROT	34	33	-0.4142	7.1789	5.7598	1.1445	omega	ROT	31
29	-0.2699	5.0886	5.2966	0.8110	omega	ROT	38	34	-0.7278	5.9803	12.0805	0.9588	omega	ROT	34
30	-0.2846	3.8562	7.3613	0.6154	omega	ROT	39	35	-1.2714	5.4731	22.6269	0.8943	omega	ROT	38
								36	-8.5685	3.1725	93.7785	1.4542	smesp2	SMES	29
								37	-0.3650	2.9529	12.2679	0.4735	omega	ROT	39

CASO 9034

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4165	8.8965	4.6760	1.4175	omega	ROT	36	26	-0.4078	8.9357	4.5592	1.4236	omega	ROT	36
24	-0.4207	8.6991	4.8302	1.3861	omega	ROT	37	27	-0.6261	8.8326	7.0708	1.4093	omega	ROT	37
25	-0.3297	8.5708	3.8435	1.3651	omega	ROT	33	28	-0.3412	8.5852	3.9714	1.3675	omega	ROT	33
26	-0.2691	7.5084	3.5821	1.1958	omega	ROT	32	29	-0.2002	7.5793	2.6400	1.2067	delta	ROT	30
27	-0.2775	7.0596	3.9275	1.1244	omega	ROT	35	30	-0.3997	7.5715	5.2722	1.2067	omega	ROT	32
28	-0.0125	6.9272	0.1810	1.1025	delta	ROT	30	31	-1.1337	7.5435	14.8623	1.2141	omega	ROT	35
29	-0.2664	6.3750	4.1756	1.0155	omega	ROT	34	32	-0.4072	7.1739	5.6670	1.1436	omega	ROT	31
30	-0.2568	5.3278	4.8143	0.8489	omega	ROT	38	33	-0.6255	6.0470	10.2898	0.9675	omega	ROT	34
31	-0.2739	3.7297	7.3240	0.5952	omega	ROT	39	34	-1.4623	5.2522	26.8218	0.8677	omega	ROT	38
								35	-8.1033	3.1222	93.3133	1.3821	smesp2	SMES	29
								36	-0.3580	2.9492	12.0487	0.4728	omega	ROT	39

CASO 9035

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
23	-0.4166	8.8958	4.6778	1.4174	omega	ROT	36	26	-0.4077	8.9348	4.5586	1.4235	omega	ROT	36
24	-0.4229	8.6976	4.8562	1.3859	omega	ROT	37	27	-0.6293	8.8303	7.1081	1.4090	omega	ROT	37
25	-0.3292	8.5692	3.8386	1.3648	omega	ROT	33	28	-0.3408	8.5833	3.9673	1.3672	omega	ROT	33
26	-0.2689	7.5100	3.5781	1.1960	omega	ROT	32	29	-0.2012	7.5854	2.6516	1.2077	delta	ROT	30
27	-0.2772	7.0590	3.9238	1.1243	omega	ROT	35	30	-0.3989	7.5726	5.2599	1.2069	omega	ROT	32
28	-0.0133	6.9277	0.1919	1.1026	delta	ROT	30	31	-1.1346	7.5435	14.8731	1.2141	omega	ROT	35
29	-0.2664	6.3744	4.1760	1.0154	omega	ROT	34	32	-0.4080	7.1749	5.6766	1.1438	omega	ROT	31
30	-0.2540	5.2833	4.8018	0.8418	omega	ROT	38	33	-0.6285	6.0467	10.3383	0.9675	omega	ROT	34
31	-0.2690	3.6998	7.2508	0.5904	omega	ROT	39	34	-1.5352	5.2071	28.2797	0.8640	omega	ROT	38
								35	-8.0164	3.1205	93.1886	1.3691	smesp2	SMES	29
								36	-0.3555	2.9472	11.9746	0.4725	omega	ROT	39

CASO 9036

N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus	N0.	Real	Imag	Damp	Freq	Variable	Dev	Bus
22	-0.4167	8.8950	4.6796	1.4172	omega	ROT	36	26	-0.4076	8.9339	4.5580	1.4233	omega	ROT	36
23	-0.4251	8.6957	4.8828	1.3856	omega	ROT	37	27	-0.6333	8.8284	7.1546	1.4087	omega	ROT	37
24	-0.3286	8.5675	3.8328	1.3646	omega	ROT	33	28	-0.3403	8.5814	3.9627	1.3668	omega	ROT	33
25	-0.2686	7.5156	3.5711	1.1969	omega	ROT	32	29	-0.2028	7.5915	2.6705	1.2087	delta	ROT	30
26	-0.2764	7.0589	3.9133	1.1243	omega	ROT	35	30	-0.3951	7.5756	5.2090	1.2073	omega	ROT	32
27	-0.0152	6.9223	0.2193	1.1017	delta	ROT	30	31	-1.1355	7.5443	14.8830	1.2142	omega	ROT	35
28	-0.2668	6.3722	4.1835	1.0151	omega	ROT	34	32	-0.4124	7.1775	5.7369	1.1442	omega	ROT	31
29	-0.2568	5.1682	4.9632	0.8236	omega	ROT	38	33	-0.6315	6.0443	10.3907	0.9672	omega	ROT	34
30	-0.2622	3.5911	7.2830	0.5731	omega	ROT	39	34	-1.6957	5.0392	31.8927	0.8462	omega	ROT	38
								35	-7.8551	3.1023	93.0090	1.3441	smesp2	SMES	29
								36	-0.3481	2.9404	11.7565	0.4713	omega	ROT	39