



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELÉCTRICO

DISEÑO COORDINADO DE UN ESQUEMA DE DESLASTRE DE CARGA Y UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor: Paola Santurino García

Director: Lukas Sigrist

Madrid

Junio 2016

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

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

La autora **Dña. Paola Santurino García** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **DISEÑO COORDINADO DE UN ESQUEMA DE DESLASTRE DE CARGA Y UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

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

3º. Condiciones de la cesión y acceso

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

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

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la

podieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

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

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

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

Madrid, a 16 de junio de 2016

ACEPTA

Fdo. 

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**DISEÑO COORDINADO DE UN ESQUEMA DE DESLASTRE DE
CARGA Y UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2015/2016 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.: Paola Santurino García

Fecha: 16, 06, 2016



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Lukas Sigrist

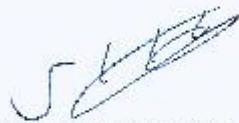
Fecha: 16, 06, 2016



Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: Fernando de Cuadra García

Fecha: 17, 6, 16



DISEÑO COORDINADO DE UN ESQUEMA DE DESLASTRE DE CARGA Y UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Autora: Santurino García, Paola

Director: Sigrist, Lukas

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

Resumen:

El diseño coordinado del esquema de deslastre de carga y de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica con el objetivo de mejorar la estabilidad de la frecuencia en pequeños sistemas de potencia aislados, se lleva a cabo al considerar que existe la necesidad de implementar la respuesta de este tipo de sistemas ante perturbaciones, como por ejemplo una pérdida en la generación. Este es el caso de los seis sistemas eléctricos de las Islas Canarias y en particular de la isla de La Palma, que se toma como ejemplo de estudio para este proyecto.

Para evitar casos en los que el sistema se vuelve inestable o alcanza valores inadmisibles de frecuencia de red, habitualmente se introduce la actuación de un esquema de deslastre de carga que desconecta parte de la carga demandada tras producirse una pérdida en la generación. Este esquema normalmente, se rige por parámetros obtenidos experimentalmente que dictan su modo de operación.

Por otro lado, se están realizando numerosos estudios sobre los beneficios que presenta la conexión a los sistemas de potencia, de dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica como los ultra condensadores. Este tipo de dispositivo de almacenamiento, presenta una alta densidad de potencia que permite su carga y descarga en un tiempo muy reducido. Esta característica es muy ventajosa ya que, a los pocos segundos tras producirse la perturbación, es cuando más riesgo de inestabilidad existe. Por lo tanto, se considera que la introducción de un ultra condensador puede ser una buena opción a la hora de implementar la estabilidad de sistemas como el de La Palma, por lo que resulta

interesante contemplar su conexión y optimización. En La Palma está instalado desde 2013 un ultra condensador de 20MWh y 4MW.

Lo que se plantea en este proyecto es diseñar un esquema optimizado de deslastre de carga, en contraste con uno basado en la experiencia que se entiende como mejorable, junto con el diseño de los parámetros de control del ultra condensador de la isla de La Palma.

El diseño coordinado del esquema de deslastre de carga y del ultra condensador, se realiza empleando la herramienta de software matemático Matlab y su entorno de programación visual Simulink. Con estos programas se realiza la modelación y simulación del sistema de potencia aislado de la isla, y a través de una herramienta de optimización del software, llamada Algoritmo Genético, se resuelve el problema de optimización del diseño paramétrico.

El diseño comprende primero la modelación del sistema eléctrico insular, del deslastre de carga y del ultra condensador. En segundo lugar, se fijan los escenarios que se emplean para el diseño óptimo y los valores de las constantes de los generadores, inercias, estatismos, retardos temporales de relés, tamaño del ultra condensador, etc. A continuación, se plantea el problema de optimización de los parámetros (variables decisionales) del esquema de deslastre y del ultra condensador. Por último, se resuelve dicho problema y se analizan los resultados observando el comportamiento del sistema tras perturbaciones en todos los escenarios, que permitirá comprobar la verdadera optimización de los parámetros.

A partir de los modelos y escenarios anteriores, se lleva a cabo el planteamiento del problema de optimización que busca minimizar la carga deslastrada a la vez que se tienen en cuenta distintas restricciones.

Los resultados obtenidos de la resolución del problema de optimización consiguen preservar la estabilidad de la frecuencia para cualquier perturbación que ocurra en el sistema, deslastrando una cantidad de carga óptima para los cuatro escenarios típicos.

En muchos casos tan solo con el esquema de UFLS optimizado, es posible reducir los casos en los que el sistema de potencia alcanza la inestabilidad, sin deslastrar una

cantidad desorbitada de carga gracias a que los parámetros del esquema de deslastre son una buena solución al problema. A continuación se muestra una tabla comparativa entre el deslastre con un esquema UFLS optimizado y el que existe actualmente en La Palma.

	Con UFLS optim	Con UFLS actuales
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total		
Escenarios	247,65	397,84

Tabla 1: Comparativa deslastre UFLS actual y optimizado.

Pero también es fundamental para la obtención de mejores resultados, la introducción del ultra condensador con sus parámetros de control optimizados. Esto se fundamenta en la comprobación de la mejora del deslastre y los casos de inestabilidad que se dan con y sin él. Cuando no se encuentra el ultra condensador y solo actúa el esquema UFLS actual, se dan algunos casos de inestabilidad de la frecuencia, en cambio cuando está el ultra condensador conectado no se da ningún caso de inestabilidad y se un 80,25% menos. A continuación se muestra una tabla comparativa entre el deslastre en la isla, con el esquema UFLS actual sin UC y el que se da con el esquema UFLS y el UC optimizados conjuntamente.

	UFLS , UC optim	UFLS actual, sin UC
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total		
Escenarios	78,5735	397,84

Tabla 1: Comparativa deslastre entre UFLS actual y, UFLS y UC optimizados conjuntamente.

Una vez optimizado el diseño coordinado el esquema de deslastre y los parámetros de control del ultra condensador, se ha tratado de entender el impacto de dichos parámetros en el sistema y de implementar aún en mayor medida, la respuesta del sistema ante perturbaciones. Para ello se han contemplado distintas variantes al problema planteado inicialmente.

En primer lugar, se ha buscado el efecto de los parámetros de control del ultra condensador en su descarga, en la estabilidad de la frecuencia y en la cantidad de carga deslastrada. El estatismo del UC con valores bajos ayuda a implementar la efectividad del Tail Control, la inercia está relacionada con el tiempo de descarga del UC y debe

tener valores altos del orden de 10 s, y el Tail Control es el parámetro más influyente en la respuesta del sistema debiendo adoptar valores de 70% o 30% según la perturbación.

En segundo lugar, se ha considerado la posibilidad que existe de que falle la entrada del ultra condensador tras una perturbación a la hora de obtener los parámetros óptimos. En los escenarios en los que falla el UC lógicamente se deslustra menos cantidad de carga con el esquema optimizado considerando dichos fallos. Pero globalmente, el total considerando los ocho escenarios es ligeramente peor. Se ha concluido que no compensa la mejora ante situaciones de fallo tal como se ha planteado, ya que se sufre el empeoramiento de la respuesta cuanto todo funciona correctamente.

En tercer lugar, se ha pensado que sería bueno contemplar los casos en los que los escalones de deslastre de carga no fueran capaces de deslustrar toda la potencia que define el escalón. Este puede ser un caso en el que por ejemplo, se desconecte una determinada zona de la isla pero que el consumo de esa zona no sea equivalente a lo que debe deslustrarse en total. Por ello, se ha vuelto a replantear el problema de optimización fijando condiciones más restrictivas que se deben cumplir en el sistema eléctrico, sobreprotegiéndolo ante estos casos. Con los nuevos parámetros, al simular todos los escenarios, el total de potencia deslustrada es 12 % mayor que en el caso de la optimización inicial. Por tanto, a la hora de considerar este diseño, se deberá estudiar estadísticamente la posibilidad de que ocurran deslastres incompletos y en caso de ser una probabilidad elevada, estudiar la compensación de este aumento del deslastre total.

Después, se ha considerado el problema para un tamaño de ultra condensador no impuesto, ya que el que se encuentra actualmente instalado podría no ser el más adecuado. Para ello, se ha planteado el problema inicial añadiendo como variables decisionales la potencia y energía nominales del ultra condensador. Obteniendo una potencia nominal de UC ligeramente superior y nuevos parámetros, se ha conseguido reducir el deslastre total un 18 % más. Se concluye entonces, que es bueno incorporar el tamaño del UC dentro de la optimización.

Además, se ha formulado de nuevo el problema, para un tamaño de UC de 4MW-40MWs. En este caso, solo se aprecia considerablemente la reducción de deslastre en los casos en los que la pérdida en la generación es de un porcentaje alto, es decir que una mayor capacidad energética del UC solo es verdaderamente beneficiosa para

ocasiones de perturbaciones relativamente graves y además es peor que el caso en que el tamaño de UC está optimizado.

Por otro lado, la optimización con un tamaño del UC 8MW-40MWs, empeora considerablemente la cantidad de potencia deslastrada respecto al resto de casos.

La conclusión es que considerar otros tamaños de UC puede llegar a reducir el deslastre de carga, como sería para el caso de un tamaño del UC 4MW-40MWs, pero también puede aumentarlo si el tamaño fuese del UC 8MW-40MWs. Por lo tanto, no es cierto que el mayor tamaño mejore necesariamente la respuesta de un sistema ante perturbaciones.

En último lugar, se ha planteado la optimización de los parámetros para cuatro escenarios muy desfavorables y cuatro escenarios no especialmente desfavorables, con el fin de abordar la posibilidad de la conveniencia de adaptar el valor de los parámetros de control del ultra condensador para según qué casos. Se ha descubierto que por supuesto que está relacionada la magnitud de la perturbación con los parámetros óptimos en cada caso. Para escenarios en los que las perturbaciones no son tan importantes, el valor de estatismo del UC es beneficioso que crezca y al contrario cuando las perturbaciones son graves. Por lo tanto, se deduce que el valor del estatismo del UC es un parámetro cuyo ajuste en situaciones más o menos desfavorables, podría ayudar a evitar casos de deslastre de carga y sería beneficioso un posible estudio de adaptabilidad de este parámetro.

THE COORDINATED DESIGN OF BOTH UNDER FREQUENCY LOAD SHEDDING SCHEME AND AN ENERGY STORAGE SYSTEM

Author: Santurino García, Paola

Supervisor: Sigrist, Lukas

Cooperating Institution: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

Abstract:

The coordinated design of both under frequency load shedding scheme and an energy storage system it is studied in this paper in order to enhance frequency stability of small isolated power systems. Those kinds of systems need to improve their natural response against a perturbation, like a loss in generation. This is the situation of the Canary Island of La Palma.

In order to avoid the cases where system turns unstable or where it reaches unpermitted frequency values, it is usual to introduce an under frequency load shedding scheme (UFLS). It works by disconnecting some load after suffering an outage on the power system generation. The parameters that define its operation way are usually experimentally chosen.

On the other hand, there have been plenty of studies related to the analysis of the benefits that presents the connection of energy storage devises in power systems, such as ultra-capacitors (UC). This kind of electrical storage device has a high power density, which means it can be charged and unchanged in a very short period of time. This is the UC's best advantage because at the very first seconds after occurring the outage is when there is more risk to lose frequency stability. Then, it is supposed that the connection of an UC could be a nice option to enhance system's stability like La Palma's one.

This paper tries to design the best UFLS scheme together with the best UC control parameters of the La Palma Island.

The coordinated UFLS scheme and UC is made using the mathematic software tool: Matlab and its visual programming environment: Simulink. Both of them are used in

order to modulate and simulate the La Palma small power system, as well as Matlab optimization tool: Genetic Algorithm is used to solve parametric optimization problem.

The design includes in first place the modulation of the isolated power system, UFLS scheme and UC. Afterwards, scenarios and contingencies for the optimization are chosen and constant values are set (inertias, statisms, time delays, UC dimensions, etc.). Next, it is set out the parameters problem optimization (decisional variables of the optimization problem). In the end, this problem is solved and its results are analyzed while observing system's responses.

Based on the previous models and scenarios the optimization problem is defined. It looks for the minimum amount of load shedding while respecting some restrictions.

The solution gives parameters that preserve the system's integrity for any possible contingency, at the same time the load shedding is moderated. That is partially, thanks to the nice UFLS scheme parameters obtained. In lot of situations, it is possible to avoid frequency instability even without UC and without a big amount of load shedding. The following table compares load shedding in La Palma, between optimized UFLS scheme and actual UFLS scheme.

	With UFLS optim	With UFLS actual
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total Escenarios	247,65	397,84

Table 1: Load shedding with actual UFLS and optimized UFLS.

But it is crucial to connect the UC with control parameters optimized, in order to get better results. That's immediately seen while observing the amount of load shedding and instability situations with and without the UC. When just the actual UFLS is connected some cases of instability occur. But, when optimal UFLS and UC are connected there are not instability situations and load shedding is 80,25 % less. The following table compares load shedding in La Palma, between actual UFLS scheme and coordinated optimized UFLS scheme and UC.

	UFLS , UC optim	UFLS actual
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total Escenarios	78,5735	397,84

Table 2: Load shedding with actual UFLS and, UFLS and UC optimized.

Once the design is optimized impact of parameters' variation is studied and also it has been tried to improve the frequency and load shedding response. In order to do so, different variations of the initial optimization problem have been proposed.

In first place, it is been studied the UC control parameters' effect on UC's discharge, on the frequency stability and on the amount of load shedding. The UC droop helps the Tail Control effect when its value is low, emulated inertia is related to the discharging UC time and Tail Control is the most influent parameter on frequency response.

In second place, the optimization problem has been reformulated considering the failure possibility of the UC. Logically, in the typical scenarios where UC fails, the power system's response is a little bit better with those new parameters. But the total load shedding simulating all possible scenarios is a little bit worse compared with the initial optimization parameters. Consequently, it has been concluded that this improvement of the system response on the typical scenarios when UC fails, may not worth it, because load shedding when UC performs properly is worse.

In third place, it is been considered that sometimes it is impossible to shed all load needed, maybe because there is not enough energy consumption at that moment. Then, it is been done a new reformulation of the optimization problem establishing stronger restrictions and overprotecting the system. With those new parameters, while simulating all possible scenarios, load shedding is 12 % more than with the initial optimal parameters. In conclusion, in order to consider this new design, a statistics study would be required to be able to determine if it is worthy.

Afterwards, it has been considered the capacities of the UC as variable parameters. So new optimization problem has been formulated including nominal UC energy and power capacities as decisional variables. And the solution of this new sized UC has a new power capacity a little bit higher than the other one and different control parameters that get to reduce load shedding the 18 % more. In conclusion, it is nice to consider the optimization of the size of the UC in order to reduce load shedding.

Also, another optimization problem has been formulated for a UC the size of 4MW-40MWs. In this case, only it is appreciated the load shedding reduction in cases where there is a big perturbation, that means that a big UC capacity only would be worthy for perturbations that are big, and in addition is worse that in the case where the UC size is optimized.

In the other hand, the UC optimization with a UC size of 8MW-40Mws, really increases the amount of load shedding with respect to the other optimization cases.

In conclusion, to consider other UC sizes can reduce load shedding, like when UC size is of 4MW-40MWs, but also can increase it, like it appends when the UC size is of 8Mw-40MWs. Then, it is not true that a bigger UC size necessary improves system response against perturbations.

Eventually, a last formulation of the optimization problem has been made. The scenarios considered have been changed to the most unfavorable ones and to some not especially unfavorable ones. So that, the convenience of the flexibility of UC parameters has been noticed.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELÉCTRICO

DISEÑO COORDINADO DE UN ESQUEMA DE DESLASTRE DE CARGA Y UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor: Paola Santurino García

Director: Lukas Sigrist

Madrid

Junio 2016

ÍNDICE

1. Introducción:	4
1.1 Introducción:	4
1.2 Energías renovables en las Islas Canarias	6
1.3 Estado en cuestión	8
1.4 Motivación:	13
1.5 Objetivos del proyecto:	14
1.6 Metodología de trabajo:	14
1.7 Recursos que se emplean:	16
2. Modelo	18
2.1 Modelo del sistema insular canario:	18
2.1.1 Introducción	18
2.1.2 Modelo simplificado del sistema eléctrico de potencia aislado	18
2.2 Súper Condensador, UC (Ultra capacitor)	19
2.2.1 Introducción	19
2.2.2 Modelo del UC	20
2.2.4 Diseño óptimo del esquema de UC	22
2.3 Deslaste de cargas, UFLS (Under Frequency Load Shedding)	22
2.3.1 Introducción	22
2.3.2 Principios de funcionamiento	23
2.3.3 Diseño óptimo del esquema de UFLS	26
3. Método de diseño coordinado del esquema de UFLS y del UC	28
3.1 Introducción	28
3.2 Problema de optimización	28
3.2.1 Función objetivo: mínimo deslaste de cargas frente a mínimas sanciones económicas	33
3.3 Los parámetros a optimizar	35
3.4 Selección del método de optimización: Algoritmo Genético	35

4. Resultados de la optimización y análisis del diseño coordinado del esquema de UFLS y del UC.....	38
4.1 Introducción.....	38
4.2 Solución de la optimización mediante el Algoritmo Genético	38
4.2.1 Respuesta del sistema sin esquema de deslastre de carga y sin ultra condensador. 40	
4.2.2 Solución: Esquema optimizado de deslastre de carga.....	41
4.2.3 Solución: Esquema optimizado de deslastre de carga junto con ultra condensador con parámetros de control optimizados.....	45
4.3 Impacto de la variación de los parámetros de control del ultra condensador en la respuesta del sistema	52
4.4 Solución teniendo en cuenta posible fallo del dispositivo UC.....	57
4.5 Solución con mayores restricciones.....	61
4.6 Solución con cambios en el tamaño del UC	63
4.7 Solución comparativa entre optimización para escenarios desfavorables y no especialmente desfavorables	69
5. Conclusiones, contribuciones y trabajo futuro.....	72
5.1 Conclusiones en relación con la respuesta del sistema sin esquema de deslastre de carga y sin ultra condensador.....	72
5.2 Conclusiones del impacto de la introducción de UFLS y del UC en el sistema eléctrico de potencia aislado	72
5.2.1 Conclusiones del impacto de la introducción de UFLS optimizado	73
5.2.2 Conclusiones del impacto de la introducción de UFLS y UC conjuntamente	73
5.3 Conclusiones en relación al impacto de la variación de los parámetros de control del ultra condensador en la respuesta del sistema.....	74
5.4 Conclusiones en relación con la solución teniendo en cuenta posible fallo del dispositivo UC.....	75
5.5 Conclusiones en relación a la solución con mayores restricciones.....	75
5.6 Conclusión en relación con cambios en el tamaño del UC.....	76
5.7 Conclusión en relación con la comparativa entre optimización para escenarios desfavorables y no especialmente desfavorables	77
5.8 Trabajo futuro	78
6. Referencias	80
7. ANEXOS.....	82

7.1	Impacto de la variación de los parámetros de control del ultra condensador en la respuesta del sistema	82
7.2	Diagramas de bloques	91
7.2.1	Diagrama de bloques del sistema de potencia	91
7.2.2	Diagrama de bloque UFLS	92
7.2.3	Diagrama de bloques UC	92
7.3	Tablas esquema UFLS actual en la isla de La Palma	93
7.4	Tablas de resultados del diseño optimizado para los cuatro escenarios típicos	93
7.4.1	Resultados esquema UFLS	93
7.4.2	Resultados parámetros de control del UC.....	93
7.5	Tabla de escenarios y contingencias de la isla de La Palma	94
7.6	Tabla de características de los generadores de la isla de La Palma	95

1. Introducción:

1.1 Introducción:

En sistemas eléctricos de potencia robustos, la respuesta ante perturbaciones frecuencia-potencia en la red está acotada debido a su tamaño, lo cual favorece la estabilidad de la frecuencia. Por ejemplo, cuando se da la pérdida de un grupo generador, el desequilibrio entre demanda y generación se ve rápidamente compensado gracias a la existencia de unidades de generación cercanas. O bien, se puede observar que en un sistema de esas dimensiones cuando se produce una importante variación de la carga, ocurre como consecuencia una pequeña variación en la frecuencia. Quiere decir que un sistema de potencia suficientemente robusto, sufre en menor intensidad las variaciones de potencia generada o absorbida que se producen en dicho sistema. Esto está relacionado con el tamaño del sistema, con cuan elevada es la cantidad de generadores, cargas e interconexiones con otros subsistemas existentes en la red de potencia, además de con la inercia del sistema.

Por otro lado, la estabilidad del sistema se ve muy afectada cuando los sistemas son más pequeños, como ocurre por ejemplo en el singular caso de las Islas Canarias.

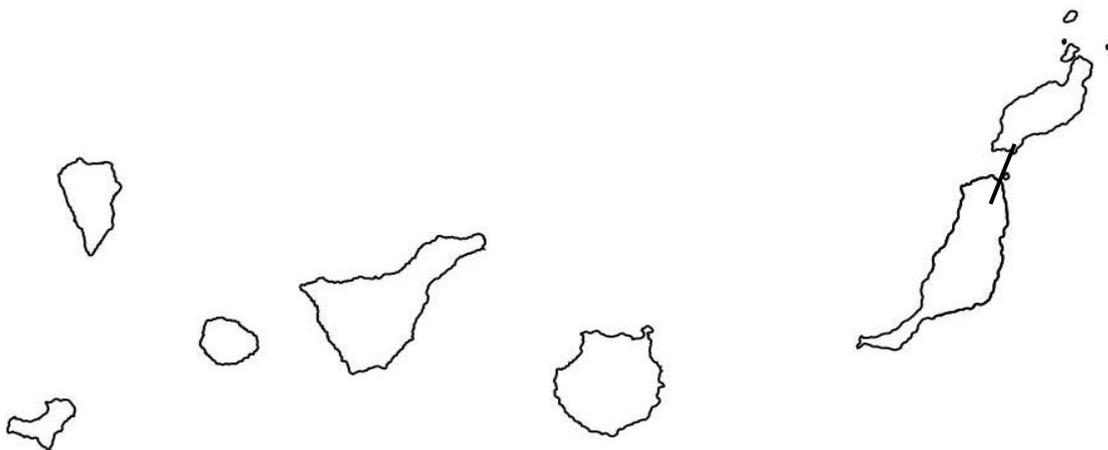


Ilustración 1: Islas canarias. [Dida,15]

Los sistemas de potencia aislados y sistemas de potencia interconectados tienen características muy diferentes. Los sistemas de potencia aislados son más pequeños que los sistemas de potencia interconectados (por ejemplo, Europa Continental o América del norte) y no cuentan con el apoyo de los sistemas de potencia vecinos. Los sistemas de potencia aislados pueden ser de distintos tamaños. Algunos grandes son los de Argentina, Reino Unido, Irlanda, Japón y Corea.

El sistema insular canario está formado por seis subsistemas no interconectados entre sí y de tamaño mucho menor al sistema peninsular. Las islas de Lanzarote y Fuerteventura están inter conectados por un cable submarino. Por tanto, no es posible aprovechar en este caso las ventajas que ofrecen en cuanto a la estabilidad del sistema eléctrico, situaciones donde existen interconexiones entre sistemas o mayor número unidades en la red. Además de que la pérdida de algún grupo generador supone una pérdida de un alto porcentaje de la generación.

La tabla siguiente muestra las características principales de los sistemas de potencia de las Islas Canarias [REE].

Sistema	Generación (GWh)	Potencia Instalada (MW)	Pico de Demanda (MW)
Tenerife	3625	1084,28	593
Gran Canaria	3653	1111,8	598
Lanzarote-Fuerteventura	1458,7	377,97	25605
La Palma	254,8	105,52	48,4
La Gomera	66,7	20,1	12,1
Hierro	35,7	11,31	7

Tabla 3: Características de los sistemas eléctricos de la Islas Canarias [3].

Los problemas planteados sufren una acentuación creciente a medida en que aumenta la introducción de energías renovables, que son de carácter muy intermitente e imprevisibles.

Red eléctrica de España (REE) describe este sistema eléctrico como: “un desafío adicional en la gestión del necesario equilibrio entre generación y consumo” [REE].

En este proyecto se tratará la evolución de los problemas en la red citados anteriormente, que incumben en la actualidad al sistema eléctrico canario, a través del

diseño coordinado del esquema de deslastre de cargas y de un sistema de almacenamiento de energía (SAEE).

1.2 Energías renovables en las Islas Canarias

Las energías renovables son fuentes energéticas con características particulares, que son de interés de estudio con relación a la estabilidad de la frecuencia en un sistema y más aún en un pequeño sistema de potencia aislado.

La estrategia energética adoptada por la Unión Europea para garantizar la sostenibilidad, competitividad y seguridad de los suministros energéticos está centrada en la reducción de los consumos, la creación de un mercado integrado de energía y sobretodo en el incremento de energía procedente de fuentes renovables.

El incremento del uso de energías renovables en la producción de energía, ha pronunciado problemas de estabilidad de las redes eléctricas. En las grandes redes interconectadas, esto puede ser todavía compensado en gran medida por el alto número de generadores de energía convencionales. En cambio, en los sistemas más pequeños en los que el suministro proviene mayoritariamente de fuentes de energía renovables o de pequeñas centrales, se requieren necesariamente medidas para la estabilización, para garantizar la constante calidad del suministro, como las que se estudian en este proyecto.

Esto es debido a que las energías renovables son de carácter muy intermitente e imprevisible, además de que son excluidas, por no poder ser planificadas, en la contribución a la regulación primaria de frecuencia.

En los pequeños sistemas de potencia aislados las fuentes de energía típicamente intermitentes son el viento y el sol. Por ejemplo, la cantidad de potencia instalada de origen solar y eólica en las Islas Canarias es de 271 MW, alrededor de un 9,5% de la energía instalada total [REE].

El impacto que pueda tener la intermitencia de estas energías en la estabilidad el sistema de potencia depende de la tecnología empleada.

Por ejemplo, en el caso de turbinas eólicas depende de si son de tipo velocidad constante o variable, esta última es más eficiente y la que se usa normalmente en la actualidad.

Y en el caso de la solar depende de si es de tipo termo-solar o fotovoltaica, esta última típicamente usada en pequeños sistemas de potencia aislados para la generación de energía.

Estas tecnologías que son comúnmente usadas en pequeños sistemas de potencia aislados afectan en gran medida a la estabilidad del sistema. Están conectadas a la red mediante electrónica de potencia, por tanto la unidad de generación en sí está desacoplada mecánicamente de la red.

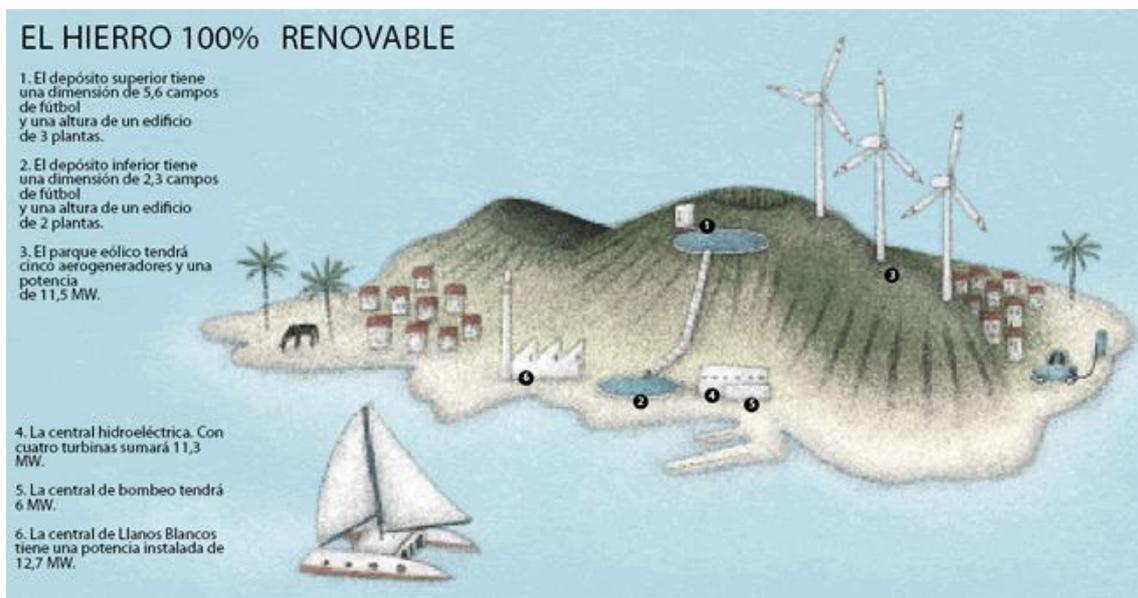


Ilustración 2: Energía renovable en la isla canaria de El Hierro [Exio,14].

Por lo tanto, a parte de la intermitencia, estas fuentes de energía plantean otros problemas debidos al hecho de que estén desacoplados de la red.

El primero es que la reserva de potencia para participar en el control de la frecuencia es pequeña, por lo que el control de frecuencia está normalmente limitado. Esto es debido a que la diferencia existente entre potencia intermitente disponible en cualquier momento y la potencia entregada realmente a la red debe ser pequeña para participar en la regulación de frecuencia, y no siempre es así.

Y el segundo problema es que al ser fuentes de generación que están desacopladas mecánicamente de la red, el sistema no percibe ninguna reacción inercial por parte de estas.

Es interesante conocer las limitaciones de las fuentes de energía sostenibles en cuando a la participación en la estabilidad de un sistema de potencia, de algún modo se puede pensar cómo combatir dichos límites. En este proyecto no se estudiarán casos donde haya participación de energías renovables, pero es lógico pensar que un ultra condensador podría corregir o compensar las intermitencias debidas a estas fuentes de algún modo. Esto sería objeto de estudio más detallado para futuras aportaciones.

Este proyecto se centrará en tratar la evolución de los problemas en la red citados anteriormente, en relación con la estabilidad del sistema que incumben en la actualidad al sistema eléctrico canario, a través del diseño coordinado del esquema de deslastre de cargas y de un sistema de almacenamiento de energía (SAEE).

1.3 Estado en cuestión

En las Islas Canarias, REE es el único transportista y operador actual del sistema eléctrico, al igual que ocurre en la Península.

La red de transporte en Canarias está formada por líneas y subestaciones de tensión igual o superior a 66 kV, por un cable submarino entre las islas de Lanzarote y Fuerteventura, y transformadores de 220/132/66 kV.



Ilustración 3: Red de transporte de la isla de La Palma [REE].

En la actualidad, debido a la especial sensibilidad de los sistemas insulares frente a desequilibrios de potencia, un déficit de generación causa la caída y consecuente desviación del valor nominal de frecuencia. Y un aumento de la incorporación de

energías renovables amplifica este problema por su naturaleza intermitente y su no participación en el control de la frecuencia.

A partir de la “conquista eléctrica” que ocurrió en el 2010 por parte de REE, se está desarrollando un proyecto de mejora de activos en la red insular. [REE]

Entre los objetivos existentes en este proyecto se encuentran el de aplicar un plan de mantenimiento adaptado a las características particulares de dicha red. Estas particularidades implican un especial mantenimiento con una mayor inversión y complejidad en comparación con las del sistema peninsular. Dentro del proyecto de mejora se encuentra:

- Adecuar las infraestructuras de Canarias a los estándares de calidad de la Península.
- Resolver las carencias de la red de transporte existente.
- Integrar los activos adquiridos en los sistemas de control de REE.
- Aplicar un plan de mantenimiento adaptado a las singularidades del sistema eléctrico.

Se entiende entonces, que es de importante interés para REE en las Islas Canarias, tratar los problemas ya comentados de estabilidad, ya que estos están relacionados con la calidad del suministro que se busca mejorar en este proyecto.

Por ello, resulta interesante el barajar la posibilidad de mejorar el método que ahora mismo se pone en práctica cuando ocurren imprevistos en la red.

Este método consiste en la protección de la estabilidad e integridad del sistema frente a una gran perturbación, por medio del deslastre de cargas es decir, en la compensación de los desequilibrios entre generación y demanda a través de la desconexión de ciertas fuentes de demanda. Para el diseño del esquema de desastre de carga, se parta de [Exio,14], donde se plantea un método de diseño del esquema de deslastre de carga para optimizar la cantidad de carga que se desconecta tras sufrir una perturbación en el sistema. Este método consiste en la entrada de unos escalones de deslastre cuando la frecuencia del sistema alcanza un determinado valor de frecuencia o de índice de cambio de frecuencia. Dicho método es empleado en este proyecto para el diseño

conjunto del esquema de deslastre de carga y parámetros de control del ultra condensador, y será detallado en capítulos posteriores.

La forma de mejorar el modo de proceder anterior, para así poder minimizar la desconexión de parte de los clientes que se encuentran demandando energía en el momento de la perturbación, es el objeto de estudio del presente proyecto, que es: la introducción de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica (SAEE).

Como SAEE se proponen súper condensadores (UCs) para el suministro de potencia activa y así aliviar los desequilibrios en la generación.

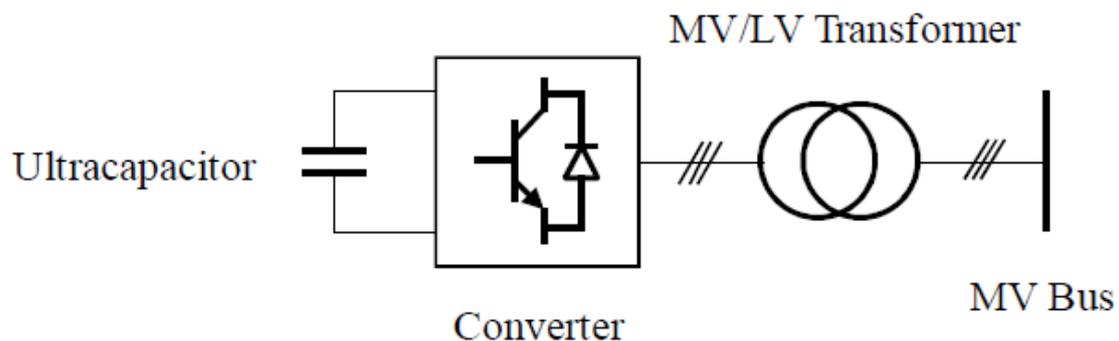


Ilustración 4: Diagrama de bloque de un UC [Sigr,15].

Estos dispositivos se están convirtiendo en una opción muy interesante de almacenamiento gracias a su alta densidad de energía en comparación con los condensadores convencionales, del orden de 1-10 Wh/kg en los súper condensadores frente a los apenas 0,1 Wh/kg de los condensadores electrolíticos [Sigr,15]. Aunque estas densidades son mucho menores que aquellas propias de las baterías.

Pero principal ventaja de los ultra condensadores frente a las baterías es su mucha mayor densidad de potencia, pues los ultra condensadores pueden llegar a 1-10 kW/kg, mientras que las baterías no llegan a superar los 200 W/kg [Sigr,15]. Lo que implica que los UCs tengan ciclos de carga y descarga de pocos segundos.

Además, por su mejora de la eficiencia respecto a las baterías, los súper condensadores alcanzan rendimientos de carga/descarga de hasta el 95%, mientras que las baterías, en el mejor de los casos, alcanzan rendimientos del 70%.

Son dispositivos electroquímicos similares a los condensadores normales que no necesitan de un material dieléctrico en su constitución. Esto permite que sea posible la construcción de estos ultra condensadores casi de cualquier tamaño, desde de pocos centímetros a metros.

Estos dispositivos funcionan polarizando una solución electrolítica, lo que permite el almacenamiento de energía eléctrica de forma estática. Es importante saber que, a pesar de que ser un dispositivo electroquímico, en su interior no se dan reacciones químicas lo que restaría densidad de potencia, como ocurre en las baterías.

Pueden cargarse y descargarse cientos de miles (incluso millones) de veces sin perder rendimiento. A diferencia de las baterías que solo funcionan correctamente en una cantidad limitada de ciclos de carga-descarga.

Un UC funciona cargándose durante el normal funcionamiento del sistema al que está conectado, y descargándose rápidamente cuando el sistema sufre un desvío en la frecuencia de red. Una ventaja importante del UC, es esa rápida descarga de su energía, ya que durante los primeros segundos tras la perturbación es cuando se da el transitorio de la frecuencia y cuando hay mayor riesgo de pérdida de estabilidad del sistema, por lo tanto es cuando más se necesita una inyección extra de energía.

Por tanto su conexión es ideal para nuestra aplicación, en la que se necesita una inmersión de energía en la red en un periodo de tiempo muy reducido y que sea suficiente para detener un proceso crítico de manera segura [Cine,09].

Algo remarcable en cuanto al estado del arte de sistemas de almacenamiento es el proyecto STORE de Endesa. Este es un proyecto del Fondo Tecnológico gestionado por el CDTI y liderado por Endesa. Comprende la instalación de sistemas de almacenamiento de energía por baterías de BrZn y NaS y ultra condensadores en sistemas eléctricos de las Islas Canarias. El equipo del IIT colaboró realizando tareas sobre «estudios de viabilidad y análisis económico « y sobre “estudios experimentales [Maik,08].

Son tres las primeras plantas de almacenamiento de energía eléctrica españolas, instaladas en las islas de Gran Canaria, La Palma y La Gomera, forman parte del

Proyecto “STORE”, el más importante de Europa sobre almacenamiento de energía en entornos insulares.

El proyecto, liderado por Endesa, cuenta con un presupuesto de 11 millones de euros y busca demostrar la viabilidad técnica y económica de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala.

Su objetivo principal es la búsqueda de tecnologías de almacenamiento de energía que permitan una gestión más eficiente del sistema eléctrico, dotándolo de una mayor flexibilidad y seguridad. STORE busca también fomentar la integración plena de las energías renovables. Se abre así la vía a nuevos avances en la búsqueda del autoabastecimiento energético en los sistemas aislados, dados sus beneficios desde el punto de vista medioambiental y de reducción de costes [Loba,12].

Existen artículos relacionados con este proyecto en los que ya se estudia el impacto del tamaño y los parámetros de control de un ultra condensador en la estabilidad de la frecuencia de un pequeño sistema de potencia como en [Endesa]. Ahí se ha estudiado el impacto para muchos escenarios posibles en el sistema y todas sus posibles pérdidas comprobando que el UC es capaz de reducir la cantidad de carga deslastrada de manera notable. Se ha dimensionado y se han analizado los parámetros de control del UC, obteniendo conclusiones que se tienen en cuenta para este proyecto. Algunas de estas conclusiones son que una estatismo del UC baja no es beneficiosa, que es importante controlar la velocidad de descarga del UC, que valores elevados de inercia emulada influyen positivamente, por ejemplo reduciendo el impacto de la descarga total del UC, que tamaños mayores del UC son solo beneficiosos si la rapidez de la respuesta está ralentizada o que menores tamaños de UC aumentan el deslastre. Estas conclusiones son de gran utilidad en este proyecto sobre todo a la hora de optimizar, ya que se poseen valores de partida de los parámetros que agilizan la resolución.

Además, se han llevado a cabo otros estudios que muestran los beneficios del uso de estos sistemas de almacenamiento no solo contra pérdidas en la generación de pequeños sistemas de potencia, sino también cuando en estos sistemas se ha producido un desplazamiento de unidades de generación convencionales y se han introducido en su lugar plantas de generación solar y eólica. Es el caso del artículo [Rouc,15] en el que se

llevan a cabo simulaciones para el estudio del control de la frecuencia con dispositivos de almacenamiento en la isla francesa de Guadalupe, con mucha potencia instalada de origen solar y eólica. Las conclusiones de este artículo favorecen mucho el uso de estos dispositivos, ya que se observa cómo se reduce el impacto en la frecuencia de estas fuentes de energía renovables cuando ocurre una perturbación en la red.

Incluso esta tecnología ya se pone en práctica en algunos sistemas aislados, por ejemplo, en Hawái en 2006 fue construido un ultra condensador con el fin de controlar las fluctuaciones de potencia y tensión de un parque eólico.

Allí, el UC funcionó como se esperaba, dando una significativa estabilización a la red, pero desafortunadamente fue destruido a causa de un terremoto menos de un año después de su inmersión.

Por tanto la aplicación es perfecta para casos en los que sea necesario proporcionar energía durante un corto periodo de tiempo, suficiente para detener un proceso crítico de manera segura, como es el caso que nos ocupa.

1.4 Motivación:

En base a lo anterior, se deduce que ante la sensibilidad de los distintos subsistemas de las Islas Canarias ante perturbaciones, es necesario un método comprometido con los clientes en cuanto a calidad y suministro ininterrumpido de energía.

Como método, se propone la coordinación entre un control del deslastre de cargas y la integración en paralelo de súper condensadores en la red.

Así, durante el transcurso en equilibrio entre la generación y el consumo, el súper condensador se carga de energía para luego descargarla rápidamente en el momento en el que sea necesario un aporte extra de generación debido a una perturbación en la red.

En la actualidad, hay un UC de 4MW – 20MWs instalado en la isla de La Palma.



Ilustración 5: Instalación del UC en la isla de La Palma [Lavo,13].

1.5 Objetivos del proyecto:

Se realiza el modelado del sistema eléctrico Canario junto con el SAEE y se estudia el funcionamiento de este sistema.

El objetivo principal es el diseño simultáneo de un sistema de deslastre de cargas y los parámetros de control del SAEE, resolviendo el problema de optimización de la minimización de la cantidad de carga deslastrada garantizando la estabilidad del sistema, para diversos casos de perturbaciones típicas.

También, se busca la comparación entre el caso expuesto en el párrafo anterior con aquel donde solo el esquema de deslastre de cargas está diseñado y con aquel en el que se consideran distintos tamaños del súper condensador.

1.6 Metodología de trabajo:

Modelar el sistema eléctrico y el SAEE y entender su funcionamiento a través de las herramientas del software matemático Matlab y el entorno Simulink, considerando simplificaciones como la de los grupos generadores, donde transitorios de los sistemas de excitación pueden ser despreciados por su rapidez, o la de las redes de transmisión, donde por ser una red insular de pequeño tamaño tiene un impacto mínimo en la

dinámica de la frecuencia, o la de las cargas, donde se asume una independencia entre tensión y frecuencia.

Formular el problema de optimización que busca minimizar la cantidad de carga deslastrada garantizando la estabilidad del sistema, a la vez que se respetan ciertas restricciones, como:

- Que la cantidad de carga deslastrada no sea superior a lo perdido en generación.
- Que la frecuencia no descienda más de un valor mínimo permitido por más de cierto tiempo. Normalmente se establece un mínimo permitido de 47.5 Hz por 3s como máximo.
- Que la frecuencia durante el transitorio no ascienda más de un valor máximo permitido que está entre los 51.5 y los 52 Hz.
- Que la frecuencia en régimen permanente tras la perturbación no sea mayor de un determinado valor prefijado.
- Que definen las prestaciones o las características del súper condensador.

Las variables de decisión son los parámetros del esquema de deslastre de cargas y del control del UC. Un esquema de deslastre de cargas está formado por varios escalones. Cada escalón se define por un umbral de frecuencia, un retardo artificial y una cantidad de carga a deslastrar. El UC proporciona regulación primaria de frecuencia y además emula inercia. Las variables de decisión son entonces los umbrales de frecuencia y los retardos de cada escalón así como el estatismo, la inercia emulada del UC y un parámetro que gestiona el agotamiento de energía del UC.

Diseñar simultáneamente el esquema de deslastre de cargas y los parámetros de control del SAEE para un conjunto de perturbaciones típicas. Se aplica el método desarrollado a la isla de La Palma.

Comparar con:

- El caso donde solo el esquema de deslastre de carga ha sido diseñado.
- Diferentes tamaños del SAEE.

1.7 Recursos que se emplean:

Se utiliza la herramienta software matemática: Matlab y su entorno: Simulink como medio para modelar el sistema y para resolver el problema de optimización anteriormente citado. Además de la herramienta de optimización del Algoritmo Genético.

2. Modelo

2.1 Modelo del sistema insular canario:

2.1.1 Introducción

En este capítulo se explicará de forma general el modelo simplificado que representa un sistema de potencia, que se emplea para la simulación del sistema insular canario.

A través de este modelo se simula y estudia el comportamiento de un pequeño sistema de potencia aislado a los pocos segundos tras sufrir una perturbación.

Este modelo es ampliamente utilizado en el análisis y diseño de esquemas de deslastre de carga y proporciona una buena simulación de la dinámica de la frecuencia en pequeños sistemas de potencia aislados [Sigr,10].

2.1.2 Modelo simplificado del sistema eléctrico de potencia aislado

La figura 6, refleja el modelo del sistema de potencia usado para llevar a cabo el diseño conjunto del esquema de deslastre de cargas y parámetros de control del UC en un pequeño sistema de potencia aislado, consistente en unidades de generación.

Cada una de estas unidades está representada con un modelo de segundo orden que es una buena aproximación de sus sistemas de regulación de velocidad de la turbina.

De hecho, la dinámica de la frecuencia está dominada por la dinámica de la regulación de la velocidad del rotor y turbina. Los transitorios de la excitación y del generador pueden ser despreciados por ser mucho más rápidos que la dinámica de la regulación de velocidad. Las turbinas de vapor son representadas normalmente por modelos de primer orden, pero la generación contiene también turbinas de gas y diésel, las cuales requieren para su representación modelos de órdenes superiores.

Algunos de los parámetros de este modelo son la inercia que, como las variaciones de frecuencia en la red se pueden considerar despreciables, se puede definir una sola inercia equivalente del sistema (H_{eq}). Otro parámetro es el factor de amortiguamiento o energía de regulación de las cargas, D , que contempla la respuesta general de las cargas ante variaciones de frecuencia. En este proyecto se desconoce dicho valor, además de considerarse de muy poca influencia en el estudio, por lo que no se tiene en cuenta. Por

otro lado, está la ganancia k_g y los parámetros a_{g1} , a_{g2} , b_{g1} , y b_{g2} , de cada unidad de generación, que son parámetros deducidos de modelos más precisos y estudios más detallados. Existen además límites de generación en las unidades, ya que las reservas de la regulación primaria son limitadas, por lo que se tienen en cuenta $\Delta p_{g,max}$ y $\Delta p_{g,min}$.

Este modelo debido a las limitaciones en la generación no es lineal. Además, el esquema de deslastre UFLS introduce mayor número de no linealidades. Es por ello que se requiere la simulación de la respuesta del sistema ante perturbaciones. Tras la obtención de dichas respuestas, estas se usan en términos de frecuencia y potencia deslastrada en la resolución del problema de optimización del diseño del esquema UFLS y los parámetros de control de UC. El problema es difícil de resolver gracias a estas no linealidades.

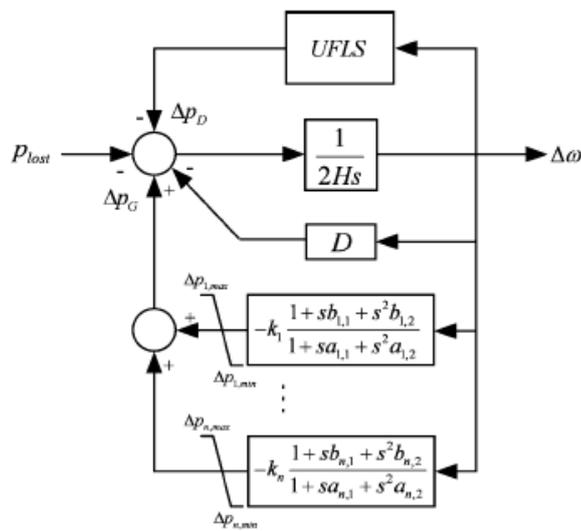


Ilustración 6: System-frequency dynamics model of the power system [Rouc,15].

2.2 Súper Condensador, UC (Ultra capacitor)

2.2.1 Introducción

En esta sección se estudia la conexión del ultra condensador (UC) como dispositivo de almacenamiento energético por diferentes ventajas que presenta, buscando reducir el número de clientes que sufren la desconexión a la red cuando se encuentran demandando energía en el momento en que se produce una perturbación.

EL principio de funcionamiento de un UC consiste en su carga durante el normal funcionamiento del sistema al que está conectado, y su rápida descarga cuando el sistema sufre un desvío en la frecuencia de red.

2.2.2 Modelo del UC

En este capítulo se detalla el modelo utilizado para la representación del UC. Dicho modelo se simula a través de la herramienta Simulink de Matlab y se conecta al conjunto del modelo del sistema de potencia estudiado.

Una particularidad del UC es que no solo participa en la regulación primaria con la inyección de potencia, sino que simula tener inercia (H_{UC}). Esta será uno de los parámetros de control a optimizar del ultra condensador.

El tiempo que tarde en descargarse y el impacto que tenga el UC tras producirse una perturbación en el sistema, dependen sobre todo de las dimensiones de este.

Un modelo lineal de primer orden ha sido propuesto en [12] para describir el comportamiento del UC durante solo la regulación primaria y omitiendo limitaciones de potencia y energía. Estas limitaciones sí que se contemplan posteriormente en la simulación.

Los parámetros de los que depende el modelo son:

- La inercia simulada del UC en pu: H_{UC}
- La estatismo del UC en pu: R_{UC}
- Constante de tiempo del filtro del UC en segundos: T_f
- Constante de tiempo equivalente del control de corriente y el convertidor del UC en segundos: T_c

Aunque las simplificaciones que se consideran a continuación en el modelo empleado omitan los límites de corriente, estos están en realidad representados por los límites de potencia ya que las variaciones de tensión se asumen despreciables y ya que el UC siempre prioriza la potencia activa frente a la reactiva.

El modelo lineal empleado para representar el UC es el siguiente:

$$\Delta p_{UC}(s) = -\left(\frac{1}{R_{UC}} + \frac{2H_{UC}s}{1+sT_f}\right) \frac{1}{1+sT_c} \Delta w(s)$$

$$= -\frac{1}{R_{UC}} \frac{1+s(2R_{UC}H_{UC}T_f)}{1+s(T_f+T_c)+s^2(T_fT_c)} \Delta w(s)$$

Ecuación 1: Incremento potencia UC.

Al modelo anterior se incluye un ancho de banda (dead-band) y limitaciones de potencia y energía a la salida. Además de un control que varía la limitación superior de potencia en función de la energía descargada en cada momento.

El control anterior se encarga de que en el momento en que la energía consumida durante el funcionamiento del UC, excede un límite (un porcentaje de potencia demandada), la limitación superior de potencia se reduzca linealmente a medida que se sigue consumiendo potencia. Este mecanismo ayuda a controlar la velocidad con que se descarga el UC.

En este proyecto solo se analiza la estabilidad de la frecuencia durante los primeros segundos después de que el sistema sufra la perturbación, por tanto el proceso de carga del UC no se modela ni se contempla.

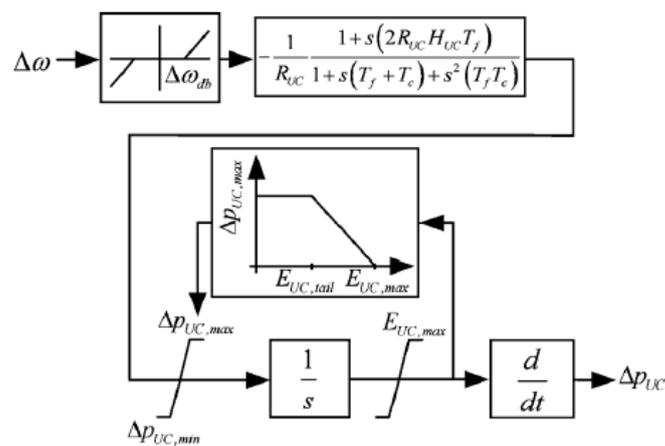


Ilustración 7: Modelo simplificado del UC [Sigr,15].

2.2.4 Diseño óptimo del esquema de UC

Los parámetros de los que depende el modelo que simula la actuación del UC dentro del sistema, deben tomar valores adecuados para conseguir una minimización de la carga deslastrada. Para ello se realiza la optimización conjunta del esquema de deslastre y de los citados parámetros de control de UC. El método que se emplea en la optimización se explicará de forma detallada en capítulos posteriores.

2.3 Deslastre de cargas, UFLS (Under Frequency Load Shedding)

2.3.1 Introducción

A continuación, se explica el método de deslastre de carga que se empleará en este proyecto. Este método explicado a continuación, se basa en el planteado en [Sigr,10] en el que existe un esquema de deslastre de carga optimizado.

El deslastre de cargas, UFLS, es un recurso que considera en último lugar, a la hora de proteger la estabilidad del sistema eléctrico tras una perturbación importante, como una pérdida de una unidad de generación.

Los esquemas de deslastre de cargas operan midiendo continuamente la frecuencia y opcionalmente el índice de variación de frecuencia (ROCOF) mediante relés del tipo 81, para después deslastrar una cantidad predefinida de carga en el caso de que la frecuencia y/o el ROCOF caigan por debajo de ciertos umbrales.

Es una técnica comúnmente empleada para mantener la estabilidad tras una perturbación, que consiste en la desconexión de algunas cargas de la red, disminuyendo así la demanda y favoreciendo el equilibrio demanda-generación. Los esquemas de UFLS empleados actualmente operan con éxito en sistemas robustos. En pequeños sistemas de potencia aislados, como el de las Islas Canarias, los UFLS tienen un papel aún más importante para la seguridad del sistema, pero su control se debe abordar de forma particular al ser un sistema más débil.

En este proyecto se presenta un nuevo enfoque en la implementación de esta técnica, que consiste en la combinación del deslastre de cargas (UFLS) con un sistema de almacenamiento de energía eléctrica (UC).

Normalmente, el diseño de los esquemas de deslastre de cargas en pequeños sistemas aislados de potencia se realiza a partir de la experiencia. Se suele seguir un criterio típico a la hora de decidir el número de escalones, porcentaje de deslastre, umbrales de frecuencia de cada escalón, etc.

Muchos métodos han sido estudiados para diseñar los parámetros de esquemas de UFLS convencionales, algunos de ellos se basan en iteraciones y ensayos de error, otros en un proceso de selección de entre multitud de esquemas planteados. Sin embargo, estos métodos no garantizan necesariamente la eficiencia de los esquemas de deslastre de cargas.

2.3.2 Principios de funcionamiento

En la actualidad, el principio de funcionamiento de los esquemas de deslastre de carga está basado en la experimentación. En cada sistema de potencia se tienen estudiadas las consecuencias y el comportamiento de la red ante perturbaciones graves (como pérdidas en la generación) y el procedimiento sistemático a seguir tras ocurrir dichas perturbaciones.

En un pequeño sistema de potencia aislado, como puede ser cada uno de los sistemas que existen en las Islas Canarias, también se tiene un procedimiento sistemático de actuación tras sucederse una perturbación. Anteriormente, este procedimiento estaba basado en la experiencia y en el estudio del comportamiento del sistema dada una cierta parametrización de las variables que influyen en el deslastre de cargas, pero ahora su funcionamiento es más complejo.

Este método de diseño más complejo y eficiente, planteado en [Sigri,10], se basa en la obtención de un esquema de deslastre de cargas optimizado que de forma automatizada deslastra la cantidad de carga óptima en los momentos precisos y con retardos intencionales también optimizados.

Este principio de funcionamiento del esquema de deslastre de cargas es el mismo que se adopta en este proyecto y su funcionamiento se detalla a continuación.

Supongamos que se produce una perturbación grave, como la pérdida de un grupo generador en un sistema de potencia aislado como por ejemplo el de la isla de La Palma

en Canarias, y se requiere para poder mantener la estabilidad de la frecuencia y por tanto la integridad del sistema, el deslastre de cargas.

El control acoplado al sistema de potencia recibirá información acerca de un desvío en la frecuencia de red a causa de un desequilibrio de potencia generada y demandada.

El sistema de potencia no responde de ningún modo hasta que se supera un primer umbral de frecuencia o de desaceleración de frecuencia. Esto quiere decir, que hasta que la frecuencia no cae lo suficiente no ocurre nada.

En el momento en que se alcanza dicho primer umbral de frecuencia el sistema de potencia podría actuar directamente deslastrando algo de carga, pero en este esquema se contempla la posibilidad de que la frecuencia haya alcanzado el primer umbral y después de unos instantes y de forma natural, comience a recuperarse aproximándose de nuevo a su valor nominal (50Hz).

Esto es algo verosímil, que se puede extrapolar para cualquier umbral de frecuencia, por lo que el sistema en vez de deslastrar directamente tras detectar que se alcanza cierto umbral espera un retardo intencional.

Surgen hasta ahora tres parámetros del problema a optimizar: los umbrales de frecuencia y decaimiento, y el retardo intencional o artificial, que se adecúan en este proyecto para ahorrar lo máximo posible deslastres de cargas evitables, respetando a la vez ciertas restricciones.

En este proyecto, los relés que actúan deslastrando potencia en función de la frecuencia del sistema o su ritmo de variación, son llamados relés UF y relés ROCOF (Rate Of Change Of Frequency), respectivamente.

En los casos en los que detecta que la frecuencia de red o el índice de cambio de la frecuencia de red, ha superado un determinado umbral, tras la espera del retardo intencional y la siguiente comprobación de que las condiciones de frecuencia no han mejorado, el relé actúa.

Los relés del sistema se consideran en la modelación de este proyecto como iguales por lo que tienen un tiempo de actuación iguales de 0,2 s. Con lo que, desde que se detecta

una frecuencia que alcanza un umbral de riesgo hasta que actúa pasa un tiempo igual a la suma de los retardos intencional y propio del relé.

Por último, después de dichos retardos, el sistema deslastra carga. Estos son unos porcentajes respecto de la carga que se está demandando en ese momento en el sistema que, debido a las pequeñas dimensiones que se tratan en los sistemas contemplados en este proyecto, son porcentajes fijos. Esto es debido a que en pequeños sistemas de potencia es difícil y a veces imposible ajustar como se desearía la repartición de la cantidad de carga deslastrada, por lo que deben ser zonas y número de clientes fijos los que se desconecten temporalmente de la red.

Dichos escalones de deslastre una vez son aplicados en el sistema, implican la prolongación del mantenimiento de la desconexión de las cargas deslastradas hasta que se vuelven a conectar. Esta parte de la simulación de la reconexión de cargas, no se contempla en este proyecto ya que solo se estudian la respuesta del sistema en los primeros instantes tras producirse la perturbación, además de que no es de interés porque en esos momentos ya se ha combatido la posible inestabilidad de la frecuencia de red, estando esta fuera de riesgo.

Entonces quiere decir que si por ejemplo, un escalón entrase en el sistema cuando la frecuencia alcanza los 48,1Hz, tras el retardo intencional la frecuencia alcanzase los 47.9Hz, se esperase el retardo de actuación del relé y se deslastrase el 6% de la potencia demandada, si se diese que a continuación se produjese una recuperación de la frecuencia, en ningún caso se volverían a reconectar el 6% de la carga deslastrada.

En la tabla mostrada a continuación se detalla un esquema de deslastre de carga sin optimizar, para el sistema de potencia de la isla de La Palma:

UF (Under Frequency) Relays

Stage	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	Load (%)
1	2101	48,81	100	0,3	0,20	6,00
2	2102	48,81	100	0,6	0,20	0,40
3	3101	48,6	100	1	0,2	10,5
4	3102	48,6	100	1,5	0,2	3,8
5	2103	48	100	2	0,2	7
6	1101	48	100	0,8	0,20	17,40
7	1111	47	100	1,5	0,20	8,70
8	3103	47	100	1,8	0,20	12,30
9	3104	47	100	2,1	0,20	11,50
10	1102	47	100	2,4	0,2	2,2
11	1112	47	100	2,4	0,2	7,8

ROCOF (Rate of Change of Frequency) Relays

Stage	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. Delay (s)	Open. Delay (s)	Load (%)
12	2101	49,5	-1,8	0,1	0,2	6
13	2102	49,5	-1,8	0,1	0,2	0,4
14	3101	49,3	-1,8	0,1	0,2	10,5
15	3102	49,3	-1,8	0,1	0,2	3,8

Tabla 4: Esquema UFLS sin optimizar.

En la Tabla 1, en correspondencia con los parámetros a optimizar del esquema UFLS de los que se habla en párrafos anteriores, se encuentran Int. Delay (s) que corresponde con el retardo intencional, Frequ (Hz) tipo UF y tipo ROCOF que son las frecuencias umbrales, y ROCOF (Hz/s) que son los índices de variación de frecuencia umbrales de cada escalón de deslastre.

Se tiene en cuenta que el resto de parámetros como Load (%) que es la cantidad de carga deslastrada u Open. Delays (s) que es el tiempo de apertura de los relés, además de los ROCOF (Hz/s) tipo UF, son valores constantes del esquema.

2.3.3 Diseño óptimo del esquema de UFLS

Los parámetros de los que depende el esquema que define la actuación del deslastre de carga dentro del sistema, deben tomar valores adecuados para conseguir una

minimización de esta carga deslastrada. Para ello se realiza la optimización conjunta del citado esquema de deslastre y de los parámetros de control del UC conectado al sistema. El método que se emplea en la optimización se explicará de forma detallada en capítulos posteriores.

3. Método de diseño coordinado del esquema de UFLS y del UC

3.1 Introducción

En este capítulo, se expone el método a través del cual se ha diseñado conjuntamente el esquema de deslastre de cargas y los parámetros de control del ultra condensador.

Dicho método, consiste en una optimización paramétrica, que tiene como base la simulación de las respuestas del sistema a partir de los modelos que representan el sistema eléctrico aislado.

El objetivo en dicha parametrización, es encontrar los valores de los parámetros de forma en que se prescinda al máximo del deslastre de cargas, preservando la estabilidad y seguridad del sistema, y respetando los límites de frecuencia.

3.2 Problema de optimización

El planteamiento del problema de optimización tiene como objetivo parametrizar los escalones del deslastre y del control del UC, de tal forma que se minimice la potencia deslastrada y se obtenga la mejor respuesta tras una perturbación, en el sistema insular de la isla de La Palma.

Para ello se eligen ciertos escenarios típicos de generación y se buscan los valores óptimos para que en caso de producirse determinadas pérdidas en la generación, el deslastre total de carga sea mínimo.

Además se establecen unas restricciones para tener en cuenta la preservación de la seguridad y estabilidad del sistema, estas son:

- Que la cantidad de carga deslastrada no sea superior a lo perdido en generación. *(a)*
- Que la frecuencia durante el transitorio no ascienda más de un valor máximo permitido que está entre los 51.5 y los 52 Hz. *(b)*
- Que la frecuencia no descienda más de un valor mínimo permitido por más de cierto tiempo. Normalmente se establece un mínimo permitido de 47.5 Hz por 3s como máximo. *(d)*

- Que la frecuencia en régimen permanente tras la perturbación no sea menor de un determinado valor prefijado. *(e)*
- El deslastre de las cargas no puede actuar después de que la frecuencia de red haya alcanzado su valor mínimo. *(c)*
- El deslastre de las cargas debe respetar la prioridad de las cargas. Que solo se respetará en caso de ser los retardos intencionales lo suficientemente pequeños. *(f)*

Además de la restricciones que definen las prestaciones o las características del súper condensador. Y los límites superiores e inferiores de las variables decisionales.

A continuación, se muestra el problema de optimización completo formulado:

Ecuaciones Problema Optimización:

$$\min f = \sum_i^m p_{UFLS,i};$$

s.t.

$$p_{UFLS,i} - p_{loss} < 0 \quad (a)$$

$$w_{max,i} - w_{max,permitted} < 0 \quad (b)$$

$$t_{shed,i} - t_{w,min,i} < 0 \quad (c)$$

$$t_{w,min,permit} - t_{w,under,min,permit,i} < 0 \quad (d)$$

$$w_{fin,min,permit} - w_{min,i} < 0 \quad (e)$$

$i = 1, \dots, M; M = \text{número contingencias};$

$$A \cdot X = \Delta\sigma \quad (f)$$

$$A = \begin{bmatrix} - & 1 & 0 & 0 & 0 & (...) & 0 & 0 & 0 & (...) \\ 1 & & & & & & & & & \\ 0 & - & 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & \\ & 1 & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & - & 1 & & 0 & 0 & 0 & (...) \\ & & & 1 & & & & & & \\ & (...) & & & & (...) & & & & \\ & & & & & & - & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & 0 & -1 & 1 & 0 & (...) \\ & & & & & & 0 & 0 & - & 1 \\ & & & & & & & & 1 & & \end{bmatrix}$$

$X = \text{vector de variables de decisión};$

$\Delta\sigma = 0 \div 0,1;$

Límites inferiores:

$$LB =$$

$$[w_{umbralufmin}, t_{intufmin}, w_{umbralrocofmin}, dwdt_{umbralrocofmin}, t_{introcofmin},$$

$$R_{UCmin}, H_{UCmin}, E_{tailUCmin}]$$

Límites superiores:

$$UB =$$

$$[w_{umbralufmax}, t_{intufmax}, w_{umbralrocofmax}, dwdt_{umbralrocofmax}, t_{introcofmax},$$

$$R_{UCmax}, H_{UCmax}, E_{tailUCmax}]$$

Como se ha dicho durante la explicación del modelo, este es un modelo no lineal debido a limitaciones en la generación y la entrada de escalones de deslastre de potencia, esto implica la clara dificultad del problema de optimización que se plantea, ya que se hace necesaria la simulación de cada respuesta del sistema ante cada perturbación.

A continuación se muestra un diagrama de flujo que explica el proceso que se lleva a cabo para resolver el problema:

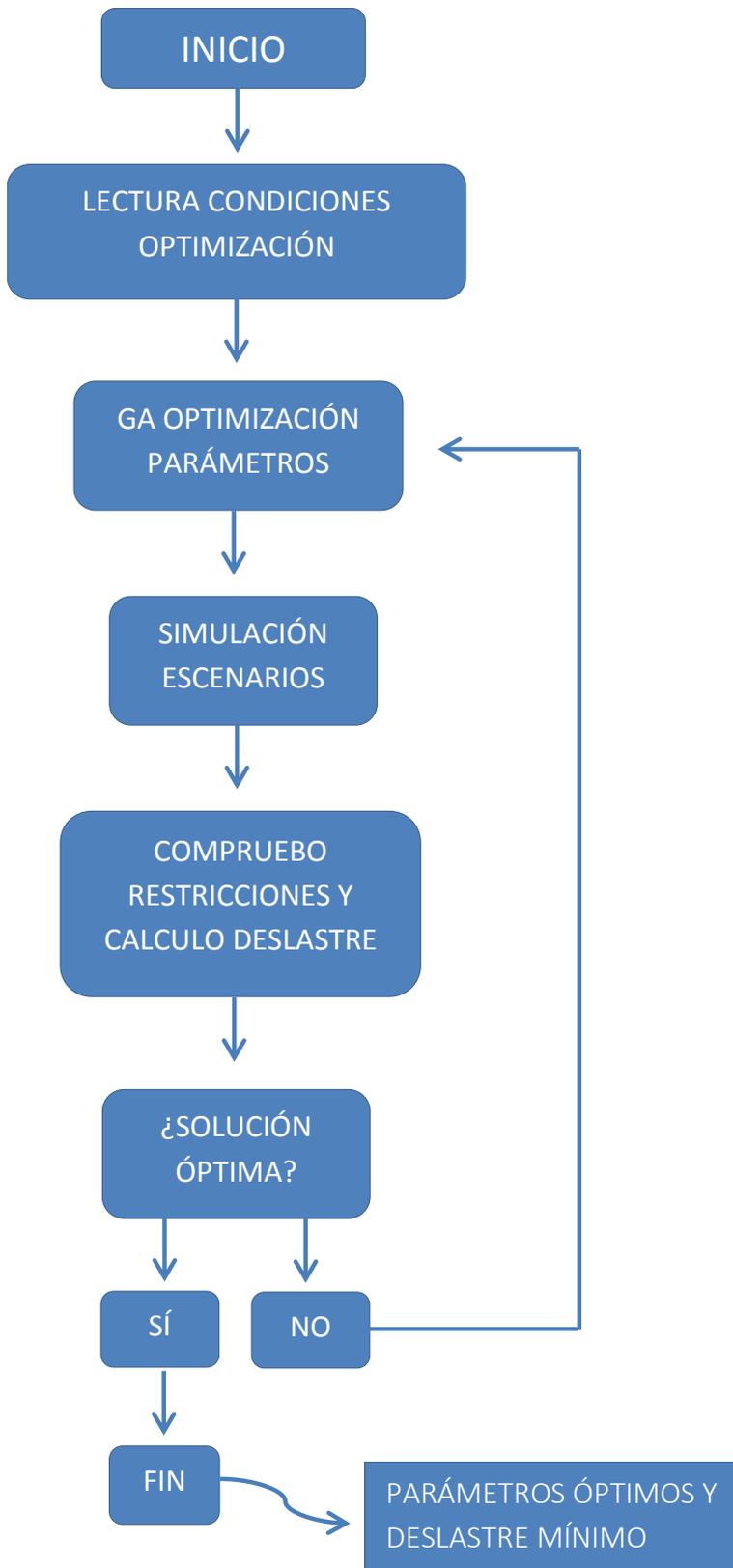


Ilustración 8: Diagrama de flujo resolución problema optimización.

Dentro de la Lectura de Condiciones de Optimización se establecen los valores que se mantienen durante todas las simulaciones. Algunos de estos son el tiempo de apertura de los relés, la potencia y energía nominales del UC, la potencia nominal de los generadores, la relación de generaciones operativos en cada escenario de simulación, etc. Además de que se fija cómo debe de optimizar el algoritmo, por ejemplo: los escenarios a optimizar, la inicialización, el número de generaciones, las condiciones de parada, etc.

Durante la Optimización de Parámetros por medio del algoritmo genético (GA) se buscan posibles valores óptimos de las variables decisionales del problema, se Simulan los Escenarios elegidos con el modelo (Simulink), se Comprueba el Cumplimiento de las Restricciones y se Calcula el Deslastre final total.

Tras estos cálculos, como se indica en el diagrama de flujo, o se finaliza la optimización habiendo encontrado unos parámetros óptimos o se vuelve a repetir el proceso de parametrización hasta llegar a una solución lo bastante buena.

3.2.1 Función objetivo: mínimo deslastre de cargas frente a mínimas sanciones económicas

Una vez analizado el problema de optimización anteriormente expuesto, se puede plantear la siguiente cuestión: ¿por qué no plantear la optimización en términos económicos? Es decir, ¿por qué no plantear una función de minimización del coste económico que pueda acarrear el deslastre de cargas?

La desconexión de cargas conectadas a la red, como ya se ha explicado en capítulos anteriores, es el último recurso que se emplea cuando es necesario recuperar el equilibrio carga-generación garantizando la estabilidad en un sistema de potencia.

Los posibles desequilibrios entre generación y carga pueden ocurrir debido a distintos tipos de perturbaciones, las cuales tienen mayor o menor repercusión en el sistema según su envergadura, el momento en que se dan o el lugar donde ocurren.

Por lo tanto, el deslastre de cargas no será considerado igualmente en todos los casos. Se tendrán en cuenta las causas, las consecuencias de la perturbación o si se produce en la distribución, transporte o generación de energía eléctrica, etc.

Además, la sanción económica aplicada al deslastre de cargas dependerá de los peritajes llevados a cabo para investigar las posibles causas por las que se ha producido la perturbación. Se investigan las protecciones y otros elementos, que a lo mejor en algunos casos, de haber estado en mejores condiciones o mejor calibrados, pudieran haber evitado la intervención del deslastre de cargas.

La conclusión es que se han de tener en cuenta una cantidad considerable de factores físicos, legales, etc., a la hora de poder simular el coste de un deslastre de cargas, lo cual complica mucho el planteamiento de la optimización y no sería realista una aproximación de “lo que costaría” el deslastre por MW deslastrado sin contemplar los factores anteriores.

En el caso de estimar una media aproximada (ya que se asume demasiado complicado el cálculo exacto) de dicho coste por KW de potencia deslastrada, sería poco realista no considerar la energía (KWH) que se ha dejado de suministrar a raíz de la perturbación. Esto no se puede contemplar dentro del presente proyecto donde la simulación que se realiza solo estudia lo ocurrido en los primeros instantes tras la perturbación en el sistema. No se contempla el tiempo que dura el deslastre, por lo que es imposible calcular la energía que se deja de suministrar al sistema.

Pero, en realidad que no se pueda minimizar directamente los costes económicos de la sanción por el deslastre de cargas no es un problema, ya que estos costes son siempre directamente proporcionales a la cantidad de carga deslastrada que es lo que en este proyecto se trata de minimizar.

Esto quiere decir que los valores de las variables decisionales que resultarían al minimizar los costes económicos considerando todos los factores que determinan el precio de la sanción en cada caso, no serían muy diferentes de los que se llegan a obtener con la optimización propuesta en este proyecto.

La conclusión es que el planteamiento adoptado en este proyecto de: optimización de los parámetros del deslastre de cargas y del control del ultra condensador minimizando la cantidad de potencia deslastrada en el sistema tras una perturbación, simplifica muy considerablemente el planteamiento del problema frente a una minimización del coste

de las sanciones económicas fruto del deslastre de cargas, dando resultados similares en ambos casos.

3.3 Los parámetros a optimizar

Como ya se ha dicho, la forma de optimizar el problema de minimización de carga deslastrada es la elección de parámetros de control del UC y del esquema de deslastre de cargas adecuados. En esta sección se hablará con un poco de más detalle de estos parámetros que se optimizan.

El esquema UFLS consta de quince escalones, cada uno de los cuales tiene asociado un porcentaje de potencia demandada que deslastra al entrar. Están divididos en dos tipos, los que entran cuando la frecuencia alcanza una determinada frecuencia umbral (tipo UF, son once) y los que entran cuando además la frecuencia alcanza una determinada velocidad de disminución (tipo ROCOF, son cuatro). Dichas frecuencias umbrales, once W_{umbral_uf} y cuatro W_{umbral_rocof} son los primeros quince parámetros a optimizar del esquema de deslastre. Y las velocidades de disminución umbrales de la frecuencia son cuatro $dwdt_{umbral_rocof}$. Esto implica que se pueda controlar la cantidad de potencia deslastrada en función de los valores que alcance la frecuencia y su desaceleración.

Otros parámetros son los quince retardos intencionales asociados a cada escalón. Estos retardos temporales son importantes ya que permiten que un escalón no deslastre en el caso de que la frecuencia alcance determinada W_{umbral_uf} o W_{umbral_rocof} pero luego se recupere rápidamente a valores más próximos a 50 Hz.

El control del UC consta de tres parámetros a optimizar. Uno es la estatismo (R_{UC}), otro es la inercia simulada (H_{UC}) y por último el porcentaje de energía descargada (E_{tail}) a partir del cual se comienza a descargar más lento el UC.

3.4 Selección del método de optimización: Algoritmo Genético

Para la optimización de los parámetros de control del esquema UFLS y el UC, minimizando la cantidad de carga deslastrada, se emplea una herramienta de optimización de Matlab llamada: Algoritmo Genético (GA).

Un algoritmo genético (GA) es un método para solucionar problemas de optimización que se basa en un proceso de selección natural que imita el proceso biológico de los

organismos vivos. En cada iteración, el algoritmo genético selecciona individuos de la población actual aleatoriamente, que corresponden a soluciones posibles aleatoriamente escogidas, y los utiliza como “padres” para producir los “hijos” de la siguiente generación. Tras varias generaciones sucesivas, la población "evoluciona" hacia una solución óptima.

El algoritmo genético se puede aplicar para solucionar problemas que no se adaptan bien a los algoritmos de optimización estándar, incluidos aquellos problemas como el que plantea este proyecto, en los que la función objetivo es altamente no lineal.

El algoritmo genético lleva a cabo distintas acciones durante la optimización.

Se define la función a optimizar y las restricciones en lenguaje Matlab, en ficheros separados.

En este caso, existen restricciones que tienen relación con el sistema de potencia, con el esquema de deslastre de cargas o bien con el sistema de almacenamiento de energía UC.

Finalmente se realiza una visualización de los parámetros optimizados y posteriormente se emplean en la simulación de distintas perturbaciones.

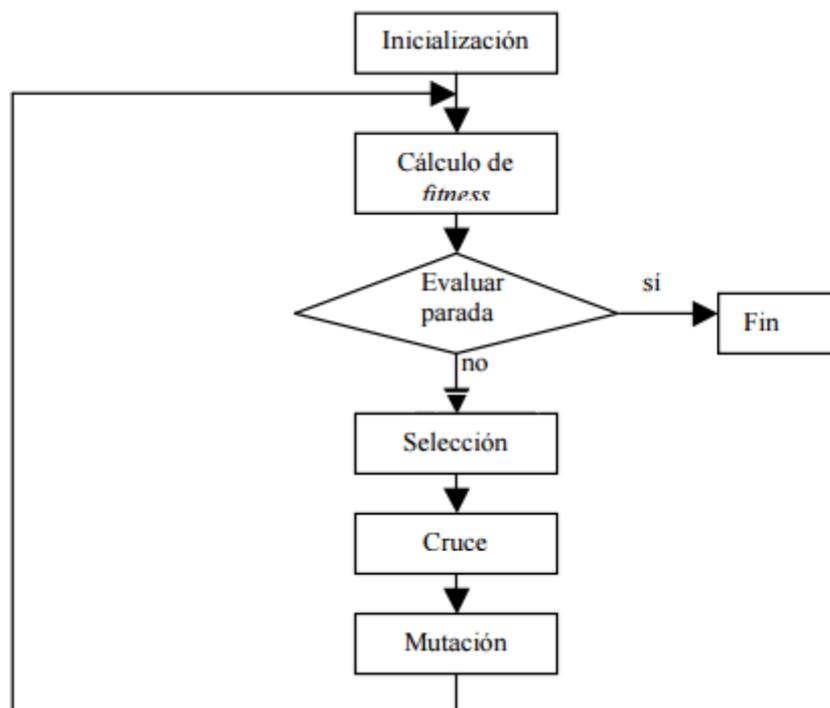


Ilustración 11: Diagrama de flujo de optimización mediante GA [scie].

4. Resultados de la optimización y análisis del diseño coordinado del esquema de UFLS y del UC

4.1 Introducción

Una vez se han modelado el sistema eléctrico y el sistema de almacenamiento de energía eléctrica (UC), y se ha formulado el problema de minimización de la cantidad de carga deslastrada garantizando la estabilidad del sistema, se pasa al diseño simultáneo del esquema de deslastre y de los parámetros de control del ultra condensador para un conjunto de perturbaciones típicas.

En este capítulo se detallará cómo es dicho diseño al que se ha llegado a través de la optimización explicada en el capítulo anterior.

También, se propondrán y compararán otros diseños para diferentes tamaños del ultra condensador, para un planteamiento más restrictivo de las condiciones de diseño y teniendo en cuenta un posible fallo del dispositivo.

Además, se realizará un análisis de los resultados obtenidos en cada caso y se hará una comparación entre sí.

4.2 Solución de la optimización mediante el Algoritmo Genético

En este capítulo se muestran los resultados del problema de optimización analítica y gráficamente, y se realiza una comparación de distintos casos y escenarios.

A no ser que en algún momento se diga lo contrario, a partir de ahora cuando se hable de “introducir el esquema de deslastre de carga al sistema de potencia”, se entenderá que se trata del esquema anteriormente optimizado.

E igualmente, a no ser que en algún momento se diga lo contrario, a partir de ahora cuando se hable de “introducir el ultra condensador en el sistema de potencia”, se entenderá que se trata de un UC con sus parámetros de control previamente optimizados.

Para obtener la solución a partir de la optimización paramétrica realizada mediante el GA, se han considerado ciertos escenarios de generación y ciertas pérdidas. Son típicos escenarios del sistema insular considerado en este caso: el de la isla canaria de La

Palma. Son los que han sido seleccionados en [Sigr,10] a través de un algoritmo de Clustering (K-means), con el que se determinan los cuatro escenarios que mejor definen de forma general del sistema eléctrico.

La tabla 1 que se muestra a continuación refleja los escenarios empleados para la optimización, el número del generador que se pierde, la demanda total del escenario en MW, la pérdida en MW y en porcentaje respecto de la potencia total demandada:

Escenario	Pérdida Generador	Pdem(MW)	Ploss (MW)	Ploss (%)
4	G17	18,29	8,96	48,99
10	G20	32,15	6,70	20,84
15	G11	30,74	2,35	7,64
16	G16	29,98	4,74	15,81

Tabla 1: Escenarios y contingencias del sistema eléctrico de La Palma empleadas en la optimización.

Cuando a partir de ahora se hable de los escenarios 1, 2, 3 y 4, en realidad se estará hablando de los escenarios 4, 10, 15 y 16 de la tabla 1 respectivamente, por una cuestión de comodidad. En el anexo 7.3, se muestra una tabla del total de escenarios que se consideran en las simulaciones del proyecto.

4.2.1 Respuesta del sistema sin esquema de deslastre de carga y sin ultra condensador

En la simulación de estos escenarios sin intervención del deslastre de cargas, ni del ultra condensador, se puede observar a continuación en la figura 12 cómo ante una pérdida en la generación, para los cuatro escenarios típicos elegidos, la frecuencia del sistema reacciona así:

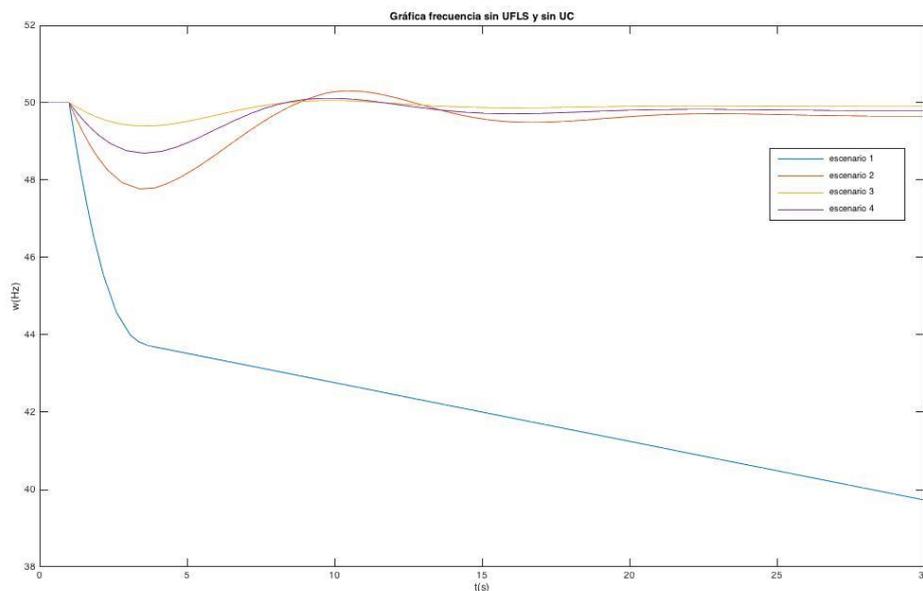


Ilustración 12: Gráfica frecuencia 4 escenarios típicos sin UFLS y sin UC.

En el caso de los escenarios 2, 3 y 4, el sistema consigue sobreponerse a la perturbación únicamente contando con la regulación primaria. Pero la respuesta de la frecuencia alcanza valores mínimos muy mejorables.

En el caso del escenario 1, directamente el sistema no consigue sobreponerse a la perturbación, se vuelve inestable y la respuesta de la frecuencia parece no cesar de descender, pudiendo llegar a producirse la parada completa de los generadores. Claramente, esta situación es inadmisibles en el sistema eléctrico por tanto se exige en este caso, una intervención de al menos el deslastre de carga.

4.2.2 Solución: Esquema optimizado de deslastre de carga

Para evitar situaciones como la de frenada de los grupos, se introduce en el sistema un esquema de deslastre de cargas. Dicho esquema, cuando ha sido estudiado u optimizado, puede en muchos casos evitar que se produzcan daños en el sistema o pérdidas de estabilidad.

Lo más importante de la implementación del esquema es que los escalones de deslastre se produzcan en el momento preciso y solo cuando son realmente necesarios. Para ello se lleva a cabo la optimización, que proporciona los valores umbrales y de retardos temporales idóneos para la preservación de la integridad del sistema.

Las variables decisionales del problema de optimización resuelto han sido los parámetros de los relés UF (de subfrecuencia) y los relés ROCOF (Rate Of Change Of Frequency). En particular, los umbrales de frecuencia, los umbrales de ROCOF y los retardos intencionales. Estos parámetros están limitados superior e inferiormente por:

- $45 \text{ Hz} < \text{Frecuencia umbral} < 50 \text{ Hz}$
- $0 \text{ Hz/s} > \text{ROCOF umbral} > -5 \text{ Hz/s}$
- $0 \text{ s} < \text{Retraso intencional} < 0,5 \text{ s}$

Además de cumplir las restricciones del problema que han sido indicadas en capítulos anteriores.

Sin embargo, no son variables decisionales los porcentajes de potencia deslastrada de tipo tanto UF como ROCOF, por lo tanto se toman dichos valores como los existentes en el esquema actual de la isla. Esto es debido a que en pequeños sistemas de potencia como el de La Palma, sería difícil encontrar una cantidad de carga concreta que valiese lo mismo que cada escalón de potencia optimizado. Por ejemplo, que parte de lo que se quiere deslastrar no esté consumiendo energía y que por tanto su deslastre no suponga una verdadera reducción de la carga demandada.

Está fijado en el esquema actual, que en La Palma pueden entrar hasta once escalones de deslastre de carga, en esta solución se reduce el número a cuatro, ya que el resto no debería entrar nunca por ser correspondientes a frecuencia umbrales bajas, que solo podrían en algunos casos incluso desestabilizar el sistema.

En la tabla 3 mostrada a continuación se detalla el esquema de deslastre de carga optimizado para el sistema de potencia de la isla de La Palma:

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,6865	100,00	0,3912	0,20	6,00
uf	2102	48,6807	100	0,3778	0,20	0,40
uf	3101	48,5306	100	0,482	0,2	10,5
uf	3102	48,1387	100	0,3971	0,2	3,8
rocof	2101	49,5569	-1,9363	0,1225	0,2	6
rocof	2102	49,4962	-1,8878	0,0983	0,2	0,4
rocof	3101	49,3408	-1,0894	0,0314	0,2	10,5
rocof	3102	49,3302	-2,315	0,0799	0,2	3,8

Tabla 3: Esquema UFLS optimizado para el sistema de potencia de La Palma.

Se puede observar que las frecuencias no son especialmente bajas y que los retardos temporales también son generalmente de pequeño valor.

Simulando los mismos escenarios (de izquierda a derecha) sin esquema de deslastre ni UC, con la intervención del deslastre de cargas actual y con el esquema de deslastre optimizado, todavía sin el ultra condensador, se puede observar en la figura 13 cómo ante una pérdida en la generación la frecuencia del sistema reacciona así:

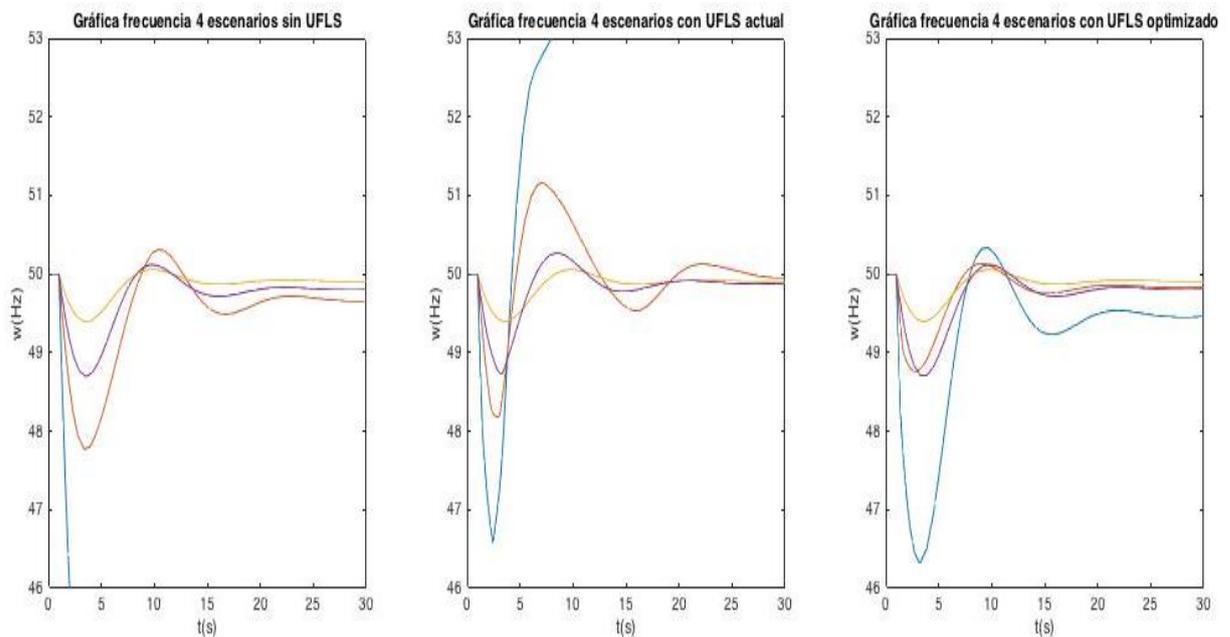


Ilustración 13: Gráfica frecuencia 4 escenarios típicos sin, con UFLS y sin UC.

Se puede observar como en los cuatro casos simulados, se mejora considerablemente la respuesta de la frecuencia en el sistema, respecto a la situación sin esquema y la

situación con el esquema actual, gracias a la introducción de un esquema de deslastre optimizado.

En el escenario 1 se evita la inestabilidad aunque alcanzando valores de frecuencia aún demasiado bajos y a costa de la desconexión de carga.

Esto es debido a que en dicho escenario la pérdida del grupo supone una gran pérdida, de un 49 % respecto de la generación total.

En el caso de los escenarios 2 y 4 se mejora considerablemente la respuesta de la frecuencia del sistema, ya que se alcanzan valores de frecuencia no tan bajos como en el caso en que no existe deslastre de carga.

Y en el escenario 3 no se aprecia mejoría de un caso respecto al otro, esto es porque la pérdida que se simula en este escenario supone el 7,64 % de la generación. Esta cantidad es lo suficientemente pequeña para que no sea necesario deslastrar carga, ya que la frecuencia mínima alcanzada es muy próxima a los 50 Hz y se estabiliza en poco tiempo.

Se ha comprobado, que los valores resultantes de la optimización del esquema UFLS respetan las restricciones del problema y el esquema actúa tal como se pretende, sin originar un deslastre de carga desorbitado.

A continuación, en la tabla 4 se puede observar la comparativa del deslastre entre el esquema actual implantado sin optimizar y el esquema optimizado, para los cuatro escenarios típicos:

	UFLS optim	UFLS actual
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Escenario 1	3,786	9,84
Escenario 2	3,3757	6,655
Escenario 3	0	0
Escenario 4	0	1,9187
	7,1617	18,4138

Tabla 4: Comprobación restricción esquema UFLS optimizado.

Finalmente, se muestran las respuestas de la frecuencia del sistema de todas las posibles pérdidas en todos los escenarios y se compara con la respuesta en los mismos casos donde no existe el deslastre de carga o este o está optimizado.

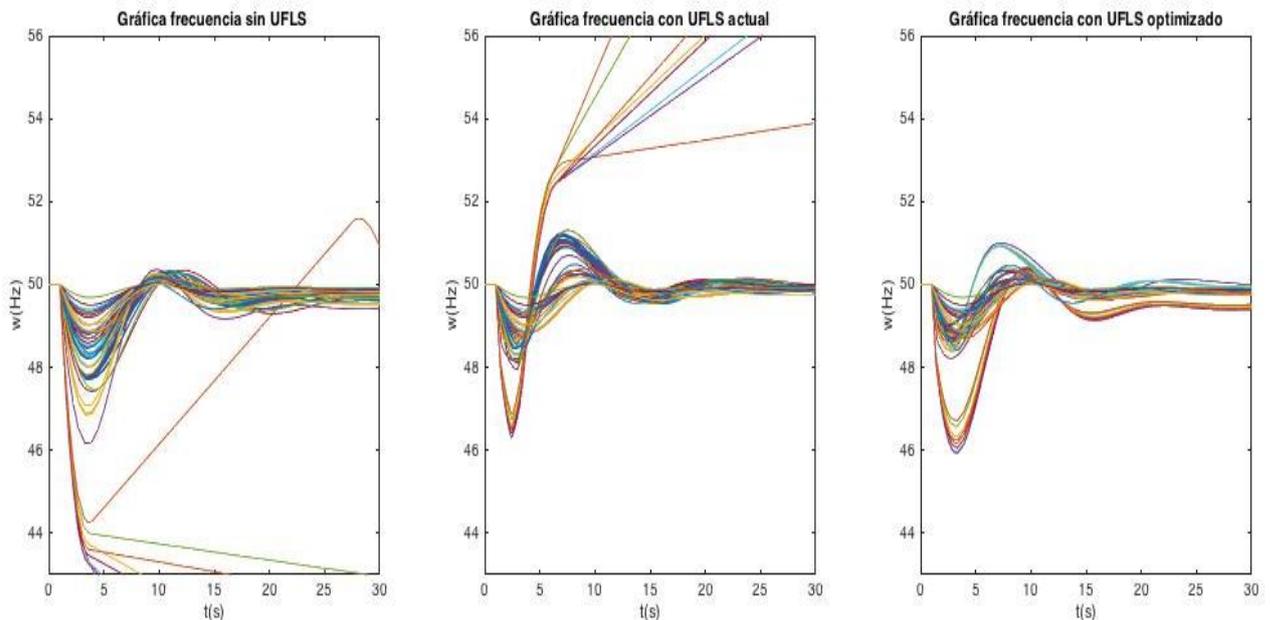


Ilustración 8. Comparación respuesta en frecuencia sin UFLS, con UFLS actual y con UFLS optimizado.

La figura 14 izquierda, muestra todas las posibles respuestas de la frecuencia en el caso en que el sistema no emplea ningún esquema de deslastre de carga, la figura 14 centro muestra la respuesta con el esquema UFLS actual, y la figura 14 derecha muestra todas las posibles respuestas de la frecuencia en el caso en que el sistema emplea un esquema de deslastre de carga optimizado.

Puede verse claramente como un esquema optimizado de UFLS mejora significativamente la respuesta de la frecuencia del sistema, se evita la pérdida de estabilidad en todos los casos.

Por otra parte, llama la atención de que se mejora la respuesta con respecto a las frecuencias máximas y mínimas permitidas en el caso de perturbaciones moderadas, pero que empeora 0,5 Hz aproximadamente, para perturbaciones más graves. Esto es debido a que no hay escalones que deslastren carga para a frecuencias muy bajas. Puede parecer que esto no es acertado, pero lo cierto es que sí lo es, ya que rápidamente se recuperan las frecuencias bajas con este esquema optimizado. Por el contrario, en el

caso de existir dichos escalones de deslastre a frecuencias bajas podría deslastrarse más carga de la conveniente, dando lugar al crecimiento descontrolado de la frecuencia y la consecuencia desconexión de generadores.

A continuación, se muestra una tabla comparativa del deslastre entre el esquema actual implantado sin optimizar y el esquema optimizado, para todos los escenarios, que supone una reducción del 40 % del deslastre:

	Con UFLS optim	Con UFLS actuales
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total		
Escenarios	247,65	415,3

Tabla 5: Comparativa UFLS actual y optimizado.

4.2.3 Solución: Esquema optimizado de deslastre de carga junto con ultra condensador con parámetros de control optimizados.

Con el objetivo de reducir aún en mayor medida la potencia que se deslastra en el sistema tras perturbaciones, se conecta a este un ultra condensador. Dicho ultra condensador, después de que hayan sido optimizados sus parámetros de control, puede en muchos casos reducir y hasta eliminar la necesidad de deslastrar carga a la vez que se preserva la integridad del sistema.

Para que de un ultra condensador se pueda obtener su máximo rendimiento, es necesario optimizar sus parámetros de control, para así que este dispositivo de almacenamiento se descargue de manera y en el tiempo preciso. Dichos parámetros proporcionados por la optimización son su estatismo R_{UC} , su inercia instantánea emulada H_{UC} y el parámetro E_{tail} explicados ya en otros capítulos.

Los parámetros de control del UC optimizados están limitados superior e inferiormente así:

- $0 \text{ pu} < R_{UC} < 2 \text{ pu}$
- $0 \text{ s} > H_{UC} > 20 \text{ s}$
- $0 \% < E_{UCtail} < 100 \%$

Sin embargo, no son variables de decisión wdb_{UC} que es un ancho de banda, T_f y T_c que son la constante de tiempo del filtro del UC y la constante de tiempo

equivalente del convertidor y el control de corriente del UC, respectivamente; y la potencia y energía nominales del UC.

En la tabla 6 mostrada a continuación, se detallan junto con las características nominales del dispositivo (20MWs-4MW), los parámetros de control del ultra condensador, para los cuatro escenarios típicos del sistema de potencia de la isla de La Palma:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_ini(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail (%)
0,002	0,0022	9,8196	0,2	0,2	4	20	0,7106

Tabla 6: Parámetros de control óptimos UC.

En la tabla 7 mostrada a continuación, se muestran los parámetros del esquema de deslastre de carga optimizados conjuntamente con el UC:

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,7795	100,00	0,2797	0,20	6,00
uf	2102	48,7833	100	0,4997	0,20	0,40
uf	3101	48,6625	100	0,4228	0,2	10,5
uf	3102	48,6971	100	0,4855	0,2	3,8
uf	2103	47,8672	100	0,372	0,2	7
rocof	2101	49,5663	-1,5815	0,2032	0,2	6
rocof	2102	49,5198	-1,5425	0,1988	0,2	0,4
rocof	3101	49,1737	-1,0639	0,0318	0,2	10,5
rocof	3102	48,7604	-1,9043	0,19	0,2	3,8

Tabla 7: Parámetros de control óptimos UFLS.

La figura 15, muestra la simulación de los mismos cuatro escenarios con intervención del deslastre de cargas y del ultra condensador optimizados conjuntamente. Se puede observar cómo ante una pérdida en la generación la frecuencia del sistema reacciona así en cada caso:

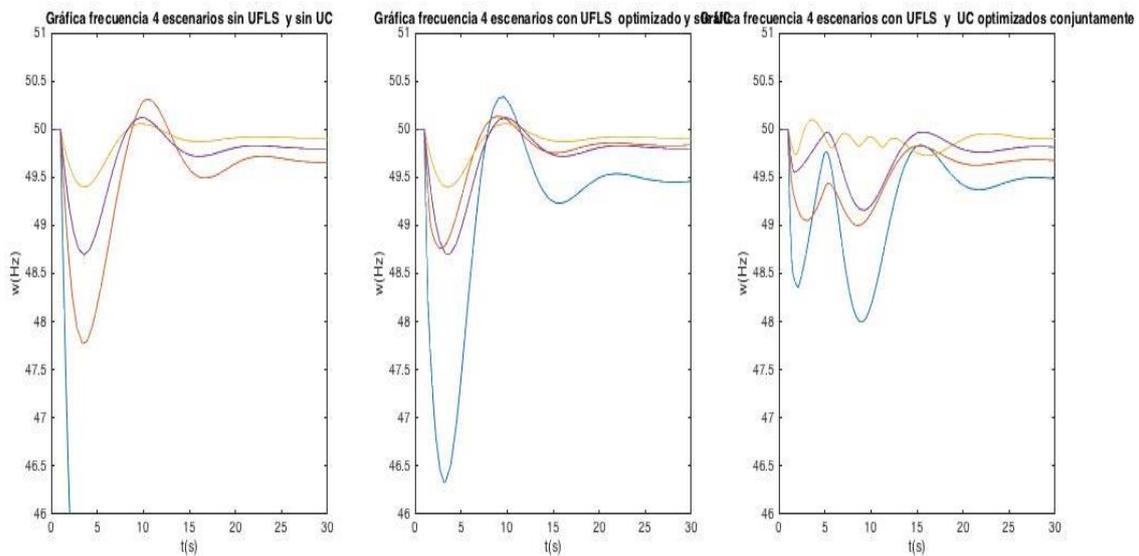


Ilustración 9: Gráfica frecuencia 4 escenarios típicos con UFLS y con UC.

Claramente, se observa a simple vista cómo la introducción del UC en el sistema junto con el deslastre de carga, supone una mejora considerable en cuanto a la respuesta en frecuencia del sistema.

Un caso muy obvio es el del escenario 3 (amarillo) donde, aunque en cuanto al deslastre es inmejorable porque es innecesario en el caso del sistema con esquema UFLS óptimo sin UC, la desviación de la frecuencia se hace muy pequeña.

También tiene un efecto positivo la introducción del UC en los escenarios 2 y 4 (rojo y morado), llegando hasta a evitar el deslastre que en ambos casos se producía sin el UC.

Y en el caso del escenario 1 (azul), también la mejora es muy considerable. Aunque no se consigue evitar el deslastre por completo, este se ve enormemente reducido.

La tabla 8 muestra a continuación, la comparativa de la disminución del deslastre de carga en los cuatro casos típicos, tan solo añadiendo al sistema un UC sin optimizar (el actual) con esquema UFLS actual, respecto de la situación en la que solo se encuentra esquema UFLS actual:

	UFLS actual,UC	
	actual	UFLS actual,sin UC
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Escenario 1	5,7796	9,84
Escenario 2	2,0576	6,655
Escenario 3	0	0
Escenario 4	0	1,9187
	7,8372	18,4138

Tabla 8: Potencia deslastrada en los 4 escenarios típicos con y sin UC.

Como queda demostrado con la gráfica anterior, el deslastre queda reducido significativamente aun cuando el UC no está optimizado.

La tabla 9 muestra a continuación la comparativa para los cuatro escenarios típicos en cuanto al deslastre de carga, entre el caso en que está el esquema UFLS actual, el caso en que está el esquema UFLS optimizado y caso en que está el esquema UFLS junto con el UC optimizados conjuntamente:

	UFLS actual	UFLS optim	UFLF, UC optim
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Escenario 1	9,84	3,786	3,786
Escenario 2	6,655	3,3757	0
Escenario 3	0	0	0
Escenario 4	1,9187	0	0
	18,4138	7,1617	3,786

Tabla 9: Comparativa deslastre.

Se puede observar las claras ventajas que conlleva la introducción de un UC optimizado para estos cuatro escenarios, en los que se consigue reducir el deslastre a un escenario.

A continuación, se muestra una figura en la que se compara para todos los escenarios, (de izquierda a derecha) la respuesta de la frecuencia del sistema de con el esquema UFLS y control del UC actuales, con el esquema UFLS optimizado y el control del UC actual, y con la optimización conjunta de ambos:

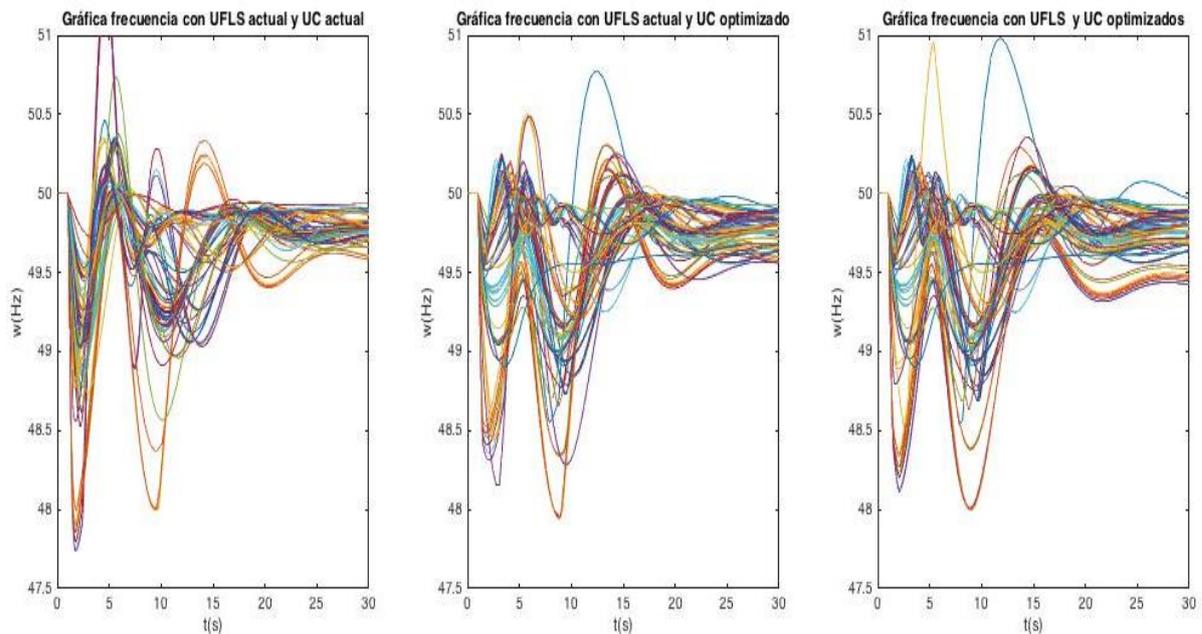


Ilustración 16: Comparativa

Puede verse claramente como en el caso del sistema con un UC con parámetros de control optimizados o actuales, mejora significativamente la respuesta de la frecuencia del sistema, logrando evitar la inestabilidad en todas las situaciones.

En la siguiente tabla se muestra la reducción del 81 % que supone la introducción de un esquema de deslastre de carga y control del UC optimizados conjuntamente, respecto de la situación en la que el sistema no cuenta con el UC optimizado pero sí tiene un esquema de deslastre con los parámetros actuales:

Potencia deslastrada		
	Simulación sin UC	Simulación con UC
Total	415,3 MW	78,5735 MW

Tabla 10: Potencia deslastrada.

En la siguiente tabla se muestra la reducción del 67,5 % que supone la simple introducción de un UC con control sin optimizar junto al esquema UFLS actual, respecto del caso en el que solo está el esquema UFLS actual:

	UFLS actual, UC actual	UFLS actual, sin UC
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total Escenarios	134,73	415,3

Tabla 15: Comparativa deslastre.

En la siguiente tabla se muestra la reducción del 41,6 % que supone el pasar de un sistema con el esquema UFLS y parámetros de control del UC actuales, a un sistema con esquema UFLS y parámetros de control del UC optimizados conjuntamente:

	UFLS, UC optim	UFLS actual, UC actual
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total Escenarios	78,5921	134,73

Tabla 12: Comparativa deslastre.

En la siguiente tabla se muestra la comparativa final de potencia deslastrada entre el caso en el que en el sistema se encuentra el esquema UFLS y control del UC actuales, el esquema UFLS optimizado individualmente y control del UC actual, y el caso con esquema UFLS y parámetros de control del UC optimizados conjuntamente:

	UFLS, UC optim	UFLS optim, UC actual	UFLS actual, UC actual
Total Escenarios	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
	78,5921	142,5398	134,73

Tabla 6: Comparativa desastre.

Es curioso cómo es un 5,4 % más beneficioso para el sistema el mantener la configuración de UFLS y UC actuales, que optimizar el esquema UFLS y no optimizar el control del UC.

Por último, la figura 17 muestra de forma explícita cómo en todos los escenarios posibles, la conexión al sistema de un UC optimizado provoca una disminución, incluso en muchos casos una erradicación, de la potencia deslastrada. En naranja se muestra la cantidad de desastre con UC actual y en azul con UC optimizado. Esto verifica la conveniencia en cualquier caso de introducir este tipo de dispositivo en un sistema como el de La Palma, ya que siempre se favorecerá al sistema.

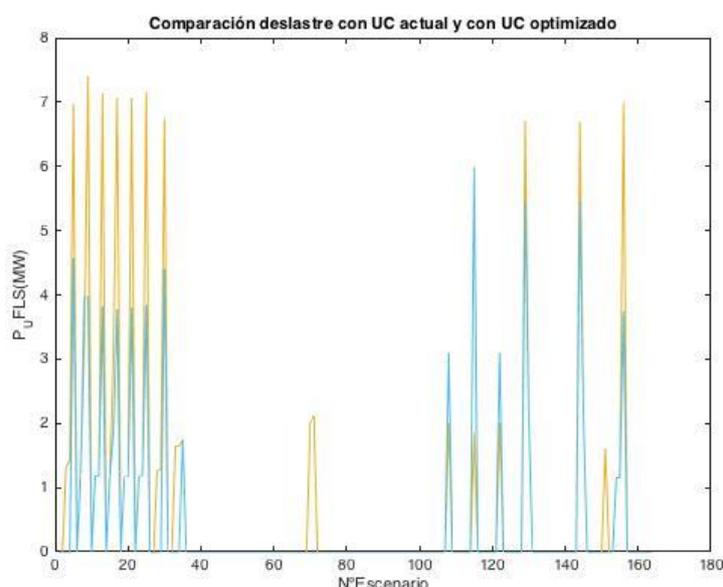


Ilustración 17: Comparación de potencia deslastrada con y sin UC optimizado.

4.3 Impacto de la variación de los parámetros de control del ultra condensador en la respuesta del sistema

En este capítulo se estudia de forma detallada la influencia en la respuesta del sistema de un parámetro de control del UC, muy determinante: E_{tail} .

El control de la energía descargada (Tail control) debe adoptar un valor próximo al 71% para optimizar la respuesta del sistema. Es un parámetro muy determinante, ya que sin él se descargaría rápidamente el UC provocándose en algunos casos deslastes de carga evitables.

Como puede observarse en las gráficas siguientes, el efecto que tiene este control es que cuando la energía descargada alcanza el porcentaje fijado en el Tail Control, el ROCOF disminuye (más o menos según el valor de E_{tail}) para después aumentar, aproximando el valor de la frecuencia hasta los 50 Hz. Si no existe este Tail Control ($E_{tail}=100\%$), en el momento en el que se descarga por completo el UC la caída del ROCOF es mucho más pronunciada, alcanzado la frecuencia valores que pueden acarrear el deslastre de carga. Es decir, que cuando no existe un Tail Control, el momento en que se produce la descarga completa del UC se nota claramente en la frecuencia del sistema. En cambio, con Tail Control el final de la descarga se convierte casi en imperceptible.

A continuación, se muestran las gráficas y tablas que reflejan el comportamiento del sistema para distintos valores de E_{tail} en el caso del escenario 1:

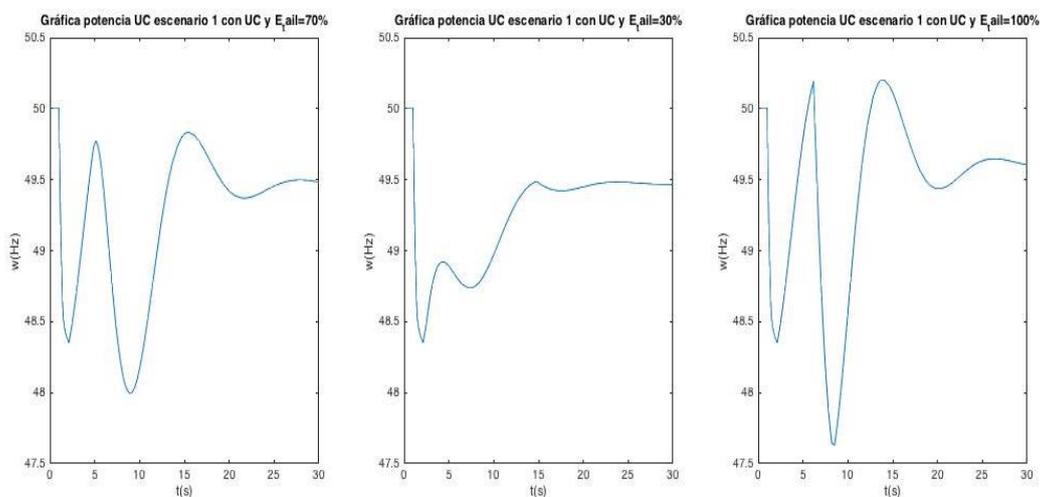


Ilustración 18: Escenario 1 respuesta frecuencia para distintos valores de E_{UC} .

A continuación, se muestra una tabla comparativa del deslastre para cada valor de E_{tail} , para los cuatro escenarios típicos:

	Con UC Optimizado	Con $E_{UC}=30\%$	Con $E_{UC}=100\%$
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Escenario 1	3,786	3,786	5,0663

Tabla 7: Escenario 1 potencia deslastrada para distintos valores de E_{UC}

Se puede observar como no se aprecian cambios en cuanto al deslastre entre la respuesta con $E_{tail}=70\%$ (optimizada) y $E_{tail}=30\%$.

A continuación, se muestra la comparación gráfica de la respuesta de la frecuencia con distintos valores de E_{tail} , para el escenario 1:

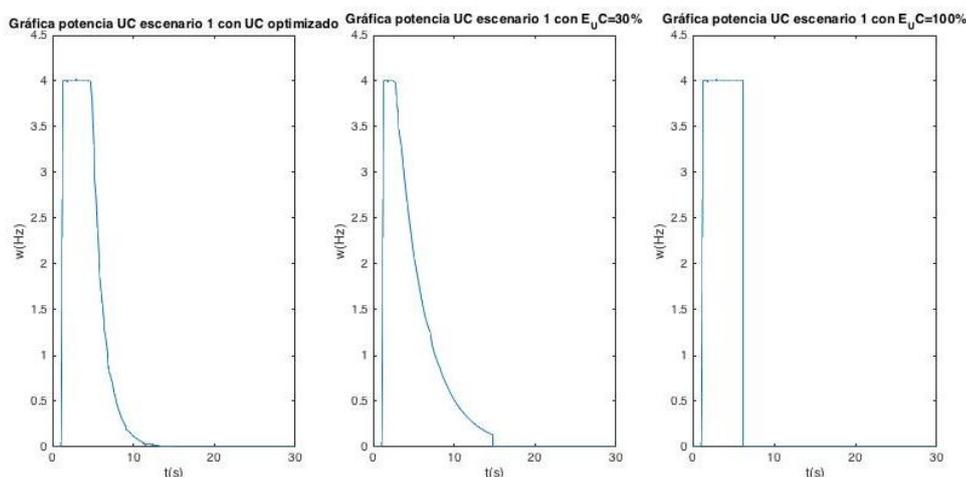


Ilustración 19: Gráfica potencia escenario 1 para distintos valores de E_{tail} .

Observando el caso del escenario 1, se podría deducir como una disminución moderada de E_{tail} no afecta significativamente a la respuesta del sistema, ya que cuando es del 70% y del 30% se deslastra la misma cantidad de carga y la frecuencia mínima es inferior en el caso de $E_{tail}=70\%$. Lógicamente, la disminución de este valor supone una mayor lentitud de descarga del UC. No ocurre así en el caso del 100% ya que casi se dobla la cantidad de carga deslastrada y también empeora considerablemente la frecuencia mínima.

Además, es interesante observar cómo, solo en el caso de $E_{tail}=70\%$, no se siente en la respuesta de la frecuencia el final de la descarga del UC. En el caso en que $E_{tail}=30\%$ y $E_{tail}=100\%$, se ve como en alrededor de los 16 s y 6 s respectivamente, existe una

disminución discontinua de la frecuencia, ya que en ese momento es cuando el UC agota su energía.

Para poder realizar una comparativa de la que extraer conclusiones más fiables, se compara la simulación de todas las pérdidas posibles y todos los escenarios, en las gráficas y tabla siguientes.

A continuación se muestra la respuesta de frecuencia para todos los escenarios con distintos valores de E_{tail} :

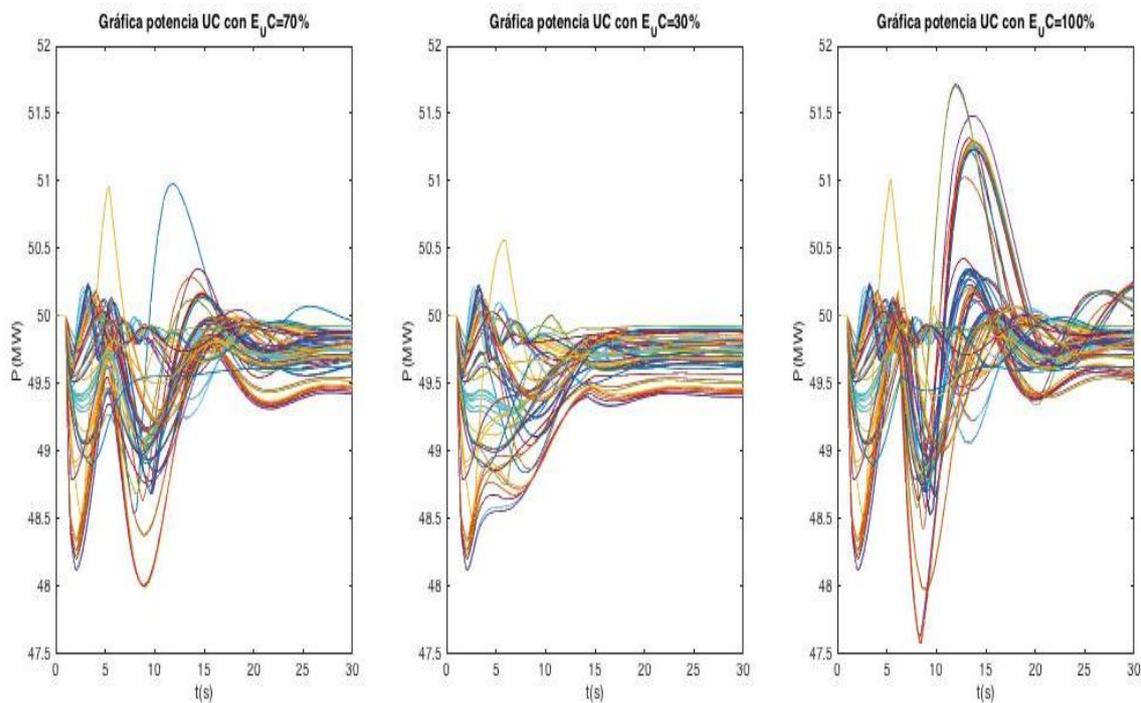


Ilustración 20: Gráfica frecuencia todos los escenarios para distintos valores de E_{tail} .

A continuación, se muestra una tabla donde se puede comparar el deslastre de carga según el valor de E_{tail} :

	Con UC optimizado	Con $E_{UC}=30\%$	Con $E_{UC}=100\%$
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total Escenarios	78,5921	59,218	163,7313

Tabla 14: Todos los escenarios potencia deslastrada para distintos valores de E_{UC} .

En la gráfica anterior, llama la atención la reducción en un 25% de la potencia deslastrada con $E_{tail}=30\%$, respecto al caso en el que $E_{tail}=70\%$.

A continuación, se muestra gráficamente la comparación de la descarga del UC para los tres valores de E_{tail} que se están contemplando, en todos los escenarios:

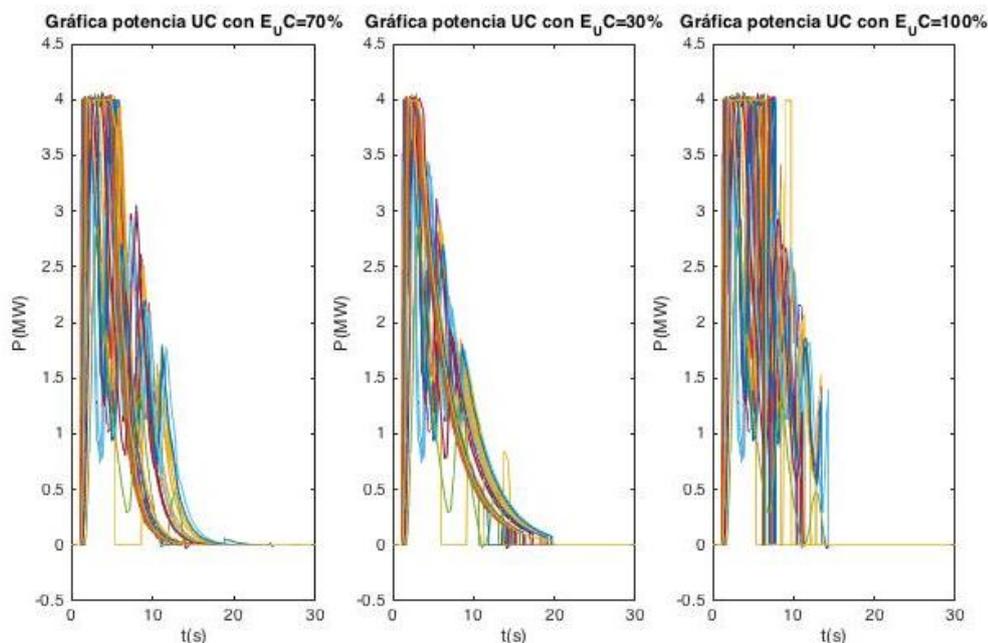


Ilustración 21: Gráfica potencia UC todos los escenarios para distintos valores de E_{tail} .

Observando a simple vista las figuras anteriores, llama atención cuánto determina el Tail Control la respuesta de la frecuencia del sistema.

Cuando no existe este control ($E_{tail}=100\%$) se alcanzan en general frecuencias más alejadas de 50 Hz durante los primeros segundos, en comparación con otros valores de E_{tail} . Además, se deslastra mucha más cantidad de carga, pero la descarga de potencia del UC es muy similar (aunque más rápida) a la de $E_{tail}=70\%$.

Por otra parte, cuando $E_{tail}=30\%$ a simple vista se observa como la respuesta de la frecuencia es mejor en cuanto a valores máximos y mínimos respecto a $E_{tail}=70\%$, que es el valor óptimo obtenido. También, es mejor en cuanto a cantidad de potencia deslastrada como se aprecia en la tabla 12.

De hecho, observando la respuesta del sistema con $E_{tail}=30\%$ para los cuatro escenarios típicos se comprueba que también es solución óptima. Esto es un descubrimiento, que se ha encontrado por casualidad un valor de E_{tail} que mantiene los resultados óptimos para

los cuatro escenarios típicos y además mejora la respuesta global del sistema en cuanto al deslastre.

Para los cuatro escenarios son óptimos ambos valores de E_{tail} : 70% y 30%, como se puede comprobar observando la figura y tabla siguientes:

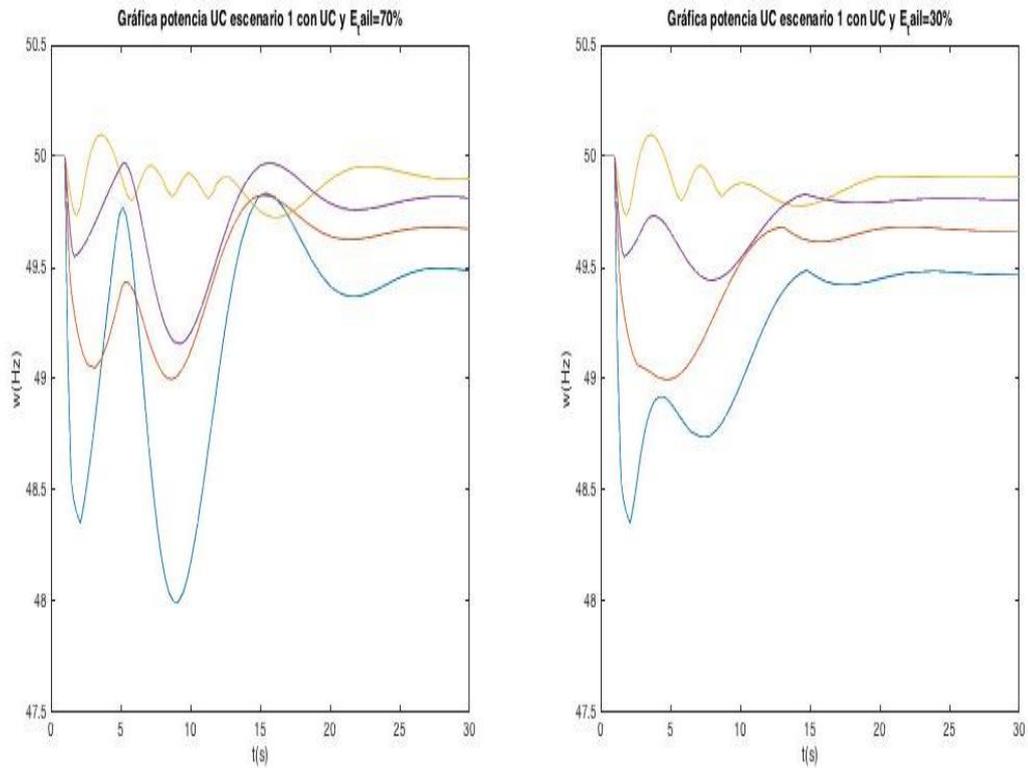


Ilustración 22: Gráficas frecuencia 4 escenarios para $E_{tail}=70\%$ y $E_{tail}=30\%$.

Potencia deslastrada		
	$E_{tail}=70\%$	$E_{tail}=30\%$
Escenario 1	3,786 MW	3,786 MW
Escenario 2	0 MW	0 MW
Escenario 3	0 MW	0 MW
Escenario 4	0 MW	0 MW
Total	3,786 MW	3,786 MW

Tabla 15: Cuatro escenarios típicos potencia deslastrada para $E_{tail}=70\%$ y $E_{tail}=30\%$.

4.4 Solución teniendo en cuenta posible fallo del dispositivo UC

En esta sección se explica cómo se ha vuelto a realizar una optimización con el mismo método con el que se ha llegado a la solución de la sección anterior, pero en este caso se contempla la posibilidad de que el UC pueda fallar en algún momento tras una perturbación.

Para ello se optimizará simulando los mismos cuatro escenarios típicos que se han venido utilizando para la optimización hasta ahora, y además se simularán los mismos cuatro escenarios sin la intervención del UC (ocho en total).

Con ello, se llega a obtener unos parámetros del esquema de deslastre de carga que garantizan también la seguridad del sistema ante una pérdida en la generación y una pérdida del UC, y además unos parámetros de control del UC bastante buenos para el resto de los casos en los que este funcione normalmente. Se muestra en las siguientes tablas, dicha solución al nuevo problema de optimización planteado:

R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_ini(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail(%)
0,003	10,4519	0,2	0,2	4	20	0,6677

Tabla 16: Parámetros UC optimizados teniendo en cuenta posible fallo del UC.

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,7989	100,00	0,3314	0,20	6,00
uf	2102	48,7371	100	0,4025	0,20	0,40
uf	3101	48,6806	100	0,4944	0,2	10,5
uf	3102	48,63	100	0,5	0,2	3,8
uf	2103	48,6222	100	0,493	0,2	7
uf	1101	0	100	100	0,20	17,40
uf	1111	0	100	100	0,20	8,70
uf	3103	0	100	100	0,20	12,30
uf	3104	0	100	100	0,20	11,50
uf	1102	0	100	100	0,2	2,2
uf	1112	0	100	100	0,2	7,8
rocof	2101	49,9581	-2,1975	0,1144	0,2	6
rocof	2102	49,5	-1,7799	0,1417	0,2	0,4
rocof	3101	49,3682	-1,1196	0,0319	0,2	10,5
rocof	3102	49,3291	-1,4187	0,127	0,2	3,8

Tabla 17: Parámetros optimizados esquema UFLS teniendo en cuenta posible fallo del UC.

A continuación, se muestra una gráfica en la que se comparan las respuestas de la frecuencia, en los cuatro escenarios típicos con UC y los mismos suponiendo que no actúa el UC, (de izquierda a derecha) con los parámetros optimizados teniendo en cuenta los posibles fallos y sin tenerlos en cuenta. Como se observa a continuación son muy similares:

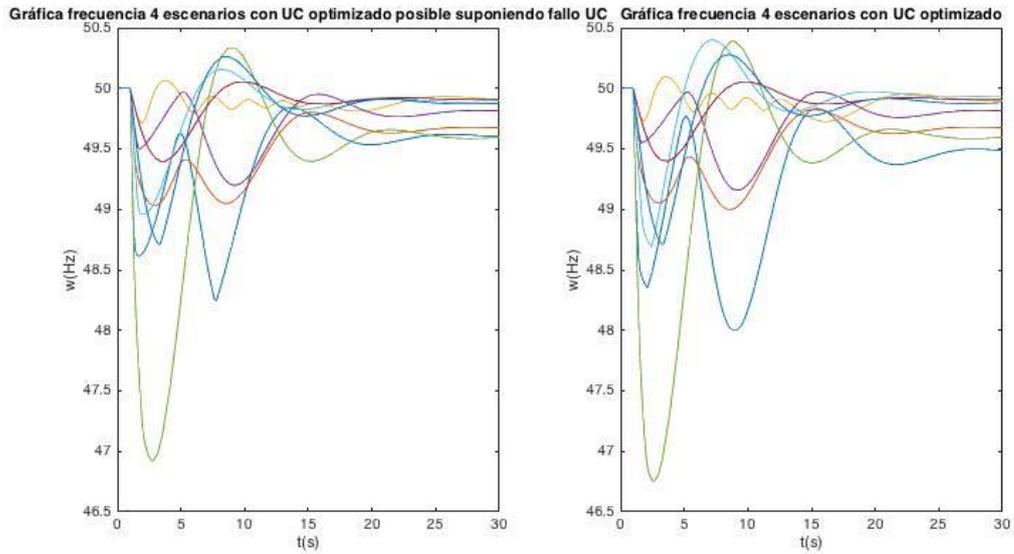


Ilustración 23: Comparación de la frecuencia con parámetros optimizados teniendo en cuenta posible fallo del UC y sin tenerlo en cuenta.

La siguiente tabla muestra el deslastre producido en el caso de emplear los parámetros obtenidos teniendo en cuenta posibles fallos del UC y sin tenerlos en cuenta, para los ocho escenarios anteriores. Se puede observar el total empeora ligeramente:

	UC optimo sin considerar fallos	UC optimo considerando fallos
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Escenario 1	3,786	5,0663
Escenario 2	0	0
Escenario 3	0	0
Escenario 4	0	0
Escenario 1 Con Fallo del UC	5,0663	5,0663
Escenario 2 Con Fallo del UC	5,4333	4,5974
Escenario 3 Con Fallo del UC	0	0
Escenario 4 Con Fallo del UC	1,9187	1,7988
	16,2043	16,5288

Tabla 18: Comparativa deslastre.

En los escenarios en los que falla el UC lógicamente se deslastra menos cantidad de carga con el esquema optimizado considerando dichos fallos. Pero globalmente, el total considerando los ocho escenarios es peor. Esto quiere decir que parece no compensar la mejora ante situaciones de fallo, con el empeoramiento de la respuesta cuanto todo funciona correctamente.

A continuación, se muestra una gráfica de las frecuencias con todos los escenarios posibles considerados, simulando en cada uno la pérdida del UC, con los parámetros optimizados teniendo en cuenta el posible fallo de este y sin tenerlo en cuenta. Como se observa a continuación son muy similares:

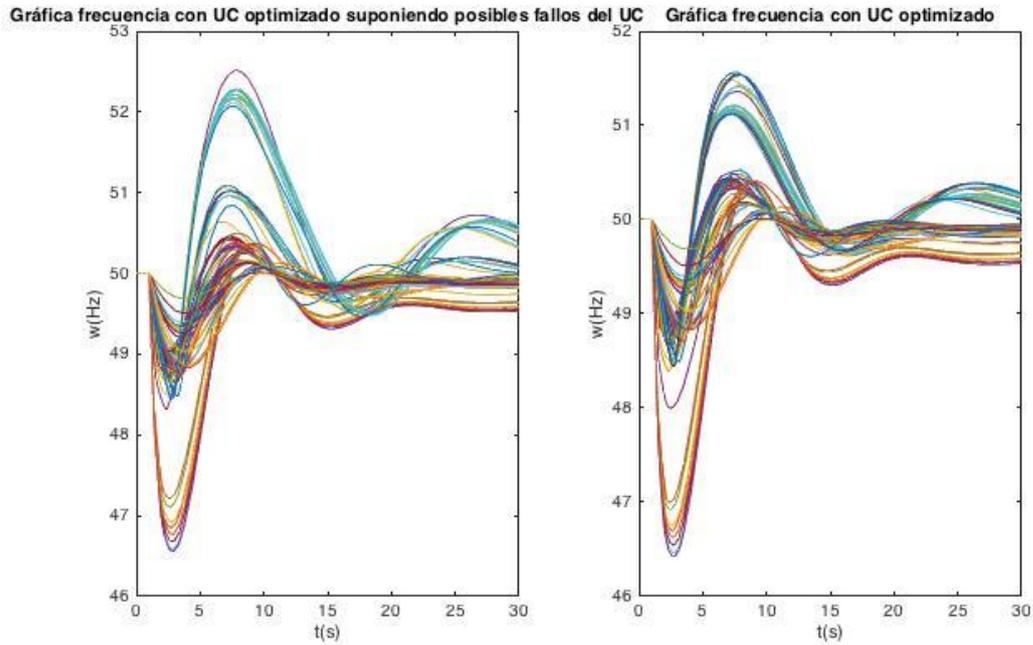


Ilustración 24: Comparación frecuencia con parámetros optimizados teniendo en cuenta posible fallo del UC y sin tenerlo en cuenta.

La siguiente tabla muestra el deslaste producido en el caso de emplear los parámetros obtenidos teniendo en cuenta posibles fallos del UC y sin tenerlos en cuenta, para todos los escenarios posibles en los que falla el UC. Se puede observar que incluso empeoran ligeramente (un 1 %):

	UC optimo sin considerar fallos	UC optimo considerando fallos
	P_UFLS (MW)	P_UFLS (MW)
Total Escenarios sin UC	371	373,5502

Tabla 19: Comparativa Deslaste.

Los resultados del deslaste son muy similares de forma total, por lo que parece no merecer la pena considerar dicho fallo del UC haciendo esta aproximación en la que no se contempla la verdadera probabilidad de fallo.

4.5 Solución con mayores restricciones

En esta sección se expone la realización de una nueva optimización conjunta del esquema de deslastre de carga y de los parámetros de control del ultra condensador, pero con mayores restricciones. Esto es de interés ya que podría suceder que al entrar un escalón de deslastre no se consiguiera desconectar toda la carga que se requiere. Esto puede ser porque un porcentaje de esa carga no esté haciendo uso de energía eléctrica, por ejemplo.

Se ha considerado que imponiendo mayores restricciones al problema de optimización, se podría sobreproteger el sistema previendo estas posibles situaciones, de manera aproximada.

Una de las nuevas condiciones, considera que permitiendo deslastrar menos cantidad de carga, podría compensarse en cierta medida que en la realidad no se pudiera deslastrar el total de carga del escalón.

Las nuevas restricciones impuestas son:

- La cantidad de carga deslastrada no es mayor que el 80 % de lo perdido en la generación.
- La frecuencia no está por más de 3 segundos por debajo de la frecuencia mínima admisible que se fija en 48 Hz.
- La frecuencia no asciende a más de 51 Hz.
- Respeto de la prioridad de cargas.

Se observa al resolver la optimización, cómo los resultados obtenidos de la resolución de esta variante del problema son prácticamente iguales a los resultados de la optimización inicial, tablas 5 y 6, y provocan el mismo deslastre total de carga de para los cuatro escenarios típicos, aunque peores (un 12% más) al simular todos los escenarios. Dichos parámetros se muestran en las tablas siguientes:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_ini(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail(%)
0,002	0,0023	9,8542	0,2	0,2	4	20	0,7577

Tabla 20: Parámetros UC optimizados teniendo en cuenta mayores restricciones.

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,9052	100,00	0,4238	0,20	6,00
uf	2102	48,8655	100	0,3826	0,20	0,40
uf	3101	48,6889	100	0,3466	0,2	10,5
uf	3102	48,7025	100	0,4228	0,2	3,8
uf	2103	47,8909	100	0,4164	0,2	7
rocof	2101	49,5858	-1,4659	0,2414	0,2	6
rocof	2102	49,6024	-1,52	0,271	0,2	0,4
rocof	3101	49,3715	-0,927	0,078	0,2	10,5
rocof	3102	48,7724	-1,6457	0,2689	0,2	3,8

Tabla 21: Parámetros UFLS optimizados teniendo en cuenta mayores restricciones.

A continuación, se muestran tablas comparativas de la cantidad de deslastre de carga teniendo en cuenta para la optimización las restricciones mayores y sin tenerlas en cuenta. La tabla 22 muestra los resultados para los cuatro escenarios típicos:

	UC optim P_UFLS (MW)	UC optim restric P_UFLS (MW)
Escenario 1	3,786	3,786
Escenario 2	0	0
Escenario 3	0	0
Escenario 4	0	0

Tabla 22: Comparativa deslastre.

La tabla 23 muestra los resultados para el total de escenarios:

	UC optimo P_UFLS (MW)	UC optimo restric P_UFLS (MW)
Total Escenarios	78,5921	89,7659

Tabla 23: Comparativa deslastre.

A continuación, se muestra una gráfica en la que se comparan las respuestas de la frecuencia de todos los posibles escenarios, (de izquierda a derecha) con los parámetros de la optimización inicial y parámetros más restrictivos:

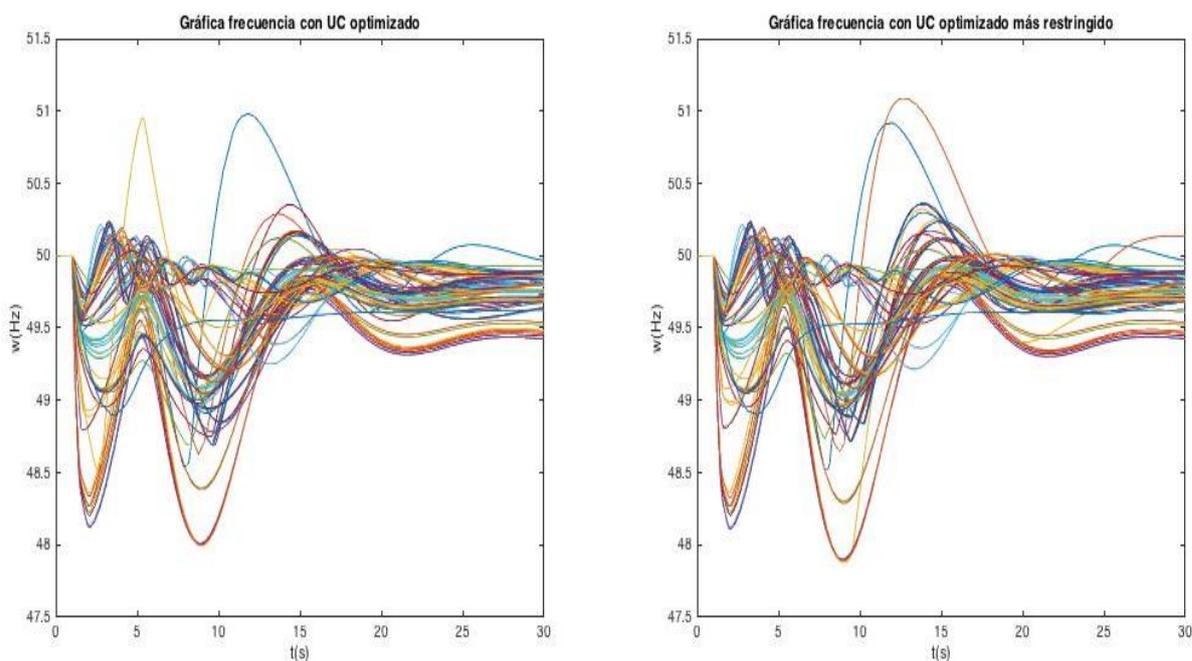


Ilustración 25: Comparativa optimización inicial y optimización más restringida.

4.6 Solución con cambios en el tamaño del UC

En esta sección se estudia la posible conveniencia de un tamaño mayor o menor del UC para los cuatro escenarios típicos considerados.

Durante todas las simulaciones pasadas se ha considerado que el tamaño del ultra condensador conectado al sistema eléctrico de La Palma tenía un tamaño de 4 MW y 20MWs, que es el tamaño real del que se encuentra actualmente en la isla, trabajando para mejorar la calidad del suministro eléctrico desde 2013, gracias al proyecto STORE del que se ha hablado en capítulos anteriores.

Se ha llegado a una buena solución a través del planteamiento de un nuevo problema de optimización similar al que se ha venido realizando hasta ahora, pero añadiendo como variables de decisión: la potencia y energía nominales del ultra condensador.

Los resultados de los parámetros obtenidos en la resolución del problema anterior, se muestran en las siguientes tablas:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_ini(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail(%)
0,002	0,0021	10,78	0,2	0,2	4	20,75	0,7

Tabla 24: Parámetros de control y tamaño óptimos UC.

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
Uf	2101	48,8072	100,00	0,22277	0,20	6,00
Uf	2102	48,8091	100	0,2752	0,20	0,40
Uf	3101	48,2123	100	0,2145	0,2	10,5
Uf	3102	47,8656	100	0,4969	0,2	3,8
Rocof	2101	49,5584	-2,8875	0,1237	0,2	6
Rocof	2102	49,4619	-1,776	0,137	0,2	0,4
Rocof	3101	48,8198	-1,1003	0,1063	0,2	10,5
Rocof	3102	48,5003	-3,2223	0,1363	0,2	3,8

Tabla 25: Parámetros de control óptimos UFLS.

Los resultados de los parámetros optimizados varían respecto de los parámetros obtenidos en otras optimizaciones anteriores. En cuanto al tamaño del UC, varía ligeramente con respecto al inicial, lo que provoca una reducción del deslastre de carga en un 18% respecto al valor optimizado con el UC predeterminado. Se puede observar la comparación en las tablas 26 y 27 más adelante.

Por otro lado, se han vuelto a plantear dos problemas de optimización más, en los que se optimiza el esquema UFLS y los parámetros de control del UC para otros tamaños del UC: 4MW-40MWs y 8MW,40MWs.

A continuación se muestran los resultados de los parámetros, de los dos nuevos problemas de optimización anteriores.

Para el tamaño de UC de 4MW-40MWs:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_ini(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail(%)
0,002	0,0042	11,6083	0,2	0,2	4	40	0,9091

Tabla 8: Parámetros optimizados UC para un tamaños de 4MW y 40MWs.

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,8201	100,00	0,3327	0,20	6,00
uf	2102	48,8156	100	0,4358	0,20	0,40
uf	3101	48,7463	100	0,4975	0,2	10,5
uf	3102	48,7018	100	0,4998	0,2	3,8
uf	2103	47,7956	100	0,4693	0,2	7
rocof	2101	49,5699	-1,7503	0,1244	0,2	6
rocof	2102	49,539	-2,2508	0,0607	0,2	0,4
rocof	3101	49,3445	-1,093	0,0254	0,2	10,5
rocof	3102	49,3065	-1,7737	0,1402	0,2	3,8

Tabla 9: Parámetros optimizados UC para un tamaño de 4MW y 40MMs.

Para el tamaño de UC de 8MW-40MWs:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_ini(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail(%)
0,002	0,0282	10,0338	0,2	0,2	8	40	0,7305

Tabla 10: Parámetros optimizados UC para un tamaños de 8MW y 40MWs.

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	49,0525	100,00	0,4799	0,20	6,00
uf	2102	48,9339	100	0,4956	0,20	0,40
uf	3101	48,7605	100	0,4998	0,2	10,5
uf	3102	48,8016	100	0,2603	0,2	3,8
uf	2103	48,7644	100	0,3614	0,2	7
rocof	2101	49,699	-1,7953	0,2654	0,2	6
rocof	2102	49,5237	-1,7944	0,1247	0,2	0,4
rocof	3101	49,4968	-1,0393	0,0633	0,2	10,5
rocof	3102	49,4434	-1,5786	0,1559	0,2	3,8

Tabla 11: Parámetros optimizados UC para un tamaño de 8MW y 40MMs

Lo más significativo son los resultados de la optimización del control del UC que se muestran en las tablas anteriores para los distintos tamaños del UC.

La estadística y el Tail Control, varían significativamente con el aumento de la potencia nominal del UC. El estadístico crece a medida que aumenta la potencia y/o energía nominal del UC. Y el E_{tail} aumenta su valor hasta el 90 % para el tamaño de 4 MW y 40 MWs, con el fin de agilizar su descarga.

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de la respuesta de la frecuencia del sistema para los cuatro escenarios típicos, (de izquierda a derecha) con solo el control del UC optimizado, con un tamaño y control del UC optimizado, con un tamaño de UC 8MW-40MWs y control optimizados, y con un tamaño de UC 4MW-40MWs y control optimizados, junto con el esquema UFLS también optimizado, en los cuatro casos:

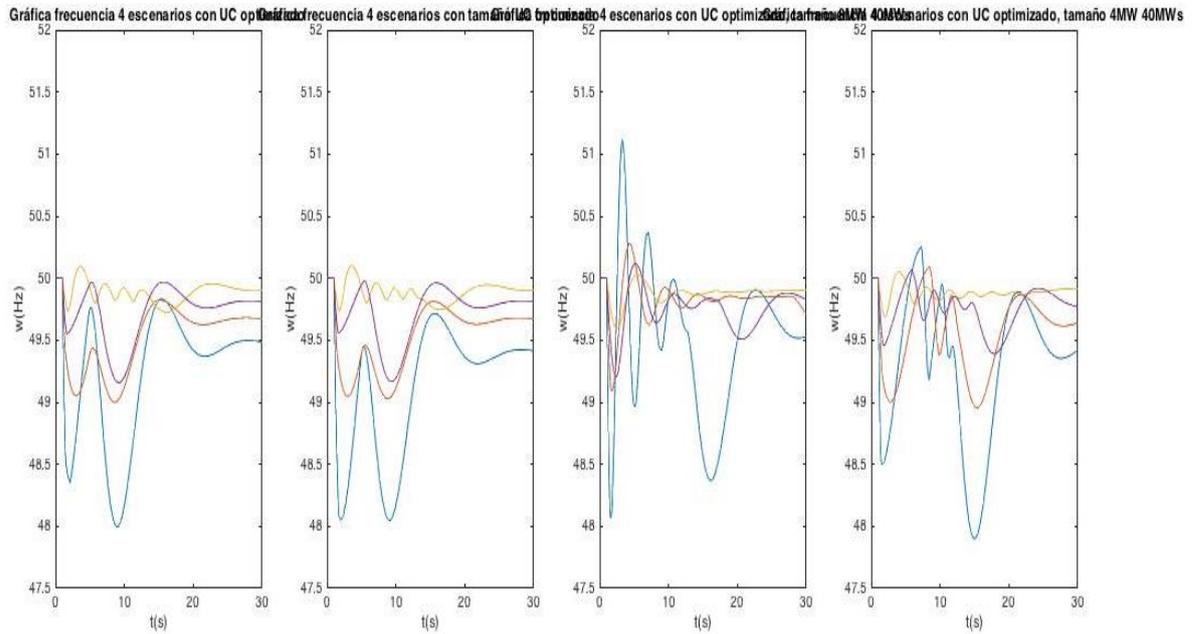


Ilustración 26: Gráficas comparativas para distintos tamaños del UC.

Se puede observar que como en los casos del tamaño de UC optimizado y de 4MW-40MWs, las frecuencias están acotadas entre valores similares más próximos a 50 Hz. Además es notable cómo incrementa las pequeñas oscilaciones de la frecuencia en los casos en los que el tamaño es de de 4MW-40MWs y de 8MW-40MWs.

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de la respuesta de la frecuencia del sistema para todos los escenarios, (de izquierda a derecha) con solo el control del UC optimizado, con un tamaño del UC optimizado, con un tamaño de UC 8MW-40MWs y parámetros optimizados, y con un tamaño de UC 4MW-40MWs y parámetros optimizados, junto con el esquema UFLS y los parámetros del UC optimizados conjuntamente en los tres casos:

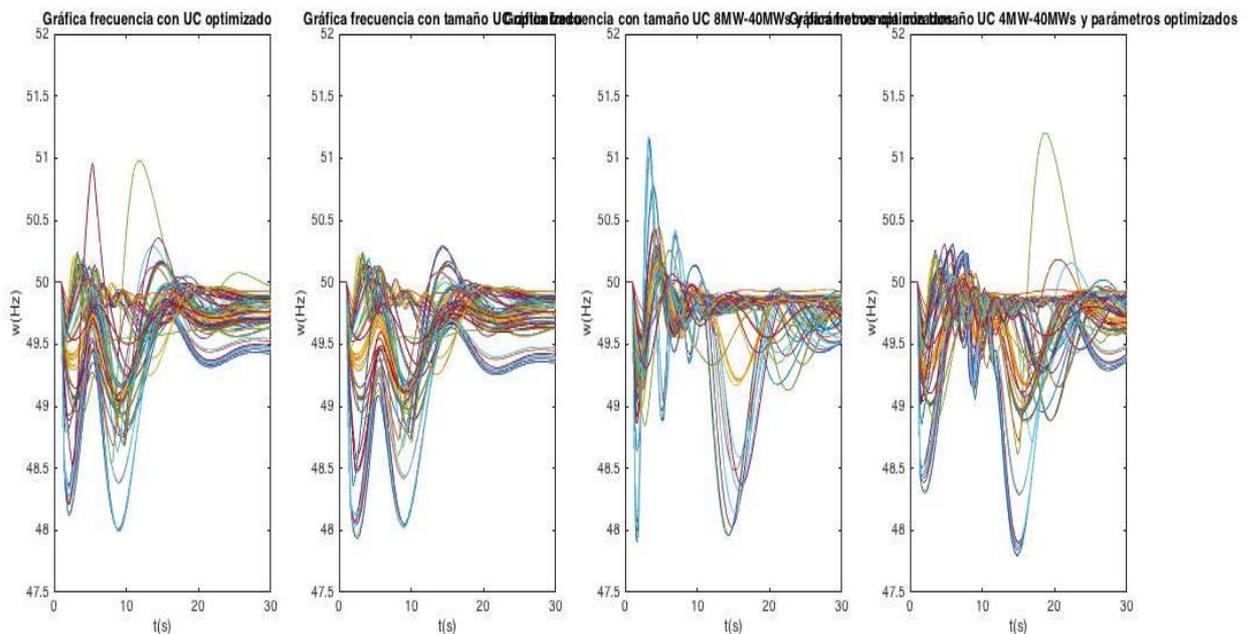


Ilustración 27: Gráficas comparativas para distintos tamaños de UC en todos los escenarios.

Es interesante comentar respecto a la tabla anterior, la similitud de respuestas de la frecuencia en los casos en los casos del tamaño de UC optimizado y de 4MW-40MWs. En el caso de 4MW-40MWs, se ve incluso mejorada, ya que exceptuando un caso no se sobrepasan los 50,25 Hz y las frecuencias mínimas son generalmente más altas, pero también se ven ralentizadas respecto al resto de casos.

La tabla 26 muestra una comparativa de la potencia deslastrada para los cuatro escenarios típicos:

	UC optim	UC tamaño optim	UC tamaño 8MW 40MWs	UC tamaño 4MW 40MWs
Escenario 1	3,786	3,091	5,0663	3,786
Escenario 2	0	0	3,3757	0
Escenario 3	0	0	0	0
Escenario 4	0	0	0	0
	3,786	3,091	8,442	3,786

Tabla26: Comparativa deslastré.

Se puede observar cómo los cuatro escenarios típicos notan una mejoría del 18 % en cuanto al deslastré con el tamaño del UC optimizado.

Para los casos de tamaño de UC: 4MW-40MWs y 8MW-40MWs, en ninguno de los cuatro casos se observa mejora en relación con el tamaño de UC predeterminado y el

tamaño optimizado. Como mucho, llega a deslastrar la misma cantidad de carga cuando su tamaño es de 4MW-40MWs, pero si su tamaño es de 8MW-40MWs, empeora considerablemente la cantidad de potencia deslastrada.

La tabla 27 muestra una comparativa de la potencia deslastrada para el total de escenarios:

	UC optim	UC tam optim	UC tamaño 8MW 40MWs	UC tamaño 4MW 40MWs
Total Escenarios	78,5921	64,1495	182,2	70,2838

Tabla 27: Comparativa Deslastre.

Se puede observar en la tabla anterior, cómo al simular el total de escenarios, se nota una mejoría 18 % en cuanto al deslastre con el tamaño del UC optimizado, como ya se ha dicho.

Para los casos de tamaño de UC: 4MW-40MWs se observa mejora en relación con el tamaño de UC predeterminado, pero no da un mejor resultado que cuando el tamaño es optimizado. Si el tamaño es de 8MW-40MWs, empeora considerablemente la cantidad de potencia deslastrada respecto al resto de casos.

4.7 Solución comparativa entre optimización para escenarios desfavorables y no especialmente desfavorables

En esta sección se plantea la optimización de los escenarios más desfavorables que se podrían dar en el sistema de la isla de La Palma y algunos no especialmente desfavorables pero que necesitan deslastre de carga, con el objetivo de tratar de minimizar el deslastre de carga total que se produce al simular todas las posibles pérdidas en el sistema y para comprobar si existe alguna relación entre el porcentaje de potencia pérdida y los parámetros optimizados. Se busca poder realizar una valoración de la posible conveniencia de un ajuste adaptable (en cierta medida), de algún parámetro de control para según qué caso.

Además, se comprueba cómo reaccionan los cuatro escenarios típicos, respecto a la frecuencia y deslastre, con los parámetros optimizados en esta sección.

Los escenarios más desfavorables seleccionados para la primera optimización en este apartado, son aquellos en los que la pérdida en la generación es del 51-52% del total. Se muestran dichos escenarios con las pérdidas que sufre cada uno, en la tabla 28:

Escenario	Pérdida Generador	Pdem(MW)	Ploss(MW)	Ploss(%)
3	G17	19	9,55	52
5	G17	18,79	9,35	51
6	G17	19,06	9,61	52
25	G17	18,60	9,16	51

Tabla 28: Escenarios y contingencias más desfavorables del sistema eléctrico de La Palma empleadas en esta optimización.

Los resultados de los parámetros del esquema de deslastre de carga que se obtienen de la optimización para los escenarios anteriores, son prácticamente los mismos que en el resto de optimizaciones y los del control de UC se muestran en la tabla 29 a continuación:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	E_UCtail(%)
0,002	0,001	10,01	0,2	0,2	0,67

Tabla 29: Parámetros de control óptimos UC para los escenarios más desfavorables.

Llama la atención cómo el resultado de la optimización del control del UC, es muy similar al obtenido en la optimización del problema para los cuatro escenarios típicos. El estatismo del UC, es el parámetro que más difiere, es 3 veces menor que el obtenido inicialmente de 0,002 pu.

Para la segunda optimización en este apartado, se seleccionan algunos escenarios no especialmente desfavorables, pero en los que existe deslastre de carga, son aquellos en los que la pérdida en la generación es de entre el 22-25% del total.

Se muestran dichos escenarios con las pérdidas que sufre cada uno, en la tabla 30:

Escenario	Pérdida Generador	Pdem(MW)	Ploss(MW)	Ploss(%)
2	G16	19,16	4,26	22
8	G19	27,37	6,63	24
19	G19	28,94	6,63	23
24	G19	26,89	6,63	25

Tabla 30: Escenarios y contingencias no especialmente desfavorables del sistema eléctrico de La Palma empleadas en esta optimización.

Los resultados de los parámetros del esquema de deslastre de carga que se obtienen de la optimización para los escenarios anteriores son prácticamente los mismos que en el resto de optimizaciones y los del control de UC se muestran en la tabla 31 a continuación:

wdb_UC(pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	E_UCtail(%)
0,002	0,01	10	0,2	0,2	0,7

Tabla 31: Parámetros de control óptimos UC para los escenarios más desfavorables.

Llama la atención cómo el resultado de la optimización del control del UC, es muy similar, también en este caso, al obtenido en la optimización del problema para los cuatro escenarios típicos. El estatismo del UC, es el parámetro que más difiere, es el 33% mayor que el obtenido inicialmente de 0,002 pu.

Los valores de inercia y de E_{tail} se asemejan en ambos casos mucho más a los parámetros optimizados para los cuatro escenarios típicos.

Por lo tanto, puede afirmarse que para casos en los que las perturbaciones no son tan importantes el valor de estatismo del UC es beneficioso que crezca y al contrario cuando las perturbaciones son graves.

Se puede decir que, al encontrarse valor óptimo de 0,002 pu centrado entre los valores óptimos en casos más y menos desfavorables, la elección de los cuatro escenarios típicos iniciales es buena, ya que se tiene un compromiso entre los parámetros que favorecen la respuesta del sistema en situaciones en las que la perturbación es más grave y las situaciones en las que no lo es.

Además se deduce que el valor del estatismo del UC es un parámetro cuyo ajuste en situaciones más o menos desfavorables, podría ayudar a evitar casos de deslastre de carga.

5. Conclusiones, contribuciones y trabajo futuro

En este proyecto se propone un esquema de deslastre de cargas robusto y eficiente, basado en escalones de deslastre de potencia demandada que entran cuando la frecuencia y su derivada alcanzan determinados valores umbrales.

La eficiencia del esquema de UFLS puede conseguirse mediante la aplicación de un algoritmo de optimización para funciones no lineales como el algoritmo genético (GA), para así ajustar los parámetros del esquema minimizando la cantidad de potencia deslastrada. El GA es un método heurístico de resolución de problemas de optimización difíciles, con el que se ha comprobado que se obtienen buenos resultados en problemas relacionados con la estabilidad de los sistemas.

5.1 Conclusiones en relación con la respuesta del sistema sin esquema de deslastre de carga y sin ultra condensador

Observando la respuesta de la frecuencia del sistema ante distintas perturbaciones, sin la actuación del esquema UFLS ni del UC, se concluye que en demasiados casos la frecuencia del sistema se vuelve inestable o adopta valores demasiado alejados de 50 Hz. En particular, se vuelve inestable en uno de los cuatro escenarios típicos que es empleado en el diseño conjunto del esquema de deslastre de carga y parámetros de control del UC. Esta situación es del todo inadmisibles por lo que, como mínimo, será necesaria la intervención del deslastre de carga.

5.2 Conclusiones del impacto de la introducción de UFLS y del UC en el sistema eléctrico de potencia aislado

El impacto que puede provocar una perturbación en el sistema, como puede ser la pérdida de un grupo generador, puede ser más o menos grave dependiendo del escenario de generación que se plantee y la magnitud de la pérdida en relación con dicho escenario de generación.

En cualquier caso es lógico pensar, que en un pequeño sistema de potencia aislado sea cual sea la pérdida, supondrá un alto porcentaje de generación, por lo que el impacto de la perturbación puede en muchos casos llevar a la inestabilidad de la frecuencia. De esto, se deduce que cualquier medida de compensación de la perturbación como el UFLS o UC, podrá tener un impacto positivo en cuanto a la estabilidad, ya que ambas

son medidas que favorecen a la regulación primaria de la frecuencia, facilitando el equilibrio entre carga y generación.

5.2.1 Conclusiones del impacto de la introducción de UFLS optimizado

El impacto de la introducción de un esquema de UFLS supone una implementación en la preservación de la seguridad del sistema, a la vez que un sacrificio con respecto al abastecimiento eléctrico completo de las cargas conectadas a la red, en el momento de una perturbación.

En cualquier caso y en base a los resultados obtenidos, claramente la actuación de un esquema de deslastre de carga optimizado en un sistema de potencia como el de la isla de La Palma, mejora significativamente la respuesta de la frecuencia manteniendo un compromiso con la potencia deslastrada, que nunca alcanza valores demasiado elevados y es un 38 % menos con respecto de la situación en la que existe un esquema UFLS con los parámetros actuales de la isla de La Palma.

Mientras que cuando este esquema no participa en muchos casos (incluido uno de los casos típicos) el sistema se vuelve inestable, con el esquema UFLS optimizado, de entre todos los escenarios y perturbaciones posibles en ninguno se vuelve inestable. Además, los valores máximos y mínimos de frecuencia están mucho más acotados en torno a 50 Hz.

En caso de que no existiera la posibilidad de implementar una actuación así en un sistema de potencia aislado, esta opción sería aceptable y razonablemente segura para el sistema.

5.2.2 Conclusiones del impacto de la introducción de UFLS y UC conjuntamente

En esta sección se explican las ventajas que tiene no solo la introducción conjunta de un esquema de deslastre de carga optimizado y un ultra condensador con parámetros de control también optimizados, en contraste con la simple introducción de un UC.

El impacto de la introducción conjunta de un esquema de deslastre de carga optimizado y un ultra condensador con parámetros de control también optimizados, es muy positivo

con respecto al caso en que no existe ninguno de los dos dentro del sistema o solo alguno de los dos está optimizado.

Esto se fundamenta en la reducción del 80,25 % del deslastre, que se produce cuando se introduce el esquema UFLS y el UC optimizados conjuntamente, respecto de la situación en que está solo el esquema de deslastre actual.

La introducción, simplemente de un UC con los parámetros actuales en el sistema con el esquema UFLS actual, igualmente supone una reducción muy elevada del deslastre respecto de la situación en que solo existe el esquema UFLS actual, del 71,3 %.

Pero lo cierto es que merece la pena realizar la optimización conjunta, ya que se deslastra un 31,1 % menos de carga que en la situación en la que no hay optimización.

Otra cuestión, es que se logra evitar con el esquema UFLS y UC optimizados como en el caso en que el esquema UFLS está optimizado, la inestabilidad en todas las situaciones, además de que se ve cómo mejora la respuesta con respecto a las frecuencias máximas y mínimas, lo cual hace de dicha optimización aún más aconsejable.

Es importante mencionar el hecho de que en cualquiera de los escenarios y perturbaciones simuladas, el UC optimizado supone una disminución en cuanto a la cantidad de carga deslastrada llegando en muchos casos a evitarla, respecto a los casos en los que el UC no está optimizado. Esto da aún más solidez a la optimización.

Con ello, puede concluirse que en cualquier caso la introducción de un UC con parámetros de control optimizados siempre supondrá un beneficio en cuanto a la estabilidad de la frecuencia y la cantidad de carga deslastrada, tras producirse una perturbación.

5.3 Conclusiones en relación al impacto de la variación de los parámetros de control del ultra condensador en la respuesta del sistema

Al realizar distintas simulaciones con los parámetros de control del UC optimizados, pero variando el valor del Tail Control, se ha observado como parece ser lo más determinante a la hora de optimizar el deslastre de carga y la respuesta de la frecuencia

del sistema. Cuanto más se ajusta a la descarga del UC a lo impuesto por este control, mejores son los resultados generalmente.

Es tan determinante, como que el cambio de E_{tail} de 70 a 30%, consigue deslastrar para todos los escenarios y pérdidas un 25% menos.

Otra conclusión que se obtiene de lo anterior, es que hay muchas soluciones óptimas de la parametrización planteada. Pero no es indiferente la elección de unas u otras, ya que no siempre tienen por qué sucederse las perturbaciones solo durante los escenarios típicos en un sistema de potencia.

Además, en ningún caso es más beneficioso dejar la descarga del UC “libre”, fijando el E_{tail} en 100%, ya que aumenta la cantidad de carga deslastrada y empeora la respuesta de la frecuencia del sistema.

5.4 Conclusiones en relación con la solución teniendo en cuenta posible fallo del dispositivo UC

En esta sección se explican las conclusiones extraídas a partir de resolver el problema de optimización teniendo en cuenta posibles fallos en la intervención del UC.

En los escenarios en los que falla el UC lógicamente se deslastra menos cantidad de carga con el esquema optimizado considerando dichos fallos. Pero globalmente, el total considerando los ocho escenarios es ligeramente peor. No compensa la mejora ante situaciones de fallo, con el empeoramiento de la respuesta cuanto todo funciona correctamente.

Además, los resultados del total de deslastre para todos los escenarios son muy similares, por lo que parece no merecer la pena considerar dicho fallo del UC haciendo esta aproximación en la que no se contempla la verdadera probabilidad de fallo.

5.5 Conclusiones en relación a la solución con mayores restricciones

En esta sección se explican las conclusiones extraídas a partir de los resultados de la optimización del problema inicial pero con mayores restricciones.

Para los cuatro escenarios típicos, es cierto que siempre será beneficiosa la implantación de los resultados de la optimización más restrictiva, ya que el deslastre en este caso es el

mismo que ocurre con la optimización inicial. No sucede lo mismo al simular todos los escenarios en los que el total de potencia deslastrada es 12 % mayor que en caso inicial.

Por tanto, a la hora de considerar este diseño en vez del inicial, se deberá estudiar estadísticamente la posibilidad de que ocurran deslastes incompletos y en caso de ser una probabilidad elevada, sería conveniente aproximar la imposición de restricciones de forma menos aproximada de lo que se hace en este proyecto.

5.6 Conclusión en relación con cambios en el tamaño del UC

En base a los resultados obtenidos en la optimización en la que se incorporan como variables decisionales el tamaño el UC, se puede decir que dicha incorporación es ciertamente favorable, ya que se obtienen resultados a favor de la estabilidad de frecuencia y de reducción de la cantidad de carga deslastrada total, como se ha demostrado en el capítulo 4.7. La ligera variación del tamaño del UC, provoca una reducción del deslastre de carga en un 18% respecto al valor optimizado con el UC predeterminado.

En los casos del tamaño de UC optimizado y de 4MW-40MWs, las frecuencias están acotadas entre valores similares más próximos a 50 Hz de lo que lo estaban con el UC de 4MW-20MWs, con lo cual estas opciones se pueden considerar mejores.

La optimización con un tamaño del UC 4MW-40MWs, solo se aprecia considerablemente en los casos en los que la pérdida en la generación es de un porcentaje alto, es decir que una mayor capacidad energética del UC solo es verdaderamente beneficiosa para ocasiones de perturbaciones relativamente graves y siempre es peor que el caso en que el tamaño de UC está optimizado.

La optimización con un tamaño del UC 8MW-40MWs, empeora considerablemente la cantidad de potencia deslastrada respecto al resto de casos.

Entonces, se concluye que por un lado, siempre será bueno incorporar el tamaño del UC dentro de la optimización.

Por otro lado, considerar otros tamaños de UC puede llegar a reducir el deslastre de carga como es el caso de un tamaño del UC 4MW-40MWs, pero también puede

aumentarlo como un tamaño del UC 8MW-40MWs. Por lo tanto, no es cierto que el mayor tamaño mejore necesariamente la respuesta de un sistema ante perturbaciones.

5.7 Conclusión en relación con la comparativa entre optimización para escenarios desfavorables y no especialmente desfavorables

En esta sección, se han obtenido conclusiones bastante interesantes respecto a la sensibilidad de los parámetros óptimos de control del UC en relación con la magnitud de la perturbación que ocurra en el sistema aislado.

En el caso de la optimización para escenarios muy desfavorables (50% de la generación perdida), llama la atención cómo el resultado de la optimización del control del UC, es muy similar al obtenido en la optimización del problema para los cuatro escenarios típicos. El estatismo del UC, es el parámetro que más difiere, es tres veces menor que el obtenido en la optimización con los cuatro escenarios típicos. Lo que se puede interpretar como que, es necesario en estos casos más delicados, una descarga más controlada del UC. Esto, como se explica en el anexo sobre el impacto de los parámetros del UC, se consigue a menores estatismos.

En la optimización para escenarios menos desfavorables (perdidas del 20-25 %) el resultado de la optimización del control del UC, es muy similar, también en este caso, al obtenido en la optimización del problema para los cuatro escenarios típicos. El estatismo del UC, es también el parámetro que más difiere, es el 33% mayor que el obtenido inicialmente.

Por lo tanto, puede afirmarse que para casos en los que las perturbaciones no son tan importantes el valor de estatismo del UC es beneficioso que crezca y al contrario cuando las perturbaciones son graves.

Se puede decir que, al encontrarse valor óptimo de 0,003 pu centrado entre los valores óptimos en casos más y menos desfavorables, la elección de los cuatro escenarios típicos iniciales es buena, ya que se tiene un compromiso entre los parámetros que favorecen la respuesta del sistema en situaciones en las que la perturbación es más grave y las situaciones en las que no lo es.

Además se deduce que el valor del estatismo del UC es un parámetro cuyo ajuste en situaciones más o menos desfavorables, podría ayudar a evitar casos de deslastre de carga.

5.8 Trabajo futuro

La implementación más allá de este proyecto, de medidas a favor de la reducción del deslastre de carga y la estabilización de frecuencia en pequeños sistemas de potencia aislados, es con seguridad posible.

Por ejemplo, como ya se ha dicho lo ideal, en cuanto al valor de la estatismo del UC es que sea tal que la descarga del UC sea lo más parecido a aquello que se fija en el Tail-Control. Una forma de implementar la búsqueda de este valor de estatismo, podría ser añadiendo como parámetro a optimizar el orden de la curva que define la disminución de la potencia de descarga del UC en el Tail-control.

Por otro lado, se ha demostrado cómo para perturbaciones de mayor o menor gravedad, varían los valores de los parámetros óptimos del UC. Se podría tratar de reducir más el deslastre total de carga, considerando la posibilidad de que algunos parámetros del control del UC se adaptaran a la magnitud de la perturbación.

Además, otra forma más realista de abordar este problema, sería considerando la inmersión de las energías renovables en el sistema de potencia.

6. Referencias

[Endesa]: www.endesa.com.

[Cine,09]: www.cinergia.coop. 2009.

[Deli,12]: Gauthier Delille, Bruno François and Gilles Malarange. «Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and solar Generation on Isolated Power System's Inertia.»2012

[Exio,14]: <http://www.exiomgroup.com/>. 2014.

[Lavo,13]: <http://www.lavozdelapalma.com/>.2013

[Maik,08]: <http://maikelnai.elcomercio.es>. 2008.

[Dida,15]: <https://didactalia.net>. 2015.

[Rouc,15]: L. Sigrist,L. Rouco, E. Lobato, I. Egido, L. Díez Maroto. , «Sizing and Controller Setting of Ultracapacitors for Frequency Stability Enhancement of Small Isolated Power Systems.» . 2015.

[REE]: www.REE.es

[Sigr,10]: Sigrist, Lukas. «Diseño de esquemas de deslastre de cargas por frecuencia de pequeños sistemas aislados». 2010.

[scie]: www.scielo.cl

7. ANEXOS

7.1 Impacto de la variación de los parámetros de control del ultra condensador en la respuesta del sistema

En este anexo se explican de forma detallada algunos parámetros optimizados del control para el óptimo funcionamiento del UC en los escenarios de simulación elegidos y se compara la respuesta del sistema ante el cambio en dichos parámetros.

- El estatismo del condensador (R_{UC}) que debe adoptar un valor próximo a 0,0022 pu (en unitarias del ultra condensador) para la optimización de la respuesta del sistema, un valor bastante menor que el típico de un generador convencional. Es un resultado sorprendente, ya que antes de optimizar se tomaron ciertos valores de R_{UC} para observar cómo se comportaba el sistema y, tras realizar un tanteo inicial y habiendo leído el artículo [9] se pensó que dicho valor óptimo de estatismo tendría un valor en torno a 0,02 pu (también en unitarias del ultra condensador). En realidad el valor de 0,02 pu es un buen valor, de hecho en dos de los cuatro escenarios típicos consigue evitar el deslastre de carga, aunque no es tan bueno como el de 0,0022 pu, como se puede observar en la figura 28, ya que los mínimos y máximos, y el valor en régimen permanente de la frecuencias están más alejados de 50 Hz

A continuación, se puede observar gráficamente cómo es de determinante el valor de dicha estatismo en relación con la cantidad de carga que se deslastra, la respuesta en frecuencia del sistema y la descarga del ultra condensador. En el caso del escenario 1:

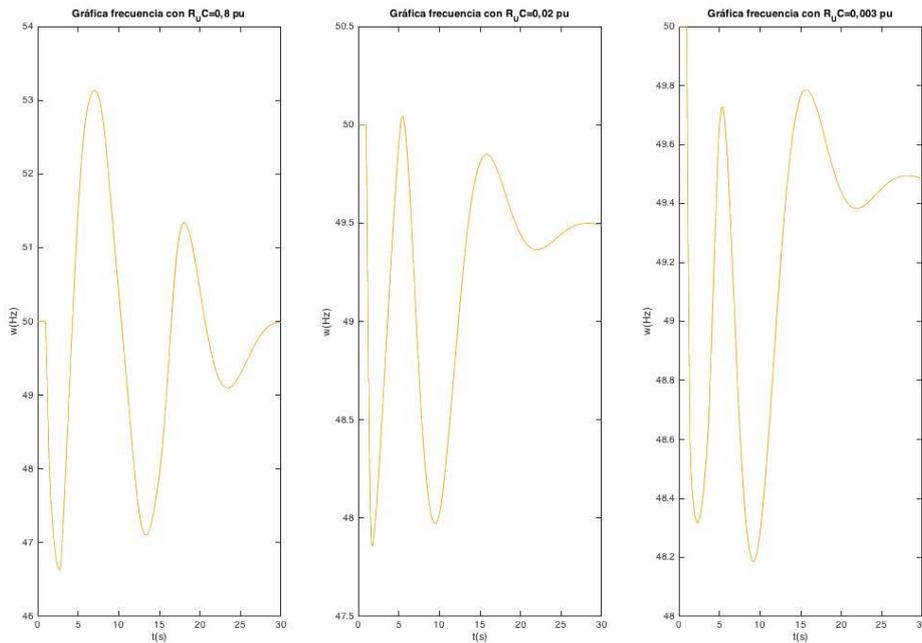


Ilustración 28: Gráfica frecuencia escenario 1 para distintos valores de R_{UC} .

Potencia deslastrada con UC			
	$R_{UC}= 0,0022pu$	$R_{UC}= 0,02pu$	$R_{UC}= 0,8pu$
Escenario 1	3,786 MW	3,786 MW	6,9685 MW

Tabla 32: Escenario 1 potencia deslastrada para distintos valores de R_{UC} .

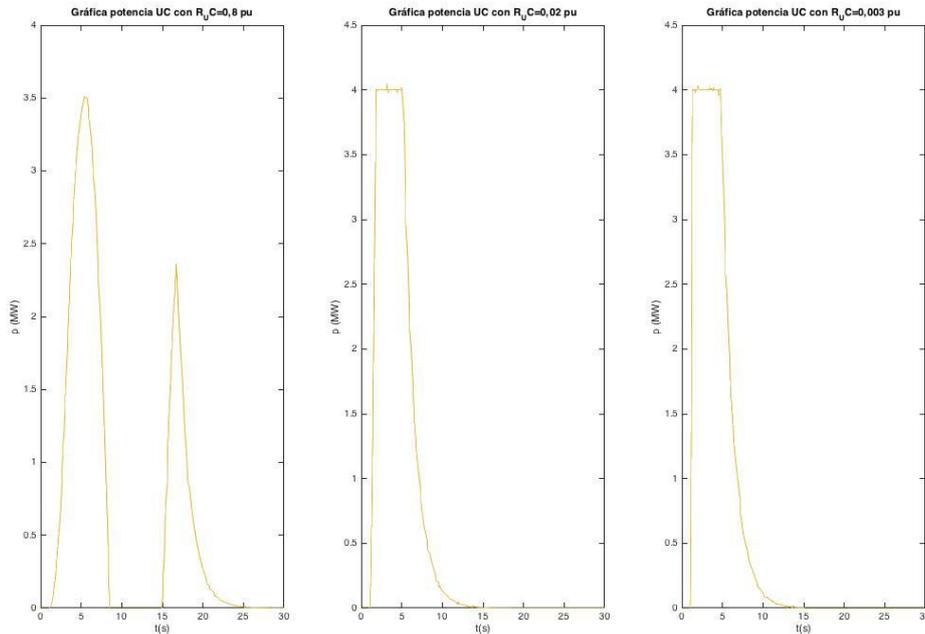


Ilustración 29: Gráfica potencia UC escenario 1 para distintos valores de R_{UC} .

Parece que para valores de estadismo del UC pequeños ($R_{UC}=0,02pu$), podría permanecer invariable la cantidad de carga deslastrada respecto al valor óptimo ($R_{UC}=0,003pu$), en cambio cuando este valor aumenta, también lo hace el efecto negativo en cuanto al deslastre, como se puede ver en la tabla comparativa 10. Respecto a la respuesta en frecuencia sí que se aprecia un cambio a peor cuando $R_{UC}=0,02pu$. Como puede observarse en la gráfica 17 empeora la frecuencia mínima de 48,1 Hz pasa a 47,7 Hz. Y cuando pasa a valer $R_{UC}=0,8pu$ es mucho peor, 46,6 Hz.

En cuanto a la descarga de potencia de UC, no sea aprecian diferencias significativas entre los casos de $R_{UC}=0,0022pu$ y $R_{UC}=0,02pu$, en cambio cuando $R_{UC}=0,8pu$ el UC nunca llega a estar descargándose a potencia máxima. La energía se descarga de forma oscilante, con dos picos de potencia, dando como resultado una descarga descontrolada del UC, que nada tiene que ver con el control impuesto.

Para poder realizar una comparativa de la que extraer conclusiones más fiables, comparo con la simulación de todas las pérdidas posibles y todos los escenarios:

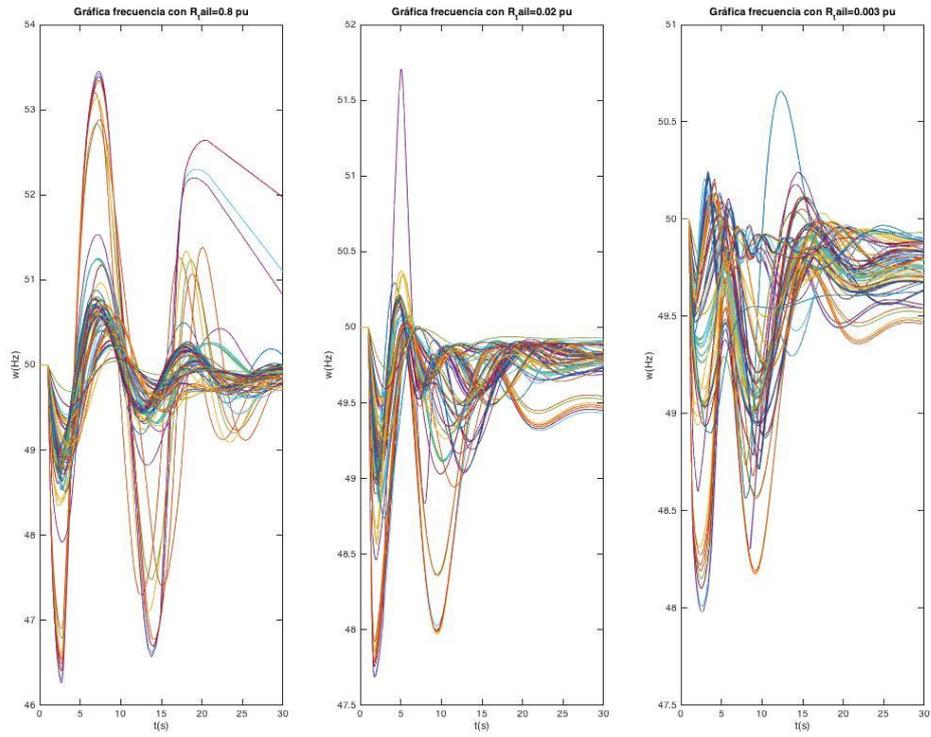


Ilustración 30: Gráfica frecuencia todos los escenarios para distintos valores de R_{UC} .

Potencia deslastrada con UC			
	$R_{UC}= 0,0022pu$	$R_{UC}= 0,02pu$	$R_{UC}= 0,8pu$
Todos	78,5921 MW	147,06 MW	318,95 MW

Tabla 33: Todos los escenarios potencia deslastrada para distintos valores de R_{UC} .

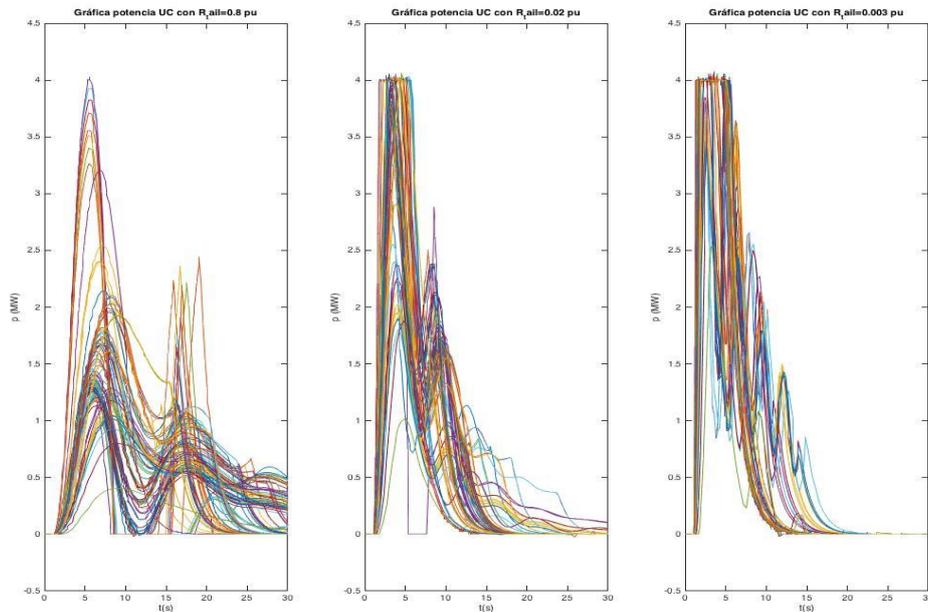


Ilustración 31 Gráfica potencia UC todos los escenarios para distintos valores de R_{UC}.

Como puede observarse en la figura 30, un UC con parámetros de control no optimizados puede en algunos casos dejar de evitar que el sistema se vuelva inestable, como ocurre en algunos casos en los que $R_{UC}=0,8pu$.

Por otro lado, aunque para los cuatro escenarios típicos el uso de los valores $R_{UC}=0,02pu$ y $R_{UC}=0,0022pu$ fuese prácticamente indistinto porque se deslastraba lo mismo, cuando se comprueba el deslastre total para todos los escenarios se ve cómo es mucho menor para $R_{UC}=0,0022pu$, como muestra la tabla 11.

En cuanto a la descarga de potencia del UC, que se muestra en la figura 31, si $R_{UC}=0,0022pu$ (óptimo) la tendencia general de las respuestas es a aproximarse a la curva teórica impuesta con el Tail Control, es decir que, cuando la energía consumida es del orden del 70% de la máxima, la potencia comienza a disminuir linealmente. En nuestro caso, como el condensador es de 20MWh y 4MW es lógico que la disminución de la potencia sea a los 5 s de producirse la perturbación, como se puede ver que ocurre en nuestro caso. Un valor más elevado de estatismo como $R_{UC}=0,02pu$, provoca una ralentización de la descarga, ya que como se puede observar en la figura 31, el UC deja de descargar a potencia máxima más pronto, si llega en algún momento a hacerlo.

Por último, un valor de estatismo aún más elevado, como de $R_{UC}=0,8pu$, provoca que en prácticamente ningún caso se descargue el UC a potencia máxima. La energía se descarga de forma oscilante, con dos picos de potencia, dando como resultado una descarga descontrolada del UC, que nada tiene que ver con el control impuesto.

- La inercia instantánea emulada del UC debe adoptar un valor próximo a 10 s para optimizar la respuesta del sistema, valor bastante superior al de un generador ya que debe proporcionar más cantidad de potencia durante el comienzo del transitorio, acelerando su respuesta y reduciendo el ROCOF inicial, frente a lo que provocaría una inercia menor. Se muestra gráficamente a continuación, la respuesta del sistema frente a distintos valores de H_{UC} .

En el caso del escenario 1:

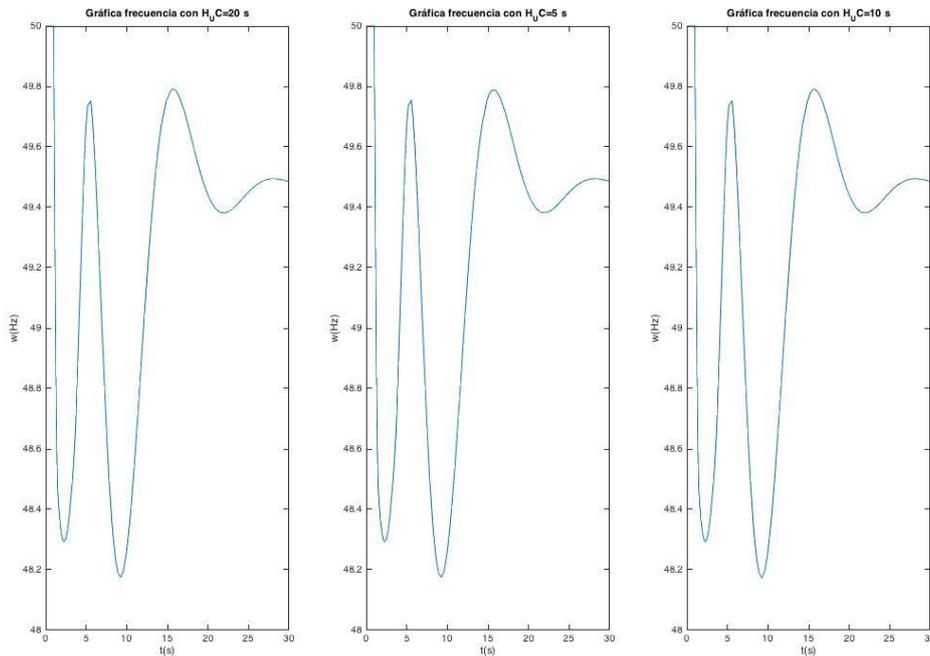


Ilustración 32: Escenario 1 respuesta para distintos valores de H_{UC} .

Potencia deslastrada con UC			
	$H_{UC}=10,4s$	$H_{UC}=5s$	$H_{UC}=20s$
Escenario 1	3,786 MW	3,786 MW	3,786 MW

Tabla 34: Escenario 1 potencia deslastrada para distintos valores de H_{UC} .

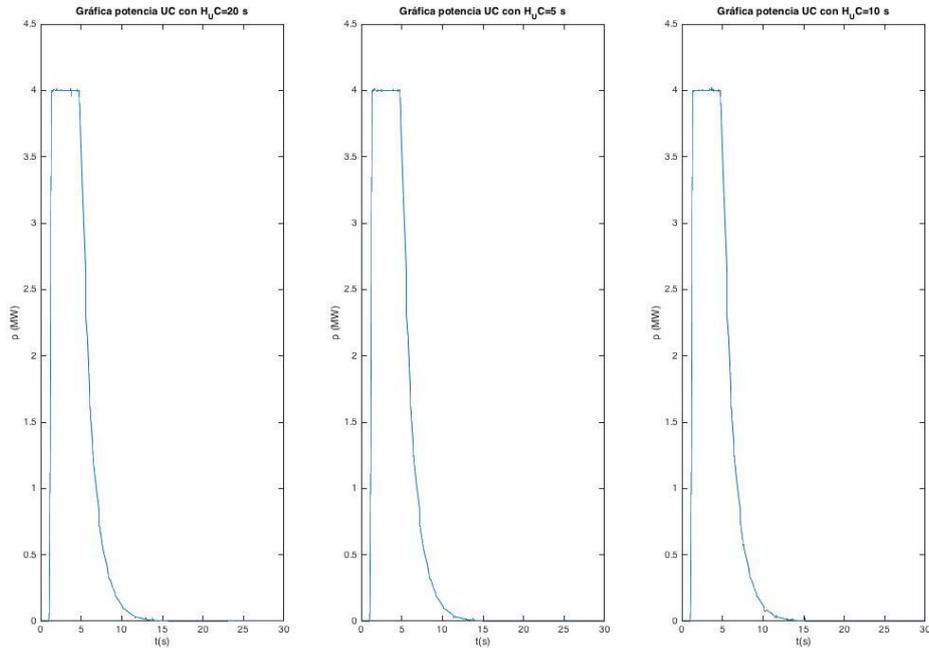


Ilustración 33: Gráfica potencia UC escenario 1 para distintos valores de H₀C.

Solo observando este caso se podría deducir que un cambio de inercia instantánea emulada en el UC no afecta significativamente a la respuesta del sistema ante una perturbación. Ya que, las respuestas tanto de la frecuencia, como de la cantidad de carga deslastrada y como de la descarga de potencia del UC, son muy similares.

Para poder realizar una comparativa de la que extraer conclusiones más fiables, se compara con la simulación de todas las pérdidas posibles y todos los escenarios, que se muestra en las siguientes figuras y tabla.

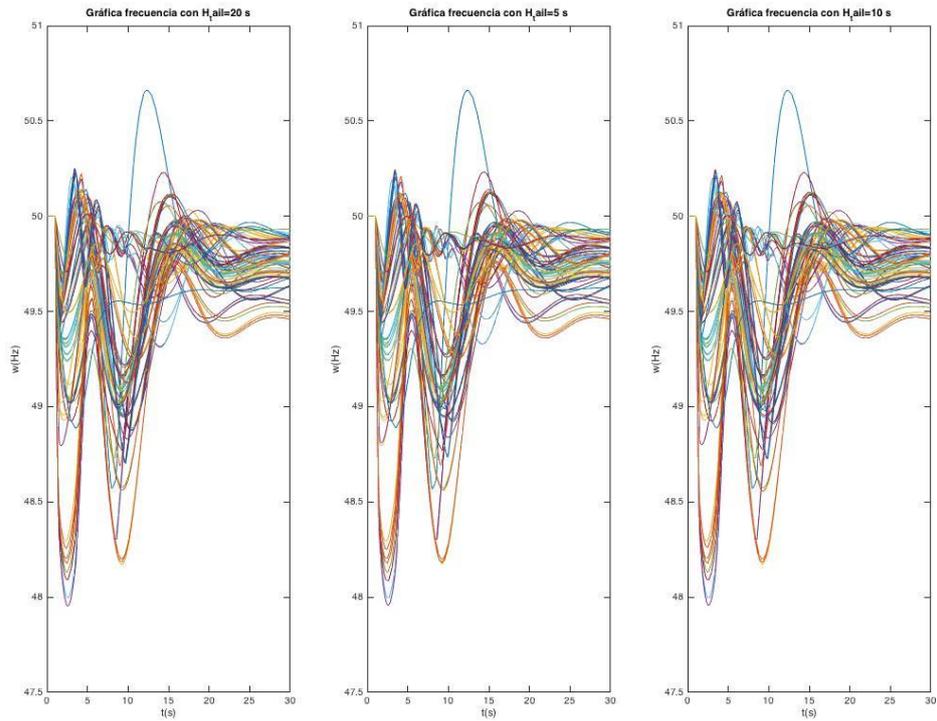


Ilustración 34: Gráfica frecuencia todos los escenarios para distintos valores de H_{UC} .

Potencia deslastrada con UC			
	$H_{UC}=10,4s$	$H_{UC}=5s$	$H_{UC}=20s$
Todos	78,5921MW	78,5921MW	78,5921MW

Tabla 35: Escenario 1 potencia deslastrada para distintos valores de H_{UC} .

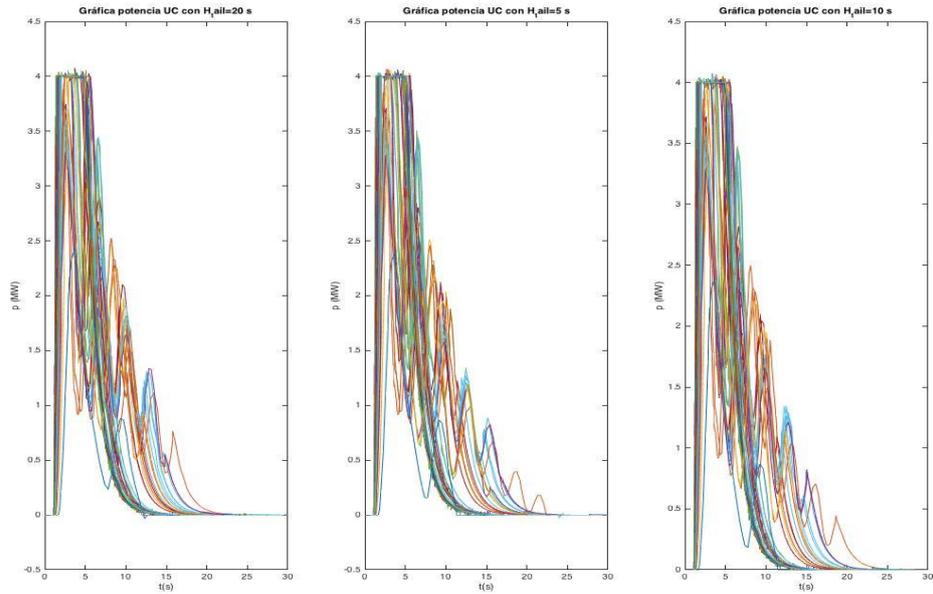
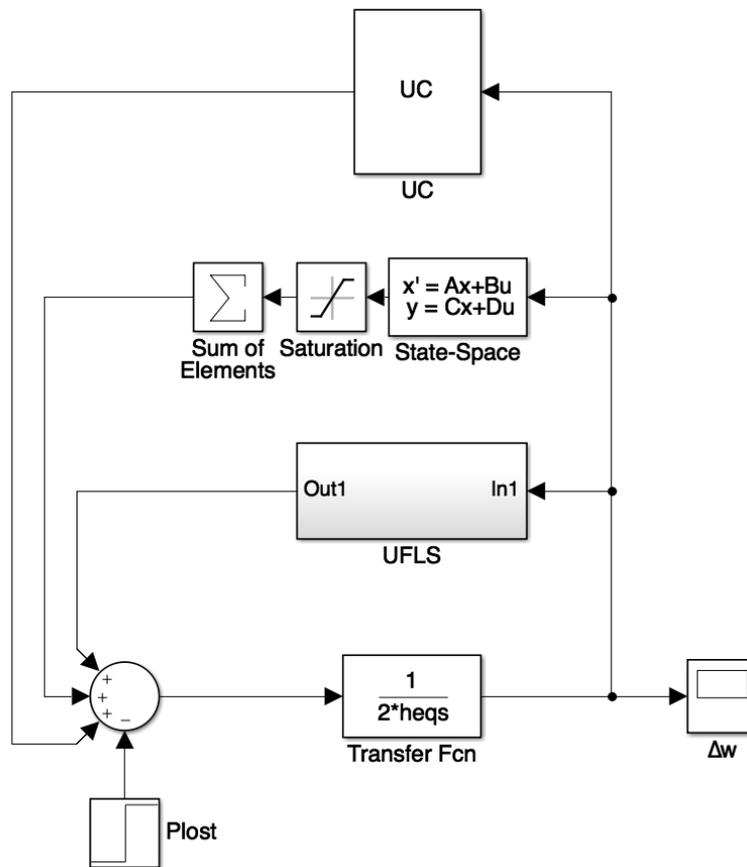


Ilustración 35: Gráfica potencia UC todos los escenarios para distintos valores de H_{UC} .

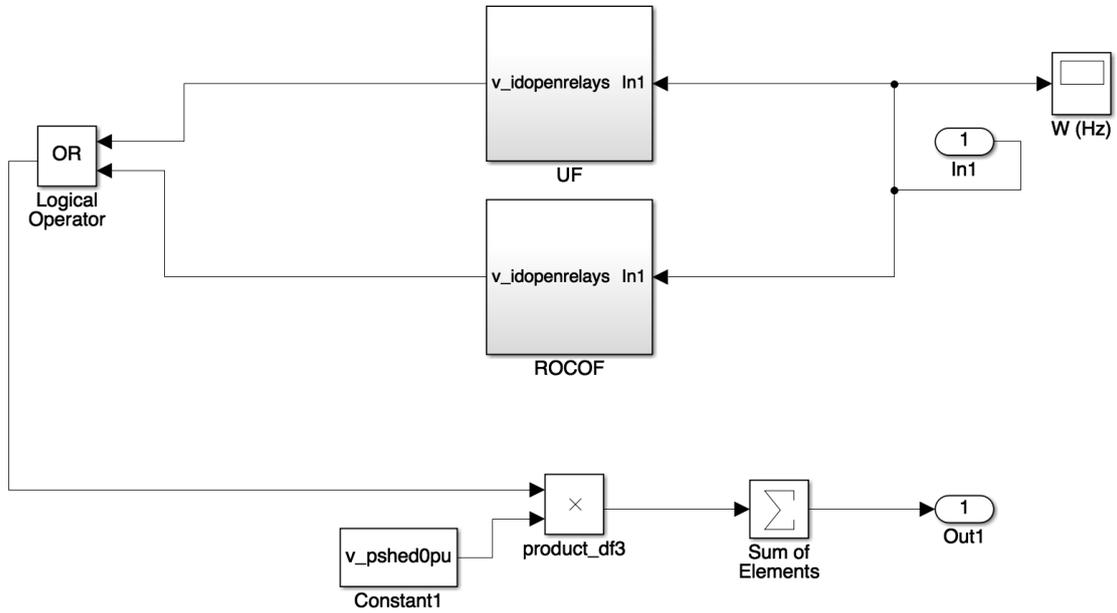
Los resultados en este caso son muy parecidos a los que se obtenían del análisis de solo el primer escenario. Las respuestas de la frecuencia y de potencia deslastrada son muy parecidas para los tres valores de H_{UC} . Pero difieren de manera más apreciable, las respuestas de la potencia descargada del UC. En ese caso, existe una pequeña diferencia entre las tres respuestas que muestra la figura 35. Cuando $H_{UC}=10,4$ s (valor óptimo) y $H_{UC}=5$ s, se alarga de forma general la descarga del UC en alrededor de 4 s. Como es lógico, con un valor de $H_{UC}=20$ s la descarga es más rápida. Con ello, se respeta en los tres casos, el tiempo de descarga a potencia máxima fijado en el Tail Control.

7.2 Diagramas de bloques

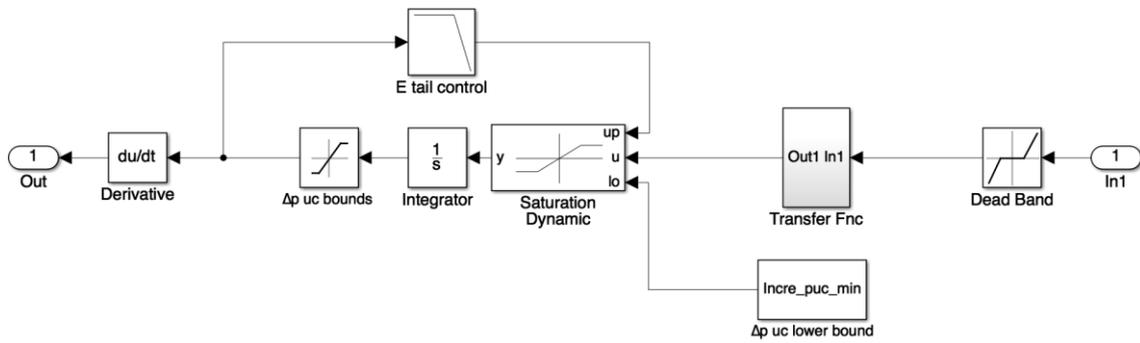
7.2.1 Diagrama de bloques del sistema de potencia



7.2.2 Diagrama de bloque UFLS



7.2.3 Diagrama de bloques UC



7.3 Tablas esquema UFLS actual en la isla de La Palma

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,81	100,00	0,30	0,20	6,00
uf	2102	48,81	100,00	0,60	0,20	0,40
uf	3101	48,66	100	1	0,2	10,5
uf	3102	49	100	1,5	0,2	3,8
uf	2103	48,66	100	2	0,2	7
uf	1101	48,00	100,00	0,80	0,20	17,40
uf	1111	48,00	100,00	1,50	0,20	8,70
uf	3103	47,00	100,00	1,80	0,20	12,30
uf	3104	47,00	100,00	2,10	0,20	11,50
uf	1102	47	100	2,4	0,2	2,2
uf	1112	47	100	2,4	0,2	7,8
rocof	2101	49,5	-1,8	0,1	0,2	6
rocof	2102	49,5	-1,8	0,1	0,2	0,4
rocof	3101	49,3	-1,8	0,1	0,2	10,5
rocof	3102	49,3	-1,8	0,1	0,2	3,8

7.4 Tablas de resultados del diseño optimizado para los cuatro escenarios típicos

7.4.1 Resultados esquema UFLS

Type	Substation	Frequ (Hz)	ROCOF (Hz/s)	Int. delay (s)	Open. delay (s)	load (%)
uf	2101	48,7795	100,00	0,2797	0,20	6,00
uf	2102	48,7833	100	0,4997	0,20	0,40
uf	3101	48,6625	100	0,4228	0,2	10,5
uf	3102	48,6971	100	0,4855	0,2	3,8
uf	2103	47,8672	100	0,372	0,2	7
rocof	2101	49,5663	-1,5815	0,2032	0,2	6
rocof	2102	49,5198	-1,5425	0,1988	0,2	0,4
rocof	3101	49,1737	-1,0639	0,0318	0,2	10,5
rocof	3102	48,7604	-1,9043	0,19	0,2	3,8

7.4.2 Resultados parámetros de control del UC

wdb_UC (pu)	R_UC(pu UC)	H_UC(s UC)	T_f(s)	T_c(s)	Incre_pUC_max_i ni(MW)	E_Ucmax (MWs)	E_UC_tail (%)	wdb_UC(pu)
0,002	0,0022	9,8196	0,2	0,2	4	20	0,7106	0,002

7.5 Tabla de escenarios y contingencias de la isla de La Palma

Escenario	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	2,35	0,00	2,35	0,00	3,29	3,69	10,41	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	2,35	0,00	3,29	4,26	9,26	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	2,35	0,00	3,29	3,29	9,55	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	2,35	0,00	3,29	3,69	8,96	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	2,35	0,00	3,29	3,29	9,35	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	2,35	0,00	3,29	3,29	9,61	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,35	0,00	2,35	0,00	3,29	3,29	10,02	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2,53	0,00	2,53	0,00	5,84	5,84	0,00	0,00	6,63	4,00	0,00
9	2,35	0,00	2,35	2,82	4,92	4,92	0,00	0,00	6,63	6,70	0,00
10	2,41	0,00	2,41	2,82	5,59	5,59	0,00	0,00	6,63	6,70	0,00
11	2,46	0,00	2,46	2,82	5,69	5,69	0,00	0,00	6,63	6,70	0,00
12	2,49	0,00	2,49	2,82	5,77	5,77	0,00	0,00	6,63	6,70	0,00
13	2,58	0,00	2,58	2,82	5,96	5,96	0,00	0,00	6,63	6,70	0,00
14	2,40	0,00	2,40	2,82	5,56	5,56	0,00	0,00	6,63	6,70	0,00
15	2,35	2,35	2,35	2,82	5,12	5,12	0,00	0,00	6,63	4,00	0,00
16	2,35	2,35	2,35	2,82	4,74	4,74	0,00	0,00	6,63	4,00	0,00
17	2,35	2,35	2,35	2,82	4,22	4,22	0,00	0,00	6,63	4,00	0,00
18	2,35	2,35	2,35	0,00	3,29	3,29	9,21	0,00	6,63	0,00	0,00
19	2,35	2,35	2,35	0,00	3,29	3,29	8,68	0,00	6,63	0,00	0,00
20	2,35	2,35	2,35	0,00	3,29	3,29	9,35	0,00	6,63	0,00	0,00
21	2,35	2,35	2,35	0,00	3,71	3,71	11,38	0,00	6,63	0,00	0,00
22	2,35	2,35	2,35	0,00	3,58	3,58	11,38	4,85	6,63	0,00	0,00
23	2,35	2,35	2,35	0,00	3,63	3,63	11,38	0,00	6,63	0,00	0,00
24	2,35	2,35	2,35	0,00	3,29	3,29	6,63	0,00	6,63	0,00	0,00
25	0,00	0,00	2,35	0,00	3,29	3,29	9,16	0,00	0,00	0,00	0,00
26	2,35	2,35	2,35	0,00	3,58	3,58	11,38	4,85	6,66	0,00	0,00

7.6 Tabla de características de los generadores de la isla de La Palma

Bus	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
k (on MBASE, =1/R)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	21,25	20,00	20,00	20,00
H (s) (on MBASE)	1,75	1,75	1,75	1,73	2,16	1,88	2,10	6,50	2,10	2,10	2,10
MBASE (MVA)	5,4	5,4	5,4	6,3	9,4	9,6	15,75	26,82	14,5	14,5	14,5
Pmax (MW)	4	4	4	4,5	7	7	12	22,8	12	12	12
Pmin (MW)	2,5	2,5	2,5	3	3,5	3,5	7	0	7	7	7
B1	1,44	1,44	1,44	1,44	1,32	1,43	1,32	0,89	1,32	1,32	1,32
B2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A1	18,64	18,64	18,64	18,64	18,38	18,66	18,31	5,66	18,31	18,31	18,31
A2	3,98	3,98	3,98	3,98	2,70	3,85	2,71	3,48	2,71	2,71	2,71