

# Un esquema centralizado de deslastre de cargas para pequeños sistemas aislados

J. Rodríguez<sup>1</sup>, M. González<sup>1</sup>, J. R. Diago<sup>1</sup>, C. Domingo<sup>2</sup>, I. Egido<sup>2</sup>, P. Centeno<sup>2</sup>, F. Fernández<sup>2</sup>, L. Rouco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Endesa Generación

Dirección de Ingeniería e I+D, Subdirección de Ingeniería, Área Eléctrica y Control  
Ribera del Loira, 60, 28042 Madrid  
Tel.: +34 912139795, Fax: +34 912139796, e-mail: migonzalez@endesa.es

<sup>2</sup>Universidad Pontificia Comillas

E.T.S. de Ingeniería (ICAI), Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)  
Alberto Aguilera, 23, 28015 Madrid  
Tel.: +34 915422800, Fax: +34 915411860, e-mail: carlos.domingo@iit.upco.es

## 1 Introducción

Los esquemas de deslastre de cargas son vitales para asegurar la estabilidad de pequeños sistemas aislados cuando ocurre la desconexión de un generador [1]. Estos sistemas eléctricos se caracterizan por el reducido número de generadores conectados y su baja inercia (típicamente accionados por motores diesel). Cuando un generador se desconecta se pierde un importante porcentaje del total de la generación, la frecuencia del sistema disminuye muy rápidamente y se pueden alcanzar valores muy bajos si no se deslastra una parte de la carga. Por otra parte, es preciso resaltar que la reserva rodante puede no ser suficiente para compensar la generación perdida. En efecto, se ha encontrado que en todo sistema hay un valor de la reserva rodante a partir del cual su incremento no impide el deslastre de cargas [2].

Los esquemas de deslastre de cargas utilizan habitualmente relés de subfrecuencia y de derivada de frecuencia. El relé de subfrecuencia desconecta una parte de la carga cuando la frecuencia se encuentra por debajo de un determinado valor durante un cierto tiempo. Los relés de derivada de frecuencia actúan cuando la pendiente de la frecuencia alcanza el valor ajustado. De esta forma se evita el colapso del sistema cuando la frecuencia disminuye tan rápidamente que los relés de subfrecuencia desconectarían la carga demasiado tarde [3].

Un esquema de deslastre de cargas ideal desconectaría únicamente la fracción de carga que no puede ser aportada por la reserva rodante. El ajuste de los esquemas de deslastre de cargas por frecuencia para lograr el citado objetivo es difícil y no es robusto. En otras palabras un ajuste válido en un caso puede no serlo en otro caso. Por tanto, en el ajuste de esquemas de deslastre de cargas se prima la seguridad frente su

eficiencia. Una alternativa a los esquemas de deslastre de cargas por frecuencia es un esquema de deslastre centralizado siempre que su implantación práctica sea sencilla y fiable.

Un esquema de deslastre centralizado desconecta la carga necesaria para asegurar la estabilidad del sistema después de la desconexión de un generador. Es necesario implantar un sistema que monitorice el estado de los generadores y las cargas y a través del cual se puedan enviar señales de apertura a los interruptores de las líneas. La aplicación de estos esquemas centralizados es más sencilla en sistemas aislados de pequeño tamaño, ya que los interruptores de las líneas de distribución están ubicados en la propia subestación y no es necesario el empleo de complejos sistemas de comunicaciones. Si se dan estas condiciones, el sistema de deslastre centralizado se puede implementar simplemente en un PLC (Programmable Logic Controller), cuyas señales de entrada sean la generación de cada grupo y la demanda de cada línea y cuyas salidas sean las señales de apertura a los interruptores de cada línea.

Este artículo evalúa la viabilidad de estos esquemas de deslastre centralizado en sistemas eléctricos aislados de pequeño tamaño. En concreto, se ha estudiado la implantación de este esquema en el sistema eléctrico de Ceuta. Las prestaciones del esquema de deslastre centralizado se comparan con las prestaciones de un sistema de deslastre de cargas por frecuencia convencional.

El artículo está organizado como sigue. La sección 2 detalla los principios del esquema centralizado de deslastre de cargas. La sección 3 describe el sistema eléctrico de Ceuta. La sección 4 describe el procedimiento de selección de las líneas a desconectar. La sección 5 determina la pendiente especificada al

sistema centralizado de deslastre de cargas para Ceuta. La sección 6 contiene la validación del esquema propuesto.

**Palabras Clave:** Pequeños sistemas eléctricos aislados, deslastre de cargas, relés de frecuencia y PLC (Programmable Logic Controller).

## 2 Deslastre centralizado

El esquema de deslastre centralizado monitoriza la generación de cada grupo y la demanda de las líneas y determina las cargas a deslastrar para preservar la estabilidad del sistema cuando se desconecta un grupo.

La cantidad de carga a deslastrar se calcula para que la pendiente de caída de la frecuencia se reduzca hasta el valor seleccionado que asegure su recuperación por medio de los reguladores de carga - velocidad de los grupos generadores. La pendiente de la frecuencia  $df/dt$  después de la desconexión de un generador depende de la generación perdida  $\Delta P_G$ , de la cantidad de carga deslastrada  $\Delta P_L$  y de la inercia del sistema  $H_e$  según [4]:

$$\frac{df}{dt} = 50 \cdot \frac{\Delta P_G - \Delta P_L}{2 \cdot H_e} \quad (1)$$

Una forma de calcular el valor de la carga a deslastrar puede ser:

$$\Delta P_L = \Delta P_G - \frac{2 \cdot H_e}{50} \cdot \frac{df}{dt} \quad (2)$$

De esta forma el valor de carga a deslastrar  $\Delta P_L$  es función de la pendiente que se desee alcanzar después de desconectar la carga.

Para fijar el valor de la pendiente de caída de la frecuencia se han de considerar varios aspectos, por una parte se pretende que el valor de frecuencia mínima del sistema cuando se produce la desconexión de un grupo no sea inferior a los valores mínimos admisibles y mantener su estabilidad. Por otra parte, también, se trata de deslastrar la menor cantidad de carga posible

El primer objetivo se consigue con valores de pendiente cercanos a cero. El segundo objetivo exige relajar este límite y permitir que la frecuencia caiga con una mayor pendiente (deslastrando una cantidad de carga menor) para que actúen los reguladores carga - velocidad de los grupos de generación y se use la reserva rodante de éstos. Por tanto, se debe encontrar un compromiso entre ambos objetivos.

Una vez establecida la derivada de frecuencia y detectada la desconexión de un grupo, el esquema

deslastre determina la combinación de líneas que deben ser desconectadas para cubrir el valor de carga a deslastrar  $\Delta P_L$  calculado anteriormente. Se pueden establecer diferentes niveles de prioridad para las cargas, de forma que los consumos que se estimen esenciales sólo se desconecten en casos extremos.

## 3 Descripción del sistema

El sistema eléctrico de Ceuta es un sistema eléctrico aislado de pequeño tamaño. La distribución de energía eléctrica es radial desde barras de la central. Por tanto, es un sistema adecuado para la implantación de un esquema de deslastre centralizado. Una representación simplificada de este sistema se muestra en el diagrama unifilar de la Figura 1.

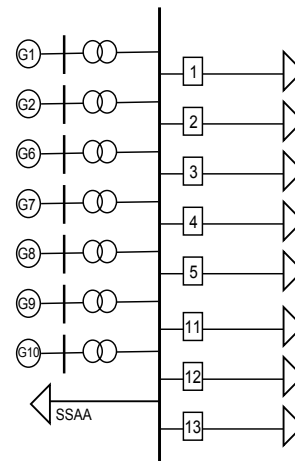


Figura 1. Unifilar simplificado del sistema eléctrico de Ceuta.

La central de Ceuta cuenta con siete generadores (cuya capacidad máxima varía entre 6 y 13 MW), accionados por motores diesel, cuyos datos se muestran en la Tabla 1. También detalla despachos de generación extremos que definen los escenarios considerados en las experimentaciones numéricas realizadas a lo largo del artículo. Estos despachos son muy exigentes desde el punto de vista de la evaluación de los esquemas de deslastre de cargas por el reducido número de grupos conectados.

	Valle P Gen (MW)	Punta P Gen (MW)	Intermedio P Gen (MW)	P max (MW)	H (s)
GR1	4	3	0	5.8	2.114
GR2	0	3	4.2	5.8	2.114
GR6	4	3.5	0	5.8	1.429
GR7	0	4.5	4.1	6.7	1.440
GR8	0	7	6.5	9.5	1.381
GR9	11.5	10	10.4	12.3	1.918
GR10	0	0	0	12.3	2.051
TOTAL	19.5	31	25.2		

Tabla 1. Características de los generadores de la central de Ceuta para los diferentes escenarios estudiados.

La subestación de la central de Ceuta cuenta con una barra de la que se alimentan ocho líneas de distribución

a 15 kV y los servicios auxiliares de la central (ver Figura 1). Las diferentes líneas están equipadas con interruptores para su maniobra. El actual esquema de deslastre de cargas por frecuencia está basado en relés de subfrecuencia (cinco escalones) y de derivada de frecuencia (cuatro escalones ajustados entre 1.5 Hz/s y 0.5 Hz/s).

#### 4 Determinación de de las líneas a desconectar

El esquema centralizado de deslastre de cargas construye cada segundo una tabla que proporciona para cada hipótesis de desconexión de grupo las líneas que deben ser desconectadas.

El sistema recoge el estado de la generación y la carga de cada línea. Determina, a partir de la pendiente de la frecuencia seleccionada, para cada hipótesis de desconexión de grupo la carga total a deslastrar. Después determina las líneas a desconectar para que la potencia desconectada sea al menos el valor deseado.

La Tabla 2 muestra un ejemplo de la construcción de la tabla de líneas a desconectar en caso de pérdida de los grupos conectados en una situación de valle cuando la derivada de frecuencia establecida es de -1 Hz/s.

df/dt especificada = -1 Hz/s					
LOADS	GENERATORS	G1	G6	G9	
	MW	4	4	11.5	
L1	2			X	
L2	0.7	X	X		
L3	0.6		X		
L4	1.8	X			
L5	1		X		
L11	3.4				
L12	3.5			X	
L13	5			X	
SSAA	1.6				
		-2.48	-2.28	-10.48	$\Delta P_{load}$ (MW)
		2.50	2.30	10.50	$P_{shed}$ (MW)
		-0.98	-0.99	-0.98	df/dt (Hz/s)

Tabla 2. Desconexión de cargas para el escenario valle, pendiente ajustada -1 Hz/s.

En la Tabla 2,  $\Delta P_{load}$  es la carga mínima necesaria a deslastrar según la expresión (3),  $P_{shed}$  la carga realmente deslastrada en el sistema que es función de la combinación de líneas resultante y  $df/dt$  la pendiente con la que realmente cae la frecuencia tras desconectar la carga indicada por el esquema de deslastre tras perder la generación correspondiente, según la expresión (4).

Se comprueba que la carga finalmente deslastrada es sólo ligeramente superior a la carga calculada inicialmente. Ello es posible porque la carga en el sistema de Ceuta está suficientemente fraccionada.

En el caso del sistema de Ceuta es posible evaluar todas las posibles combinaciones de líneas a desconectar hasta

alcanzar el valor deseado de carga deslastrada. En sistemas en los que el número de líneas es mucho mayor se pueden emplear técnicas de búsqueda local y de optimización [5].

#### 5 Determinación de la derivada de frecuencia especificada en el sistema de Ceuta

Esta sección aborda la determinación de la derivada de frecuencia especificada en el sistema de deslastre de cargas centralizado para Ceuta.

Se elige un escenario desfavorable de la operación del sistema eléctrico. Se simula la implantación del esquema centralizado con diferentes valores de derivada de frecuencia en caso de la desconexión de cualquiera de los grupos conectados. Se elige aquel valor de la derivada de frecuencia que asegura la estabilidad del sistema ante cualquier desconexión de grupo. Después se procede a verificar que en otros escenarios de la operación del sistema eléctrico el esquema centralizado, con la derivada de frecuencia especificada, funcionan satisfactoriamente en caso de la desconexión de cualquiera de los grupos conectados.

La selección adecuada del escenario de partida es por tanto muy importante. La estabilidad del sistema ante la desconexión de un grupo depende de varios factores. Los más importantes son: el número de grupos conectados, su inercia y la reserva de potencia rodante tras la desconexión del grupo [6]. Los escenarios de valle de demanda son los más críticos debido al reducido número de grupos conectados. La desconexión de uno de los grupos supone una pérdida elevada de la generación total y este efecto es más acusado cuanto mayor sea la generación del grupo desconectado.

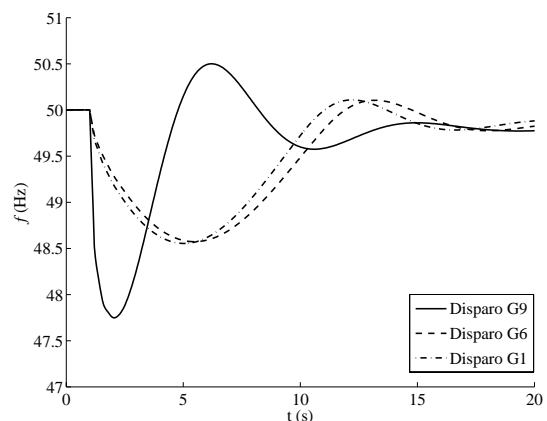


Figura 2. Variación de la frecuencia al desconectar los grupos del escenario valle, con una pendiente limitada a -1 Hz/s.

La Figura 2 muestra la respuesta de la frecuencia del sistema de Ceuta cuando se produce la desconexión en condiciones de valle de demanda de cualquiera de los

grupos conectados (El Grupo 9 está generando 11.5 MW mientras que el Grupo 6 y el Grupo 1 generan 4 MW cada uno de ellos) y considerando la actuación del esquema de deslastre centralizado con una derivada de la frecuencia especificada de -1 H/s. La pérdida del Grupo 9 produce oscilaciones en la frecuencia de mayor magnitud que cuando se desconectan grupos de menor tamaño y la pendiente inicial antes del deslastre también es muy superior. La combinación de cargas a deslastrar es la mostrada en la Tabla 2. Como se aprecia el resultado de la aplicación del esquema centralizado es satisfactorio.

Se analiza a continuación la posibilidad de considerar una derivada de la frecuencia superior. Esto es -2 Hz/s. La Tabla 3 muestra las cargas a deslastrar en caso de la desconexión de cada uno de los grupos.

df/dt especificada = -2 Hz/s				
GENERATORS		G1	G6	G9
LOADS	MW	4	4	11.5
L1	2			
L2	0.7			
L3	0.6		X	
L4	1.8			
L5	1	X		X
L11	3.4			
L12	3.5			X
L13	5			X
SSAA	1.6			

-0.95	-0.56	-9.46	$\Delta P_{load}$ (MW)
1.00	0.60	9.50	$P_{shed}$ (MW)
-1.97	-1.98	-1.96	df/dt (Hz/s)

Tabla 3. Desconexión de cargas para el escenario valle, pendiente ajustada -2 Hz/s.

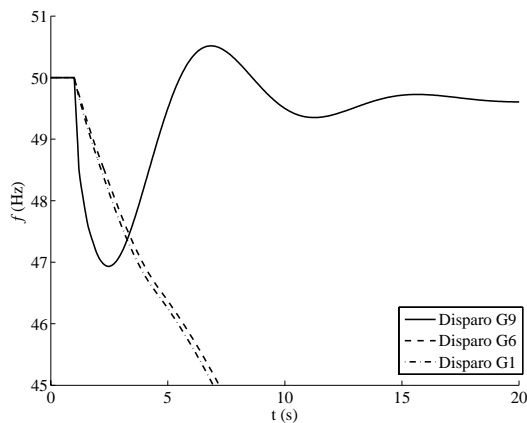


Figura 3. Variación de la frecuencia al desconectar los grupos del escenario valle, con una pendiente limitada a -2 Hz/s.

La Figura 3. muestra la respuesta de la frecuencia del sistema de Ceuta cuando se produce la desconexión en condiciones de valle de demanda de cualquiera de los grupos conectados y considerando la actuación del esquema de deslastre centralizado con una derivada de la frecuencia especificada de -2 H/s. La desconexión de los grupos 1 y 6 conduce al colapso del sistema. Nótese que la desconexión del Grupo 9, de mayor tamaño que los grupos 1 y 6, no conduce al colapso del sistema ya que precisa mayor deslastre de cargas. Por tanto, se

elige como pendiente especificada -1 H/s ya que asegura la estabilidad en caso de desconexión de cualquier grupo.

Se ha comprobado que en otros escenarios de demanda (demandas punta e intermedia) el esquema centralizado propuesto con una pendiente de frecuencia especificada de -1 H/s funciona satisfactoriamente. En todos los escenarios considerados el sistema es estable. La Tabla 4 muestra en cada escenario y en caso de desconexión de cada generador, la carga deslastrada y el ratio con relación a la generación desconectada. Se aprecia que siempre se desconecta menos carga que la generación desconectada merced a la utilización de la reserva rodante de los grupos.

	Grupo desconectado	CARGA DESLASTRADA (%)	Ratio sobre la generación desconectada (%)
VALLE	G1	12.8	62.5
	G6	11.8	57.5
	G9	53.8	91.3
INTERMEDIO	G2	8.3	50.0
	G7	8.3	51.2
	G8	17.1	66.2
PUNTA	G9	34.5	83.7
	G1	0.0	0.0
	G2	0.0	0.0
	G6	2.9	25.7
	G7	5.2	35.6
	G8	12.6	55.7
	G9	23.9	74.0

Tabla 4. Porcentaje de carga deslastrada sobre el consumo total para cada escenario ensayado según el grupo desconectado y para la pendiente seleccionada de -1 Hz/s. y porcentaje de carga deslastrada sobre la potencia generada desconectada.

La Tabla 5 muestra para cada escenario y en caso de desconexión de cada generador, la frecuencia mínima alcanzada. Se aprecia que la frecuencia es inferior a 47.5 Hz.

Grupo desconectado	VALLE			INTERMEDIO				PUNTA					
	G1	G6	G9	G2	G7	G8	G9	G1	G2	G6	G7	G8	G9
Frecuencia mínima Hz	48.5	48.6	47.7	48.9	49.1	48.7	48.9	49.0	49.0	49.1	49.0	48.8	48.6

Tabla 5. Frecuencia mínima del sistema cuando se fija un valor de pendiente de -1 Hz/s.

## 6 Validación

Las prestaciones del esquema de deslastre de cargas propuesto se compara con relación a las prestación del esquema de deslastre de cargas en servicio por relés de subfrecuencia y derivada de frecuencia. Se ha simulado la desconexión del Grupo 9 en el escenario de valle de demanda antes considerado.

La Figura 4 compara la desviación en frecuencia y la carga deslastrada por los dos esquemas. Se confirma que la desviación en frecuencia es menor y que la cantidad de carga deslastra también es inferior cuando se emplea el esquema propuesto de deslastre centralizado.

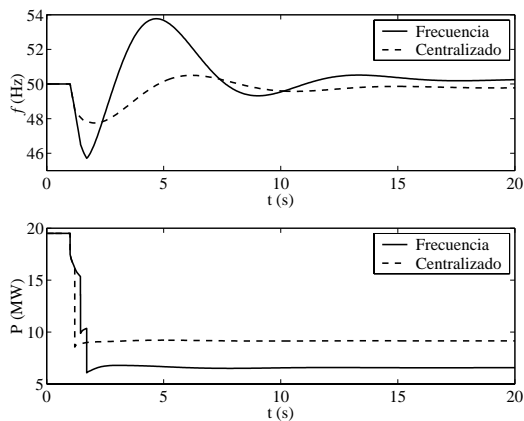


Figura 4. Comparación de la actuación del esquema centralizado frente al sistema actualmente empleado, basado en relés de subfrecuencia.

## 7 Conclusiones

Este artículo ha evaluado la efectividad de un esquema de deslastre centralizado para pequeños sistemas eléctricos aislados. El esquema mide la generación, la carga por las líneas. Cuando se produce la desconexión de un grupo envía señales de apertura a los interruptores de un conjunto de líneas de tal forma que se minimice la carga deslastrada merced a la utilización de la reserva rodante. El esquema centralizado está basado en la especificación de una derivada de frecuencia máxima admisible que asegura el mantenimiento de la estabilidad.

Se ha evaluado su aplicación en el sistema eléctrico de Ceuta. El esquema propuesto disminuye la carga deslastrada y resulta en una desviación de frecuencia menor en comparación con el sistema de deslastre de carga por subfrecuencia y derivada de frecuencia en servicio.

## 8 Referencias

- [1] C. Concordia, L. H. Fink, and G. Poullickas, "Load shedding on an isolated system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, pp. 1467-72., 1995.
- [2] A. Elices, L. Rouco, "Análisis Fundamental del Impacto de la Reserva Primaria en Sistemas Eléctricos Aislados". *Actas de las Séptimas Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica*, Leganés, 4 - 6 Julio 2001, Volumen II, páginas 335-340.
- [3] Haibo You, V. Vittal, and Zhong Yang, "Self-healing in power systems: an approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, pp. 174-81, 2003.

- [4] M. S. Baldwin and H. S. Schenkel, "Determination of frequency decay rates during periods of generation deficiency," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-95, pp. 26-36, 1976.
- [5] M. DellAmico, M. Trubian, "Applying tabu search to the job-shop scheduling problem". *Annals of Operations Research*, 41, 1-4, 1993.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Mc Graw-Hill, 1994.