

Control Secundario Multi-Agente para Reconectar una Microrred de Convertidores Formadores de Red con la Red Principal

Andrés Tomás-Martín
Aurelio García-Cerrada
Lukas Sigríst
IIT, ETSI ICAI
Universidad Pontificia Comillas
Madrid, España

Javier Roldán-Pérez, Njegos Jankovic
Unidad de Sistemas Eléctricos
IMDEA Energía
Móstoles, España

Sauro Yagüe
Departamento de Ingeniería Industrial
IQS, Universidad Ramón Llull
Barcelona, España

Resumen—La resincronización es una característica fundamental para flexibilizar la operación de una microrred en su relación con la red principal. En la literatura se han propuesto estructuras de control secundario multi-agente para llevar a cabo esta tarea sin necesidad de un controlador centralizado. Sin embargo, varios aspectos de esta funcionalidad deben investigarse más a fondo. En este artículo, se presenta y analiza en detalle la implementación de un control secundario multi-agente en la resincronización de una microrred con la red principal. Se ha investigado la importancia de los retrasos de comunicación para la estabilidad general de la microrred, y la relación de los flujos de potencia instantáneos en la microrred con la velocidad de resincronización. Se proponen y analizan diferentes soluciones para abordar los retrasos de comunicación y el control del flujo de potencia durante la sincronización. Los resultados muestran que ambos problemas pueden resolverse mediante un diseño adecuado de los parámetros de control. Los resultados de este trabajo se validan en una microrred real formada por cuatro convertidores de 15 kVA y un emulador de red de 75 kVA, con una infraestructura de comunicación industrial.

Palabras clave—Control distribuido, convertidores formadores de red, microrredes, sincronización, sistemas multi-agente.

I. INTRODUCCIÓN

Una microrred debe poder operar aislada o conectada a red, y la transición entre ambos modos debe ser suave [1]. Aunque hay trabajos que estudian la conexión de redes asíncronas [2], necesitan un convertidor de interfaz, lo que aumenta sensiblemente el coste. En modo aislado, la microrred debe tener al menos un generador operando en modo formador de red [3], pero es frecuente que se necesiten varios convertidores en ese modo de operación. La referencia [4] presenta un algoritmo centralizado para sincronizar una isla con este tipo de convertidores con la red principal.

El control distribuido se presenta como una alternativa prometedora para microrredes por su flexibilidad y facilidad de implementación, necesitando únicamente comunicaciones entre generadores cercanos (vecinos) [3], [5].

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través del programa de investigación en redes inteligentes S2018/EMT-4366 PROMINT-CAM de la Comunidad de Madrid, con un 50% de apoyo del Fondo Social Europeo, y mediante el proyecto MIG-20201002 financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación.

El límite teórico del retardo en un control distribuido para garantizar su estabilidad presentado en [6] se aplica en [7] y [8] a una microrred. Sin embargo, que el control distribuido sea estable no exime de problemas durante la sincronización, como los transitorios de potencia activa entre generadores.

La referencia [9] propone un algoritmo para sincronizar con la red principal una microrred con control secundario multi-agente y [10] reduce la velocidad de variación de frecuencia añadiendo un filtro paso bajo a la frecuencia de referencia de cada convertidor. Más recientemente, el trabajo anterior de los autores en [11] propuso un método de saturación para reducir la velocidad de sincronización sin introducir una oscilación poco amortiguada en el sistema. Sin embargo, ninguna de estas referencias considera la implementación del algoritmo o el efecto de los retrasos de comunicación entre convertidores en el control secundario.

En este artículo, se propone, analiza e implementa un algoritmo de resincronización a la red principal para una microrred utilizando un control secundario multi-agente en un prototipo de laboratorio.

Las contribuciones de este artículo son:

- Estudiar el efecto del retardo de comunicación en el proceso de sincronización.
- Limitar la velocidad de sincronización para garantizar una pico de potencia activa asumible en la implementación del algoritmo.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: La Sección II-A presenta una descripción general de la aplicación, mientras que el control secundario distribuido se presenta en la Sección II-B. La Sección II-D explica el control de sincronización, y la Sección III analiza el efecto de los retardos de las comunicaciones. La Sección IV estudia el flujo de potencia activa entre dos generadores de la microrred, durante la sincronización. La Sección V detalla el caso de estudio, la Sección VI describe la validación experimental y los resultados, y la Sección VII expone las conclusiones.

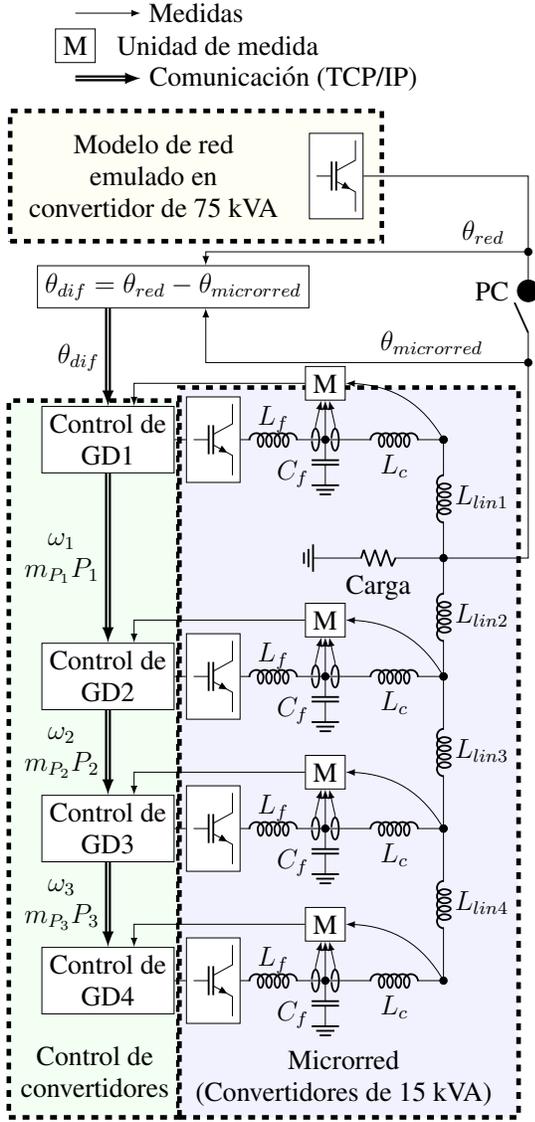


Figura 1. Diagrama del caso de estudio, microrred con cuatro convertidores formadores de red con un control secundario distribuido.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL

II-A. Descripción de la aplicación

La Figura 1 representa esquemáticamente la microrred que se estudia en este trabajo. Esta microrred puede funcionar tanto conectada como desconectada de la red principal y está compuesta por cuatro generadores distribuidos (GDs) que se conectan a la red mediante convertidores electrónicos de potencia con filtros LCL .

Cada convertidor formador de red de la Figura 1 controla la tensión del condensador del filtro v_{oi} , con un lazo interno de control de corriente por la inductancia del lado del convertidor, una impedancia virtual y un control primario. El control primario implementado se basa en el estadismo clásico entre la frecuencia y la potencia activa, así como entre la tensión y la potencia reactiva.

II-B. Principios del algoritmo de consenso

Esta aplicación utiliza un control secundario multi-agente en el que cada convertidor toma decisiones en base a medidas locales y una información limitada de sus vecinos para evolucionar a una solución común, llamada de “consenso”.

Para describir un control secundario multi-agente, hay que definir un grafo dirigido $G = (V, E)$, con un conjunto de nodos $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ y aristas que son pares de nodos ordenados $(v_i, v_j) \in E$ donde $v_i, v_j \in V$. Los vecinos del agente (nodo) v_i son aquellos conectados con él mediante una arista $N_i = \{v_j \in V : (v_i, v_j) \text{ or } (v_j, v_i) \in E\}$ [6].

En general, la dinámica de un sistema multi-agente puede describirse como:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (1)$$

donde x_i es la variable de estado del agente i , N_i es el grupo de vecinos del agente i , y a_{ij} son los elementos de la matriz de adyacencia, que contienen los pesos de las aristas. En un grafo dirigido, cuando existe una arista con peso $a_{ij} \neq 0$, se entiende que la información viaja desde el nodo v_j al nodo v_i . Por lo tanto, el grado de entrada del nodo v_i se define como [5] como:

$$d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (2)$$

Si, además, se definen las matrices:

$$D = \text{diag}\{d_i\}, \text{ y } A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

puede escribirse

$$\frac{dx}{dt} = -L \cdot x = -(D - A)x \quad (4)$$

donde $x = [x_1, \dots, x_N]^T$, T es “transpuesta” y L es la matriz Laplaciana que tiene todos los autovalores con parte real positiva, excepto uno $\lambda_1 = 0$, para garantizar la convergencia hacia una solución de consenso [6]. Esto ocurre, si y solo si, desde el nodo raíz puede alcanzarse cualquier otro nodo siguiendo la dirección de las aristas del grafo. El nodo raíz (o líder) es aquel en el que $d_i = 0$. Si el grafo está conectado (el único caso de interés para este trabajo) solo hay un nodo raíz.

En [6] se demuestra que la solución de consenso, después de una perturbación es:

$$x_1 = \dots = x_N = \frac{1}{N} \sum_{\forall N} x_i(t=0) \quad (5)$$

En la Figura 1 se puede definir un grafo G , tal que:

$$V = \{GD1, GD2, GD3, GD4\}$$

$$E = \{(GD1, GD2), (GD2, GD3), (GD3, GD4)\}$$

donde hay tres aristas en E orientadas desde el primer elemento de cada par hacia el segundo, que es la dirección en la que viaja la información, y donde $GD1$ es el nodo raíz.

La aplicación del estatismo clásico para cada uno de los convertidores GD_i puede escribirse como [12]:

$$\omega_i = \omega_i^* - m_{P_i} \cdot P_i, \quad (6)$$

donde i se refiere al número del convertidor, ω_i^* es la frecuencia de referencia para el convertidor i , m_{P_i} es el coeficiente de estatismo de frecuencia y P_i es la potencia activa que GD_i está inyectando.

Para el convertidor $GD1$ se ha establecido que:

$$\omega_1(t) = \overbrace{\omega_1^* - m_{P1} \cdot P_1(t)}^{x_1} \ \& \ \frac{d\omega_1^*}{dt} = 0 \quad (7)$$

donde ω_1^* puede ser arbitraria cuando la microrred trabaja en isla y los detalles de cómo se calcula en el proceso de sincronización se darán más adelante. Nótese que $GD1$ es el nodo raíz y $a_{1j} = 0, \forall j$ en (1)

En los convertidores $GD2$, $GD3$ y $GD4$, el control secundario potencia-frecuencia se ha definido como:

$$\frac{d\omega_i^*}{dt} = c_f \left[(\omega_{i-1} + m_{P_{i-1}} \cdot P_{i-1}) - \overbrace{(\omega_i + m_{P_i} \cdot P_i)}^{x_i} \right] \quad (8)$$

que, usando la transformada de Laplace, queda

$$\omega_i^*(s) = c_f \frac{\omega_{i-1}^*(s) - \omega_i^*(s)}{s} \quad (9)$$

y, por lo tanto:

$$\omega_i^* = \frac{\omega_{i-1}^*}{s/\omega_{bw} + 1} \quad (10)$$

donde $\omega_{bw} = c_f$ es el ancho de banda del proceso dinámico que relaciona las frecuencias de referencia de los convertidores. Por lo tanto, la frecuencia de referencia de los convertidores en la microrred no será la misma. Si esta dinámica no es despreciable, el rendimiento del control puede verse comprometido aunque, en régimen permanente, se cumple:

$$\omega_1^* = \omega_2^* = \dots = \omega_4^* \quad (11)$$

II-C. Intercambio de potencia entre dos convertidores

El flujo de potencia activa entre dos convertidores GD_i y GD_j conectados por una línea con carácter inductivo, puede simplificarse como:

$$P_{i \rightarrow j} = \frac{h_{ij}}{X_{ij}} \delta_{ij} \quad (12)$$

donde h_{ij} es el producto de las tensiones de los nudos, X_{ij} es la impedancia a la frecuencia nominal entre los dos convertidores y δ_{ij} es la pequeña diferencia angular entre las tensiones de los nudos ($\sin \delta_{ij} \approx \delta_{ij}$). Por lo tanto:

$$\frac{dP_{i \rightarrow j}}{dt} = \frac{h_{ij}}{X_{ij}} \omega_{ij}^r \quad (13)$$

si se desprecia la variación del módulo de las tensiones en los nudos (si no hay flujo apreciable de potencia reactiva) y de la impedancia de conexión (porque la variación de frecuencia es pequeña. En (13), ω_{ij}^r es la diferencia entre las frecuencias de los convertidores GD_i e GD_j . Por lo tanto, el régimen permanente sin oscilaciones de potencia ($dP_{i \rightarrow j}/dt = 0$) solo

se alcanza si $\omega_{ij}^r = 0$. Por lo tanto, y teniendo en cuenta (11) que se aplica al grafo descrito para la Figura 1,:

$$\omega_1 = \dots = \omega_4 \quad m_{P1} \cdot P_1 = \dots = m_{P4} \cdot P_4 \quad (14)$$

una vez que se alcanza el régimen permanente.

Por lo tanto, con el control descrito en la Sección II-B, todos los convertidores en la Figura 1 trabajarán a la misma frecuencia cuando se alcance el régimen permanente y se repartirán la potencia demandada por las cargas en relación a sus constantes de "estatismo":

$$P_j = \frac{m_{P_j}}{m_{P_i}} \cdot P_i \quad (15)$$

II-D. Control para la sincronización

Para sincronizar la microrred con la red principal, es necesario que las tensiones a ambos lados del punto de conexión sean iguales, en módulo y en ángulo. Por simplicidad, en este trabajo se va a suponer que los módulos de las tensiones son todos iguales porque no hay flujo de potencia reactiva.

El control de sincronización entre las dos redes necesita un agente adicional por encima de la estructura de control secundario distribuido descrita hasta ahora. Ese agente sincronizador medirá la tensión en ambos lados de la interconexión entre la red principal y la microrred y calculará la diferencia angular entre las tensiones de los dos lados usando la transformada de Park con esas tensiones a un sistema de referencia d-q arbitrario. La diferencia angular será:

$$\begin{aligned} \theta_{dif} &= \angle(\mathbf{v}_R \bar{\mathbf{v}}_{MR}) \\ &= \angle[(v_{dR} + jv_{qR})(v_{dMR} - jv_{qMR})] \end{aligned} \quad (16)$$

donde los subíndices R y MR representan la red y la microrred, respectivamente, y v_d y v_q son las componentes directa y en cuadratura de las señales de tensión en el mismo marco de referencia d-q.

La diferencia de ángulo medida θ_{dif} puede usarse como entrada en un regulador PI para calcular la variación de la frecuencia para el convertidor líder en el grafo de la Figura 1. Así, usando la transformada de Laplace:

$$\omega_1^*(s) = \omega_{1,0}^* + \overbrace{K_{PI} \cdot \frac{1 + Is}{Is}}^{\Delta\omega_1^*} \cdot \theta_{dif}(s) \quad (17)$$

donde $\omega_{1,0}$ es la frecuencia de referencia del convertidor líder justo antes de comenzar la sincronización, y K_{PI} e I son los parámetros del regulador PI .

III. EFECTO DE LOS RETARDOS DE COMUNICACIÓN

El flujo de potencia activa por una línea inductiva depende fundamentalmente de la diferencia de ángulo de la tensión en ambos terminales. Si un convertidor a un lado de la línea cambia la frecuencia más tarde que el del otro lado (por un retardo), el ángulo entre ambos cambiará.

En esta sección se usa un modelo reducido, de dos convertidores formadores de red conectados, para estudiar el efecto de las especificaciones de un regulador PI de sincronización en el pico de potencia activa que experimenta cada convertidor durante un transitorio. El modelo reducido solo considera el

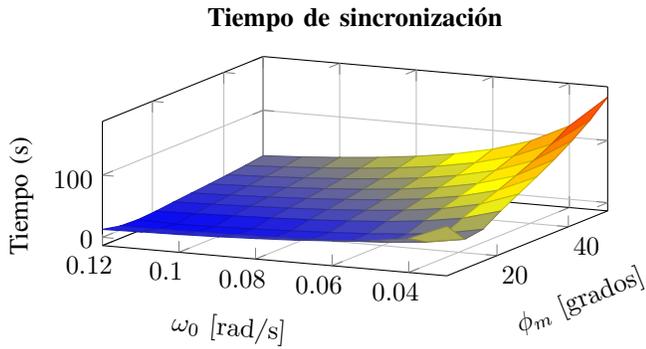


Figura 2. Tiempo de sincronización en función del margen de fase en lazo abierto y la frecuencia de cruce del sistema

comportamiento de potencia activa y ángulo y descarta completamente el comportamiento de tensión y potencia reactiva.

En el caso de dos convertidores formadores de red, ambos convertidores imponen su frecuencia de salida a partir de la ecuación del estatismo (6).

Para concretar, se van a considerar dos convertidores $GD1$ y $GD2$ con $m_{P_1} = m_{P_2} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ rad/s} \cdot W$, una tensión en los nudos de $V_N = 400 \text{ V}$, y una impedancia de conexión $|Z| = 2\pi \Omega$. La potencia activa que suministran los convertidores P_i puede escribirse:

$$P_1 = -P_2 = (\theta_1 - \theta_2) \cdot \frac{V_N^2}{|Z|} \quad (18)$$

Se ha implementado un regulador PI de sincronización $K_{PI}(1 + Is)/(Is)$ que actúa sobre error entre el ángulo de una red infinita de 50 Hz y θ_1 , con punto de operación inicial:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_2 = 49,5 \text{ Hz} \\ \theta_{grid} - \theta_1 = \pi \text{ rad} \end{cases} \quad (19)$$

El regulador PI de sincronización calcula el incremento de la referencia de frecuencia del GD1, y la frecuencia aplicada por este le llega como referencia a GD2 con retraso de comunicación T_d .

Se ha calculado pico de potencia activa entre ambos convertidores simulando el modelo lineal reducido, cambiando el retraso y el controlador PI. El controlador PI se modifica variando sus especificaciones: el margen de fase en lazo abierto y la frecuencia de cruce del sistema.

Las Figuras 2 y 3 muestran, respectivamente, el tiempo de sincronización y el pico de potencia activa medidos en función del margen de fase en lazo abierto (ϕ_m) y la frecuencia de cruce del sistema (ω_0). El tiempo de sincronización se calcula como el tiempo que transcurre para que la diferencia de ángulo se mantenga menor a 2 grados. El retraso de comunicación entre ambos convertidores se ha establecido en 30 ms.

Las figuras muestran claramente que un control de sincronización más rápido reduce el tiempo de sincronización pero aumenta el pico de potencia activa. Reducir el margen de fase en lazo abierto del sistema disminuye tanto el tiempo de sincronización como el pico de potencia activa.

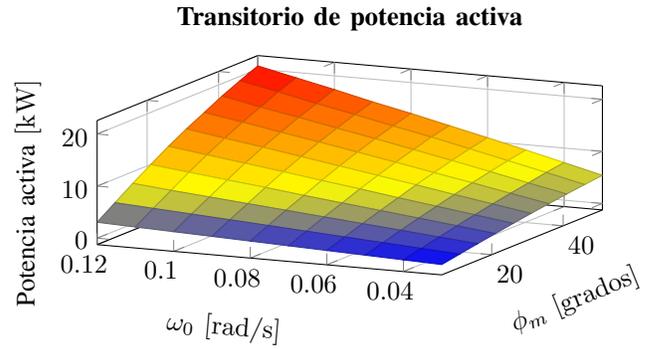


Figura 3. Pico de potencia activa entre ambos convertidores en función del margen de fase y la frecuencia de cruce del sistema

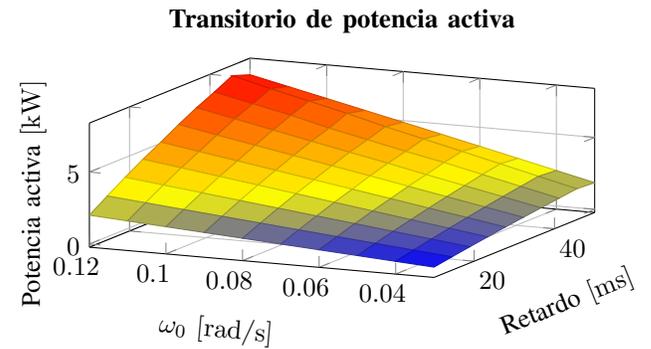


Figura 4. Pico de potencia activa entre ambos convertidores en función del retraso de comunicación y la frecuencia de cruce del sistema. El margen de fase se mantiene constante e igual a $\phi_m = 11$ grados

Si se limita el pico de potencia activa a 4 kW se obtiene un regulador PI con parámetros $K_{PI} = 0,0155$ e $I = 2,5$, ($\omega_0 = 0,08 \text{ rad/s}$ y $\phi_m = 11$ grados).

La Figura 4 muestra la variación del pico de potencia activa con la frecuencia de cruce en lazo abierto del sistema y el retraso de tiempo de comunicación entre ambos generadores. El margen de fase en lazo abierto del sistema se mantiene constante e igual al valor impuesto previamente ($\phi_m = 11$ grados).

Como se muestra en la Figura 4, el pico de potencia activa entre ambos convertidores aumenta con el retraso de comunicación y la velocidad del regulador PI . Por lo tanto, una implementación real, la velocidad del controlador de sincronización PI debe limitarse por el retraso de comunicación esperado.

IV. REDUCCIÓN DEL PICO DE POTENCIA ACTIVA

Para lograr un control primario más efectivo, se utiliza el estatismo derivativo [13] (se agrega un componente derivativo al estatismo), para tener un estatismo más efectivo durante la sincronización.

El algoritmo propuesto usa el estatismo derivativo para mejorar la velocidad de respuesta primaria. Según se menciona en [13], en una implementación real, agregar una derivada al control amplificaría el ruido del sistema, muy probablemente, por lo que proponen calcular el ángulo directamente como:

$$\begin{aligned}\omega_i &= \omega_i^* - m_{P_i} \cdot P_i, \\ \theta_i &= \int \omega_i dt - m_{D_i} \cdot P_i.\end{aligned}\quad (20)$$

Dado que el ángulo es la integral de la frecuencia, una acción proporcional en el ángulo es equivalente a una acción derivativa en la frecuencia.

V. CASO DE ESTUDIO: MICRORRED CON CUATRO CONVERTIDORES FORMADORES DE RED

En primer lugar, la microrred de la Figura 1 se ha modelado en MATLAB Simulink con los parámetros de la Tabla I.

Tabla I

PARÁMETROS DE LA MICRORRED. PARÁMETROS DE LOS PIS ADECUADOS PARA EL CONTROL EN VARIABLES REALES, NO POR UNIDAD.

Convertidores			
m_P	$2 \cdot 10^{-4}$ rad/s·W	n_Q	$1 \cdot 10^{-4}$ V/VAr
R_f	0,173 Ω	L_f	2,2 mH
C_f	8,8 μ F	R_{cf}	48 k Ω
R_c	0,048 Ω	L_c	1,5 mH
K_{PV}	0,12	K_{IV}	36,29
K_{PC}	4,53	K_{IC}	$1,06 \cdot 10^4$
m_D	$5,33 \cdot 10^{-5}$ rad/W	LPF_{const}	1,5 ms
Control secundario y bases			
c_f	30	ω_{ref}, v_{ref}	1 pu
f_{base}	50 Hz	S_{base}	15 MVA
retardo (T_d)	10 ms	$V_{nom} = V_{base}$	400 V
Control de sincronización			
K_{PI}	0,0155	I	2,5
Parámetros de la red			
L_{lin1}	0,1 mH	L_{lin2}	0,4 mH
L_{lin3}	0,0923 mH	L_{lin4}	0,27 mH
R_{Carga}	16 Ω		
Punto de operación inicial ($i \in [1 - 4]$)			
P_i	2,502 kW	Q_i	0,027 kVAr

Después de un análisis modal, se puede concluir que el retraso introducido por el filtro paso-bajo en (10) es despreciable para $c_f \geq 30$. Por lo tanto, el control secundario de todos los convertidores aplica con $c_f = 30$. Es importante tener en cuenta que el grafo elegido para la estructura de control secundario también afecta la dinámica del sistema y su robustez ante los retrasos de tiempo de comunicación, como se menciona en [14]. Por lo tanto, en este estudio, se mantiene constante el grafo para evitar que sus cambios afecten a los resultados.

En cuanto al control de estatismo derivativo, la Figura 5 muestra la comparación entre el pico de potencia activa en función de la ganancia (m_D) en el sistema completo utilizado en esta sección y el sistema simple utilizado en la Sección III. Puede verse que el estatismo derivativo reduce el pico de potencia activa entre los convertidores durante el transitorio tanto en el modelo simple como en el completo.

El tiempo de sincronización también se muestra en la Figura 5 para aclarar que la constante derivativa no lo afecta significativamente, ya que está principalmente influenciado por

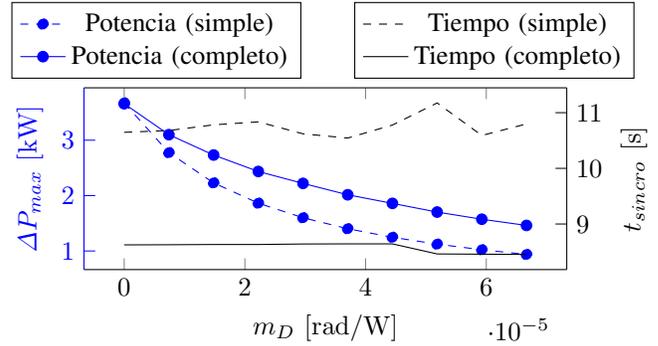


Figura 5. Pico de potencia activa en función de la ganancia de estatismo derivativo (m_D) en el sistema completo y en el sistema simple

el controlador PI de sincronización. Sin embargo, se debe garantizar la estabilidad del sistema para el valor utilizado de la ganancia derivativa (m_D).

Después de un análisis modal, se puede concluir que el sistema es estable para $m_D \leq 6,7 \cdot 10^{-5}$ rad/W. Sin embargo, hay un autovalor real que se acerca al límite de estabilidad (menor en magnitud) a medida que aumenta m_D . En una implementación real, la ganancia derivativa se limita a $m_D = 5,33 \cdot 10^{-5}$ rad/W para garantizar un margen de estabilidad razonable.

VI. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

VI-A. Descripción del laboratorio

En esta sección, los resultados de la simulación obtenidos en este trabajo se validan en una microrred real montada en el laboratorio SEIL de IMDEA [15], formada por cuatro convertidores de 15 kVA y un emulador de red de 75 kVA con una infraestructura de comunicación industrial.

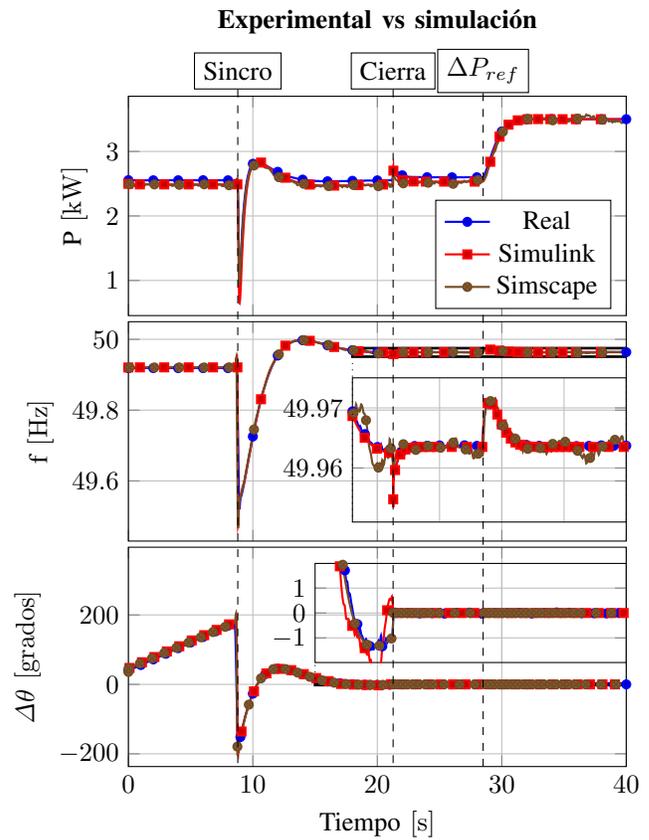
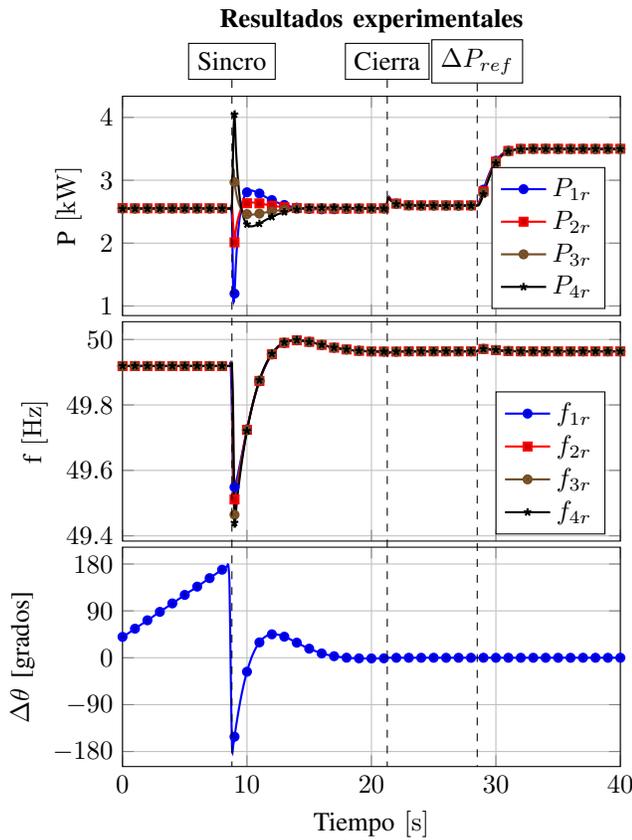
El esquema de la microrred se muestra en la figura 1, conectando cuatro convertidores formadores de red (GD 1-4 en la figura) a una carga resistiva que consume 10 kW a tensión nominal, a través de inductancias que emulan líneas eléctricas. Los parámetros usados se muestran en la Tabla I.

La red a la que se sincronizará se emula como una red infinita utilizando un emulador de red de 75 kVA. El emulador de red funciona en una configuración de doble conversión con otro convertidor de 75 kVA para permitir trabajar en los cuatro cuadrantes, ya que puede ser necesario absorber potencia activa después de la sincronización.

VI-B. Resultados experimentales

La Figura 6a muestra los resultados experimentales de la sincronización de la microrred con la red principal, donde puede verse que la microrred se sincroniza con la red principal, y la frecuencia y la tensión de la microrred son estables después de la sincronización.

Una vez las dos redes están sincronizadas, el contactor se cierra y la microrred se conecta a la red principal. Después de la conexión, se requiere que la microrred inyecte potencia activa en la red principal, y puede verse en la Figura 6a cómo se consigue este objetivo manteniendo el reparto de potencia activa entre los convertidores.



(a) Resultados experimentales de la sincronización de la microrred con la red principal. Todas las variables eléctricas están filtradas y se reciben a través de la capa de comunicación en el convertidor uno

(b) Comparación entre la potencia activa inyectada por GD1, la frecuencia establecida por GD1 y la diferencia de ángulo entre ambas redes durante la prueba. Los resultados experimentales están filtrados

Figura 6. Configuración experimental y resultados, comparados con los resultados de la simulación

La Figura 6b muestra la comparación entre los resultados simulados y experimentales de la potencia activa inyectada por GD1, la frecuencia impuesta por GD1 y la diferencia de ángulo entre ambas redes durante la prueba. Claramente, el transitorio de potencia activa entre convertidores y el comportamiento global de la microrred son similares a los obtenidos en simulación.

Para validar el algoritmo propuesto en un caso con flujo de potencia reactiva en la microrred, se incluye un consumo de 10 kVAR en la carga, y se comparan los resultados de simulación obtenidos por el método presentado en este artículo con los obtenidos mediante el método presentado en [11]. La Figura 7 incluye la comparación de ambos métodos en un caso con consumo de potencia reactiva.

Como se puede apreciar en la figura, al tener en cuenta el máximo retardo de comunicación estimado, se consigue sincronizar en un menor tiempo con un transitorio de potencia activa equivalente. Además, se muestra que no sincronizar ambas tensiones no resulta en un gran transitorio de potencia reactiva al conectar con la red principal. La variación de potencia reactiva después de conectar la microrred con la red principal es una reducción del 10% respecto al punto de operación inicial.

VII. CONCLUSIÓN

Este artículo implementa un algoritmo para sincronizar con la red eléctrica principal una microrred que trabaja con control secundario multi-agente en el que existen retrasos de comunicación que normalmente se desprecian. Este estudio aclara que los retrasos de comunicación deben considerarse al diseñar el control de sincronización, ya que ambos afectan en gran medida a la variación transitoria de potencia activa entre convertidores durante la sincronización. El estudio analiza cómo limitar el pico transitorio de potencia activa durante la sincronización y utiliza el control de estatismo derivado para mejorar su rendimiento. Además, el amortiguamiento del PI de sincronización afecta al pico transitorio de potencia activa. Los resultados de simulación se validan con resultados experimentales en laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] C. Marnay, S. Chatzivasileiadis, C. Abbey, R. Iravani, G. Joos, P. Lombardi, P. Mancarella y J. von Appen, "Microgrid Evolution Roadmap," en *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, Viena, Austria: IEEE, sep. de 2015, págs. 139-144.
- [2] J. Susanto, F. Shahnia, A. Ghosh y S. Rajakaruna, "Interconnected Microgrids via Back-to-Back Converters for Dynamic Frequency Support," en *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, sep. de 2014, págs. 1-6.

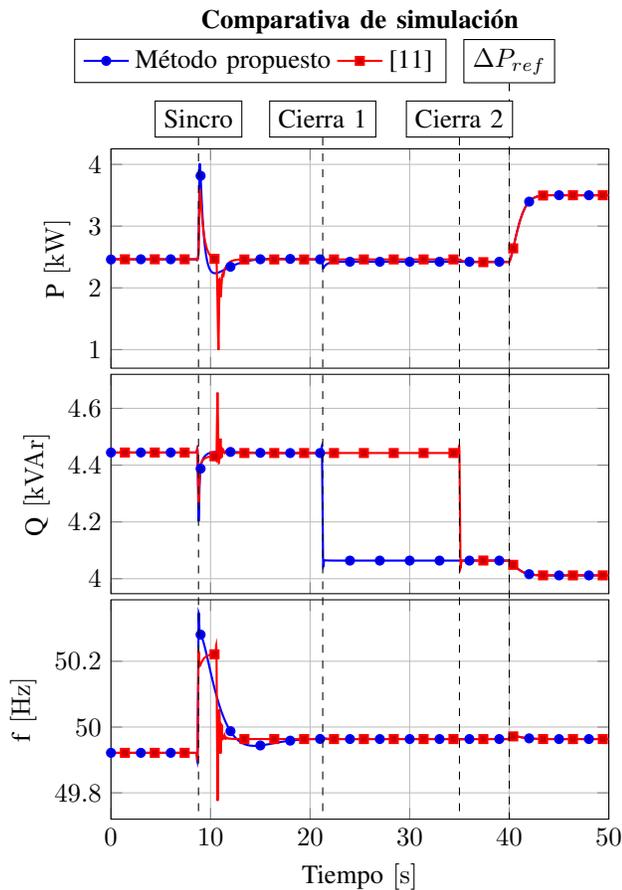


Figura 7. Resultados de simulación de la sincronización incluyendo consumo de carga reactiva en la microrred. Se muestran las potencias activa y reactiva inyectadas por GD1 y la frecuencia establecida por GD1. Comparación del método presentado en este artículo (conexión en “Cierra 1”) con el método presentado en [11] (conexión en “Cierra 2”).

[3] A. Bidram, A. Davoudi y F. L. Lewis, “A Multiobjective Distributed Control Framework for Islanded AC Microgrids,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, n.º 3, págs. 1785-1798, ago. de 2014.

[4] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna y M. Castilla, “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC

Microgrids—A General Approach Toward Standardization,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n.º 1, págs. 158-172, ene. de 2011.

[5] A. Bidram, V. Nasirian, A. Davoudi y F. L. Lewis, *Cooperative Synchronization in Distributed Microgrid Control* (Advances in Industrial Control). Cham, Suiza: Springer International Publishing, 2017.

[6] R. Olfati-Saber y R. Murray, “Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, n.º 9, págs. 1520-1533, sep. de 2004.

[7] Y. C. C. Wong, C. S. Lim, A. Cruden, M. D. Rotaru y P. K. Ray, “A Consensus-Based Adaptive Virtual Output Impedance Control Scheme for Reactive Power Sharing in Radial Microgrids,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, n.º 1, págs. 784-794, ene. de 2021.

[8] E. A. A. Coelho, D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragicevic, C. Stefanovic y P. Popovski, “Small-Signal Analysis of the Microgrid Secondary Control Considering a Communication Time Delay,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, n.º 10, págs. 6257-6269, oct. de 2016.

[9] Y. Sun, C. Zhong, X. Hou, J. Yang, H. Han y J. M. Guerrero, “Distributed cooperative synchronization strategy for multi-bus microgrids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 86, págs. 18-28, mar. de 2017.

[10] S. Shah, H. Sun, D. Nikovski y J. Zhang, “Consensus-Based Synchronization of Microgrids at Multiple Points of Interconnection,” en *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR: IEEE, ago. de 2018, págs. 1-5.

[11] A. Tomás-Martín, A. García-Cerrada, L. Sigríst, S. Yagüe, D. R. Miguel y F.-D. Martín-Utrilla, “Re-Synchronisation of a Microgrid to the Main Grid Using Multi-Agent Secondary Control,” en *2023 IEEE Belgrade PowerTech*, Belgrado, Serbia: IEEE, jun. de 2023, págs. 1-6.

[12] A. Bidram, F. L. Lewis y A. Davoudi, “Distributed Control Systems for Small-Scale Power Networks: Using Multiagent Cooperative Control Theory,” *IEEE Control Systems*, vol. 34, n.º 6, págs. 56-77, dic. de 2014.

[13] Y. Sun, X. Hou, J. Yang, H. Han, M. Su y J. M. Guerrero, “New Perspectives on Droop Control in AC Microgrid,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, n.º 7, págs. 5741-5745, jul. de 2017.

[14] L. Meng, T. Dragicevic, J. Roldán-Pérez, J. C. Vasquez y J. M. Guerrero, “Modeling and Sensitivity Study of Consensus Algorithm-Based Distributed Hierarchical Control for DC Microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, n.º 3, págs. 1504-1515, mayo de 2016.

[15] M. Prodanovic, A. Rodríguez-Cabero, M. Jiménez-Carrizosa y J. Roldán-Pérez, “A rapid prototyping environment for DC and AC microgrids: Smart energy integration Lab (SEIL),” en *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nuremberg, Germany, 2017, págs. 421-427.