

## ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA CONEXIÓN EN PARALELO DE INVERSORES EN UPS

Roberto Esteban Carballo<sup>1</sup>, Fernando Botterón<sup>2</sup>, Guillermo Oscar García<sup>3</sup>, Germán Gustavo Oggier<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Tesista, Dr. Ing. Electrónico, carballore@gmail.com

<sup>3</sup> Director, Dr. Ing. Electricista, botteron@gmail.com

<sup>3</sup> Director, Dr. Ing. Electricista, ggarciasapino@gmail.com

<sup>4</sup> Colaborador, Dr. Ing. Electricista, oggier.german@gmail.com

### Resumen

En este trabajo se presenta un resumen de la tesis realizada como requisito para obtener el título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, otorgado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, la cual trata sobre el análisis y el diseño de estrategias de control para el funcionamiento de inversores conectados en paralelo, particularmente para aplicaciones en fuentes de alimentación ininterrumpida.

Estas estrategias se utilizan para equilibrar las potencias entregadas por cada inversor a la carga, ya que estos presentan una reducida impedancia de salida la cual, debido a diferencias paramétricas intrínsecas entre los convertidores, produce una gran circulación de corriente entre inversores, pudiendo causar desde una disminución en la eficiencia de la conversión de energía, hasta fallas en los convertidores. Además, estas estrategias deben mantener una determinada calidad de energía para las cargas críticas e inyectar una corriente de falla en casos de sobrecarga o cortocircuito.

Los objetivos del trabajo son proponer nuevas estrategias de control para la conexión en paralelo de inversores, establecer metodologías de diseño de sus controladores y validar experimentalmente las propuestas en un prototipo de laboratorio.

La metodología de investigación utilizada parte del análisis del estado del arte, para luego seguir con la identificación y simulación numérica de las principales estrategias de control que tienen aplicación en fuentes de alimentación ininterrumpidas. Comprendidas las principales características de funcionamiento de estas estrategias, se proponen mejoras o nuevas estrategias de control, para finalmente validarlas experimentalmente utilizando un prototipo de laboratorio conformado por dos inversores monofásicos de 2 kVA, alimentando cargas lineales y no lineales.

**Palabras Clave:** *Inversores en paralelo – Fuentes de Alimentación Ininterrumpida – Control sin comunicación*

### Introducción

La operación en paralelo de inversores es requerida principalmente para lograr repartir entre un número de convertidores la potencia demandada por una carga, siendo por ejemplo utilizada en fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS – *Uninterruptible Power Supplies*), sistemas de accionamiento en navíos y trenes, conversión de energía para

integración de fuentes renovables y microrredes eléctricas (Kroposki et al., 2008). Además, la conexión en paralelo de inversores puede incrementar tanto la confiabilidad del sistema como la disponibilidad de energía eléctrica, debido a la redundancia introducida en el sistema con cada inversor conectado en paralelo.

Debido a la reducida impedancia de salida que poseen los inversores de altas prestaciones (Ryan, Brumsickle, & Lorenz, 1997), la conexión en paralelo puede causar excesiva circulación de corrientes entre estos y reducir la eficiencia del sistema de conversión (Holtz & Werner, 1990). Las estrategias para mitigar este problema pueden clasificarse en dos grupos (Han et al., 2016): las que utilizan comunicación de datos entre los convertidores y las que no utilizan comunicación.

Por requerir hardware adicional e introducir puntos únicos de falla en el sistema, las estrategias de control con comunicación de datos tienden a quedar restringidas a aplicaciones en que la falta de energía no es crítica (Guerrero, Lijun, & Uceda, 2008).

Las estrategias de control que no utilizan comunicación pueden cumplir los requerimientos de confiabilidad en muchas aplicaciones críticas, además de ser más adecuadas para los casos en que la distancia que separa a los inversores es considerable (Han et al., 2016). Como desventaja, debido a que la estrategia de control requiere incrementar la impedancia de salida de los inversores conectados en paralelo para desacoplar las potencias activa y reactiva, la regulación de la tensión en la carga puede resultar comprometida (Jinwei & Yun Wei, 2011).

Otra característica importante que se logra con el incremento de la impedancia de salida es el de disminuir la sensibilidad a la circulación de corriente entre los inversores ante variaciones paramétricas, siendo la diferencia entre las ganancias de los circuitos de medición de la tensión de salida el factor que más afecta a la corriente de circulación (Lazzarin, 2010).

De los distintos tipos de estrategias de control sin comunicación (Chandorkar, Divan, & Adapa, 1993; Johnson, Dhople, Hamadeh, & Krein, 2014; Qing-Chang & Weiss, 2011), las estrategias de control *droop* son las que presentan menor complejidad de diseño e implementación. Estas se basan en el principio de funcionamiento de los generadores síncronos en paralelo utilizados en el sistema eléctrico de potencia, donde existe una característica de caída (*droop*) en la frecuencia en función de la potencia activa entregada por cada unidad, introduciéndose de esta forma la relación entre la potencia activa y el ángulo de potencia que permite mantener la operación sincrónica de los generadores en el sistema (Kundur, Balu, & Lauby, 1994).

Por lo general, para lograr el desacoplamiento entre las potencias activa y reactiva y a su vez disminuir la corriente de circulación entre los inversores, estas estrategias de control requieren la emulación de la impedancia de salida del inversor, lo cual se realiza a partir del diseño de los lazos de control del mismo y el agregado de un lazo de impedancia virtual. Este lazo se implementa típicamente a partir de la realimentación de la corriente de salida, la cual corresponde a la corriente medida después del filtro *LC*, pudiéndose lograr impedancias de salida con características inductivas, resistivas, capacitivas o complejas (Zhong & Zeng, 2016).

En comparación con los generadores síncronos utilizados en el sistema eléctrico de potencia, la ausencia de inercia en los inversores conectados en paralelo requiere de

análisis de estabilidad especiales cuando se implementan controladores *droop*, siendo los principales factores que afectan a la estabilidad la ganancia del controlador, la impedancia que separa a los inversores y las frecuencias de corte de los filtros utilizados en el cálculo de las potencias activa y reactiva media (Coelho, Cortizo, & Garcia, 2002; Pogaku, Prodanovic, & Green, 2007).

Además de garantizar la operación en paralelo de los inversores, la estrategia de control implementada debe lograr una reducida distorsión armónica en el bus de corriente alterna (CA) en el que están conectadas las cargas críticas, por lo que distintos controladores de la tensión de salida pueden utilizarse para reducir la impedancia de salida en torno a las frecuencias armónicas de la fundamental (Poh Chiang & Holmes, 2005; Ryan et al., 1997; Vukosavic, Peric, Levi, & Vuckovic, 1990), siendo en estas frecuencias en las que se produce distorsión de la tensión cuando circulan corrientes de naturaleza no lineal por la impedancia del filtro *LC* de cada inversor, siendo esta corriente la que consumen las cargas no lineales como ser los rectificadores pasivos.

Otra cuestión que se debe tener en cuenta al diseñar una estrategia de control para inversores en UPS, es que esta debe posibilitar inyectar una determinada corriente de falla ante condiciones de sobrecarga o cortocircuito, con el objetivo de hacer actuar protecciones que separen al circuito en estado de falla del resto del sistema (Holtz, Lotzkat, & Werner, 1988), a su vez de proteger los semiconductores de potencia.

En función de los conceptos mencionados hasta aquí, los objetivos de este trabajo son proponer una estrategia de control para la conexión en paralelo de inversores que no utilizan comunicación de datos entre ellos, junto a una metodología de diseño para cada uno de los controladores utilizados en la estrategia, de manera de cumplir con normas de calidad de energía para UPS, además de lograr inyección de corriente controlada ante condiciones de sobrecarga o cortocircuito.

## **Metodología**

La metodología de investigación utilizada comienza con la revisión del estado del arte, consultando las publicaciones en las principales revistas científicas, anales de congresos y tesis doctorales y de maestría, relacionadas a estrategias de control para conexión en paralelo de inversores y control de tensión en inversores aislados.

De estos trabajos se identificaron las estrategias de control que presentaban las características más adecuadas para aplicaciones en fuentes de alimentación ininterrumpidas. Con el objetivo de comprender su funcionamiento, se reprodujeron estas estrategias mediante simulaciones numéricas utilizando los programas Matlab y PSIM.

Como siguiente paso se propusieron mejoras dando lugar a nuevas estrategias de control, además de proponer nuevas metodologías de diseño para sus controladores.

Las nuevas estrategias se implementaron en primer lugar mediante simulaciones numéricas, para finalmente validarlas experimentalmente utilizando un prototipo de laboratorio, el cual constaba de un convertidor compuesto por dos inversores monofásicos de 2 kVA, al cual se le conectaron cargas lineales y no lineales para evaluar su comportamiento dinámico y de régimen permanente, comparando los resultados obtenidos con las especificaciones de las norma para UPS IEC 62040-3 y la norma para sistemas de distribución de baja tensión IEC 61000-2-2 e IEEE 519.

## Resultados y Discusión

A continuación, se presenta en primer lugar la estrategia de control propuesta, para luego describir sucintamente las principales diferencias con otras propuestas encontradas en la literatura. Finalmente, se presenta una comparación entre la propuesta de una metodología de diseño de los parámetros de cada controlador utilizado en esta estrategia, con las metodologías propuestas en la literatura.

### Estrategia de Control Propuesta

En la Fig. 1 se muestra una representación gráfica de uno de los inversores monofásicos que integran la conexión en paralelo considerada en el desarrollo de este trabajo, donde la planta considerada para el diseño de los lazos de control de cada inversor está definida a partir de las características dinámicas del filtro  $LC$  de salida.

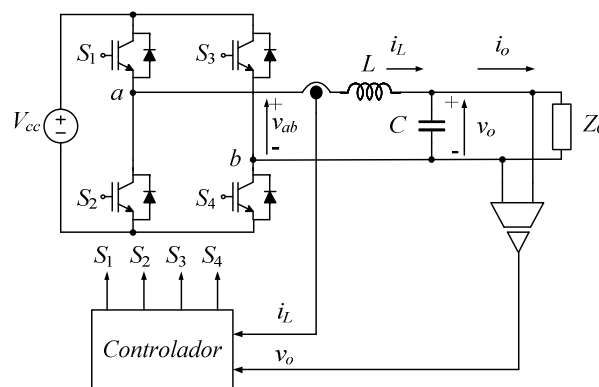


Fig. 1. Inversor monofásico y variables de interés utilizadas en la estrategia de control.

En la Fig. 2 se presenta el diagrama de bloques que describe la estrategia de control propuesta para ser implementada en el controlador observado en la Fig. 1, incluyendo los efectos de la implementación digital a partir del modelo de pequeña señal de la planta, según se propuso en (Mattavelli, Paolo, Dal Lago, & Saggini, 2008).

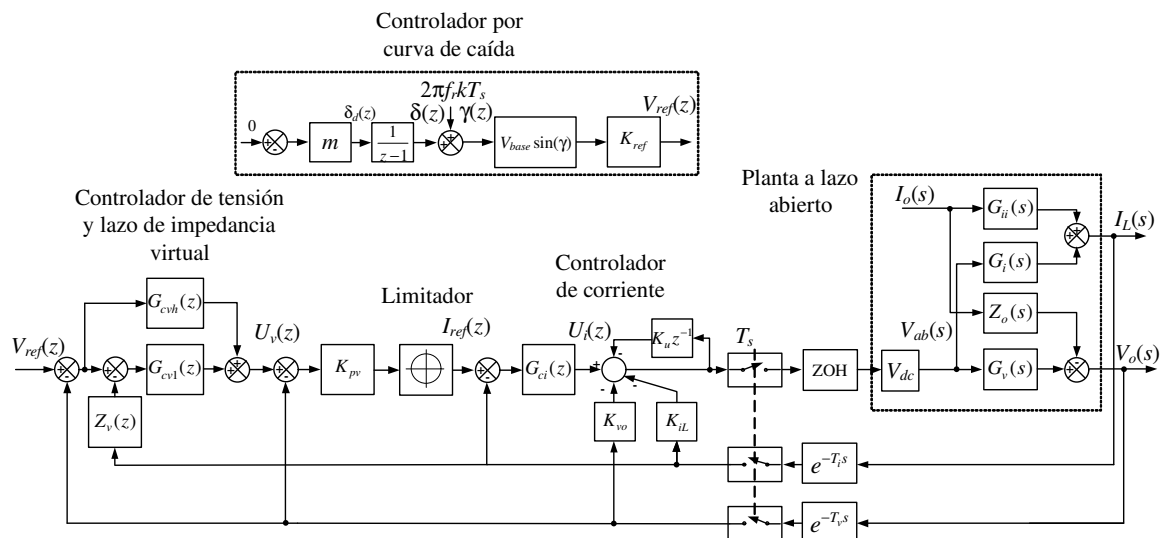


Fig. 2. Diagrama de bloques que representa la estrategia de control propuesta en (Carballo, 2017).

Los bloques  $G_v(s)$ ,  $G_i(s)$ ,  $Z_o(s)$  y  $G_{ii}(s)$  en la Fig. 2 representan a las funciones de transferencia de la planta. Todas estas funciones dependen de los parámetros del filtro  $LC$ ,

encontrándose las expresiones matemáticas en (Carballo, Botterón, Oggier, & García, 2016). Los atrasos de transporte mostrados en el diagrama de bloques de la Fig. 2 representan los atrasos ocurridos entre los instantes en los que se realiza el muestreo y se actualiza la acción de control, considerándose en este trabajo  $T_d = T_s$ , siendo  $T_s$  el periodo de muestreo e igual a la mitad de la frecuencia de conmutación.

Este tipo de modelo por función de transferencia es el más apropiado para analizar y diseñar estrategias de control en el dominio del tiempo discreto, debido a que permite discretizar las funciones de transferencia de la planta al ubicarlas entre las llaves de muestreo y actualización de acción de control, considerando además las dinámicas introducidas por la implementación digital (Mattavelli et al., 2008).

Los tipos de discretización para cada una de las funciones de transferencia se encuentra definida en (Carballo et al., 2016).

Observando la Fig. 2 desde el lazo más interno hacia los más externos, se tiene en primer lugar el lazo de control de corriente, el cual viene dado por una realimentación de estados con ganancias  $K_u$ ,  $K_{v0}$  y  $K_{iL}$ , que tienen como objetivo introducir amortiguamiento activo en las dinámicas del filtro  $LC$ , junto a un controlador con función de transferencia  $G_{ci}(z)$ , compuesto por múltiples controladores resonantes dados por

$$G_{ci}(z) = \sum_{i=1}^n \text{FOH} \left\{ K_{ri-L} \frac{s \cos(\theta_{i-L}) - \omega_i \sin(\theta_{i-L})}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_i^2} \right\}, \quad (1)$$

Este controlador tiene como objetivo lograr seguimiento de referencia en este lazo de control, posibilitando la implementación de un limitador en la generación de referencia que permita actuar ante sobrecargas y cortocircuitos.

Como se puede observar, la función de transferencia discreta de los controladores resonantes se obtiene a partir de aplicar la discretización por retenedor de primer orden (FOH - *first order hold*), la cual permite obtener una aproximación más precisa sin causar corrimiento de la frecuencia de resonancia y de la característica de fase del controlador (Yepes et al., 2010). Los parámetros de cada controlador resonante vienen dados por: la ganancia  $K_{ri-L}$ , un factor de amortiguamiento  $\omega_c$ , la frecuencia angular de resonancia  $\omega_i$  y el ángulo de compensación  $\theta_{i-L}$  (Yunhu, Keliang, Ming, & Bin, 2013).

El lazo externo de control de tensión contempla un lazo con controlador proporcional,  $K_{pv}$ , el cual tiene como objetivo mejorar la respuesta dinámica de este lazo, la cual se ve degradada por la inclusión de los múltiples controladores resonantes del lazo interno de control de corriente. En cuanto a la función de transferencia  $G_{cv}(z)$  esta está compuesta por múltiples controladores resonantes separados en dos partes, el bloque  $G_{cv1}(z)$  es el controlador resonante a frecuencia fundamental

$$G_{cv1}(z) = \text{FOH} \left\{ K_{r1} \frac{s \cos(\theta_1) - \omega_1 \sin(\theta_1)}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_1^2} \right\}, \quad (2)$$

que tiene como objetivo seguir la señal de referencia del lazo de control de tensión, mientras que  $G_{cvh}(z)$  son los múltiples controladores resonantes en las frecuencias armónicas de la fundamental

$$G_{cvh}(z) = \sum_{i=3}^n \text{FOH} \left\{ K_{ri} \frac{s \cos(\theta_i) - \omega_i \sin(\theta_i)}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_i^2} \right\}, \quad (3)$$

que tienen el objetivo de rechazar las perturbaciones de carga lineales y no lineales.

Los parámetros de cada controlador resonante  $K_{ri\_v}$ ,  $\omega_c$ ,  $\omega_i$  y  $\theta_{i\_v}$ , cumplen las mismas funciones que los parámetros de los controladores resonantes del lazo interno de control de corriente.

La separación de los controladores resonantes en dos partes se propuso para que la introducción del lazo de impedancia virtual, representado en la Fig. 2 por la función de transferencia  $Z_v(z)$ , tenga la acción de incrementar la impedancia de salida solamente en la componente de frecuencia fundamental, logrando el desacoplamiento necesario entre potencias activa y reactiva para la operación correcta del controlador *droop*, esto es que el ángulo de la tensión sintetizada controle la potencia activa en caso de una impedancia de salida inductiva, o que controle la potencia reactiva en caso de que sea resistiva. El segundo objetivo que cumple el incremento de la impedancia virtual es reducir la corriente de circulación entre los inversores.

La función de la ganancia  $K_{ref}$  que se observa en la Fig. 2 se utiliza para compensar el efecto de la impedancia de virtual sobre la regulación de tensión en la condición de vacío

El cálculo del argumento  $\gamma$  de la señal de referencia para cada convertidor se realiza a partir del controlador *droop*, utilizando el esquema que permite implementar la relación  $P-\delta$ , con la cual se logra evitar variaciones de frecuencia en el sistema (Majumder, Ghosh, Ledwich, & Zare, 2009). La ganancia  $m$  en la Fig. 2 corresponde a la pendiente de la recta  $P-\delta_d$ , y define la velocidad con la cual el error de reparto de potencia tiende a cero una vez que se conectan los inversores en paralelo, siendo  $\delta_d$  la cantidad en la que se reduce el ángulo cuando aumenta la potencia activa media, debiendo integrarse esta variable en el tiempo para obtener el ángulo  $\delta$ , el cual se suma finalmente al argumento calculado en cada periodo de muestreo  $2\pi f_s k T_s$ .

### *Características distintivas de la propuesta*

El motivo por el cual se optó por utilizar controladores resonantes en los lazos de control de tensión y corriente, en conjunto con controladores proporcionales y realimentación de estados respectivamente, es que todos estos se encuentran dentro de los controladores lineales, permitiendo operar los inversores con modulación PWM (*pulse width modulation* – modulación por ancho de pulso) y consecuente frecuencia de conmutación fija en los semiconductores de potencia (Aamir, Kalwar, & Mekhilef, 2016), así como también utilizar herramientas de diseño simples como por ejemplo lugar de raíces, diagramas de respuesta en frecuencia y diagramas de Nyquist.

La utilización de controladores basados en el principio del modelo interno (PMI), como ser los controladores resonantes y los repetitivos, permiten cumplir los objetivos de seguimiento de referencias y rechazo de perturbaciones periódicas con robustez ante incertezas paramétricas, lo cual desde el punto de vista de la impedancia de salida del inversor, significa una reducción de su magnitud en cada frecuencia en que se introduce el PMI.

Desde el punto de vista de la robustez ante variaciones paramétricas, la introducción necesaria y suficiente de los controladores resonantes y el ajuste de sus ganancias en función de los requerimientos de las normas de calidad de energía para UPS, logran

márgenes de estabilidad relativa más elevados en comparación con los obtenidos utilizando controladores repetitivos. Por este motivo y considerando además que, la estructura de controladores resonantes tiene una mayor flexibilidad para separar las acciones de control de la componente fundamental de los armónicos, para así combinar fácilmente el lazo de impedancia virtual como se mencionó anteriormente, los controladores resonantes son la mejor opción para implementar el PMI para control de tensión y corriente.

En lo que respecta al lazo de impedancia virtual y su ubicación en la estrategia de control, en comparación con otros esquemas la propuesta realizada permite reducir el número de sensores de corriente utilizados en la implementación, ya que no utiliza la medición de la corriente de salida como en los esquemas propuestos en (De & Ramanarayanan, 2010; Guerrero, Garcia de Vicuna, Matas, Castilla, & Miret, 2005; Guerrero, Matas, de Vicuña, Castilla, & Miret, 2007). Otra propuesta que utiliza menor cantidad de sensores es la presentada por (Lazzarin, 2010), en el cual se implementa el lazo de impedancia virtual en el lazo interno de control de corriente, mientras que en el lazo de control de tensión se utilizan controladores PID. Esta combinación establece una relación de compromiso entre circulación de corriente y distorsión armónica de la tensión de salida, ya que el aumento de la impedancia virtual incrementa la impedancia de salida en todas las frecuencias, causando mayor distorsión armónica que la obtenida con la propuesta del presente trabajo. En cuanto a las características de inyección de corriente de falla obtenidas con la estrategia de control propuesta, estas se diferencian de otras propuestas (Bottrell & Green, 2014) en lograr limitar la corriente tanto en condiciones de sobrecarga como cortocircuito, pasando del modo normal a falla y viceversa sin sobrepasos de la tensión de salida ni desestabilización de los controladores, mientras que en comparación con la propuesta de (Sadeghkhan, Golshan, Guerrero, & Mehrizi-Sani, 2016) para implementación con circuitos analógicos, la presente propuesta logra una implementación digital del controlador.

Por otro lado, la estrategia de control propuesta para la inyección de corriente de falla tiene ciertos puntos en común con la propuesta de (Botteron et al., 2003), la cual se realizó para inversores trifásicos en UPS de doble conversión, implementada en un referencial de coordenadas sincrónicas  $dq$ . La diferencia principal reside en que en lugar de utilizar acciones de control integral, se utilizan los controladores resonantes en cada lazo de control, desarrollándose algoritmos *anti-windup* particulares para este caso. Estos algoritmos tienen como objetivo evitar que durante el funcionamiento del inversor en condiciones extremas de sobrecarga o cortocircuito, los acumuladores del DSC se desborden producto de la sucesiva integración en las acciones de control.

### *Metodología de diseño de los controladores*

La mejor compensación del atraso de fase del sistema a lazo cerrado para la implementación de controladores resonantes se logra con la compensación de fase cero (Yunhu et al., 2013), obteniéndose los mayores márgenes de estabilidad relativa y consecuente mejor robustez ante incertezas paramétricas en comparación con otros esquemas de compensación.

A diferencia de la propuesta de (Yunhu et al., 2013), en la cual se propone obtener los ángulos de compensación en forma experimental, en el presente trabajo se propone determinar estos a partir de la característica de fase obtenidas del modelo de la planta (Carballo et al., 2016), simplificando significativamente el procedimiento de diseño.

Otra característica importante es la introducción del concepto de impedancia armónica, con la cual se establecen los límites que debe tener la impedancia de salida del convertidor para lograr cumplir con las normas IEC 62040-3. Comparando la impedancia de salida del inversor sin considerar los controladores resonantes, con la impedancia armónica, se determina que se deben introducir los controladores resonantes en la frecuencia fundamental, 3<sup>era</sup>, 5<sup>ta</sup>, 7<sup>ma</sup>, 9<sup>na</sup>, 15<sup>ta</sup>, 21<sup>era</sup> y 27<sup>ma</sup> armónicas de la fundamental, logrando con esto reducir significativamente la impedancia en estas frecuencias, y así cumplir con las normas de calidad de energía.

En Fig. 3 se observa la respuesta en frecuencia de la impedancia de salida del inversor considerando los controladores resonantes diseñados de acuerdo a la metodología de diseño propuesta en (Carballo et al., 2016), junto el efecto de  $Z_v(z)$  para dos características distintas de impedancia virtual, una resistiva y otra inductiva de magnitud  $1,5\Omega$ , verificándose que esta propuesta impone efectivamente la característica de la impedancia de salida que se quiere lograr a la frecuencia fundamental, mientras que en torno a las frecuencias armónicas se mantiene una reducida impedancia de salida para cumplir con las normas de calidad de energía para UPSs.

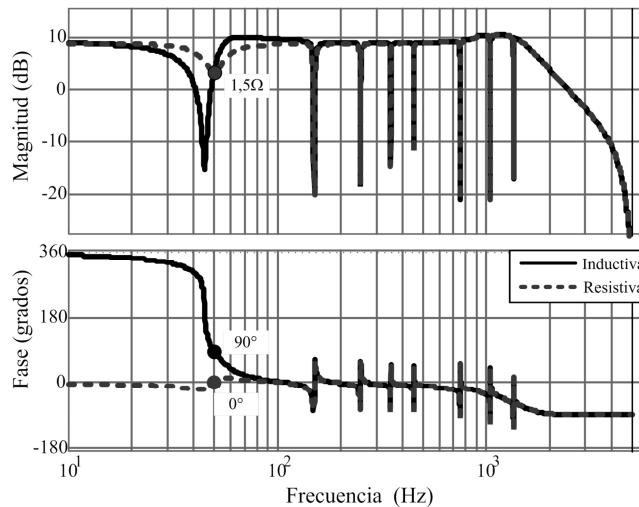


Fig. 3. Impedancia de salida para dos casos de impedancia virtual, impedancia inductiva en trazo continuo negro, e impedancia resistiva en trazo discontinuo gris.

Para lograr distintas características de fase de la impedancia virtual, se propone utilizar la siguiente función de transferencia para este lazo

$$Z_v(s) = k_{zv} (s + \omega_f) / (s - \omega_f), \quad (4)$$

La cual consiste en un filtro pasa todos que produce un retardo de fase de  $90^\circ$  a la frecuencia  $\omega_f$ , siendo la ganancia  $k_{zv}$  la que definirá la magnitud de la impedancia de salida. Variando  $\omega_f$  desde 0 hasta  $90^\circ$  es posible implementar a 50Hz impedancias resistivas puras hasta inductivas puras.

Para diseñar las características de magnitud y fase de  $Z_v(z)$ , las cuales tienen efecto sobre la regulación de tensión y corriente de circulación entre los inversores conectados en



paralelo, se propuso un modelo en espacio de estados del sistema completo, comprendido por los inversores conectados en paralelo con la estrategia de control propuesta.

Con la información de la relación de compromiso entre regulación de tensión y corriente de circulación obtenida con el modelo propuesto, se determinó que características de impedancia virtual predominantemente inductivas consiguen mejor regulación de tensión para una misma magnitud de impedancia virtual, por lo que esta característica sería la más adecuada para inversores en paralelo para UPS.

El modelo de espacio de estados propuesto también permite predecir la estabilidad del sistema en función de la característica de la impedancia virtual utilizada, diferenciándose de la propuesta de (Pogaku et al., 2007) en que esta fue realizada para estrategias en coordenadas  $dq$  sincrónicas además de incluir las dinámicas de los controladores por curva de caída en el modelo, mientras que la propuesta del presente trabajo es para coordenadas estacionarias y resulta más simple al no requerir la dinámica del controlador por curva de caída.

En la Fig. 4 se presenta el resultado experimental obtenido con el prototipo de laboratorio alimentando una carga no lineal, observándose que la forma de onda de la tensión sobre la carga posee un reducido contenido armónico, estando este resultado en correspondencia con la aplicación de la metodología de diseño y las características de la estrategia de control propuesta, mientras que las formas de onda de la corriente en los inductores presentan un comportamiento típico producto de la naturaleza de la forma de onda de la corriente de la carga no lineal, y la modulación PWM utilizada en cada convertidor. En el canal Matem. se obtiene la corriente de circulación entre los inversores, observándose un valor reducido y acorde a lo diseñado.

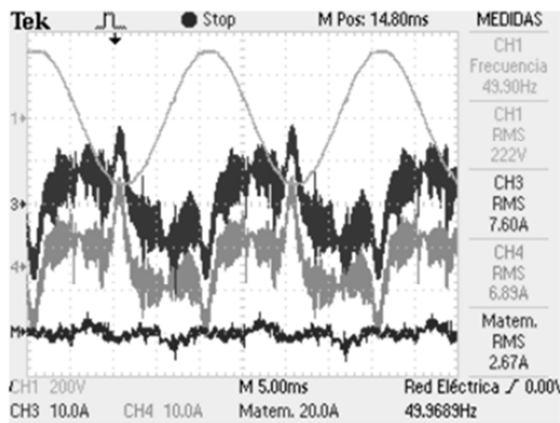


Fig. 4. Tensión sobre la carga no lineal (CH1) con dos inversores conectados en paralelo utilizando una impedancia virtual  $2\Omega$ , corriente de circulación (Matem.) y corrientes  $i_{L1}$  (CH3) e  $i_{L2}$  (CH4). Esc. de Tensión 200V/div. Esc. de Corriente 20A/div.

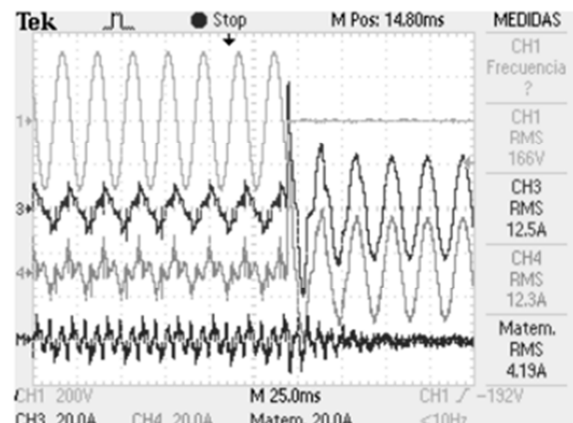


Fig. 5. Ensayo de cortocircuito. Tensión sobre la carga (CH1) con dos inversores conectados en paralelo utilizando una impedancia virtual de  $2\Omega$ , corriente de circulación (Matem.) y corrientes  $i_{L1}$  (CH3) e  $i_{L2}$  (CH4). Esc. de Tensión 200V/div. Esc. de Corriente 20A/div.

En la Fig. 5 se presenta el resultado experimental obtenido con el prototipo de laboratorio para la transición del estado de vacío a cortocircuito, observándose un rápido establecimiento de la corriente de falla (menos de 10mseg), con un comportamiento adecuado de la corriente de circulación, la cual se mantiene reducida en todo el ensayo.

## Conclusiones

En el desarrollo de la tesis descrita en este resumen, se propusieron, diseñaron y validaron estrategias de control para inversores conectados en paralelo, particularmente para el caso en que no se utiliza comunicación entre los inversores, teniendo como objetivo la obtención de un sistema con redundancia al que se pueden agregar otros inversores manteniendo siempre las cargas alimentadas. Esta característica es esencial en fuentes ininterrumpidas de energía o UPS; aplicación que es el objeto de análisis de esta tesis, para lo cual además se garantiza con la estrategia propuesta, que la tensión sobre la carga cumple con una calidad de energía especificada por normas para UPS, logrando también inyectar una corriente de falla en caso de sobrecargas y cortocircuitos.

Se propuso además una metodología de diseño de los controladores de esta estrategia, teniendo como objetivos cumplir con dichas normas de calidad de energía, inyectar la corriente de falla logrando una transición adecuada entre los distintos modos de operación, garantizar la operación estable de los inversores en paralelo para un amplio rango de robustez ante incertezas paramétricas, y lograr una regulación de tensión adecuada manteniendo una reducida corriente de circulación entre los inversores.

## Referencias

- Aamir, M., Kalwar, K. A., & Mekhilef, S. (2016). Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1395-1410.
- Botteron, F., De Camargo, R., Hey, H., Pinheiro, J., Undling, H., & Pinheiro, H. (2003). *New limiting algorithms for space vector modulated three-phase four-leg voltage source inverters*. Paper presented at the Electric Power Applications, IEE Proceedings-.
- Bottrell, N., & Green, T. C. (2014). Comparison of Current-Limiting Strategies During Fault Ride-Through of Inverters to Prevent Latch-Up and Wind-Up. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 29(7), 3786-3797. doi: 10.1109/tpel.2013.2279162
- Carballo, R. E. (2017). *Estrategias de control para la conexión en paralelo de inversores en UPS*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto.
- Carballo, R. E., Botterón, F., Oggier, G. G., & García, G. O. (2016). Design approach of discrete-time resonant controllers for uninterruptible power supply applications through frequency response analysis. *IET Power Electronics*, 9(15), 2871-2879. doi: 10.1049/iet-pel.2015.1059
- Coelho, E. A. A., Cortizo, P. C., & Garcia, P. F. D. (2002). Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 38(2), 533-542. doi: 10.1109/28.993176
- Chandorkar, M. C., Divan, D. M., & Adapa, R. (1993). Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 29(1), 136-143. doi: 10.1109/28.195899
- De, D., & Ramanarayanan, V. (2010). Decentralized Parallel Operation of Inverters Sharing Unbalanced and Nonlinear Loads. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 25(12), 3015-3025. doi: 10.1109/tpel.2010.2068313
- Guerrero, J. M., Garcia de Vicuna, L., Matas, J., Castilla, M., & Miret, J. (2005). Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 52(4), 1126-1135. doi: 10.1109/tie.2005.851634
- Guerrero, J. M., Lijun, H., & Uceda, J. (2008). Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(8), 2845-2859. doi: 10.1109/tie.2008.924173
- Guerrero, J. M., Matas, J., de Vicuña, L. G., Castilla, M., & Miret, J. (2007). Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 54(2), 994-1004. doi: 10.1109/tie.2007.892621
- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M., & Guerrero, J. M. (2016). Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 7(1), 200-215.

- Holtz, J., Lotzkat, W., & Werner, K. H. (1988). A high-power multitransistor-inverter uninterruptible power supply system. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 3(3), 278-285. doi: 10.1109/63.17945
- Holtz, J., & Werner, K. H. (1990). Multi-inverter UPS system with redundant load sharing control. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 37(6), 506-513. doi: 10.1109/41.103455
- Jinwei, H., & Yun Wei, L. (2011). Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 47(6), 2525-2538. doi: 10.1109/tia.2011.2168592
- Johnson, B., Dhople, S., Hamadeh, A., & Krein, P. (2014). Synchronization of Parallel Single-Phase Inverters With Virtual Oscillator Control. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, PP(99), 1-1. doi: 10.1109/tpel.2013.2296292
- Kroposki, B., Lasseter, R., Ise, T., Morozumi, S., Papathanassiou, S., & Hatziaargyriou, N. (2008). Making microgrids work. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 40-53. doi: 10.1109/mpe.2008.918718
- Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (1994). *Power system stability and control* (Vol. 7): McGraw-hill New York.
- Lazzarin, T. B. (2010). *Paralelismo de inversores de tensão*. Phd., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G., & Zare, F. (2009). Load sharing and power quality enhanced operation of a distributed microgrid. *Renewable Power Generation, IET*, 3(2), 109-119.
- Mattavelli, P., Paolo, F., Dal Lago, F., & Saggini, S. (2008). Analysis of Control-Delay Reduction for the Improvement of UPS Voltage-Loop Bandwidth. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(8), 2903-2911. doi: 10.1109/tie.2008.918607
- Pogaku, N., Prodanovic, M., & Green, T. C. (2007). Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 22(2), 613-625. doi: 10.1109/tpel.2006.890003
- Poh Chiang, L., & Holmes, D. G. (2005). Analysis of multiloop control strategies for LC/CL/LCL-filtered voltage-source and current-source inverters. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 41(2), 644-654. doi: 10.1109/tia.2005.844860
- Qing-Chang, Z., & Weiss, G. (2011). Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58(4), 1259-1267. doi: 10.1109/tie.2010.2048839
- Ryan, M. J., Brumsickle, W. E., & Lorenz, R. D. (1997). Control topology options for single-phase UPS inverters. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 33(2), 493-501. doi: 10.1109/28.568015
- Sadeghkhan, I., Golshan, M. E. H., Guerrero, J. M., & Mehrizi-Sani, A. (2016). A Current Limiting Strategy to Improve Fault Ride-Through of Inverter Interfaced Autonomous Microgrids. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*.
- Vukosavic, S., Peric, L., Levi, E., & Vuckovic, V. (1990, 0-0 1990). *Reduction of the output impedance of PWM inverters for uninterruptible power supply*. Paper presented at the Power Electronics Specialists Conference, 1990. PESC '90 Record., 21st Annual IEEE.
- Yepes, A. G., Freijedo, F. D., Doval-Gandoy, J., Lopez, O., Malvar, J., & Fernandez-Comesaña, P. (2010). Effects of Discretization Methods on the Performance of Resonant Controllers. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 25(7), 1692-1712. doi: 10.1109/tpel.2010.2041256
- Yunhu, Y., Keliang, Z., Ming, C., & Bin, Z. (2013). Phase Compensation Multiresonant Control of CVCF PWM Converters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28(8), 3923-3930. doi: 10.1109/tpel.2012.2227809
- Zhong, Q. C., & Zeng, Y. (2016). Universal Droop Control of Inverters With Different Types of Output Impedance. *IEEE Access*, 4, 702-712. doi: 10.1109/access.2016.2526616