

# Estrategia de control en convertidores CC-CA trifásicos conectados a redes débiles, con filtro de salida LCL y realimentación de tensión de red



Este trabajo presenta una estrategia de control para inversores trifásicos con filtro de salida LCL, con realimentación de corriente de salida, corriente de capacitor y realimentación de tensión. Es conocido que al realimentar las corrientes de salida y de capacitor, y siendo la frecuencia de resonancia del sistema igual a un sexto de la frecuencia de muestreo, existe un par de polos sobre la circunferencia unitaria, para un valor de ganancia de lazos de corrientes óptimos. En este trabajo se analiza primero la incidencia de la realimentación de tales lazos de corriente, para luego proponer y analizar la realimentación positiva de la tensión de capacitor en la estabilidad del sistema. Finalmente se propone realimentar la tensión de red, permitiendo estabilizar el sistema a un sexto de la frecuencia de muestreo.

Juan Gonzalez, Claudio Busada y  
Jorge Solsona  
Instituto de Investigación en  
Ingeniería Eléctrica "Alfredo Desages"  
Universidad Nacional del Sur  
CONICET  
*iiie.conicet.gov.ar*

**Palabras clave:** Inversor. Filtro LCL. Compensación feedforward. Realimentación de tensión.

## Introducción

Actualmente, la creciente demanda energética promueve el desarrollo de sistemas de generación distribuida, en los cuales los inversores tienen un rol importante a la hora de entregar energía a red. Para cumplir con los requisitos de calidad de energía [1]–[3], generalmente se utiliza un filtro LCL, reduciendo con él la cantidad de armónicos inyectados a la red. Se elige este filtro frente al 'L', por tener una mayor capacidad de atenuación de armónicos de alta frecuencia, a un costo y tamaño menor. Al efecto de que el sistema resulte estable, es necesaria la realimentación de la corriente en el capacitor del filtro, cuando la frecuencia de resonancia del filtro LCL es

menor a un sexto de la frecuencia de muestreo [4]. Siguiendo el método propuesto por [5] y [4], se utiliza en este trabajo un lazo de realimentación negativa de corriente de capacitor del filtro, además de la realimentación de la corriente de salida. Es importante notar, que al tratarse de redes débiles, la impedancia de red puede variar, o variar la impedancia vista por el inversor, como sucede al conectarse inversores en paralelo [6]–[9], variando también la frecuencia de resonancia del sistema filtro LCL-red.

Teniendo en cuenta esto, se abordará el análisis de estabilidad para situaciones críticas de impedancia de red, buscando hacer al sistema más robusto frente a variaciones de impedancia. El trabajo está organizado de la siguiente manera. La sección "Descripción y modelado del sistema" presenta el esquema del convertidor. En la sección "Diseño

optimizado del controlador” se introduce el diseño optimizado del controlador propuesto en [4]; mientras en la sección “Adición de lazo de realimentación de tensión de capacitor” se incluye la tensión del capacitor en el lazo de realimentación. En la sección “Alimentación de tensión de red feedforward” se muestra el efecto que produce en la estabilidad del sistema la alimentación feedforward de la tensión de red. Resultados de simulación se presentan en la sección homónima. Finalmente, la última sección entrega la conclusión de este trabajo.

### Descripción y modelado del sistema

El esquema simplificado del sistema a analizar se muestra en la figura 1. Allí se observa un inversor trifásico conectado a la red mediante un filtro LCL, siendo  $L_1$  el inductor del lado del inversor,  $L_2$  el del lado de la red y  $C$  el capacitor.

Se denota PCC (del inglés, “punto de acoplado común”), al punto de acoplamiento entre el inversor y la red, siendo la tensión en ese punto  $U'_g$ . La red se modela mediante una inductancia  $L_g$  en serie a una fuente ideal de tensión, denominada  $U_g$ .

El inversor se alimenta desde una tensión de bus. En la figura 1, se controla corriente de salida mediante un controlador, el cual puede ser un PR (proporcional-resonante) [10]–[14], un PI (proporcional-integrador) [15] [16] o un P (proporcional), siendo aplicado al error entre la corriente de inyectada a la red y una referencia de corriente. La señal  $\cos \theta$  (siendo  $\theta$  la fase de la tensión de red) es obtenida a través del PLL (del inglés, “lazo de fase cerrada”) [17], que utiliza como señal de entrada a  $U'_g$ . Para estabilizar el lazo de control principal de la corriente de salida, se utiliza un segundo lazo de realimentación interno de la corriente del capacitor [18] [19], a través de una ganancia [5] [4]. Además, se utiliza un lazo de realimentación de tensión [20] [21].

La representación en variables de estado del sistema se detalla en la figura 2. Para el cual la tensión es realimentada a través de una ganancia. El retardo debido del tiempo de muestreo y la retención

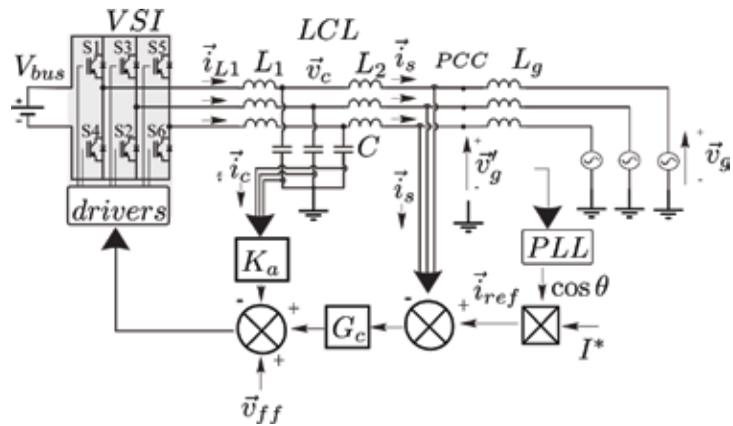


Figura 1. Modelo de inversor con filtro LCL

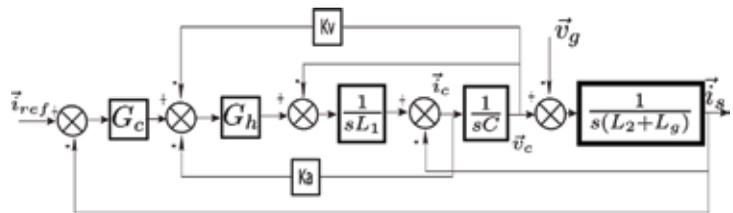


Figura 2. Variables de estado del modelo

de orden cero (ZOH), con la cual se modela el PWM [5], se incluyen en el bloque  $G_h$ , agregando al sistema un retardo de una muestra y media (1), para un tiempo de muestreo.

$$G_h = e^{-1,5sT_s} \quad (1)$$

### Diseño optimizado del controlador

Para el caso de inversores conectados a redes débiles a través de filtro LCL, se presenta la dificultad de que al variar la impedancia de red, varía con ella la frecuencia de resonancia del sistema, pudiendo afectar la estabilidad de este.

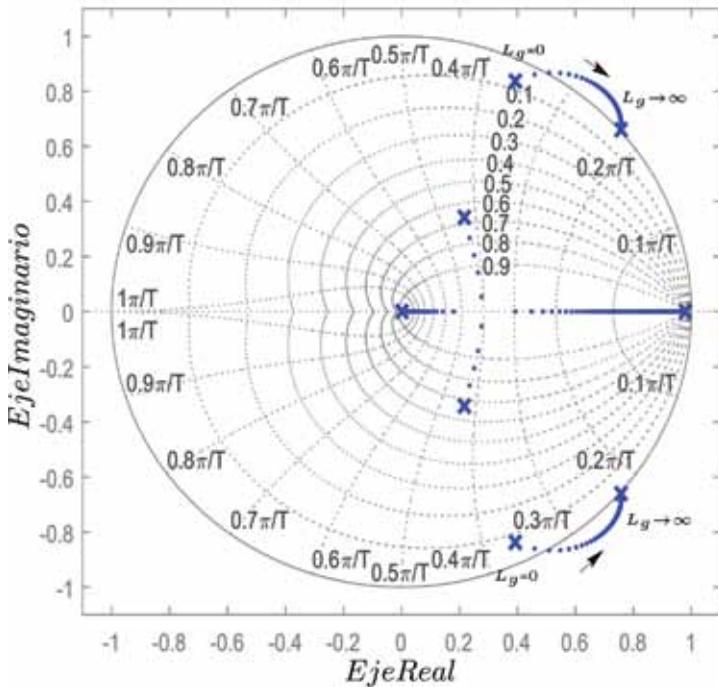


Figura 3. Lugar de los polos para realimentación de corriente de salida con  $K_p$  igual a  $K_{pop}$ , variando  $L_g$

En el caso de utilizarse un controlador  $P, G_c$  el controlador es igual a la ganancia proporcional ( $G_c = K_p$ ). Para el caso del diseño óptimo del controlador [10] [11],  $K_p$  es igual a  $K_{pop}$  (2), donde  $\omega_c$  (3) es una fracción de la frecuencia de resonancia del sistema  $\omega_r$  (4).

$$K_{pop} = \omega_c(L_1 + L_2) \tag{2}$$

$$\omega_c = 0,3 \omega_r \tag{3}$$

$$\omega_r = \sqrt{[(L_1 + L_2 + L_g)/(L_1(L_2 + L_g)C)]}; f_r = \omega_r/2\pi \tag{4}$$

Como se ha dicho anteriormente, cuando la frecuencia de resonancia es menor a un sexto de la frecuencia de muestreo  $f_s$ , es necesario agregar un

lazo de realimentación de corriente del capacitor que el sistema resulte estable [11] [5] [4]. Los polos de lazo cerrado del sistema de la figura 1, con ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$  y ganancia igual a cero, se muestran en figura 3, donde, para el caso en que solo se realimenta la corriente inyectada a la red, existe un margen de valores de inductancia en el que los polos del sistema se encuentran fuera de la circunferencia  $|Z|$  igual a uno.

En [4] se utiliza un lazo de realimentación de la corriente del capacitor, con una ganancia. Además, define un valor para ganancia óptimo,  $K_{aop}$  (5), que hace al sistema estable para cualquier valor de inductancia, excepto para un valor de inductancia crítica,  $L_{gc}$  (6), en que la frecuencia de resonancia del sistema es igual a la sexta parte de la frecuencia de muestreo. En tal caso, el sistema se encuentra en el límite de estabilidad, con un par de polos sobre la circunferencia  $|Z|$  igual a uno. Esto se muestra en la figura 4, donde la ubicación de los polos del sistema varía con la inductancia de red de inductancia, definiéndose a los puntos A, A', B y B' como la ubicación de los polos del sistema para cuando el valor de inductancia es igual al valor de inductancia crítica. Para este caso, los lazos de realimentación de corriente inyectada y corriente de capacitor, poseen ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$  y ganancia igual a ganancia óptima, respectivamente.

$$K_{aop} = (K_p L_1)/(L_1 + L_2 + L_{gc}) \tag{5}$$

$$L_{gc} = L_2 \times \frac{36 ((L_1 + L_2)/(2\pi^2 L_1 L_2 C) - f_s^2)}{f_s^2 - 36 (1/((2\pi^2)L_1 C))} \tag{6}$$

De acá en adelante, supondrá el caso en el que la inductancia de red sea igual a la inductancia crítica.

### Adición de lazo de realimentación de tensión de capacitor

En esta sección se analiza el efecto que produce en la estabilidad del sistema la realimentación de la

tensión en el capacitor de filtro, tal que la realimentación de tensión sea igual a la tensión en el capacitor, a través de una ganancia (ver figura 2).

En la figura 5, se detalla el lugar de las raíces para el caso donde, además de realimentar la corriente inyectada y la corriente del inductor (con  $K_{pop}$  y ganancia proporcional respectivamente), se realimenta la tensión del capacitor a través de la ganancia variable.

Se observa que existe un margen de valores de ganancia variable en que los polos se encuentran dentro de la circunferencia unitaria, siendo la ubicación de los polos del sistema para ganancia variable igual a cero los puntos A, A', B y B'. Este método logra estabilizar el sistema con la desventaja de necesitar un sensor más.

En la siguiente sección se propone utilizar la tensión del punto de acoplamiento como realimentación de tensión, evitando así emplear un sensor más.

### Retroalimentación de tensión de red

La realimentación positiva de tensión de PCC generalmente se utiliza para cancelar el efecto de la tensión ideal en el lazo de control. Permite mejorar el transitorio producido por variaciones de tensión ideal, y reducir el contenido armónico introducido por esta tensión en la corriente inyectada [22] [23]. Al valor de tensión realimentada de esta forma se la denomina retroalimentación (alimentación feed-forward) [20] [21].

En la figura 1, se observa que la tensión del punto de acoplamiento se utiliza como señal de entrada al PLL. Además, si se tiene en cuenta que esa tensión es una fracción de la tensión del capacitor, se propone realimentar de forma positiva a la tensión del punto de acoplamiento en vez de la tensión del capacitor, lo que es equivalente a realimentar la tensión del capacitor a través de una ganancia variable, es decir, ganancia variable de retroalimentación (7), siendo esta manera la tensión de retroalimentación igual a la tensión de punto de acoplamiento, como se muestra en la figura 1,

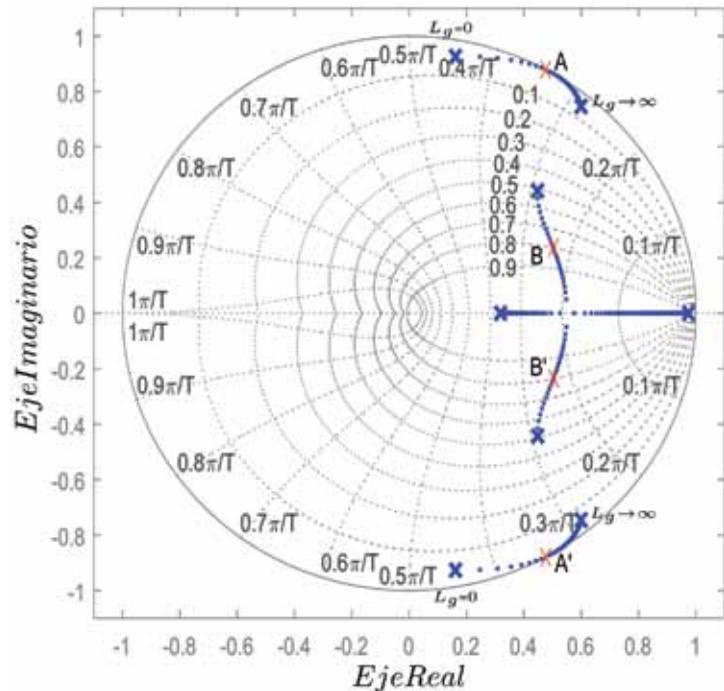


Figura 4. Lugar de los polos para la realimentación de la corriente inyectada con ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$ , y corriente del capacitor con ganancia igual a ganancia óptima, variando la inductancia

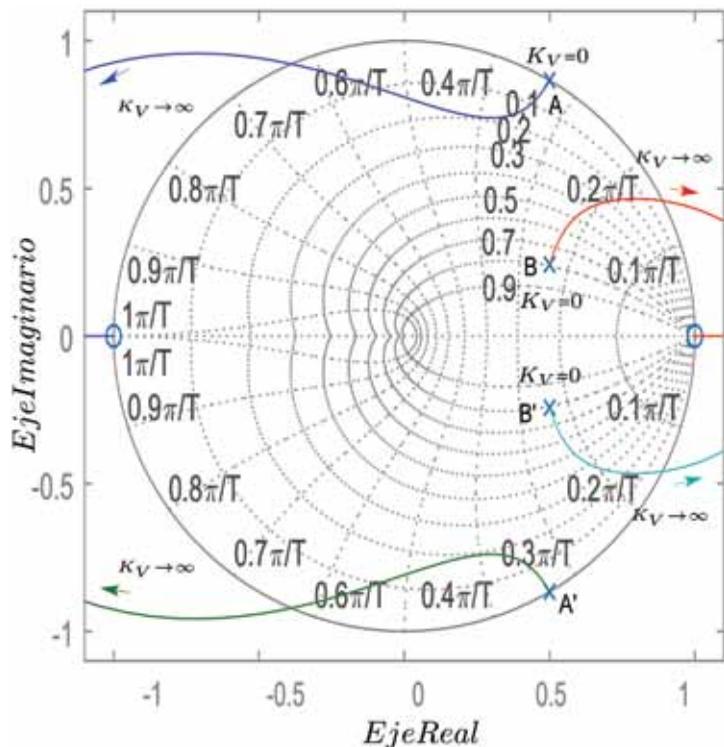


Figura 5. Lugar de raíces para realimentación de la corriente inyectada con ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$ , corriente del capacitor con ganancia igual a ganancia óptima y tensión del capacitor con ganancia variable

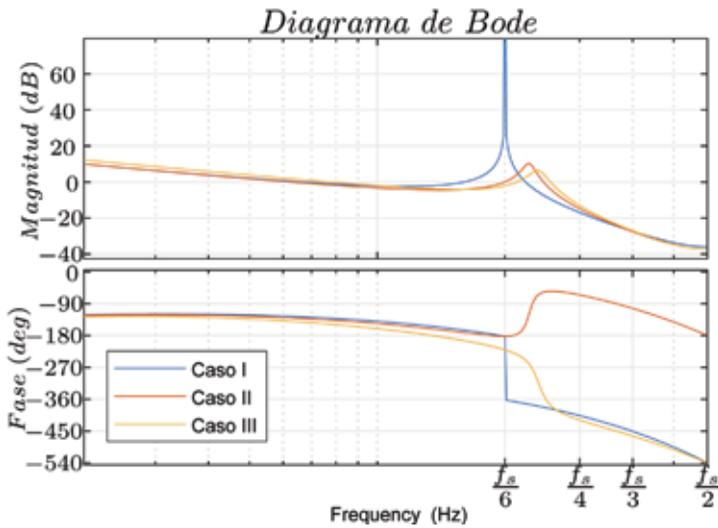


Figura 6. Análisis de lazo abierto para caso I, caso II y caso III con ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$ , ganancia igual a ganancia óptima

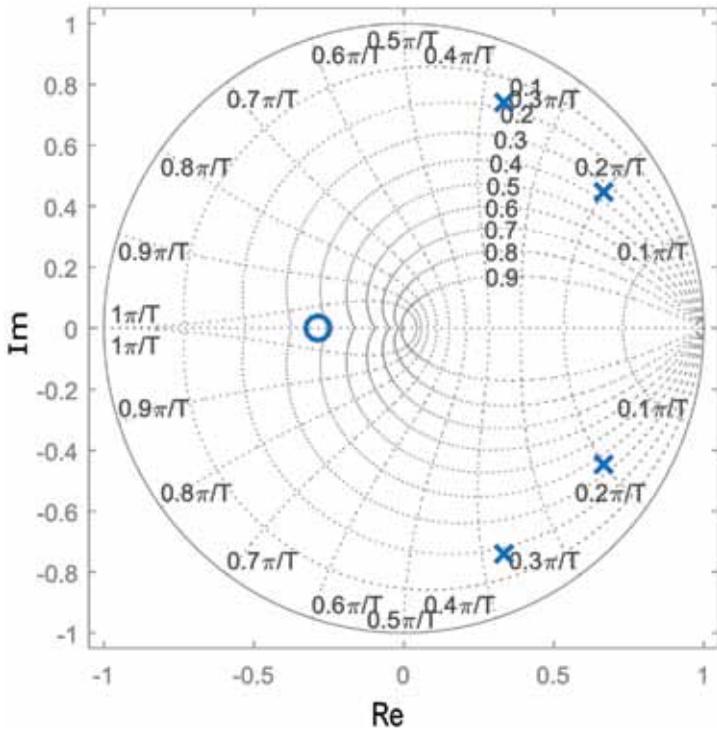


Figura 7: Diagrama de polos y ceros para caso III, con ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$ , ganancia igual a ganancia óptima

evitando así la medición de otra señal y el uso de su correspondiente sensor.

$$K_{vff} = L_{gc} / (L_{gc} + L_2) \tag{7}$$

De acuerdo al criterio de Nyquist [10], para que el sistema de lazo cerrado (cuando se realimenta la corriente inyectada) sea estable, la respuesta a lazo abierto debe tener una magnitud menor a cero decibeles cuando la fase es de -180 grados. Para poder comparar la mejora que incorpora la realimentación de tensión de punto de acoplamiento, se analiza la repuesta a lazo abierto para los siguientes tres casos, siendo el valor de la inductancia de red igual a la inductancia del capacitor:

- » Caso I. Respuesta a lazo abierto en corriente inyectada del sistema, sin realimentación de corriente ni tensión del capacitor.
- » Caso II. Respuesta a lazo abierto en corriente inyectada del sistema, con realimentación de corriente del capacitor, siendo la ganancia igual a la ganancia óptima, y sin realimentación de tensión del capacitor.
- » Caso III. Respuesta a lazo abierto en corriente inyectada del sistema, con realimentación de corriente y tensión del capacitor, con ganancia igual a ganancia óptima y ganancia variable igual a ganancia variable de retroalimentación.

En la figura 6, se observa que la magnitud para el caso I es mayor a cero decibeles para  $f_s/6$ , siendo la fase -180 grados, lo que implica que el sistema es inestable, según el criterio de Nyquist.

Para el caso II, la respuesta a lazo abierto posee una magnitud de cero decibeles para una fase de -180 grados, a una frecuencia  $f_s/6$ , que corresponde a un sistema en el límite de estabilidad. Esto se comprueba fácilmente al observar el lugar de las raíces en la figura 4, donde para una impedancia de red igual a la inductancia del capacitor y una ganancia óptima, el par de polos se encuentran sobre la circunferencia  $|Z|$  igual a uno.

Para el caso III, la respuesta a lazo abierto, la magnitud es menor a cero decibels para una fase de  $-180$  grados, siendo el sistema estable, con un margen de fase próximo a  $32$  grados. Esto se verifica en la figura 7, donde para el caso de la realimentación de tensión del capacitor con ganancia variable igual a ganancia de retroalimentación dado en (7), la ubicación de los polos se encuentra dentro de la circunferencia unitaria, logrando de esta manera que el sistema sea estable.

### Resultado de la simulación

En esta sección se detallan los resultados de la simulación del sistema ilustrado en la figura 1. Para esto la frecuencia de muestreo fue de doce kilohertz ( $12$  kHz), con una frecuencia de red de cincuenta hertz ( $50$  Hz). Siendo las inductancias  $L_1 = 3,2$  mH,  $L_2 = 1$  mH,  $L_{gc} = 1,76$  mH, y el valor del capacitor  $C = 4,26$   $\mu$ F. Se modeló con interruptores IGBT, con tiempos muertos de  $700$  ns. Siendo barra de continua  $V_{bus}$  de cuatrocientos volts ( $400$  V).

Se simuló un modelo para el cual, en el instante inicial, solo se encontraban implementados los lazos de realimentación de corriente con ganancia proporcional igual a  $K_{pop}$  y corriente de capacitor con ganancia igual a ganancia óptima, Siendo el controlador de corriente un  $P_i$  implementado en un marco de referencia sincrónico y la inductancia de red igual a cero. La corriente de salida es inicialmente estable (figura 8). Para el tiempo de simulación de trescientos milisegundos ( $300$  ms), la inductancia de red toma el valor de inductancia del capacitor, con lo cual los polos del sistema se ubican sobre la circunferencia unitaria, haciéndose el sistema inestable. Para el instante de tiempo de setecientos milisegundos ( $700$  ms), se cierra el lazo de alimentación de tensión igual a tensión del punto de acoplamiento, siendo, nuevamente, el sistema estable. Se observa de esta manera, que el sistema simulado es estable para cualquier valor de impedancia de red, especialmente para el caso crítico en que la frecuencia de resonancia es  $f_s/6$ .

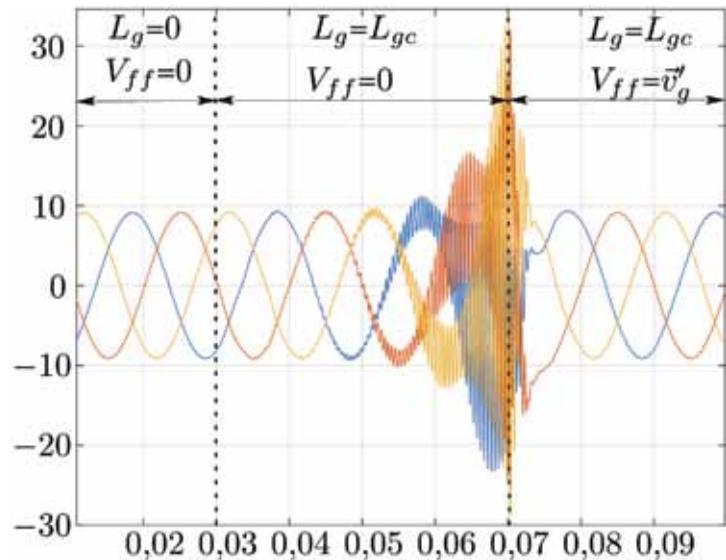


Figura 8. Corriente de salida

### Conclusión

En este trabajo, se concluye que para convertidores conectados a las redes débiles a través de filtros LCL, con realimentación de corriente de salida y corriente de capacitor, es necesaria la alimentación positiva feedforward de la tensión de red para que el sistema sea estable con la variación de la inductancia de red, particularmente para el caso crítico en que la frecuencia de resonancia es  $f_s/6$ . Es de gran importancia destacar, que al ser la tensión de red medida y utilizada como entrada al PLL, no es necesaria la adhesión de un sensor más a la hora de aplicar dicho control. ■

Referencias

- [1] "Ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems - amendment 1," IEEE Std 1547a-2014 (Amendment to IEEE Std 1547-2003), pp. 1–16, May 2014.
- [2] A. Prudenzi, U. Grasselli, and R. Lamedica, "Iec std. 61000-3-2 harmonic current emission limits in practical systems: need of considering loading level and attenuation effects," in 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), vol. 1, July 2001, pp. 277–282 vol.1.
- [3] "Ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," IEEE Std 519-1992, pp. 1–112, April 1993.
- [4] D. Pan, X. Ruan, C. Bao, W. Li, and X. Wang, "Optimized controller design for lcl-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid-impedance variation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1537–1547, March 2015.
- [5] —, "Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of lcl-type grid-connected inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 7, pp. 3414–3427, July 2014.
- [6] M. Lu, X. Wang, P. C. Loh, and F. Blaabjerg, "Resonance interaction of multiparallel grid-connected inverters with lcl filter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 2, pp. 894–899, Feb 2017.
- [7] M. Lu, F. Blaabjerg, and X. Wang, "Interaction admittance based modeling of multi-paralleled grid-connected inverter with lcl-filter," in 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), Dec 2016, pp. 1–7.
- [8] J. L. Agorreta, M. Borrega, J. López, and L. Marroyo, "Modeling and control of n -paralleled grid-connected inverters with lcl filter coupled due to grid impedance in pv plants," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 3, pp. 770–785, March 2011.
- [9] F. Cavazzana, T. Caldognetto, P. Mattavelli, M. Corradin, and I. Toigo, "Analysis of current control interaction of multiple parallel grid connected inverters," IEEE Transactions on Sustainable Energy, pp. 1–1, 2018.
- [10] S. G. Parker, B. P. McGrath, and D. G. Holmes, "Regions of active damping control for lcl filters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 1, pp. 424–432, Jan 2014.
- [11] R. A. Fantino, C. A. Busada, and J. A. Solsona, "Optimum pr control applied to lcl filters with low resonance frequency," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 1, pp. 793–801, Jan 2018.
- [12] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and M. Liserre, "Proportional-resonant controllers. a new breed of controllers suitable for grid-connected voltage-source converters," Journal of Electrical Engineering.
- [13] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," IEE PROCEEDINGS - ELECTRIC POWER APPLICATIONS, October 2006.
- [14] G. Shen, J. Z. Xuancai Zhu, and D. Xu, "A new feedback method for pr current control of lcl-filter-based grid-connected inverter," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 57, no. 6, pp. 2033–2041, June 2010.
- [15] D. Holmes, T. Lipo, B. McGrath, and W. Kong, "Optimized design of stationary frame three phase ac current regulators," Power Electronics, IEEE Trans. on, vol. 24, no. 11, pp. 2417–2426, Nov 2009.
- [16] A. Vidal, F. Freijedo, A. Yepes, J. Malvar, O. Lopez, and J. Doval-Gandoy, "Transient response evaluation of stationary-frame resonant current controllers for grid-connected applications," Power Electronics, IET, vol. 7, no. 7, pp. 1714–1724, July 2014.
- [17] N. A. Orlando, M. Liserre, V. G. Monopoli, and A. Dell'Áquila, "Speed sensorless control of a pmsg for small wind turbine systems," in 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 2009, pp. 1540–1545.
- [18] F. Liu, Y. Zhou, S. Duan, J. Yin, B. Liu, and F. Liu, "Parameter design of a two-current-loop controller used in a grid-connected inverter system with lcl filter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4483–4491, Nov 2009.
- [19] Y. Tang, P. C. Loh, P. Wang, F. H. Choo, F. Gao, and F. Blaabjerg, "Generalized design of high performance shunt active power filter with output lcl filter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 3, pp. 1443–1452, March 2012.
- [20] X. Li, J. Fang, Y. Tang, and X. Wu, "Robust lcl filter design for grid-side current single-loop controlled grid-connected converters under weak power grids," in 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), June 2017, pp. 477–482.
- [21] —, "Robust design of lcl filters for single-current-loop-controlled grid-connected power converters with unit pcc voltage feedforward," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 54–72, March 2018.
- [22] X. Wu, X. Li, X. Yuan, and Y. Geng, "Grid harmonics suppression scheme for lcl-type grid-connected inverters based on output admittance revision," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, no. 2, pp. 411–421, April 2015.
- [23] S. Zhou, X. Zou, D. Zhu, Y. Kang, L. Tong, and X. Gao, "Lcl type grid-connected converter no startup inrush current control method based on capacitor branch voltage feedforward," in IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Nov 2015, pp. 001 471–001 476.