

Estudio de un algoritmo de observador de estado de la red eléctrica de baja tensión

F. Marín*, A. B. Rey**, F. de A. Ruz*

**Dep. de Electrónica, Tecn. Comp. y Proyectos

*Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica de Cartagena
Cartagena (España)

pentxo.marin@upct.es; alexis.rey@upct.es

S. de Pablo, L. C. Herrero

Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Valladolid
Valladolid (España)
sanpab@eis.uva.es

Abstract— Se presenta el análisis de un nuevo algoritmo utilizado como observador de estado para lograr la correcta sincronización en fase y frecuencia de un inversor trifásico conectado a la red eléctrica de baja tensión, llevando a cabo la regulación desacoplada de las potencias instantáneas activa y reactiva por medio de la transformación de Park (dominio transformado). Se analiza la respuesta del algoritmo observador a los armónicos de la red, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio transformado, y se muestra su utilización en el control vectorial en fuente de corriente por histéresis de un inversor trifásico conectado a la red que garantiza una conexión con factor de potencia unitario si así se desea. Se muestran varias simulaciones del funcionamiento, tanto del observador de estado propuesto, así como del control del inversor.

Keywords- Transformación de Park, observador de estado, control vectorial

I. INTRODUCTION

Los sistemas de microgeneración, tales como las fotovoltaicas y las eólicas, pueden conectarse a una red trifásica de baja tensión a través de un inversor utilizado como acondicionador de potencia para aumentar la capacidad de la red de distribución de baja tensión. Esta red se comporta idealmente como una fuente de tensión senoidal, de manera que para no entrar en contradicción con ésta se suele controlar el inversor en fuente de corriente. Para garantizar la máxima eficiencia del sistema se precisa que el inversor conectado a la red funcione con un factor de potencia unitario y esto se consigue detectando la fase real de las tensiones trifásicas de red para inyectar las corrientes trifásicas en fase con aquella, anulando así la potencia reactiva si se desea. Sin embargo, algunas veces es necesario que circule algo de reactiva por el inversor cuando se utilizan condensadores en derivación como filtros pasivos. La teoría de la potencia reactiva instantánea [1] permite el control de las potencias instantáneas activa y reactiva en ejes desacoplados d - q en el dominio transformado.

La figura 1 muestra el diagrama de bloques del control en fuente de corriente de un inversor trifásico conectado a la red eléctrica.

La técnica PLL se ha venido empleando para garantizar la ya mencionada sincronización entre el inversor y la red a la que está conectado [2] y [3].

Este artículo introduce un nuevo algoritmo de observador de estado descrito mediante la transformación de Park. En primer lugar se describen brevemente las transformaciones directa e inversa de cualquier sistema de variables trifásicas, así como las expresiones de las potencias instantáneas activa y reactiva para un sistema equilibrado. En segundo lugar, se analiza la influencia de los armónicos de la red de baja tensión en el funcionamiento del observador de estado y las formas de filtrarlos. Finalmente se muestra la simulación del control vectorial en fuente de corriente por histéresis de un inversor trifásico conectado a la red.

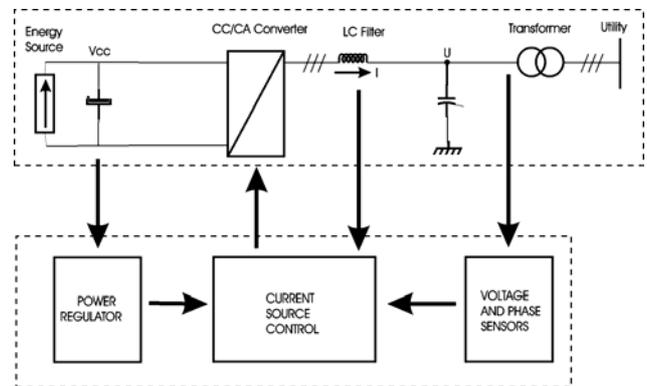


Fig. 1. Diagrama de bloques de un inversor trifásico conectado a la red y su control en fuente de corriente.

II. TRANSFORMACIÓN DE PARK

Cuando los valores instantáneos de las tensiones y corrientes trifásicas suman cero se puede aplicar la transformación de Park (ec. 1) [4] para manejar este tipo de variables, también conocida como “Campo Orientado” en la rama del control de motores eléctricos:

$$\mathbf{X} = \frac{2}{3} \cdot (x_1 + \bar{a} \cdot x_2 + \bar{a}^2 \cdot x_3) \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{U}_s \mathbf{I} \\ x_1 &= u_1 i_1 \\ x_2 &= u_2 i_2 \\ x_3 &= u_3 i_3 \\ \bar{a} &= e^{j(2\pi/3)} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \bar{a}^{-2} &= e^{j(4\pi/3)} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

A. Transformaciones directa e inversa

Si las variables trifásicas son señales senoidales de secuencia directa, entonces \mathbf{X} será un vector que gira en el sentido contrario a las agujas del reloj con una velocidad angular ω . Este vector se puede representar en el plano complejo (espacio de Park) sobre tres ejes fijos: \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , cada uno rotado 120° respecto del otro, dos ejes fijos $\text{Re}(\alpha)$ e $\text{Im}(\beta)$, y/o dos ejes móviles: \mathbf{d} , \mathbf{q} (véase la figura 2, ec. 3 y ec. 4), cada uno rotado 90° respecto del otro. Esto es la transformación directa. Para la transformación inversa véase la ec. 5 y la ec. 6.

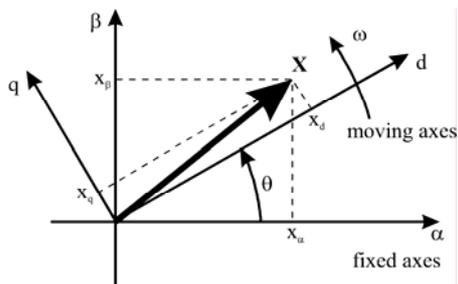


Fig. 2. Representación de las variables trifásicas en el espacio de Park.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

También se puede expresar \mathbf{X} en tres ejes \mathbf{a}' , \mathbf{b}' , \mathbf{c}' , rotados 30° respecto de la terna \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} . La matriz de transformación para este caso es como sigue:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_{30^\circ} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

III. EL OBSERVADOR DE ESTADO

La transformación de las tensiones trifásicas de red medidas al espacio de Park (\mathbf{U}) y el ajuste del eje móvil \mathbf{d} con la primera fase ($u_q=0$) garantizan la sincronización inductor-red: esto es lo que se denomina observador de estado (ver figuras 3 y 4). Teniendo en cuenta la teoría de la potencia reactiva instantánea [4], la transformación de las corrientes trifásicas del inductor en el vector \mathbf{I} hace que la potencia activa se corresponde con i_d y la reactiva con i_q (ec. 8). La segunda componente se anula o se hace constante para obtener un factor de potencia estable (unitario si fuese preciso). Mientras tanto, la componente en el eje \mathbf{d} se emplea para regular la tensión continua con el propósito de extraer la máxima potencia activa instantánea disponible en la fuente primaria de corriente continua.

$$\begin{aligned} p &= u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q = u_d \cdot i_d \\ q &= u_q \cdot i_d - u_d \cdot i_q = -u_d \cdot i_q \end{aligned} \quad (8)$$

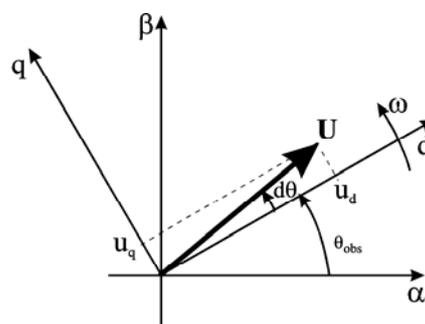


Fig. 3. Análisis gráfico del observador de estado.

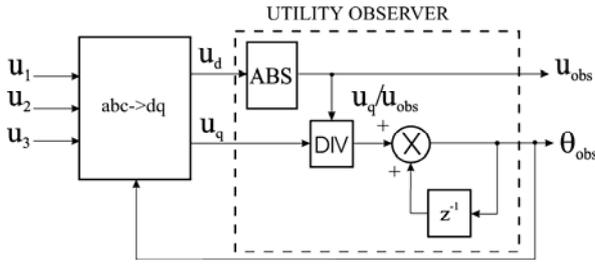


Fig. 4. Diagrama de bloques del algoritmo del observador de estado implementado digitalmente (p y q no se muestran por simplicidad).

El período de muestreo debe ser muy reducido en comparación con el período de la frecuencia fundamental de las tensiones trifásicas de red, de modo que $d\theta$ también será muy reducido. De este modo, las ecuaciones del observador de estado son:

$$\begin{aligned} u_{obs} &= |u_d| \\ d\theta &= \frac{u_q}{u_{obs}} \approx \Delta\theta = \theta(n) - \theta(n-1) \\ \theta_{obs} &= \theta(n) = \theta(n-1) + \frac{u_q}{u_{obs}}(n) \end{aligned} \quad (9)$$

De acuerdo con el signo del error resultante $d\theta$, el eje \mathbf{d} se acelerará o desacelerará con el propósito de aproximarse a \mathbf{U} y el tiempo de respuesta será mínimo al compararlo con el de un PLL.

El sistema completo del observador de estado, tanto para las tensiones de red, como para las potencias activa y reactiva se muestra en la figura 5.

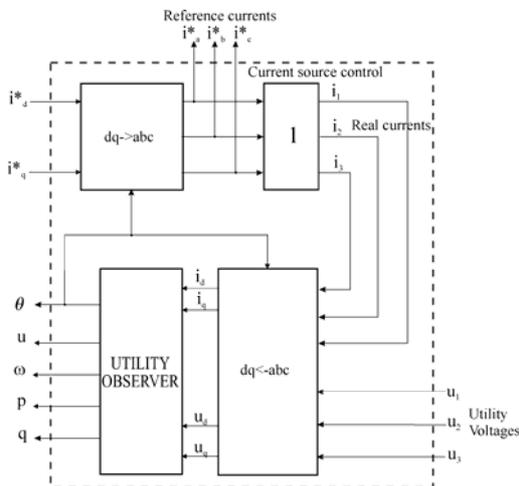


Fig. 5. Diagrama de bloques ideal del sistema completo.

IV. ANÁLISIS DE LA RED ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN DISTORSIONADA

Chung [5] analiza la influencia de un PLL de 2º orden con el filtro del lazo de un regulador PI, para una transformación $\mathbf{d-q}$ de las variables, en el tiempo de respuesta del sistema, logrando

un compromiso entre un “enganche del lazo” rápido y unas buenas características de filtrado. También analiza la influencia de las tensiones de red trifásicas distorsionadas en el dominio transformado $\mathbf{d-q}$ cuando u_q se regula a cero. En el estudio se muestra que las tensiones de red desequilibradas producen el 2º armónico en u_d ; que los armónicos 1, 5, 7, 11, 13, ... en las tensiones de red equilibradas producen el 0, 6, 12, 18, ... armónico en u_d ; y que el *offset*, debido a los procesos de medida y conversión de datos de las tensiones de red trifásicas de baja tensión, produce el 1º armónico en u_d .

A. Filtrado

Con el propósito de reducir las potenciales distorsiones en los armónicos de bajo orden de la corriente controlada es necesario filtrar las tensiones de la red trifásica de baja tensión en lazo abierto. Pero la utilización de un filtro real de tipo paso-bajo produce un retardo en estas señales, reduciendo el factor de potencia, y acoplando las potencias activa y reactiva instantáneas. Sin embargo, si las tensiones filtradas se retrasaran 90º respecto de las no filtradas, las magnitudes de los ejes α, β se podrían permutar. Así, la respuesta en régimen estacionario no tendrá retardo alguno, y las potencias instantáneas activa y reactiva podrían ser controladas en los ejes desacoplados $\mathbf{d-q}$.

Un filtro digital real de 2º orden de tipo paso-bajo con un ancho de banda de 50Hz, y con un factor de amortiguamiento de 0,5 tiene todas las características que se mencionan arriba [6].

La figura 6 muestra el diagrama de bloques del observador utilizando el filtro de 2º orden descrito, y las ecuaciones 10-12 lo describen.

Cuando se producen armónicos en u_d por desequilibrio y *offset* en las tensiones de la red, la mejor elección es el empleo de un filtro activo.

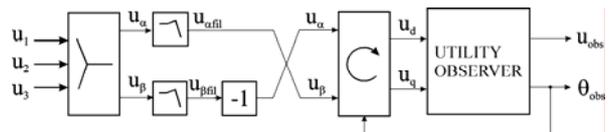


Fig. 6. Diagrama de bloques del observador de estado con un filtro paso-bajo de segundo orden.

$$\mathbf{U} = u_\alpha \cdot \boldsymbol{\alpha} + u_\beta \cdot \boldsymbol{\beta} \quad (10)$$

$$\mathbf{U}_{fil} = u_{\alpha fil} \cdot \boldsymbol{\alpha} + u_{\beta fil} \cdot \boldsymbol{\beta} = \mathbf{U} \cdot e^{-j\pi/2} \quad (11)$$

Operando con las ecuaciones (10) y (11):

$$u_\alpha = -u_{\beta fil} \quad (12)$$

$$u_\beta = u_{\alpha fil}$$

V. INVERSOR CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA

La estructura del inversor es la típica: la fuente de energía de continua conectada al inversor a través de un condensador *link*, un filtro LC y un transformador trifásico para el aislamiento galvánico (véase la figura 7). Se muestra igualmente los bloques del control en fuente de corriente.

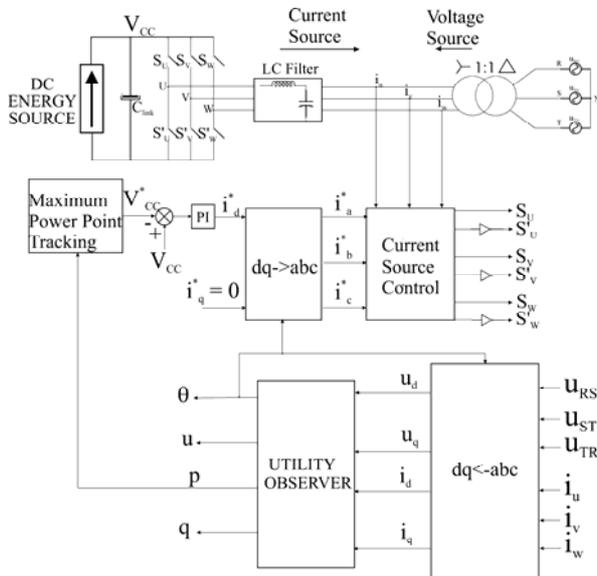


Fig. 7. Diagrama de bloques del control en fuente de corriente de un inversor trifásico conectado a red.

VI. SIMULACIONES

Para mostrar el funcionamiento del observador de estado propuesto se han realizado varias simulaciones: en primer lugar se ha simulado la influencia del algoritmo del observador de estado utilizando el filtro digital de 2º orden tipo paso-bajo en las corrientes generadas ($V_{rn}=380V$, $i_d=20A$); en segundo lugar, se muestran las simulaciones del control vectorial en fuente de corriente por histéresis de un inversor trifásico de 10 KVA conectado a la red, conmutando a 10 kHz [7], [8].

La figura 8 muestra la evolución de la tensión y la fase observadas, así como la corriente generada en la fase 1 en perfecto sincronismo de fase y de frecuencia con las tensiones de red equilibradas. La respuesta transitoria es de 20ms aproximadamente.

La figura 9 muestra la evolución de la tensión observada con una distorsión del 5,71% en el 2º armónico, debida a un desequilibrio de las tensiones de red. La corriente generada en la fase 1 tiene una distorsión del 2,88% en el 3º armónico, algo menos debido a la acción de filtrado.

La figura 10 muestra la evolución de la tensión observada con una distorsión del 0,4% en el 6º armónico, debida a las tensiones de red con una distorsión del 10% en el 5º armónico. La corriente generada en la fase 1 tiene una distorsión del 0,31% en el 5º y el 7º armónico, fuertemente reducida por el filtrado.

La figura 11 muestra la evolución de la tensión observada con una distorsión del 13,49% en la frecuencia fundamental,

debida a un *offset* en las tensiones de red. La corriente generada en la fase 1 tiene una distorsión del 6,91% principalmente en los armónicos 2º y 3º.

En todos los casos, se ha podido ver la evolución desacoplada de las potencias activa y reactiva instantáneas, cuando se produce un escalón de 8A en I_q .

La figura 12 muestra la evolución de la corriente controlada por la fase 1 en un inversor trifásico de 10 KVA, conmutando a 10 kHz y conectado a la red. El inversor está controlado en fuente de corriente por histéresis. A los 62,5ms aproximadamente se produce un escalón de -50A provocando la circulación de potencia reactiva que provoca el desfase observado entre la tensión y la corriente por la fase 1.

La figura 13 muestra el control desacoplado que se ejerce sobre las potencias activa y reactiva al producirse el escalón de -50A a los 62,5ms aproximadamente.

VII. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un nuevo algoritmo por *software* para el observador de estado de las tensiones de red utilizando la transformación de Park para conseguir la sincronización red-inversor en sistemas conectados a red. El método propuesto evita el empleo de un PLL, además de poderse implementar en un DSP.

La operación con factor de potencia unidad se garantiza utilizando un filtro de 2º orden de tipo paso-bajo para disminuir la contaminación por armónicos de las tensiones de red ya que el funcionamiento se optimiza a régimen estacionario, además de conseguir un control desacoplado de las potencias reactiva y activa instantáneas. Sin embargo, se tiene una pobre respuesta inicial en régimen transitorio.

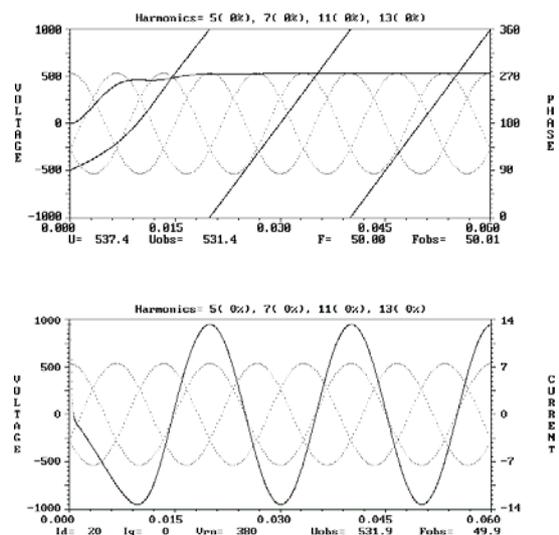


Fig. 8. Observador de estado con tensiones de red equilibradas.

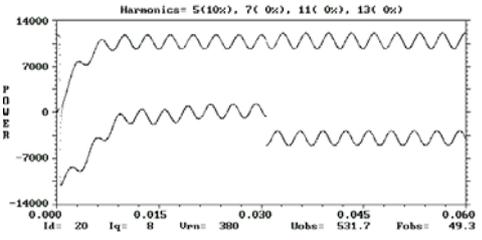
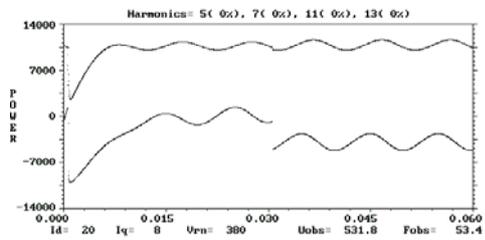
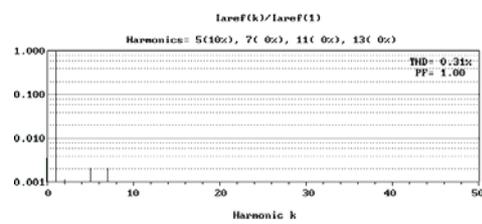
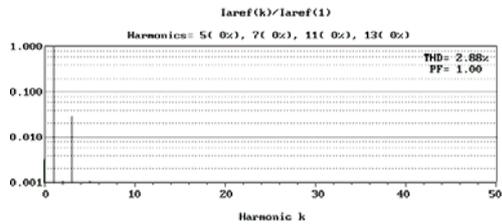
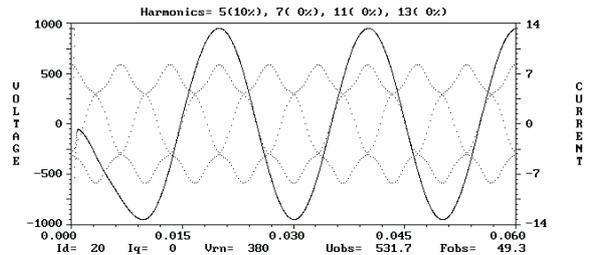
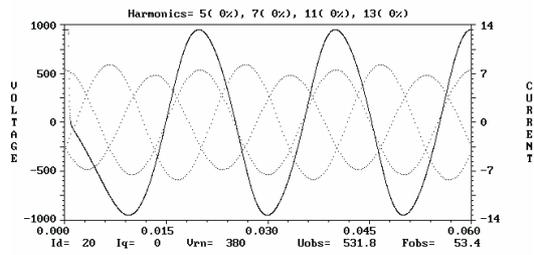
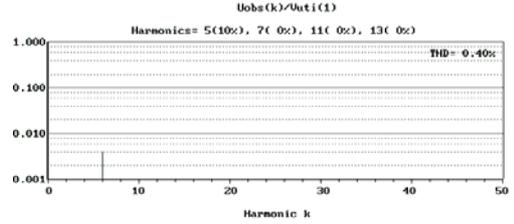
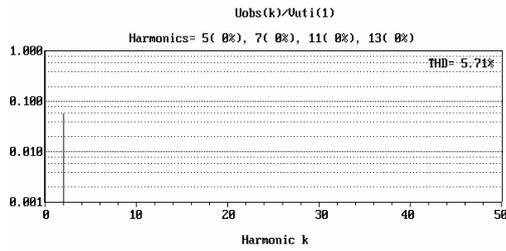
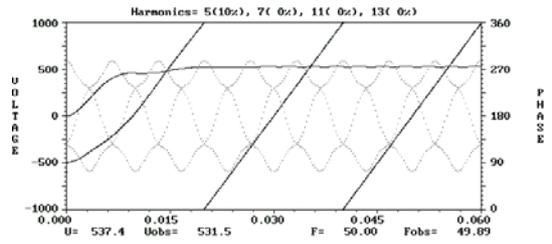
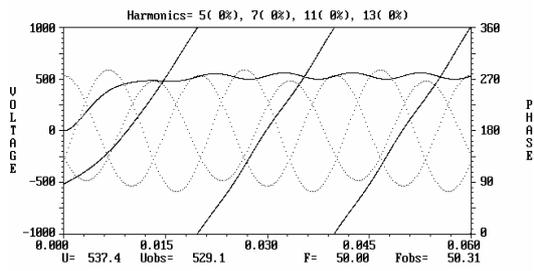


Fig. 9. Observador de estado con tensiones de red desequilibradas.

Fig. 10. Observador de estado con distorsión del 10% en el 5º armónico.

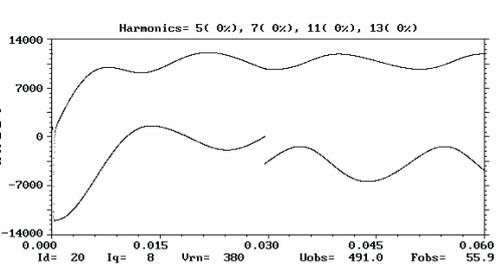
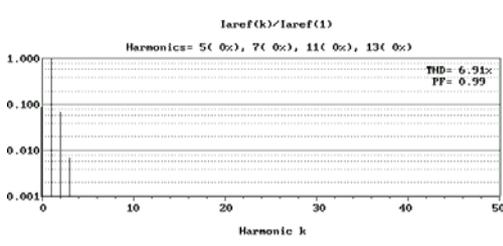
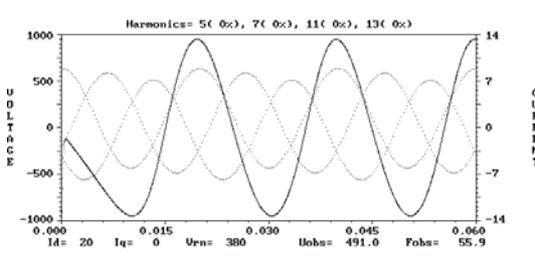
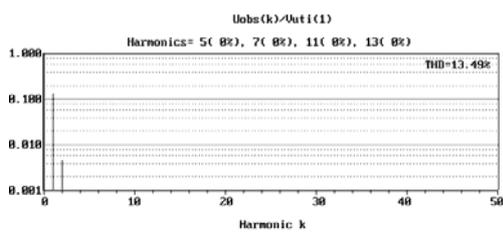
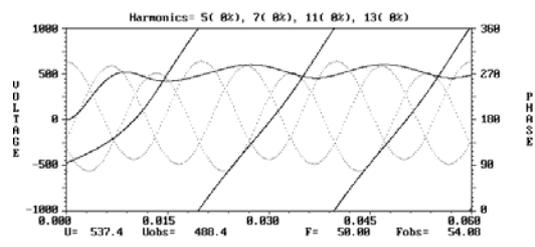


Fig. 11. Observador de estado con offsets en las tensiones de red.

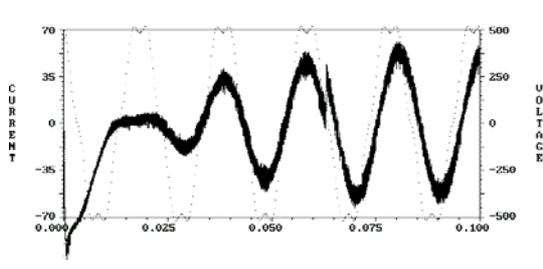


Fig. 12. Evolución de la corriente por la fase 1 (también la tensión en línea discontinua) de un inversor conectado a red controlado en fuente de corriente por histéresis. Escalón en $I_q=50A$ a 62,5ms aproximadamente.

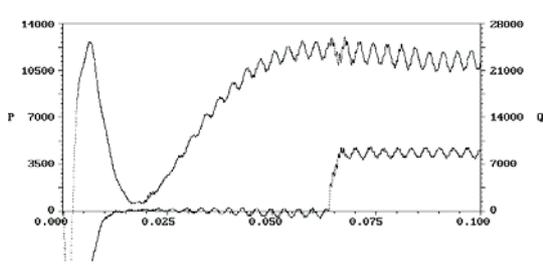


Fig. 13. Evolución de las potencias activa y reactiva instantáneas de un inversor conectado a red controlado en fuente de corriente por histéresis. Escalón $I_q =50A$ a 62,5ms aproximadamente. Las potencias p y q desacopladas.

REFERENCIAS

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 20, pp. 625-630, **May/June** 1984.
- [2] L. J. Borle, M. S. Dymond, and C. V. Nayar.: "Development and testing of a 20-kW grid interactive photovoltaic power conditioning system in Western Australia", *IEEE Trans.*, 1997, **IA-33**, (2), pp.502-508.
- [3] Gardner, R. M.: "Phaselock techniques", *John Wiley*, 1979.
- [4] P. Korondi, H. Hashimoto. "Park Vector Based Sliding Mode Control of UPS with Unbalanced and Nonlinear Load", *Workshop on Variable Structure Systems VSS'98*, 1998.
- [5] S. -K. Chung. "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, **Vol. 147, No. 3, May** 2000.
- [6] W. H. Hayt Jr., J. E. Kemmerly, S. M. Durbin. "Engineering Circuit Analysis", 6 ed., *Mc Graw Hill*.
- [7] J. Holtz. "Pulsewidth Modulation - A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. **IE-39**, n° 5, 1992, pp. 410-420.
- [8] Alexis B. Rey. "Control Digital Vectorial con Sliding en Fuente de Corriente para convertidores CC/CA trifásicos conectados a red", *Ph. D. Thesis, University of Valladolid (Spain)*, 2000.