



## Control de un restaurador dinámico de tensión basado en la transformada de Fourier del Vector Espacial

### *Dynamic voltage restorer control based on the Space-Vector Fourier Transform*

Lesyani T. – León Viltre  
Francisco de Assis- Dos Santos Neves  
Miriam-Vilaragut Llanes

**Recibido:** Junio del 2013

**Aprobado:** Septiembre del 2013

#### **Resumen/ Abstract**

El gran desarrollo de la automatización industrial, como resultado de la modernización y el progreso de los equipos con microprocesador y electrónica de potencia, ha hecho que las cargas en la actualidad sean más sensibles a las caídas de tensión de corta duración. Estos trastornos, incluso en tiempos muy cortos, pueden detener procesos enteros causando enormes pérdidas. Por esta razón en el presente trabajo se propone un Restaurador Dinámico de Tensión (dynamic voltage restorer- DVR), para mantener la operación ininterrumpida de una carga industrial, sensible a huecos de tensión. El control propuesto para el DVR está basado en la transformada de Fourier del vector espacial (space vector Fourier transform- SVFT). El vector controlado es implementado en los ejes de referencia estacionarios alfa y beta. Se obtienen resultados satisfactorios ante señales distorsionadas. Se realizan simulaciones en el Matlab del sistema propuesto para huecos de tensión balanceados y desbalanceados.

**Palabras clave:** restaurador dinámico de tensión.

*The great development of industrial automation, as a result of modernization and progress of equipment with microprocessor and power electronics has made loads now more sensitive to voltage drops. These disorders, even in very short time, can stop the whole process causing huge losses. For this reason a dynamic voltage restorer (DVR) is proposed in this paper for keeping uninterrupted operation of sensitive industrial load during voltages sags. The proposed DVR controller is based on the Space Vector Fourier Transform (SVFT). The vector controller is implemented in the stationary reference frames. Satisfactory results are obtained for distorted signals. The proposed system is simulated in Matlab for voltage dips balanced and unbalanced.*

**Key Words:** dynamic voltage restorers.

#### INTRODUCCIÓN

Entre los diversos fenómenos que afectan a la calidad del suministro de energía eléctrica las variaciones de tensión de corta duración son unos de las de mayor incidencia. Entre las variaciones de tensión de corta duración, los huecos de tensión ocupan un lugar destacado, ya que son los que afectan a los procesos industriales. No todos los huecos de tensión que se producen en la red son debidos a fallas, también se producen huecos por el arranque de grandes motores o en la conexión de transformadores en el sistema eléctrico. Los huecos de tensión se han estudiado en detalles en numerosos trabajos de investigación. En [1] se presenta un análisis y clasificación de huecos trifásicos desequilibrados. La clasificación considera las fallas trifásicas, monofásicas, bifásicas, así como todos los tipos de conexión de transformadores.

En las redes trifásicas los huecos de tensión pueden ser divididos en dos grandes categorías:

- Huecos simétricos, donde las tensiones de las tres fases caen en la misma proporción.
- Huecos asimétricos, donde las caídas de las tres fases no son iguales. Pueden ser monofásicos o bifásicos.

Normalmente los huecos que aparecen en la red son monofásicos, provocados por un cortocircuito entre una fase y tierra. Por ejemplo, la descarga de un rayo produce sobretensiones suficientes para formar un arco entre la fase y la torre que se encuentra conectada a tierra, lo que provoca un cortocircuito entre la línea y tierra. Las faltas bifásicas son menos comunes, y consisten en un cortocircuito entre dos fases. El gran desarrollo de la automatización industrial como resultado de la modernización y el progreso de los equipos de microprocesador y electrónica de potencia ha hecho que estos procesos sean más sensibles a este fenómeno. Veamos, que es de suma importancia para la continuidad del suministro de electricidad para los procesos industriales, ya que estos trabajan con los regímenes de producción cada vez más independientes y no pueden ser interrumpidos debido a huecos de tensión.

El DVR es un convertidor en fuente de tensión (VSC) que es conectado en serie entre de la red y la carga, cuya tensión se suma a la tensión de la red con el fin de obtener la tensión deseada en la carga. Dependiendo del tipo de control, el DVR representa una solución práctica para proteger cargas sensibles a la presencia de perturbaciones de la red [2-3].

En los primeros trabajos publicados sobre DVR las estrategias de control eran basadas en controladores de tipo proporcional integral (PI), implementados en el referencial dq síncrono [2-4]. El uso de controladores PI en el referencial síncrono garantiza buen desempeño cuando se desea compensar huecos de tensión trifásicos balanceados, como aquellos causados por corto circuitos trifásicos en la red. Sin embargo, la gran mayoría de las fallas son asimétricas de modo que las tensiones de red presentan componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Considerando que generalmente las industrias son conectadas a la red a través de transformadores con conexión  $\Delta Y$ , las componentes de secuencia cero no influyen en la tensión secundaria en el lado de las cargas industriales. A pesar de eso, la existencia de tensiones desequilibradas con componentes de secuencia positiva y negativa hacen que los controladores PI en el referencial síncrono no sean adecuados, ya que las componentes de secuencia negativa son sinusoidales de segunda armónica cuando se usa en el referencial dq síncrono.

Una posible solución para este problema puede ser obtenida con el uso de controladores duplos, siendo uno en el referencial dq síncrono y el otro en el referencial dq girando a la velocidad de la secuencia negativa [5-6]. En este caso, se garantiza error de régimen permanente nulo para las componentes desequilibradas de falla, tornando las tensiones en la carga perfectamente equilibradas, o sea, conteniendo apenas componente de frecuencia fundamental y secuencia positiva (fundamental-frequency positive-sequence FFPS).

En los casos en que el DVR debe ser capaz de compensar armónicos, causados, por ejemplo, cuando se energizan transformadores o debidos a cargas no lineales como hornos de arco, el uso de dos controladores, en referenciales de secuencia positiva y negativa pasa a ser insuficiente. Se puede emplear controladores PI en varios referenciales para conseguir un buen desempeño de control [7], mas con un elevado esfuerzo computacional.

El controlador proporcional+ resonante (PR) fue propuesto como una solución equivalente al uso de PI en el referencial síncrono [8-11]. Ese controlador es basado en el integrador generalizado de segundo orden en el referencial estacionario (second order stationay-frame generalized integrators) (SSI), el cual tiene ganancia infinita para una frecuencia de resonancia específica, haciendo que el controlador PR garantice error nulo de régimen permanente en esa frecuencia. Los controladores PR son generalmente implementados en referencial dq síncrono. Con eso, la componente FFPS se torna continua, la componente de frecuencia fundamental y secuencia negativa se torna segunda armónica de secuencia negativa y las componentes de orden  $h$  se tornan de orden  $(h-1)$ , pudiendo  $h$  ser positiva o negativa, donde el signo negativo significa secuencia negativa. Así, un controlador con frecuencia de resonancia  $\omega_0$  garantiza error nulo en régimen permanente para dos componentes: de orden  $(+\omega_0-1)$  y  $(-\omega_0-1)$ . Sabiendo que los componentes armónicos por lo general presentes en sistemas trifásicos son de orden  $(6k+ 1)$

y  $(-6k + 1) k \in \mathbb{N}$ , se pueden utilizar controladores de frecuencias de resonancia  $\omega_0 = 6k$ . Un controlador vectorial resonante equivalente a un controlador integral en un referencial que gira a una velocidad específica es usado en [10-13]. Este controlador, basado en un integrador vectorial de primer orden y denominado integrador generalizado de orden reducido (reduced order generalizad integrator) (ROGI), es implementado en el referencial estacionario y tiene una ganancia infinita para una componente de frecuencia y secuencia específica. La diferencia entre controladores basados en SSI y ROGI es que este último es capaz de rastrear a penas la componente de secuencia positiva o a penas la componente de secuencia negativa de una determinada frecuencia, en cuanto que el controlador basado en SSI tiene que rastrear ambas componentes.

En [14-15] fueron propuestos controladores de corrientes para convertidores conectados a la red basados en control repetitivo. Tales controladores garantizan error nulo en régimen permanente para diversas componentes armónicas del vector de corriente de entrada. La Transformada discreta de Fourier (discrete Fourier transform – DFT) es usada para obtener componentes armónicas específicas de la señal de error y la realimentación positiva de tales componentes es empleada de modo que el controlador posee ganancia infinita para las mismas.

En este trabajo, se propone emplear controladores basados en SVFT para regular la tensión inyectada por un DVR. De modo semejante al control basado en DFT, la inclusión de realimentación positiva de las componentes vectoriales de secuencia positiva y frecuencia fundamental, de secuencia negativa y frecuencia fundamental y de componentes vectoriales armónicas típicas de cargas no lineales, garantiza ganancia de lazo abierto infinita y ganancia de lazo cerrado unitaria para esas componentes. Al usar control basado en DFT, cada componente armónica a ser controlada requiere la implementación de dos DFT (una para el eje  $\alpha$  y otra para el eje  $\beta$ ). Diferentemente, solamente una SVFT recursiva debe ser calculada para cada componente vectorial armónica a ser controlada. Además, el uso de la SVFT permite, así como el control basado en ROGI, rastrear a penas una señal de referencia con una secuencia específica.

El presente trabajo está estructurado de la siguiente forma: en la sección A se muestra las diferentes partes que forman el DVR, así como su sistema de control, mientras que en la sección B se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en el Simulink del Matlab.

## DESARROLLO

La configuración general de un DVR trifásico se muestra en la figura 1. Se compone de un DVR trifásico conectado en serie con la línea de alimentación a través de tres transformadores monofásicos (0,8 MVA y 690/690 V) para inyectar las tensiones de compensación. Un filtro paso bajo LC está conectado entre el convertidor en fuente de tensión (VSC) que forma parte del DVR y el transformador.

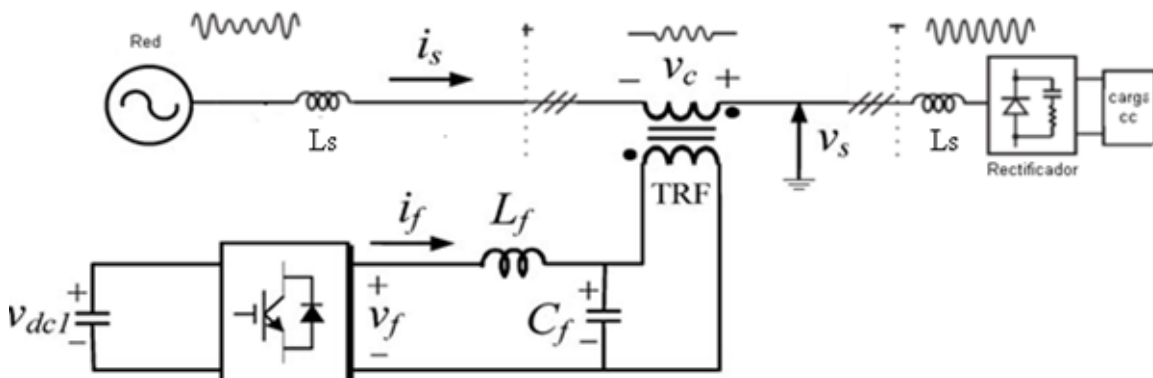


Fig. 1. DVR Trifásico.

## A. Partes que conforman el DVR

Para llevar a cabo las simulaciones propuestas, se utilizó el sistema eléctrico de 34.5 kV y un transformador de 34.5/0.690 kV. La carga a alimentar es de tensión nominal 690 V.

### Filtro de salida

Las tensiones de salida sintetizadas por el convertidor no se pueden aplicar directamente al transformador debido a su contenido de armónicos provocados por la conmutación del inversor de alta frecuencia. Para corregir las tensiones aplicadas al secundario del transformador se coloca un filtro LC en la salida del inversor. Los valores del filtro utilizados en la simulación son:  $L_f = 0.2$  mH y  $C_f = 1000$  mF.

### Transformador de inyección

El transformador de inyección es conectado en serie, este debe tener bajos valores de las resistencias en el devanado primario y secundario para reducir al mínimo las pérdidas. La restricción en los valores de la inductancia de dispersión depende de la caída de tensión y los errores generados en el transformador. Se utilizan tres transformadores trifásicos para componer la fase de inyección.

### Obtención de la señal de referencia

La señal de referencia se obtiene a partir de la ecuación (1):

$$\begin{bmatrix} V_{Ta}^* \\ V_{Tb}^* \\ V_{Tc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa,antes} - V_{sa} \\ V_{sb,antes} - V_{sb} \\ V_{sc,antes} - V_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:

$V_{sa,antes}$ ,  $V_{sb,antes}$ , y  $V_{sc,antes}$  son las tensiones antes de ocurrir la falla,  
 $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  y  $V_{sc}$  son las tensiones del sistema después de ocurrir la falla.

Para obtener las tensiones de antes de ocurrir la falla utilizamos un PLL (Phase locked loop) con constante de tiempo grande según se muestra en la figura 2, de su implementación en el Simulink.

Debido al uso de una constante de tiempo muy grande, al ocurrir la falla, las componentes de tensión en los ejes directo y cuadratura, así como la frecuencia angular de este vector detectado por el PLL, no se alteran rápidamente. Además, la posición angular del vector tensión de pre-falla no sufre discontinuidad. Como se puede observar en la figura 2, el vector tensión de antes de la falla es convertido al referencial estacionario. Las componentes del vector de referencia al ser producidos por el DVR y adicionado a la tensión de la red son obtenidas calculando la diferencia entre el vector tensión de pre-falla y el vector tensión medido en el punto de conexión.

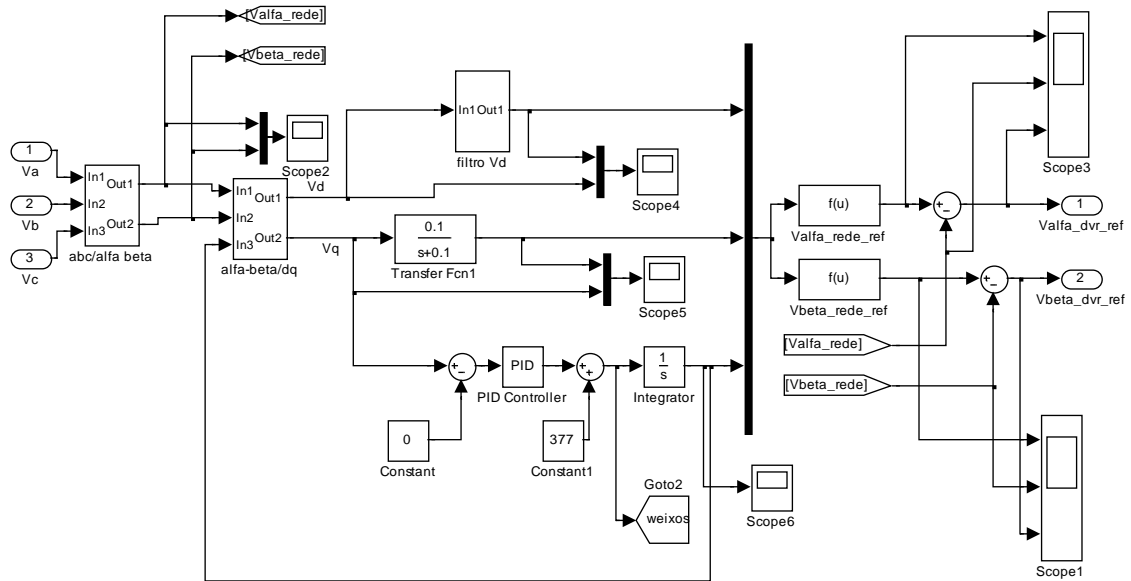


Fig. 2. Esquema en el Simulink de la obtención de las señales de referencias.

**Sistema de control**

El objetivo del DVR es inyectar la tensión deseada en serie con la carga. Así la tensión de la carga se mantiene como si el hueco no hubiese ocurrido.

Una fase del filtro trifásico conectado a la salida del inversor es mostrada en la figura 3, donde  $V_T$  es la tensión aplicada al transformador en serie del DVR.

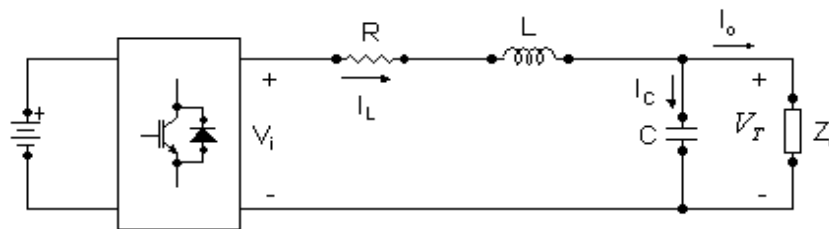


Fig. 3. Representación de una fase del filtro de salida alimentado por el inversor.

Las relaciones tensión-corriente del filtro de salida, en el referencial estacionario  $\alpha\beta$  son descritas desde la ecuación (2), a la ecuación (5), donde a partir de la figura 3, puede constatarse que R y C son los valores del filtro de salida,  $I_L$  la corriente por el filtro en sus componentes alfa y beta y  $V_T$  el voltaje de entrada al transformador del DVR.

$$V_{i\alpha} = V_{T\alpha} + R I_{L\alpha} + L \frac{d}{dt} I_{L\alpha} \quad (2)$$

$$V_{i\beta} = V_{T\beta} + R I_{L\beta} + L \frac{d}{dt} I_{L\beta} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} V_{T\alpha} = \frac{1}{C} (I_{L\alpha} - I_{o\alpha}) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} V_{T\beta} = \frac{1}{C} (I_{L\beta} - I_{o\beta}) \quad (5)$$

Se verifica por las ecuaciones anteriores que se puede realizar el control de las componentes de la tensión a ser inyectada por el DVR, a partir del control de las corrientes de los inductores del filtro en sus componentes alfa y beta. Un lazo de control interno más rápido es empleado para regular esas corrientes, tomando como entradas las tensiones en las componentes alfa y beta en la salida del inversor. El esquema de control de corriente propuesto en este artículo está mostrado en la figura 4. Teniendo en cuenta que las corrientes en los inductores y las tensiones de salida del filtro necesitan ser medidas para la realización del control en lazo cerrado, fueron añadidos términos de compensación feedforward para cancelar perturbaciones que ellos causan en los controladores de corrientes y tensión. Los controladores empleados son basados en la transformada vectorial de Fourier conforme se describe a continuación.

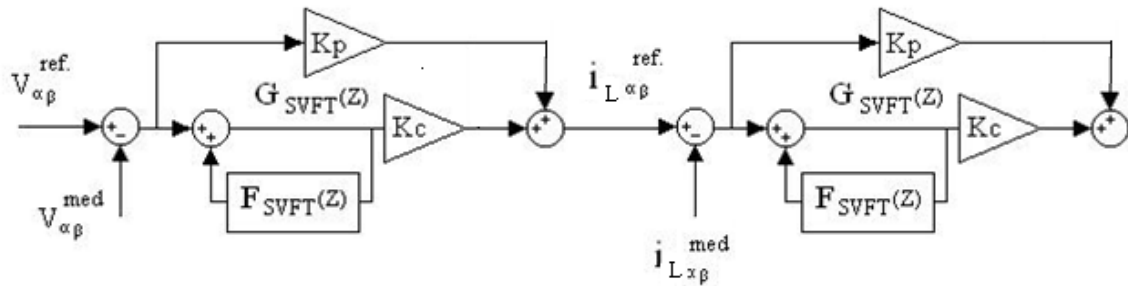


Fig. 4. Diagrama de bloques del esquema de control del DVR.

La transformada de Fourier del vector espacial permite obtener la componente de secuencia positiva o la de secuencia negativa de la componente armónica deseada de una señal trifásica, lo que resulta muy atractivo cuando ocurren huecos de tensión desbalanceados.

Considere que los componentes alfa y beta del vector espacial  $X_{\alpha\beta}(t)$  son calculados desde la señal trifásica y almacenados para:

$$t = (k - N)T_s, \dots, t = (k - 1)T_s$$

donde:

$T_s$  es el período de muestreo

$kT_s$  es el tiempo actual.

Si la secuencia del vector almacenado es entrada a la transformada discreta de Fourier, se obtiene el siguiente número complejo, representado en la ecuación (6):

$$f_c[(k - N)T_s] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{x_{\alpha\beta}[(k - N + i)T_s] e^{-j\frac{2\pi}{N}ci}\} \quad (6)$$

donde  $c$  es la componente armónica (con la secuencia específica) seleccionada para ser identificada.

Separando la parte real e imaginaria de la ecuación (6) resulta la ecuación (7):

$$\begin{bmatrix} f_{c\alpha}[(k - N)T_s] \\ f_{c\beta}[(k - N)T_s] \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{N-1} \{M(i) \begin{bmatrix} x_{\alpha}[k - N + i] \\ x_{\beta}[(k - N)T_s] \end{bmatrix}\} \quad (7)$$

donde la variable  $M(i)$  se obtiene por la ecuación (8),

$$M(i) = \begin{bmatrix} \cos(\frac{2\pi}{N}c_i) & \sin(\frac{2\pi}{N}c_i) \\ -\sin(\frac{2\pi}{N}c_i) & \cos(\frac{2\pi}{N}c_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

En la ecuación (8), el término  $C_i$ , al igual que en la ecuación (6), es la componente armónica (con la secuencia específica) seleccionada para ser identificada.

Para resolver la ecuación (7), se requiere  $N$  multiplicación de matrices de  $2 \times 2$  por vectores de  $2 \times 1$ . Para reducir el efecto computacional puede utilizarse una técnica recursiva.

De acuerdo con [16-17], la implementación de la técnica recursiva de la transformada de Fourier del vector espacial es lograda a través de la operación representada en la ecuación (9):

$$f_c[(k - N + 1)T_s] = \{f_c[(k - N)T_s] + \frac{1}{N}x_{\alpha\beta}(kT_s) - \frac{1}{N}x_{\alpha\beta}[(k - N)T_s]\}e^{j\frac{2\pi}{N}c} \quad (9)$$

El control basado en SVFT sigue el principio del modelo interno mostrado en [9], incluyendo en el lazo de control un generador de señal periódico para la eliminación del error en una frecuencia específica de armónico de la señal de entrada. Separando los componentes alfa y beta de la ecuación (9) puede ser escrito como se muestra en la ecuación (10):

$$\begin{bmatrix} f_{c\alpha}[(k - N + 1)T_s] \\ f_{c\beta}[(k - N + 1)T_s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{2\pi}{N}c_i) - \sin(\frac{2\pi}{N}c_i) \\ \sin(\frac{2\pi}{N}c_i) \cos(\frac{2\pi}{N}c_i) \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} f_{c\alpha}[(k - N)T_s] \\ f_{c\beta}[(k - N)T_s] \end{bmatrix} + \frac{1}{N} \begin{bmatrix} x_{\alpha}(kT_s) - x_{\alpha}[(k - N)T_s] \\ x_{\beta}(kT_s) - x_{\beta}[(k - N)T_s] \end{bmatrix} \right\} \quad (10)$$

La transformada Z del tiempo discreto SVFT puede ser obtenida directamente desde la siguiente ecuación (11):

$$F_{SVFT}(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\frac{2\pi}{N}ci) - j \sin(\frac{2\pi}{N}ci)] z^{(i-N+1)} \quad (11)$$

Como es de esperar, la transformada Z en tiempo discreto de SVFT y la transformada discreta de Fourier (DFT) son iguales, la SVFT corresponde a la aplicación de DFT a una entrada compleja. Todas las propiedades de la DFT son también válidas para el tiempo discreto SVFT.

El controlador sigue la siguiente función de transferencia representada por la ecuación (12):

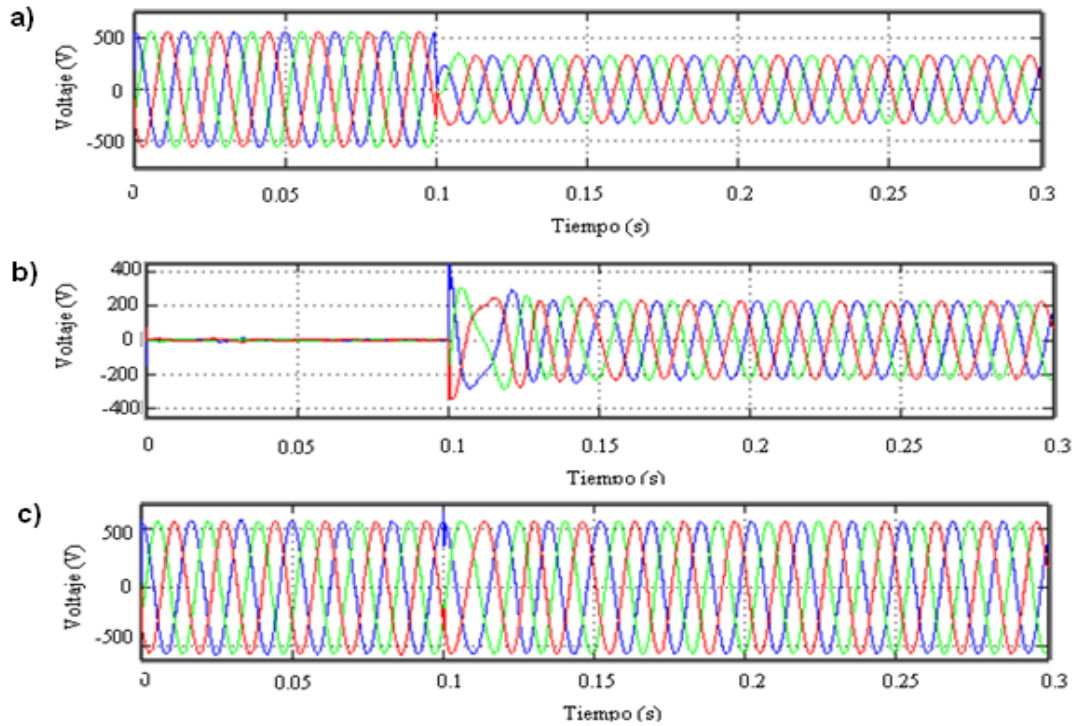
$$G_{SVFT}(z) = \frac{1}{1 - F_{SVFT}(z)} \quad (12)$$

La función transferencial del SVFT,  $F_{SVFT}(z)$  tiene ganancia uno y ángulo de fase cero para una componente armónica específica de secuencia positiva o negativa de la señal trifásica de entrada. Entonces, el control SVFT tiene ganancia de lazo abierto infinita para la componente específica del vector de error.

## B. Resultado de las simulaciones

Para verificar el comportamiento del sistema propuesto se presentan en esta sección los resultados de las simulaciones realizadas en Matlab. A los 0.1 segundos provocamos un hueco de tensión trifásico, según se muestra en la figura 5a. En la figura 5b, se muestra la tensión que aporta el DVR para ser sumado con la tensión de la red. Puede observarse que antes de ocurrir el hueco de tensión a los 0.1 segundos la tensión aportada por el DVR es cero. En la figura 5c, se

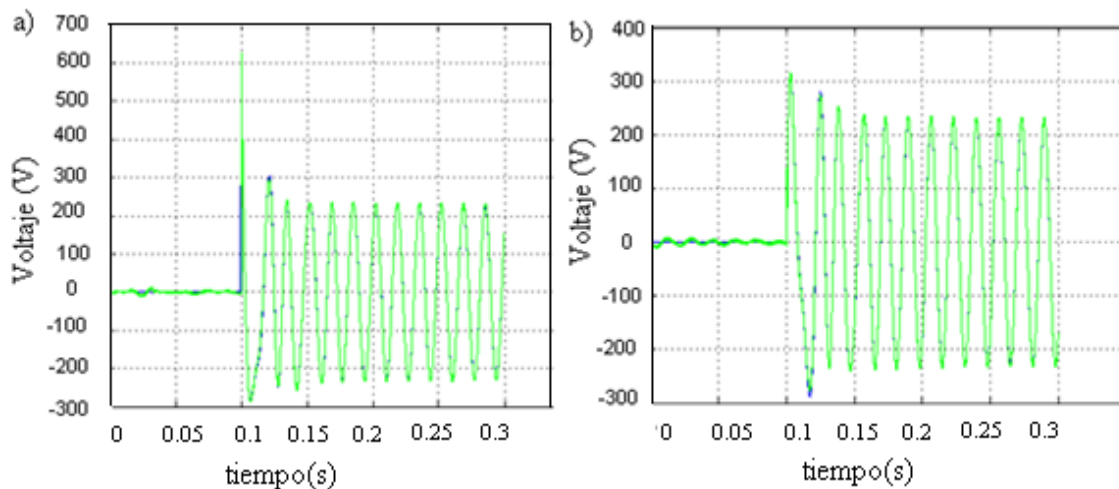
representa la tensión en la carga, observándose que esta se mantiene constante como resultado de la tensión aportada por el DVR.



**Fig.5. Comportamiento del DVR ante un hueco de tensión trifásico a) Tensión en la red b) tensión aportada por el DVR, c) Tensión en una carga resistiva.**

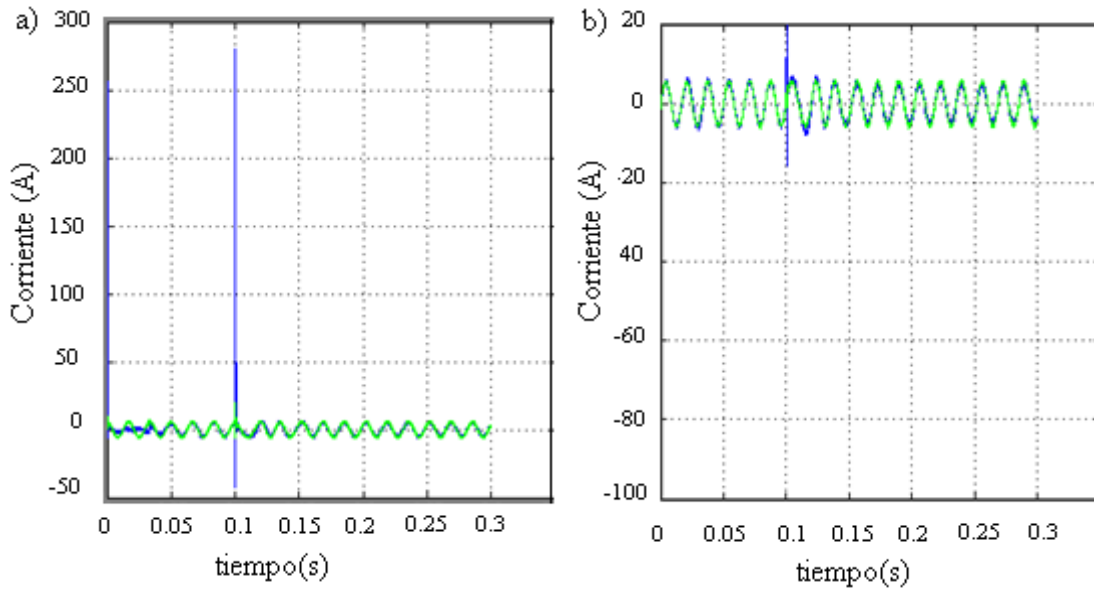
La señal de referencia para el control del DVR, representada por la ecuación (1) se implementa en los ejes de referencia estacionarios alfa y beta y constituye la entrada al controlador de tensión del DVR.

En la figura 6 a y b, se representa el comportamiento de la componente alfa y beta del control de la tensión en el DVR, pudiéndose observar que el control diseñado sigue fielmente la señal de referencia. En la figura 7 a y b, se representa el comportamiento de la componente alfa y beta del control interno de la corriente.



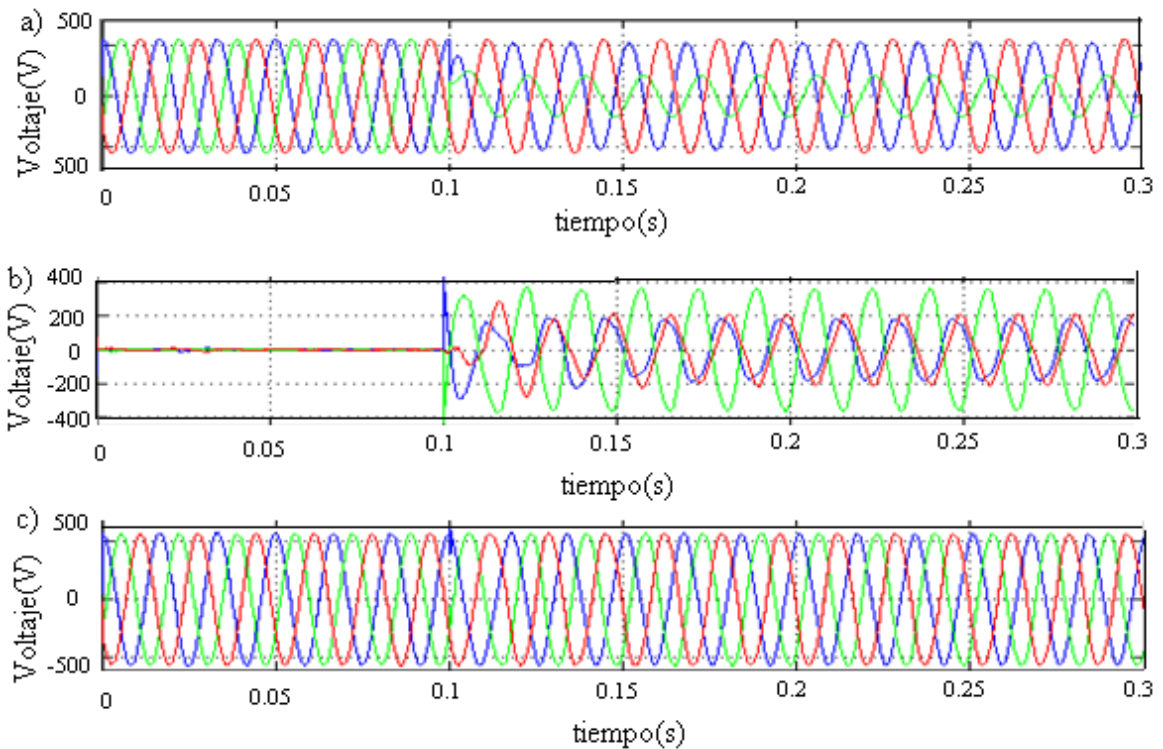
**Fig. 6. Control de tensión del DVR a) Componente alfa b) Componente beta.**





**Fig. 7. Control interno de la corriente a) Componente alfa b) Componente beta.**

Si se provoca un hueco de tensión desbalanceado a los 0.1 segundos, se observan las formas de ondas representadas en la figura 8, pudiendo apreciarse el comportamiento satisfactorio del DVR ante un hueco de tensión monofásico. Obviamente, un hueco de tensión monofásico hace que las tensiones de la red posean componentes de secuencia positiva, negativa y cero. No obstante, debido a un transformador con conexión delta-estrella, apenas componentes de secuencia positiva y negativa existen en el punto de conexión. Por esta razón, el DVR debe inyectar tensiones con componentes de secuencia positiva y negativa en serie con la carga. El control de tensiones y corrientes trifásicas desequilibradas, basado en SVFT tiene excelente desempeño, siendo nulo el error en régimen permanente.



**Fig. 8. Comportamiento del DVR ante un hueco de tensión desbalanceado. a) Tensión en la red b) tensión aportada por el DVR, c) Tensión en la carga resistiva.**

Los resultados que se obtuvieron para una carga resistiva son similares a los obtenidos para cualquier otro tipo de carga.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las simulaciones demuestran que la aplicación del DVR con la implementación del control SVFT propuesto en este trabajo, garantiza la operación ininterrumpida de una carga industrial ante huecos de tensión equilibrados y desequilibrados, ya que la tensión aportada por el DVR se suma con la tensión de la red manteniendo constante la tensión a la entrada de la carga.

## REFERENCIAS

- [1] MAIA, R.M., "Estudo de Caso de Afundamentos de Tensão nos Componentes do Sistema Elétrico Industrial da Moinhos Vera Cruz". Monografía presentada em el curso de Especialización en Automatización Industrial de La Universidad Federal de Minas Gerais, 2008.
- [2] NIELSEN, J.G.; Blaabjerg, F., "A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers". IEEE Trans. on Industry Applications, Sept.-Oct. 2005, vol.41, n.5, p. 1272-1280, ISSN 0093-9994.
- [3] NIELSEN, J.G.; *et al.*, "Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump". Proc. of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, Anaheim, CA, 2001, vol.2, p. 1267-1273.
- [4] AWAD, H.; *et al.*, "Mitigation of unbalanced voltage dips using static series compensator". IEEE Trans. on Power Electronics, May 2004, vol.19, n.3, p. 837-846, ISSN 0885-8993.
- [5] SONG, H. S.; Nam, K., "Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions". IEEE Trans. on Ind. Elect. 1999, vol.46, n.5, p. 953-959, ISSN 0278-0046.
- [6] JACOBINA, C.B.; *et al.*, "Current control of unbalanced electrical systems". IEEE Trans. on Ind. Elect. 2001, vol.48, n.3, p. 517-525, ISSN 0278-0046.
- [7] PARK, S.; *et al.*, "A current control scheme based on multiple synchronous reference frames for parallel hybrid active filter". Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third International, Beijing, 2000, vol.1, p. 218-223.
- [8] YUAN, X.; *et al.*, "Stationary-frame generalized integrators for current control of APF with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions". IEEE Trans. on Ind. Appl. Mar.-Apr. 2002, vol.38, n.2, p. 523-532, ISSN 0093-9994.
- [9] ZMOOD, D.N.; *et al.*, "Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators". IEEE Trans. on Ind. Appl., Mar.-Apr. 2001, vol.37, n.2, p. 601-610, ISSN 0093 9994.
- [10] ROWAN, T.M.; Kerkman, R.J., "A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters". IEEE Trans. Ind. Appl., Jul. 1986, vol.IA-22, n.4, p. 678-690, ISSN 0093-9994.
- [11] LIMONGI, L.R.; *et al.*, "Digital Current Control Schemes". IEEE Ind. Elect. Magazine, 2009, vol.3, n.1, p. 20-31, ISSN 1932-4529.
- [12] HAWANG, J.G.; *et al.*, "A generalized class of stationary frame-current controllers for grid-connected AC-DC converters". IEEE Trans. Power Del., Oct. 2010, vol.25, n.4, p. 2742-2751, ISSN 0885-8977.
- [13] BUSADA, C.A.; *et al.*, "Current controller based on reduced order generalized integrators for distributed generation systems". IEEE Trans. on Ind. Elect., 2012, vol.59, n.7, p. 2898-2909, ISSN 0278-0046.
- [14] MATTAYELLI, P., "Implementation of synchronous-frame harmonic control for high performance AC power supplies". IEEE Trans. Ind. Appl., May 2001, vol.37, n.3, p. 864-872, ISSN 0093-9994.

- [15] MATTAYELLI, P.; Marafao, F.P., "Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters". IEEE Trans. on Ind. Elect., Oct. 2004, vol.51, n.5, p. 1018-1024, ISSN 0278-0046.
- [16] NEVES, F.; *et al.*, "A space-vector discrete fourier transform for unbalanced and distorted three-phase signals". IEEE Trans. on Ind. Elect., Aug. 2010, vol.57, n.8, p. 2858-2867, ISSN 0278-0046.
- [17] NEVES, F.; *et al.*, "Digital filters for fast harmonic sequence component separation of unbalanced and distorted three-phase signals". IEEE Trans. on Ind. Elect., Oct 2012, vol.59, n.10, p. 3847 -3859, ISSN 0278-0046.

## AUTORES

### **Lesyani Teresa León Viltre**

Ingeniera Electricista, Máster en Ciencias, Profesora Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

e-mail: [lesyani@uclv.edu.cu](mailto:lesyani@uclv.edu.cu)

### **Francisco de Assis dos Santos Neves**

Ingeniero Eléctrico, Master en Ciencias, Doctor en Ciencias, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

e-mail: [fneves@ufpe.br](mailto:fneves@ufpe.br)

### **Miriam Vilaragut Llanes**

Ingeniera Eléctrica, Doctora en Ciencias, Profesora Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergética, CIPEL, Facultad de Eléctrica, Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [miriamv@electrica.cujae.edu.cu](mailto:miriamv@electrica.cujae.edu.cu)