

DETECTORES DE SECUENCIA POSITIVA PARA LA CONEXIÓN DE TURBINAS EÓLICAS A LA RED

F. Serra¹, C. De Angelo², D. Forchetti.
 Grupo de Electrónica Aplicada (GEA)
 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
 Ruta Nacional #36 Km. 601 – TE/Fax: +54-358-4676255.
fserra@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se comparan diferentes métodos utilizados para obtener la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red. Estos métodos de detección de secuencia positiva son necesarios para lograr la correcta sincronización entre los sistemas de generación basados en energías renovables y la red en la que se encuentran conectados. Se analizan tres estructuras diferentes utilizadas comúnmente como detectores de secuencia positiva y se determina la más conveniente para este tipo de aplicación. El análisis realizado muestra el desempeño de los diferentes detectores de secuencia positiva principalmente para tensiones de red con desbalance y/o contenido armónico.

Palabras clave: Energía Eólica, Detectores de Secuencia Positiva, Lazos de enganche de fase, PLL

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, con el creciente aumento de los sistemas de generación distribuidos basados en energías renovables, tales como sistemas eólicos o fotovoltaicos, se ha incrementado el interés por estudiar diferentes esquemas de conexión entre estos sistemas y la red eléctrica.

Para permitir que este tipo de conexión funcione de manera suave y sin introducir perturbaciones importantes en la red, se requiere la utilización de convertidores electrónicos de potencia. Estos convertidores tienen como principal objetivo controlar el flujo de energía entre dicha red y el sistema de generación. Muchas de las estrategias de control utilizadas para controlar estos convertidores, necesitan detectar la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red para determinar las señales de referencia necesarias para efectuar el control (Seung-Ho, *et al.*, 2003; Timbus *et al.*, 2006).

En el caso ideal, donde la tensión de red es senoidal pura y balanceada, la amplitud y frecuencia de la tensión de línea o de fase pueden determinarse de manera relativamente sencilla, mediante detectores de pico o de paso por cero (Gardner, 2005). En el caso real, la tensión de red puede presentar variación en su frecuencia fundamental, además de desbalance y/o contenido armónico. En estas condiciones los métodos mencionados anteriormente no presentan respuestas de tipo dinámica o de régimen permanente satisfactorias, por lo que generalmente se utilizan lazos de enganche fase o PLL (*Phase Locked Loop*) para realizar la detección de la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red.

Para obtener un detector de secuencia positiva utilizando un PLL, es necesario realizar el filtrado de las señales empleadas dentro del lazo de manera tal que la salida del PLL sea únicamente una señal con la misma frecuencia, amplitud y fase que la componente fundamental de la señal de entrada.

Un PLL genera una señal de salida v que posee la misma frecuencia que la señal de entrada v_i (Guan-Chyun y Hung, 1996). En general, los PLLs se construyen utilizando tres bloques principales; un bloque denominado Detector de Fase (DF) encargado de detectar la diferencia de fase v_d entre la señal de entrada y la de salida, un Filtro de Lazo (FL) encargado de suprimir las frecuencias indeseables dentro del lazo y un Oscilador Controlado por Voltaje (OCV) que convierte la salida del FL, v_f , en una señal senoidal v con una frecuencia que depende de v_f , tal como se muestra en la Figura 1.

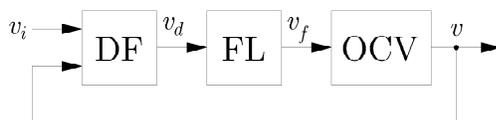


Figura 1: Estructura básica de un PLL.

¹ Becario del CONICET

² Investigador del CONICET

En general, el FL tiene características de pasa bajos y filtra las componentes de alta frecuencia que salen del DF dejando a su salida la señal de frecuencia más baja.

Existen diferentes tipos de PLL que se poseen la estructura mencionada anteriormente entre los que se pueden mencionar: PLLs basados en la transformada de Park (Chung, 2000), PLLs basados en la Teoría pq (Aredes *et al.*, 2009), PLLs basados en filtros adaptivos (Karimi-Ghartemani e Iravani, 2001) y PLLs basados en un integrador generalizado de segundo orden (Ciobotaru *et al.*, 2006), entre otros.

En este trabajo se analiza, por medio de resultados de simulación, el desempeño dinámico y de régimen permanente de tres esquemas para la detección de la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red, con el objetivo de determinar cuál es el esquema más conveniente cuando la tensión de red es desbalanceada y/o con contenido armónico.

TIPOS DE DETECTORES DE SECUENCIA POSITIVA

Existen diferentes estrategias para detectar la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red. En este trabajo se analizan tres de estas estrategias y mediante resultados de simulación, se determina la más adecuada para ser utilizada en el control de convertidores electrónicos para sistemas eólicos conectados a la red.

Detector de secuencia positiva basado en un q-PLL

Un q-PLL es un PLL cuya estructura está basada en la Teoría de la potencia activa-reactiva instantánea o simplemente Teoría pq (Akagi *et al.*, 2007), y tiene un diagrama en bloques como el que se muestra en la Figura 2.

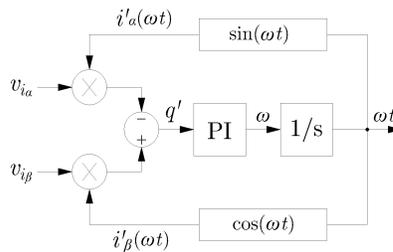


Figura 2: q-PLL.

El q-PLL posee como entrada las tensiones en el marco de referencia estacionario, las cuales se obtienen mediante la transformada de Clarke de las tensiones de entrada. De esta manera v_{ia} y v_{ib} se multiplican por las corrientes ficticias i'_a y i'_b y, usando la definición de la Teoría pq, se combinan para obtener q' la cual se procesa mediante un controlador PI para obtener la frecuencia ω . En estado estable $q' = 0$ y, por lo tanto, la frecuencia calculada por el q-PLL es igual a la frecuencia de la tensión de entrada. Luego, integrando ω se obtiene la fase de la señal de entrada.

Por otra parte, si $q' = 0$ entonces la parte constante de p' tiene la amplitud total de la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de entrada. La parte constante de p' puede obtenerse filtrando p' mediante un filtro pasa bajos (FPB). De esto se deduce que se puede construir un detector de secuencia positiva como el que se muestra en la Figura 3, que permite obtener la fase y amplitud de la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de entrada (Aredes *et al.*, 2009).

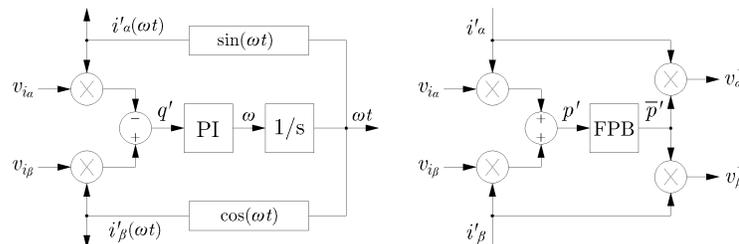


Figura 3: Detector de secuencia positiva basado en un q-PLL.

Detector de secuencia positiva basado en un EPLL

El EPLL (*Enhanced Phase-Locked Loop*) es un método alternativo de detección de fase. En este tipo de estrategia el DF de la Figura 1 se reemplaza por un esquema basado en un Filtro Notch Adaptivo (*Adaptive Notch Filter* - ANF) (Karimi-Ghartemani e Iravani, 2001).

El EPLL tiene la característica de poseer alta inmunidad al ruido, armónicos, desbalances y otros tipos de contaminaciones que pueden existir en las señales que se usan como base para la sincronización. Otra ventaja del EPLL es que realiza una estimación directa de la amplitud y la fase de la señal de entrada y además presenta una estructura de fácil implementación ya sea en DSP, FPGA, ASIC, entre otros (Karimi Ghartemani e Iravani, 2004).

En la Figura 4 se muestra un diagrama de la estructura básica del EPLL, donde se puede observar que la salida del FL es la estimación de la derivada temporal de la fase total. En este caso el DF consta de tres multiplicadores, un integrador y un sumador. La señal v estimada es comparada con la señal de entrada v_i para calcular un error e_v , el cual es usado por el FL para generar la señal de entrada al OCV y con esto producir la sincronización del sistema. Mediante una elección adecuada de la ganancia k y las constantes de controlador PI se controla la convergencia de la amplitud, frecuencia y fase de la señal generada por el EPLL (Karimi Ghartemani e Iravani, 2004).

Como se observa en la Figura 4 el EPLL proporciona dos señales en cuadratura v y jv , lo que permite usar tres EPLL para generar versiones ortogonales de cada tensión de fase y de esta manera se pueden calcular los voltajes de secuencia positiva v_a^+ , v_b^+ y v_c^+ . Luego se puede utilizar un cuarto EPLL para determinar la amplitud y fase de la componente de secuencia positiva de la señal de entrada. De esta manera se puede construir el EPLL trifásico mostrado en la Figura 5.

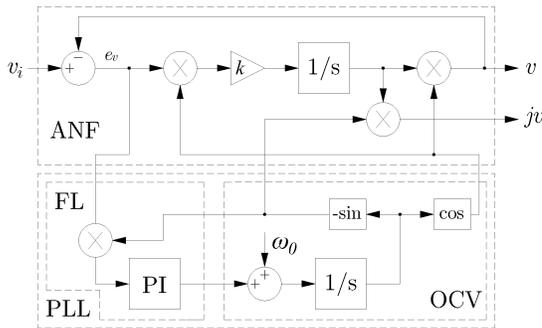


Figura 4: Estructura básica del EPLL.

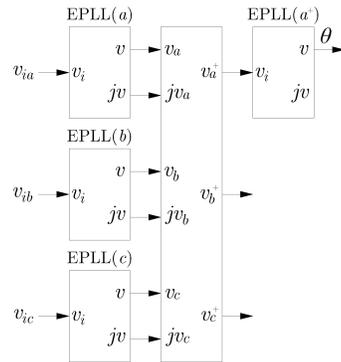


Figura 5: EPLL trifásico.

Con la finalidad de reducir la complejidad estructural del EPLL trifásico analizado anteriormente, se puede trabajar en el marco de referencia estacionario. En este caso el EPLL original se modifica levemente para obtener las señales v y qv , donde qv está 90° atrasada con respecto a v . En la Figura 6 se muestra el EPLL modificado y en la Figura 7 se muestra la estructura del EPLL trifásico mejorado denominado DEPLL (Rodríguez *et al.*, 2006).

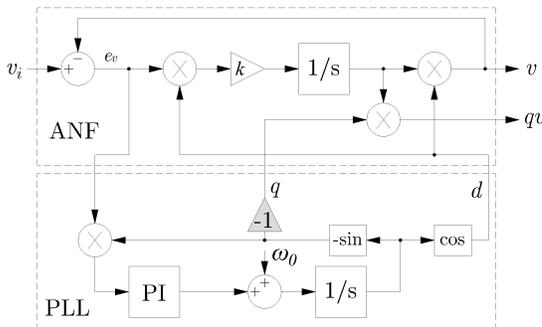


Figura 6: EPLL modificado.

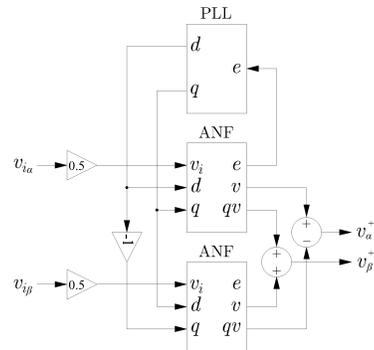


Figura 7: DEPLL.

Detector de secuencia positiva basado en un SOGI

Una forma de generar las señales en cuadratura necesarias para detectar la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red, es mediante un Integrador Generalizado de Segundo Orden (*Second Order Generalized Integrator* - SOGI). El diagrama en bloques de un SOGI se muestra en la Figura 8 y su función de transferencia es (Rodríguez *et al.*, 2006),

$$S(s) = \frac{d}{f}(s) = \frac{s \omega'}{s^2 + \omega'^2}$$

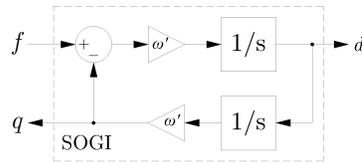


Figura 8: Integrador generalizado de segundo orden.

De esta ecuación se puede observar que el SOGI actúa como un integrador de ganancia infinita cuando la señal f es sinusoidal de frecuencia ω' . De lo anterior se puede realizar un generador de señales en cuadratura basado en un SOGI cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 9.

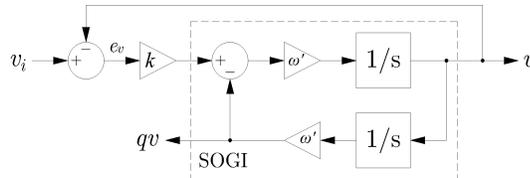


Figura 9: Generador de señales en cuadratura basado en un SOGI.

Las funciones de transferencia de este sistema están dadas por,

$$D(s) = \frac{v}{v_i}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2}$$

$$Q(s) = \frac{qv}{v_i}(s) = \frac{k\omega'}{s^2 + k\omega's + \omega'^2}$$

En función de estas ecuaciones, se puede deducir que el generador de señales en cuadratura basado en un SOGI atenuará las componentes de alta frecuencia de v_i y además, si v_i es una señal sinusoidal, v y qv serán también sinusoidales. Además qv siempre estará atrasada 90° respecto a v , independientemente de la frecuencia ω' y de k (Rodríguez *et al.*, 2006).

Este esquema de generación de señales en cuadratura tiene la característica de no poseer funciones trigonométricas y, consecuentemente, ocupa menos recursos computacionales. Además los integradores pueden implementarse usando diferentes métodos de integración (*Forward Euler*, *Backward Euler*, Integrador Trapezoidal) (Ciobotaru *et al.*, 2006).

Una vez presentado el generador de señales en cuadratura basado en un SOGI, es necesario hacerlo adaptivo en frecuencia. Si bien esto puede hacerse con un PLL convencional, introduciendo una modificación en la señal realimentada se puede obtener un esquema más simple que el PLL convencional y puede llamarse lazo cerrado de frecuencia (FLL); su esquema es el que se muestra en la Figura 10.

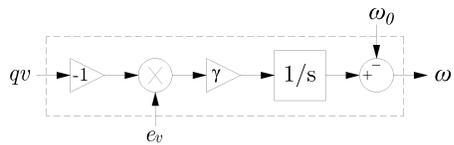


Figura 10: Estructura del FLL.

De todo lo anterior se puede realizar un esquema de sincronización como el que se muestra en la Figura 11 denominado SOGI-FLL, el cual, como se puede deducir de lo anteriormente mencionado, presenta la ventaja de ser altamente robusto, capaz de atenuar las componentes armónicas de alto orden presentes en la señal de tensión de entrada y además es de fácil implementación digital.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con la finalidad de analizar el comportamiento de los detectores de secuencia positiva analizados, se realizaron simulaciones en SIMULINK de MATLAB para las siguientes condiciones: tensiones senoidales puras y balanceadas, tensiones desbalanceadas, tensiones con contenido armónico, tensiones con desbalance y contenido armónico y error inicial en la estimación de frecuencia.

Para todos estos casos se muestra el error de fase producido por el detector utilizado y las tensiones de salida en el marco de referencia estacionario.

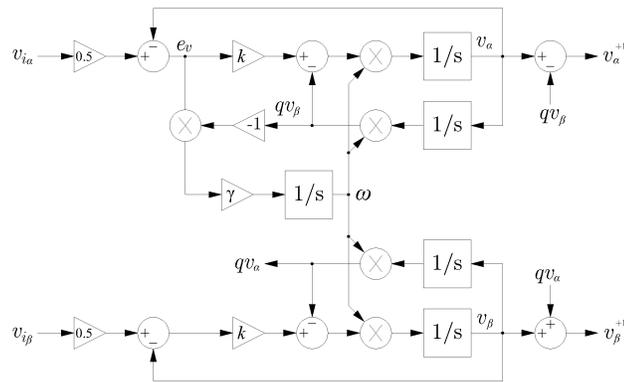


Figura 11: SOGI-FLL.

Tensiones de fase senoidales puras y balanceadas

En este caso, la tensión de alimentación es senoidal pura y balanceada. En la Figura 12 se puede ver el error de fase de los tres detectores analizados: en (a) se ve la respuesta para el detector basado en el q-PLL, en (b) para el DEPLL y en (c) para el SOGI-FLL. En la Figura 13 se pueden ver las tensiones de salida en el marco de referencia estacionario.

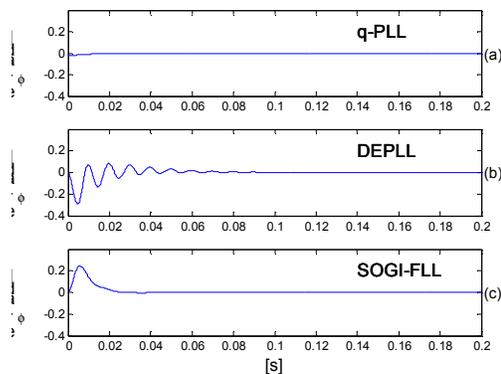


Figura 12: Error de fase para el caso de tensiones senoidales puras y balanceadas.

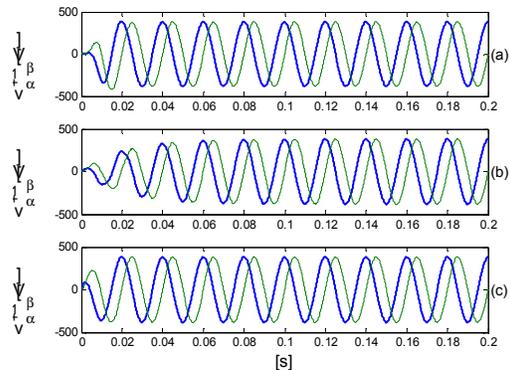


Figura 13: Tensiones de salida para el caso de tensiones senoidales puras y balanceadas.

Como se puede observar en la Figura 12, para este caso el detector basado en el q-PLL tiene una respuesta dinámica más rápida que el DEPLL y el SOGI-FLL.

Tensiones de fase desbalanceadas

En este caso la tensión de alimentación presenta un 30% de desbalance en la amplitud de la fase b. En la Figura 14 se puede ver el error de fase de los tres detectores analizados: en (a) se ve la respuesta para el detector basado en el q-PLL, en (b) para el DEPLL y en (c) para el SOGI-FLL. En la Figura 15 se pueden ver las tensiones de salida en el marco de referencia estacionario.

Se puede ver de la Figura 14 que, para el perfil de tensiones de alimentación propuesto, el detector basado en el q-PLL tiene un error de fase oscilatorio con una frecuencia de 100 Hz, el DEPLL tiene un error de fase constante luego de un transitorio y el SOGI-FLL presenta un error de fase transitorio, que luego de 40 ms se anula.

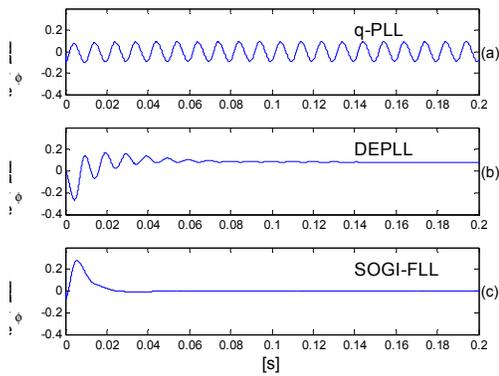


Figura 14: Error de fase para el caso de tensiones desbalanceadas.

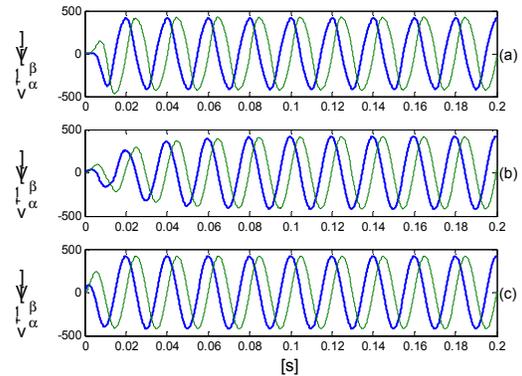


Figura 15: Tensiones de salida para el caso de tensiones desbalanceadas.

Tensiones de fase con contenido armónico

En este caso la tensión de alimentación tiene un 5% de 5^{to} armónico y 2% de 7^{mo} armónico. En la Figura 16 se puede ver el error de fase de los tres detectores analizados: en (a) se ve la respuesta para el detector basado en el q-PLL, en (b) para el DEPLL y en (c) para el SOGI-FLL. En la Figura 17 se pueden ver las tensiones de salida en el marco de referencial estacionario.

Como se puede observar en la Figura 16, los tres detectores presentan una oscilación del error de fase, la cual es de menor amplitud en el DEPLL y el SOGI-FLL comparada con la del detector basado en el q-PLL.

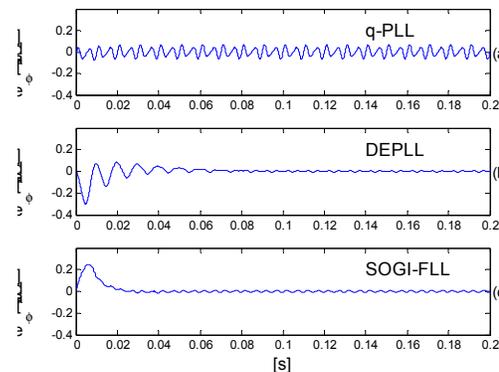


Figura 16: Error de fase para el caso de tensiones con contenido armónico.

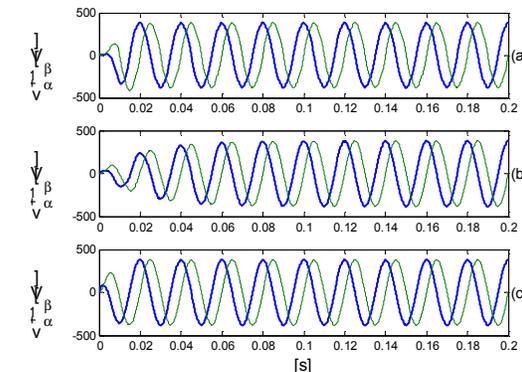


Figura 17: Tensiones de salida para el caso de tensiones con contenido armónico.

Tensiones de fase con desbalance y armónicos

En este caso la tensión de alimentación es tiene un 5% de 5^{to} armónico y 2% de 7^{mo} armónico y además, un desbalance del 30% en la amplitud de la fase b. En la Figura 18 se puede ver el error de fase de los tres detectores analizados: en (a) se ve la respuesta para el detector basado en el q-PLL, en (b) para el DEPLL y en (c) para el SOGI-FLL. En la Figura 19 se pueden ver las tensiones de salida en el marco de referencial estacionario.

Se puede ver de la Figura 18 que para este caso, el error de fase correspondiente al detector basado en el q-PLL presenta oscilaciones de mayor amplitud que el DEPLL y el SOGI-FLL; además el DEPLL presenta un error de fase con un valor constante en estado estable.

Error inicial en la estimación de frecuencia

Algunas estrategias utilizadas como detector de secuencia positiva (DEPLL y SOGI-FLL) necesitan aproximar el valor de la frecuencia de entrada para disminuir el tiempo de enganche. El valor estimado de la frecuencia de entrada debe ser lo más cercano posible al valor real de la frecuencia de red para obtener una respuesta aceptable. En este ensayo, se prueba la respuesta de los detectores propuestos cuando la frecuencia estimada ω_0 difiere de la frecuencia real de la tensión de red.

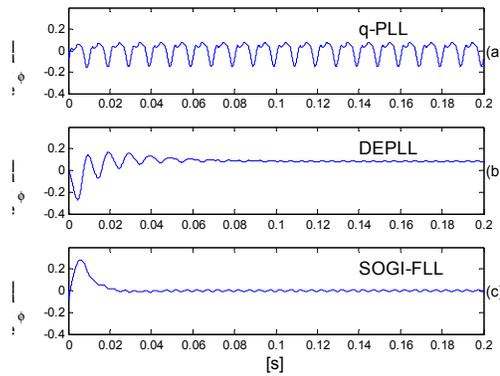


Figura 18: Error de fase para el caso de tensiones con desbalance y con contenido armónico.

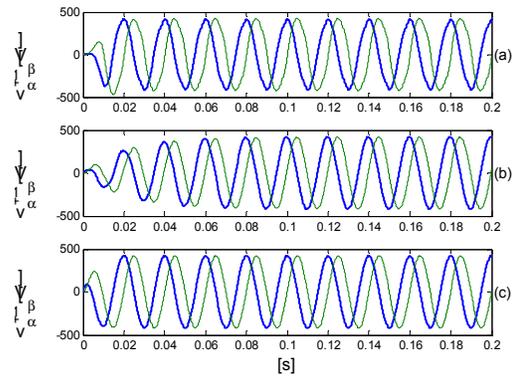


Figura 19: Tensiones de salida para el caso de tensiones con desbalance y con contenido armónico.

En este caso la frecuencia de la tensión de la red tiene un valor de 40Hz, mientras que ω_0 tanto para el EPLL como para el SOGI-FLL, es estimada en 50Hz. En la Figura 20 se puede ver el error de fase de los tres detectores analizados. En (a) se ve la respuesta para el detector basado en el q-PLL, en (b) para el DEPLL y en (c) para el SOGI-FLL.

Como se puede ver en la Figura 20, el detector basado en el q-PLL tiene un error de fase cero, ya que éste tiene una estructura que no depende de ω_0 . Por otra parte, tanto el DEPLL como el SOGI-FLL necesitan un valor de ω_0 para engancharse. Como se observa en la Figura 20, para las condiciones planteadas, el DEPLL tiene un error de fase que tarda aproximado de 2s en hacerse cero, mientras que el SOGI-FLL se engancha en un tiempo mucho menor.

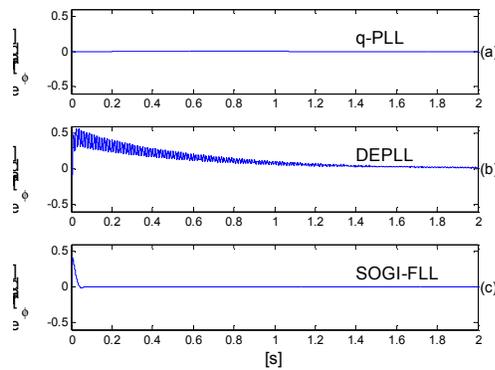


Figura 20: Error de fase para el caso de error inicial en la estimación de frecuencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó, mediante resultados de simulación, el desempeño de tres estrategias para detectar la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red, que pueden ser utilizados en el control de convertidores para sistemas eólicos acoplados directamente a la red.

Los detectores fueron ensayados para diferentes tipos de tensiones de entrada, balanceada, desbalanceada, con armónicos y con un error en la estimación de la frecuencia. De allí se pudo observar que, si bien el detector basado en un q-PLL tiene mejor respuesta en el caso de tensiones balanceadas comparado con las otras estructuras, su desempeño decae en el caso de tener desbalance y/o contenido armónico en la tensión de red.

El DEPLL funciona mejor que el q-PLL en caso de que la tensión de red tenga armónicos, pero presenta un error de fase constante en caso de desbalance y además su respuesta ante una variación de frecuencia es demasiado lenta. El SOGI-FLL es la estructura que tiene una respuesta más aceptable para todos los casos ensayados y por lo tanto se deduce que sería la mejor elección para la aplicación planteada.

REFERENCIAS

- Akagi, H., E. H. Watanabe y M. Aredes (2007). "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning". Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Aredes, M., H. Akagi, E. Hirokazu Watanabe, E. Vergara Salgado y L. Frizzera Encarnacao (2009). "Comparisons Between the p-q and p-q-r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems." IEEE Transactions on Power Electronics, 24(4): 924-933.
- Ciobotaru, M., R. Teodorescu y F. Blaabjerg (2006). "A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator". Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE.
- Chung, S. K. (2000). "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems." IEE Proceedings Electric Power Applications, - 147(3): 213-219.
- Gardner, F. M. (2005). "Phaselock techniques", John Wiley & Sons, Inc.
- Guan-Chyun, H. and J. C. Hung (1996). "Phase-locked loop techniques. A survey." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 43(6): 609-615.
- Karimi-Ghartemani, M. y M. R. Iravani (2001). "A new phase-locked loop (PLL) system". Midwest Symposium on Circuits and Systems. Proceedings of the 44th IEEE 2001.
- Karimi Ghartemani, M. y M. R. Iravani (2004). "A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments." IEEE Transactions on Power Systems, 19(3): 1263-1270.
- Rodriguez, P., A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu y F. Blaabjerg (2006). "Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions". Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd.
- Seung-Ho, S., K. Shin-il y H. Nyeon-kun (2003). "Implementation and control of grid connected AC-DC-AC power converter for variable speed wind energy conversion system". Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE.
- Timbus, A. V., R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre y A. Dell'Aquila (2006). "Independent synchronization and control of three phase grid converters". International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.

ABSTRACT

Different methods utilized for obtaining the positive-sequence fundamental component of the grid voltage are compared in this work. Such methods are necessary for obtaining a correct synchronization between renewable-energy based generation systems and the grid. Three different techniques are analyzed in order to determine the most appropriate strategy for this application. The performance of these techniques is evaluated under voltage distortion and unbalance.

Keywords: Wind Energy, Positive-Sequence Voltage Detection, Phase-Locked Loop, PLL.