

Stability and accuracy of Digital Filters in the presence of Interharmonics

Jose Felix MIÑAMBRES¹, Jorge LAZARO², Miguel Angel ZORROZUA¹,
Maribel SANCHEZ², Begoña LARREA² & Iñigo ANTIZA³

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica

² Departamento de Matemática Aplicada

E.T.S.I., Universidad del País Vasco

Alameda Urquijo S/N, 48013 BILBAO (España)

Tel.:+34 94 6014055, fax:+34 94 6014200, e-mail: josefelix.minambres@ehu.es

³ GE Multilin

Avda Pinoa, Zamudio (Vizcaya)

Resumen.

Los filtros digitales utilizados en protecciones eléctricas deben analizar formas de onda cada vez más complejas. El tratamiento de las distorsiones debidas a componentes exponenciales y armónicos está solucionado por una amplia variedad de métodos. Sin embargo, la creciente presencia e importancia de los inter-armónicos presentes en las señales eléctricas hace necesario analizar su influencia en la respuesta de los mencionados filtros. Este artículo presenta un análisis de la influencia de componentes inter-armónicos en el comportamiento de los filtros digitales y en base a los resultados obtenidos, muestra la necesidad de revisar y adaptar los actualamnte utilizados en el campo de la protección del sistema o, como alternativa, la necesidad de proponer nuevos métodos que se definan teniendo en cuenta la presencia de inter-armónicos en las ondas analizadas y que mejoren las prestaciones de los actualmente existentes.

Palabras llave

Digital filters, Harmonic analysis, Interharmonics, Power system harmonics, Protective relaying.

1. Introducción

El principal objetivo de un filtro digital es la estimación del espectro armónico que presenta la señal analizada. Este proceso de estimación es especialmente crítico en el caso de los relés digitales utilizados en el campo de la protección del sistema eléctrico de potencia. Esto es debido a que la rapidez y precisión de los resultados proporcionados por el estimador fasorial está directamente relacionada con la rápida y correcta actuación del dispositivo de protección correspondiente.

Actualmente, debido principalmente al creciente número de elementos no lineales presentes en el sistema eléctrico de potencia, los relés digitales deben ser capaces de hacer frente a señales de entrada cada vez más complejas. Debido a ello es constante el desarrollo de nuevos filtros digitales que, teniendo en cuenta las características de las ondas que deben analizar, permiten alcanzar resultados con la precisión y rapidez exigidas en el campo de la

protección del sistema [1].

Junto al espectro regular de armónicos y a las componentes aperiódicas, debidas fundamentalmente a fenómenos transitorios, es cada vez más habitual la aparición de un complejo juego de inter-armónicos que puede llegar a distorsionar de manera importante la señal eléctrica que debe ser analizada por el filtro digital. Teniendo en cuenta que los filtros digitales utilizados en protecciones deben garantizar rapidez y precisión en los resultados que proporcionan, es de gran importancia conocer y analizar la influencia de los inter-armónicos en la respuesta de los algoritmos que están siendo utilizados o desarrollados con el propósito de ser implementados en un relé digital.

Por todo lo expuesto, este artículo esta enfocado a analizar la influencia de los inter-armónicos en la respuesta de los filtros digitales. El análisis llevado a cabo muestra claramente la necesidad de desarrollar nuevos filtros digitales que tengan en cuenta la presencia de estos indeseables componentes en las señales de un sistema eléctrico de potencia.

2. Inter-armónicos en sistemas de energía eléctrica

Las tecnologías de regulación y control tienen una creciente importancia en el desarrollo y explotación de los sistemas de energía eléctrica. Estas tecnologías utilizan habitualmente elementos no lineales basados en electrónica de potencia, por lo que este tipo de elementos tiene cada vez mayor presencia en los sistemas de energía eléctrica. Entre los inconvenientes del uso de estos elementos se encuentra el hecho de que distorsionan la forma de onda de las señales eléctricas, ya que provocan la aparición de armónicos e inter-armónicos que se suman a la componente fundamental de la señal.

Los armónicos se definen como componentes sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental, mientras que inter-armónicos

son componentes sinusoidales cuya frecuencia no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

$$\begin{aligned} \text{Frecuencia de armónicos:} & \quad f = k \cdot f \\ \text{Frecuencia de inter-armónicos:} & \quad f \neq k \cdot f \end{aligned}$$

Donde f es la frecuencia fundamental del sistema de energía eléctrica y k es un número entero.

Dentro de la categoría de inter-armónicos, también suele ser habitual la utilización del término sub-armónicos. Los sub-armónicos son un caso particular de inter-armónicos que cumplen la condición de tener una frecuencia menor que la frecuencia fundamental del sistema. Es decir, los sub-armónicos son componentes sinusoidales de frecuencia ($a \cdot f$), donde a es un número no entero menor que la unidad.

Es de todos conocido que, en el campo de la ingeniería, a la hora de estudiar el comportamiento de un sistema real se consideran las características relevantes del mismo y se desprecian aquellas cuya influencia en el fenómeno estudiado resulta ser despreciable. Por esta razón, tradicionalmente el estudio de los sistemas de energía eléctrica se ha realizado despreciando a efectos de cálculo la influencia de los inter-armónicos.

Sin embargo, ya que en la actualidad la presencia y relevancia de los inter-armónicos es creciente [2], se hace necesario conocer su influencia en el comportamiento de las diferentes partes que componen un sistema eléctrico de potencia. En concreto, las señales procesadas por los filtros digitales están fuertemente afectadas por estos componentes.

Las protecciones digitales reciben como datos los valores de las señales de tensión e intensidad y, tras un proceso interno de cálculo, deben discriminar entre condiciones normales o anormales de operación del sistema.

La etapa fundamental de este procesamiento de señal es la estimación fasorial. La señal es filtrada para obtener el fasor correspondiente a una frecuencia específica que, normalmente, es la frecuencia fundamental. Este dato es el utilizado por las funciones de protección para evaluar y decidir si el relé debe operar. Consecuentemente, la estimación fasorial debe ser rápida y precisa con el fin de garantizar una respuesta correcta del relé de protección.

Los filtros digitales están comúnmente basados en tres tipos de algoritmos [3].

- Tipo I: Algoritmos basados en métodos matriciales como, por ejemplo, LES (Least Error Squares).
- Tipo II: Métodos basados en la aproximación del filtro MIMIC.
- Tipo III: Métodos basados en versiones modificadas de la DFT (Digital Fourier Transform)

Sin embargo, debido a las razones señaladas anteriormente, todos ellos han sido desarrollados sin

tener en cuenta la presencia de inter-armónicos en la señal filtrada. Consecuentemente, es necesario analizar la respuesta del relé digital bajo estas nuevas condiciones de operación. Con este objetivo, el primer paso es conocer en detalle la influencia de los inter-armónicos en la respuesta de los filtros digitales usados actualmente en el campo de las protecciones.

Como respuesta de la comunidad científica a la creciente importancia del tema de los inter-armónicos, en los últimos años están proliferando las investigaciones y la publicación de artículos relativos a su presencia en las señales eléctricas. Se trata de trabajos que están enfocados a la detección y estimación del contenido en inter-armónicos de una determinada señal [4, 5]. Sin embargo, los métodos propuestos en estos trabajos no resultan apropiados para ser aplicados en el campo de las protecciones debido a que requieren procesos de cálculo que necesitan utilizar ventanas con un elevado número de ciclos.

Por todas estas razones, el presente artículo analiza desde el punto de vista de las protecciones la influencia de los inter-armónicos en la estimación del módulo y ángulo de un determinado armónico. El estudio se realiza analizando el error que, como consecuencia de la presencia de inter-armónicos, se produce en los resultados de salida del estimador fasorial, ya que estos resultados serán los utilizados como datos de entrada por las funciones de protección responsables de decidir la actuación del relé.

3. Influencia de interarmónicos en el comportamiento de filtros digitales

Antes de entrar en detalle, se presenta un ejemplo que permite comprobar la influencia de los inter-armónicos en el comportamiento de los filtros digitales y que justifica la necesidad de analizar con rigurosidad dicha influencia.

Las Figuras 1 y 2 muestran los resultados obtenidos al filtrar mediante DFT una señal compuesta por componente fundamental (50 Hz), componentes armónicos de tercer y quinto orden (150 y 250 Hz) e inter-armónicos de 112 y 177 Hz.

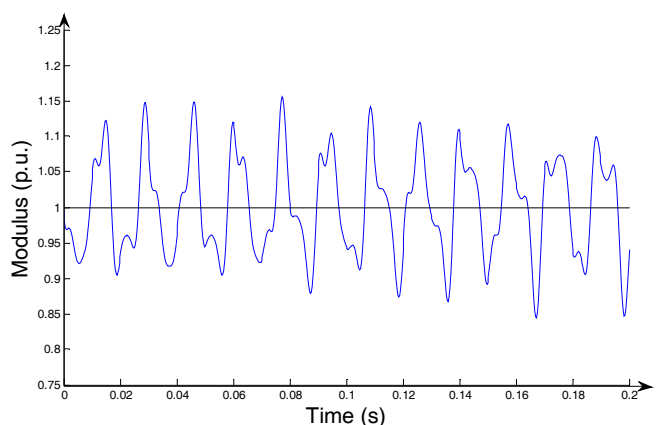


Fig. 1. Estimación del módulo de la componente fundamental

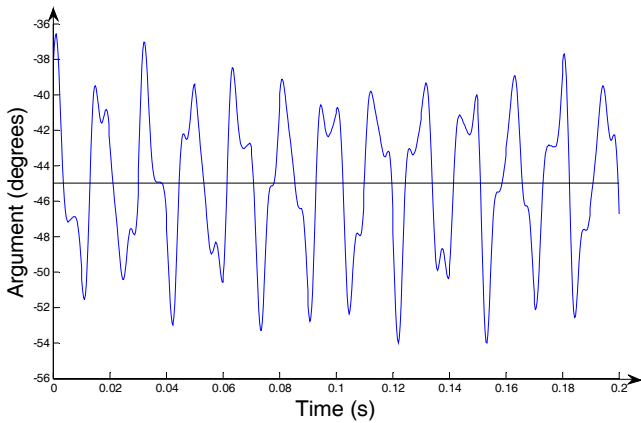


Fig. 2. Estimación del argumento de la componente fundamental

La Figura 1 se refiere a la estimación del módulo de la componente fundamental (expresada en tanto por uno respecto al valor exacto del citado módulo) y la Figura 2 a la estimación del argumento de la componente fundamental (expresado en grados). En ambos casos, el valor de referencia, correspondiente a una estimación sin error, se ha señalado mediante una recta horizontal que corta al eje vertical en el valor exacto del parámetro estimado.

En los gráficos de las Figuras 1 y 2 se aprecia claramente como la presencia de inter-armónicos produce una oscilación no amortiguada en la respuesta del filtro. Las consecuencias encadenadas de ello son:

- Incertidumbre en el fásor estimado por el filtro digital (tanto en módulo como en ángulo).
- Incertidumbre en los datos de entrada utilizados por las funciones de protección.
- Posible mala operación del relé de protección.

Es decir, desde el punto de vista de las protecciones, la presencia de inter-armónicos produce un comportamiento inadmisibles del filtro digital debido a que su respuesta oscilatoria pone en peligro la correcta actuación del relé.

4. Caracterización del análisis

La caracterización del análisis presentado en este documento se realiza a través de la selección de los filtros digitales a estudiar, de la definición de las formas de onda utilizadas para probar la respuesta de los filtros seleccionados y del parámetro utilizado para evaluar la respuesta de cada filtro.

A. Selección de filtros digitales

Se han realizado pruebas correspondientes a distintos filtros. Teniendo en cuenta la clasificación señalada en la sección 2, se ha considerado necesario realizar pruebas con filtros pertenecientes a los tres tipos existentes y analizar en mayor profundidad los resultados correspondientes a los filtros más representativos.

Del tipo I se ha analizado con especial profundidad el filtro propuesto por J. Pan [6].

Entre los filtros del tipo II se ha seleccionado el filtro mímico propuesto por G. Benmouyal [7], ya que es el más característico de los pertenecientes a este grupo.

Por último, la DFT se ha tomado como representativa de los filtros del tipo III debido a que es la base sobre la que se definen todos ellos y a que su respuesta será la responsable del comportamiento del filtro frente a inter-armónicos.

B. Definición de formas de onda

La definición de todos los filtros digitales ha sido hecha con el fin de estimar un determinado armónico de la manera más exacta posible. Sin embargo, es evidente que ningún filtro consigue que sus resultados sean completamente inmunes frente a cualquier tipo de componente que pueda aparecer en la onda analizada.

Así, por ejemplo, las componentes exponenciales provocan errores de estimación más o menos importantes en función de las características de la exponencial (amplitud y constante de tiempo) y de las condiciones bajo las que ha sido definido el filtro. Sirva como ejemplo el caso del filtro mímico que puede proporcionar respuestas exactas, si ha sido sintonizado al valor exacto de la constante de tiempo presente en la señal que analiza, o respuestas afectadas de un error creciente, a medida que aumenta la diferencia entre la constante de tiempo sintonizada y la real.

A la hora de definir las formas de onda a utilizar en las pruebas es fundamental tener en cuenta el objetivo perseguido con el estudio. Por esta razón, dado que se trata de analizar el error debido única y exclusivamente a la presencia de inter-armónicos, la señal de prueba tiene la forma:

$$y(t) = A_1 \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha_1) + \sum_{r=1}^8 A_r \cdot \text{sen}(2\pi r \cdot f \cdot t + \alpha_r) + A_{ia} \cdot \text{sen}(2\pi f_{ia} \cdot t + \alpha_{ia}) \quad (1)$$

Donde con el subíndice "ia" se hace referencia al inter-armónico cuya influencia en la respuesta del filtro va a ser analizada. La inclusión de otro tipo de componentes implicaría la dificultad adicional de tener que discernir la parte del error en la salida que era debido a la presencia del inter-armónico y la parte del error que era debida a los otros tipos de componentes presentes en la señal. Dado que ninguno de los filtros tiene dificultades en estimar de forma exacta cualquier armónico en presencia de otros armónicos, esta forma de onda garantiza que el error que se produzca en la respuesta será debido solamente a la distorsión introducida por el inter-armónico. Estudios posteriores, que utilicen formas de onda más complejas, permitirán analizar la influencia que tienen los inter-armónicos en la eliminación de las componentes exponenciales, etc.

C. Factor de evaluación

Como factor de evaluación del error que se produce en la estimación del módulo se emplea el indicador MPD (Maximum Percentage Deviation) [8].

$$MPD(\%) = \left| \frac{\max(X(t) - X_{ref})}{X_{ref}} \right| \quad (2)$$

Este parámetro mide, en valor absoluto, la máxima desviación porcentual que se produce en la salida $X(t)$ del filtro respecto del valor exacto X_{ref} del parámetro estimado.

Como factor de evaluación del error que se produce en la estimación del argumento se ha considerado más apropiado e ilustrativo utilizar directamente el valor absoluto en grados sexagesimales del error cometido.

5. Resultados

Los resultados presentados en este documento se han obtenido utilizando formas de onda como la definida en (1) y referidas a una frecuencia fundamental de 50 Hz. En esta onda, para facilitar la interpretación de los resultados, se ha fijado en 100 la amplitud de la componente fundamental y en $100/r$ la correspondiente al armónico de orden r .

$$y(t) = 100 \cdot \text{sen}(100 \cdot \pi \cdot t + \alpha_1) + \frac{100}{r} \cdot \text{sen}(100 \cdot \pi \cdot r \cdot t + \alpha_r) + A_{ia} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f_{ia} \cdot t + \alpha_{ia}) \quad (3)$$

Asimismo, con el fin de obtener la relación existente entre cada uno de los parámetros característicos del inter-armónico y el error cometido en la estimación, se han considerado los siguientes rangos de valores:

- Amplitud del inter-armónico (A_{ia}). Los valores considerados en los resultados presentados van desde el 1% hasta el 10 % respecto de la amplitud del armónico que va a ser estimado.
- Frecuencia del inter-armónico (f_{ia}). Se ha considerado un rango de valores que va desde 50 Hz hasta 200 Hz.
- Argumento del inter-armónico (α_{ia}). Se han considerado diferentes valores del ángulo en función de los ángulos correspondientes a los armónicos.

Los resultados alcanzados en las pruebas realizadas muestran que los métodos del tipo I proporcionan peores resultados que los métodos de tipo II y III. Ello es debido a los fundamentos matemáticos en que se basan y que implican un mal condicionamiento de las matrices utilizadas por los métodos tipo I. Por esta razón se presentan y analizan los resultados proporcionados por métodos del tipo II y III.

Las Figuras 3 y 4 muestran, respectivamente, el valor de

MPD y la desviación del argumento correspondientes a la estimación de la componente fundamental utilizando un método del Tipo III (DFT). En estas estimaciones, con el fin de analizar la influencia de la amplitud y de la frecuencia del inter-armónico, se ha mantenido constante en todos los casos el valor de α_{ia} y se han variado las frecuencias (eje horizontal) y amplitudes (rojo valor máximo, verde valor mínimo) en los rangos indicados anteriormente.

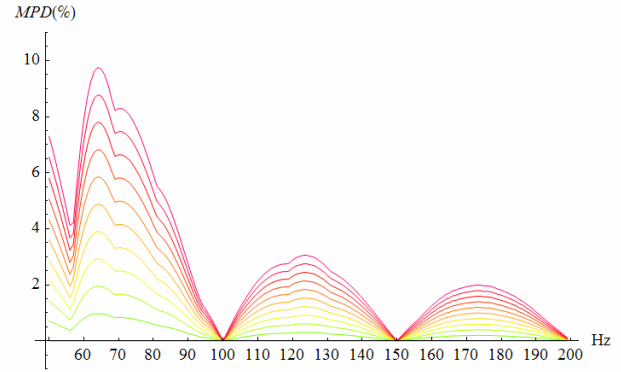


Fig. 3. Influencia del inter-armónico en algoritmo Tipo III. Estimación del módulo de la componente fundamental.

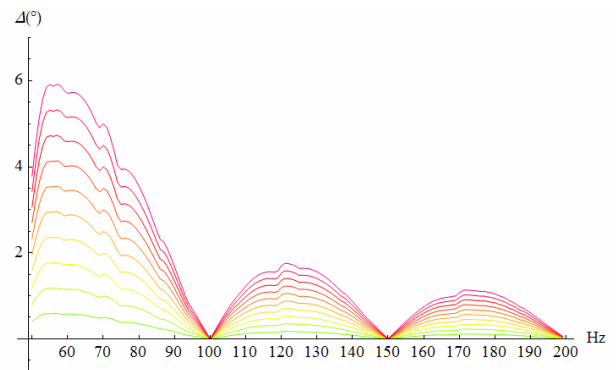


Fig. 4. Influencia del inter-armónico en algoritmo Tipo III. Estimación del argumento de la componente fundamental.

De manera análoga, las Figuras 5 y 6 se muestran al valor del MPD y la desviación del argumento correspondientes a la estimación del segundo armónico.

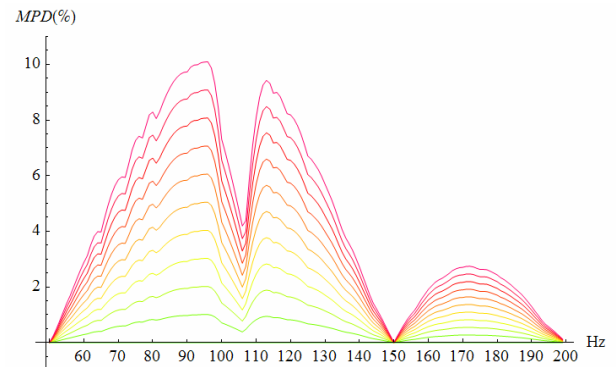


Fig. 5. Influencia del inter-armónico en algoritmo Tipo III. Estimación del módulo del segundo armónico.

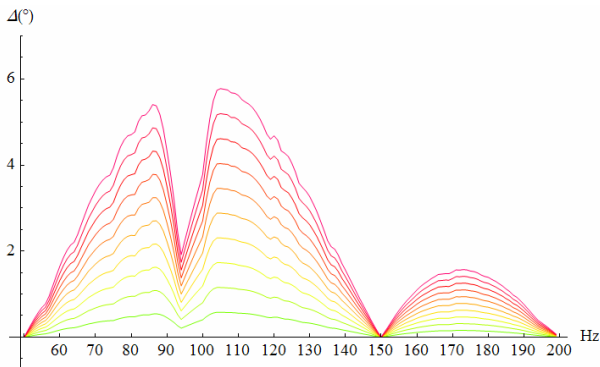


Fig. 6. Influencia del inter-armónico en algoritmo Tipo III. Estimación del argumento del segundo armónico.

Los resultados obtenidos en la estimación del resto de componentes armónicos conducen a gráficas similares a las mostradas en las Figuras 5 y 6.

El análisis de estas figuras muestra como, tanto en la estimación del módulo como del argumento, se cumple que:

- Para una determinada frecuencia (f_{ia}) el error es tanto mayor cuanto mayor es la amplitud del inter-armónico (de verde a rojo, amplitudes crecientes del 1 al 10 %).
- Para una determinada amplitud (A_{ia}) el error es mayor en los segmentos inter-armónicos adyacentes a la frecuencia del armónico estimado que en el resto de segmentos inter-armónicos. Así, por ejemplo, en el caso de la estimación de la componente fundamental (Figuras 3 y 4) los errores son mayores en el segmento correspondiente a inter-armónicos de frecuencias entre 50 y 100 Hz que en los segmentos inter-armónicos correspondientes a los rangos [100-150] y [150-200].

Del mismo modo, en el caso del segundo armónico (Figuras 5 y 6) el error es mayor en el segmento de frecuencias [50-100] y [100-150] que en el resto de segmentos, [150-200] para los rangos presentados.

En definitiva, en lo que respecta a la evolución del valor del error, se aprecia como los errores que se producen van siendo menores a medida que el segmento inter-armónico se aleja de la frecuencia correspondiente al armónico estimado.

Cuando f_{ia} coincide con la frecuencia de un armónico el error se hace nulo, ya que en ese caso particular el inter-armónico se ha convertido en un simple componente armónico que no produce errores en la estimación de otro armónico cualquiera.

Lógicamente, esto es así salvo en el caso en que el valor de f_{ia} coincida con la frecuencia del armónico estimado ya que, en este caso, el inter-armónico deja de tener tal condición y su influencia implica simplemente la modificación del valor del armónico que se pretende estimar.

Como consecuencia de todo ello, los gráficos correspondientes al conjunto de los dos segmentos inter-armónicos adyacentes a la frecuencia armónica estimada y los correspondientes a cada uno de los restantes segmentos inter-armónicos, adquieren una forma genérica con tendencia a un semiperiodo sinusoidal afectado de distorsiones. Estas distorsiones son especialmente importantes en los segmentos adyacentes a la frecuencia estimada y ponen de manifiesto una acusada disminución tanto del error en la estimación del módulo (MPD) como del error en la estimación del argumento.

Los resultados presentados en las gráficas de las Figuras 3, 4, 5 y 6 corresponden a casos en los que el desfase del inter-armónico respecto de los armónicos mantenía constante su valor. Estas gráficas ponen de manifiesto que la frecuencia a la que se producen las distorsiones es independiente del valor de la amplitud del armónico aunque, por otro lado, sus efectos son tanto más acusados cuanto mayor es la amplitud y más se suavizan a medida que la amplitud del inter-armónico disminuye.

El análisis de los resultados obtenidos tras la realización de una nueva batería de pruebas bajo las mismas condiciones (mismos rangos de variación de amplitudes y frecuencias) pero introduciendo como nueva condición un rango variable de valores del desfase inter-armónico (α_{ia}), permite asimismo concluir que la frecuencia a la que se producen las distorsiones es función del valor del desfase del inter-armónico.

Pruebas análogas a las descritas pero realizadas sobre un filtro digital de tipo II, en concreto el filtro mímico propuesto por Benmouyal [7], muestran unos resultados bastante análogos a los obtenidos con el filtro tipo III.

La figura 7 muestra las curvas correspondientes al valor MPD de la estimación del módulo de la componente fundamental en presencia de un inter-armónico dentro del rango de frecuencias de 50 a 200 Hz y amplitudes del 1 % (verde) al 10 % (rojo).

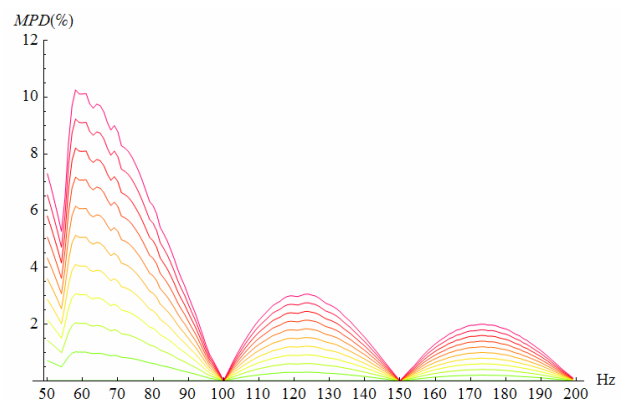


Fig. 7. Influencia del inter-armónico en algoritmo Tipo II. Estimación del módulo de la componente fundamental.

La Figura 8 corresponde a la desviación en la estimación del argumento de la componente fundamental bajo las mismas condiciones y mismos rangos de valores

señalados para las curvas de MPD mostradas en la Figura 7.

Como puede apreciarse fácilmente, las conclusiones señaladas para los filtros tipo III son extrapolables a los resultados proporcionados por filtros tipo II, ya que en ambos casos se llega a curvas del mismo tipo y características.

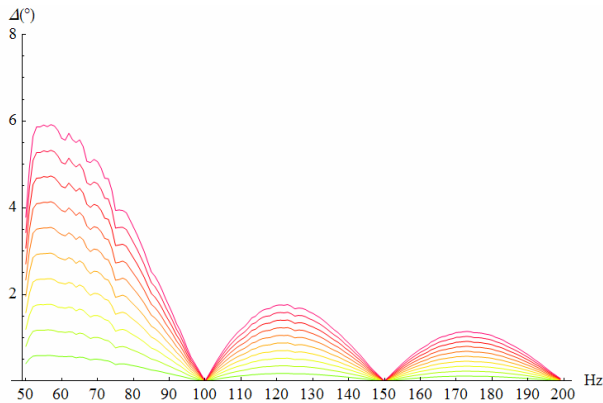


Fig. 8. Influencia del inter-armónico en algoritmo Tipo II. Estimación del argumento de la componente fundamental.

6. Conclusiones

Debido a múltiples causas, las señales eléctricas presentes en los sistemas de energía eléctrica están cada vez más distorsionadas. En los últimos años las distorsiones debidas a la presencia de componentes inter-armónicos están adquiriendo cada vez más relevancia debido a su creciente número e importancia.

Por otro lado, las protecciones digitales deben ser capaces de estimar con precisión y rapidez los componentes armónicos que necesitan las funciones de protección para tomar la decisión de cual debe ser la actuación de la protección ante cualquier situación que pueda llegar a producirse en su área de vigilancia.

Las pruebas realizadas a los distintos tipos de filtros utilizados en protecciones digitales, de los que parte han sido presentados en este documento, ponen de manifiesto que la presencia de componentes inter-armónicos en la señal analizada afecta de manera negativa e importante a la respuesta de estos filtros.

En consecuencia, es necesario adaptar los filtros existentes o definir nuevos filtros que tengan en cuenta la posible presencia de componentes inter-armónicos en la señal que deben analizar.

Agradecimientos

El trabajo presentado en este artículo es parte de proyecto de investigación “Repercusiones de inter-armónicos en el comportamiento de los sistemas de protección de redes eléctricas”, realizado bajo la esponsorización de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU-Ref.EHU08/47).

Referencias

- [1] J. Lázaro, J.F. Miñambres, M.A. Zorroza, B. Larrea, M. Sánchez and I. Antiza, “New Quick-converge invariant digital filter for phasor estimation”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, pp. 705-713, May 2009.
- [2] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Interharmonic: Theory and Modeling”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp 2335-2348, October 2007
- [3] J.Z Yang, C.W Liu, “A new method for transmission line fault signal phases estimation”, *IEEE ICSS2005 International Conference On Systems & Signals*, Taiwan, April 2005.
- [4] Q. Zhang, H. Liu, H. Chen Q. Li and Z. Zhang, “A Precise and Adaptive Algorithm for Interharmonics Measurement Based on Iterative DFT”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 4, pp 1728-1735, October 2008
- [5] T.X. Zhu, “Exact Harmonics/Interharmonics calculation using adaptive window width”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp 2279-2288, October 2007
- [6] J. Pan, K. Vu, Y. Hu, “An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, N° 4, pp. 1623-1628, October 2004.
- [7] G. Benmouyal, “Removal of DC-offset in current waveforms using digital mimic filtering”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 621-630, April 1995.
- [8] T.S. Sidhu, X. Zhang, F. Albasri, M.S. Sachdev, “Discrete-Fourier-transform-based technique for removal of decaying DC offset from phasor estimates”, *IEE Proc.Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, No. 6, pp.745-752, November 2003.