

Multipurpose digital filter to compensate CT's saturation and estimate harmonic components

J. Lázaro Domínguez¹, M.A.Zorrozua Arrieta², J.F. Miñambres Argüelles²,
M. Sánchez Benito¹, B. Larrea Jaurrieta¹

¹ Departamento de Matemática Aplicada
E.T.S.I., Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Alda. Urquijo s/n – 48013 Bilbao (España)
Tel.:+34 94 6014150, fax:+34 94 6014200, e-mail: mapladoj@bi.ehu.es

² Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.T.S.I., Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Alda. Urquijo s/n – 48013 Bilbao (España)
Tel.:+34 94 6014056, fax:+34 94 6014200, e-mail: iepzoarm@bi.ehu.es

Resumen. Los filtros digitales tienen como misión proporcionar los datos necesarios para alimentar a las funciones implementadas en dispositivos digitales. La información sobre el estado del sistema llega a estos filtros en forma de ondas digitalizadas, de tensión e intensidad, que deben ser convenientemente interpretadas. Los factores que más dificultan y distorsionan la correcta interpretación de estas ondas son la presencia de armónicos, la presencia de componentes exponenciales y los errores derivados de la saturación de los transformadores de intensidad que transmiten la información de las corrientes circulantes por el sistema eléctrico de potencia. En consecuencia, el primer paso para poder estimar adecuadamente el armónico fundamental, o cualquier otro que fuese necesario, es eliminar la influencia de los factores que dificultan su cálculo.

En este trabajo se presenta un nuevo filtro digital que elimina la componente exponencial independientemente del número de armónicos que componen la onda, del valor de la constante de tiempo de la exponencial y del grado de saturación del transformador de intensidad que transmite la información de la onda de corriente. Su sencillez de implementación y la fiabilidad de los resultados que proporciona lo hacen adecuado para poder ser implementado en relés de protección.

Palabras llave

Digital filtering, dc-offset removal, current transformer, saturation effects, digital protection.

1. Introducción

Actualmente los relés de protección se fabrican con tecnología digital por sus numerosas ventajas frente a los relés tradicionales. Para que sus funciones de protección actúen correctamente es necesario que sean alimentadas

con valores fiables de las magnitudes eléctricas que caracterizan el estado del sistema que vigilan.

En relés digitales el proceso de medida es el mostrado en la figura 1. Las ondas analógicas procedentes de los CT's y VT's son convertidas en señales digitales. Los elementos fundamentales de esta etapa son un filtro antialiasing (low pass) y un conversor analógico-digital. Posteriormente, las señales digitales son procesadas mediante filtros digitales con el fin de estimar los componentes armónicos que vayan a ser utilizados por las funciones de protección.

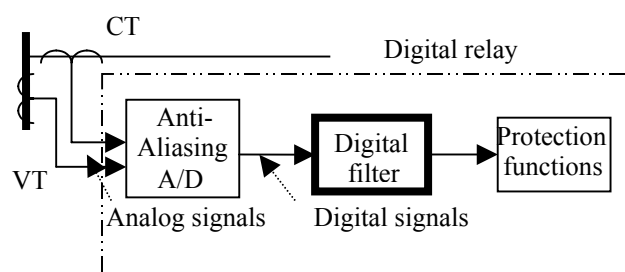


Fig. 1. Relé digital

Lógicamente, cuanto más exactos sean los valores suministrados al filtro digital más exactos serán sus resultados. Por esta razón, en los últimos años hay tendencia a introducir una etapa más en el procesamiento de señal. Esta etapa tiene el objetivo de compensar el error debido a los CT's y VT's. La mayoría de los trabajos están centrados en el caso de los CT's debido a que son los que producen mayor error cuando entran en saturación ante valores elevados de intensidad como, por ejemplo, los que se producen durante una falta [1], [2].

Es obvio señalar que es precisamente bajo condiciones de falta cuando es más importante y necesario que las funciones de protección implementadas en el relé reciban información fiable del estado del sistema. En consecuencia, la correcta actuación de la protección

digital queda supeditada a la fiabilidad y precisión del proceso de tratamiento de señal que culmina con la estimación de los valores utilizados por las funciones de protección.

Por otro lado, para que tanto los métodos del filtrado como de compensación de error puedan ser utilizados en un relé de protección es necesario que puedan trabajar en tiempo real. Por esta razón, si el método es muy complejo es necesario realizar simplificaciones para reducir su carga computacional [3]. Sin embargo, la simplificación de estos métodos implica mayores errores en sus resultados.

Si bien es cierto que en este campo la tecnología esta avanzando a pasos agigantados, no lo es menos que el nivel de exigencia es también creciente. El tiempo (Δt) entre muestras consecutivas para un sistema a frecuencia f y velocidad de muestreo de m muestras por ciclo es:

$$\Delta t = \frac{1}{f \cdot m} \quad (1)$$

Así, por ejemplo, para velocidades de muestreo de 16 muestras por ciclo, el tiempo entre muestras consecutivas es de 1.25 ms en sistemas de 50 Hz. A 32 muestras por ciclo este tiempo pasa a ser de 0.625 ms y a 64 muestras por ciclo se reduce a 0.3125 ms. Por tanto, aunque las velocidades de procesamiento son cada vez mayores, cada vez se dispone de menos tiempo para realizar los cálculos. En consecuencia, para poder trabajar en tiempo real aprovechando toda la información disponible, sigue siendo muy importante disponer de algoritmos de procesamiento fiables, precisos y que por su sencillez de aplicación impliquen una baja carga computacional.

2. Problemática del filtrado: Influencia de la componente exponencial

Tradicionalmente, el procesamiento de la señal digital se ha realizado con filtros digitales del tipo DFT (Discrete Fourier Transform). Estos filtros proporcionan buenos resultados cuando la onda esta compuesta por armónicos y componente continua de valor constante. Sin embargo, tienen problemas de precisión cuando la señal de entrada contiene componente exponencial.

En régimen permanente puede considerarse que las ondas correspondientes a magnitudes eléctricas, tanto de tensión como de intensidad, son periódicas y centradas respecto a un eje horizontal. Desde un punto de vista general este tipo de ondas está compuesto por un armónico fundamental, una serie de armónicos y un desplazamiento vertical u offset. En estos casos, la aplicación de un filtro DFT no presenta problemas y ofrece resultados precisos en la estimación de cualquiera de los armónicos que componen la onda.

Para aplicar la transformada discreta de Fourier de ciclo completo solamente es necesario conocer las muestras correspondientes a un ciclo del armónico fundamental. En el caso de darse las condiciones necesarias para poder

aplicar la transformada discreta de Fourier de medio ciclo esta exigencia se reduce, lógicamente, al conocimiento de los valores registrados correspondientes a una ventana de tiempos de medio ciclo.

En régimen transitorio, sin embargo, aparece una componente exponencial decreciente. La presencia de esta componente aperiódica provoca una mala respuesta de la DFT.

Para valores pequeños de la constante de tiempo la respuesta del filtro DFT, aunque converge rápidamente hacia el valor correcto, tiene gran amplitud de oscilación (y, por tanto, de error) en los primeros ciclos. Por el contrario, para valores elevados de la constante de tiempo la respuesta tiene menos amplitud de oscilación pero tarda más tiempo en converger hacia el valor correcto (Figuras 2 y 3). Este efecto es debido a que cuanto menor es la constante de tiempo, más asimetría introduce en la onda correspondiente a un ciclo y menos tiempo dura su influencia.

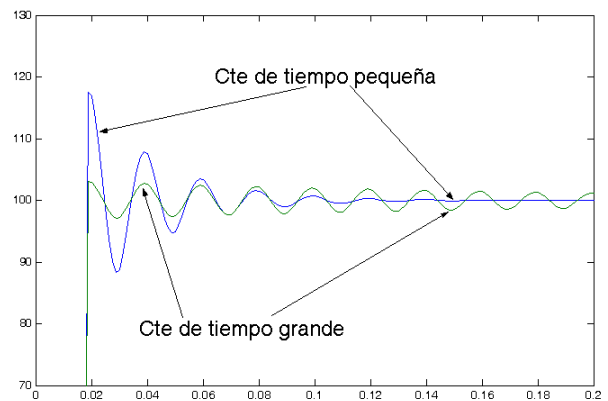


Fig. 2. Comportamiento del filtro DFT. Estimación del módulo.

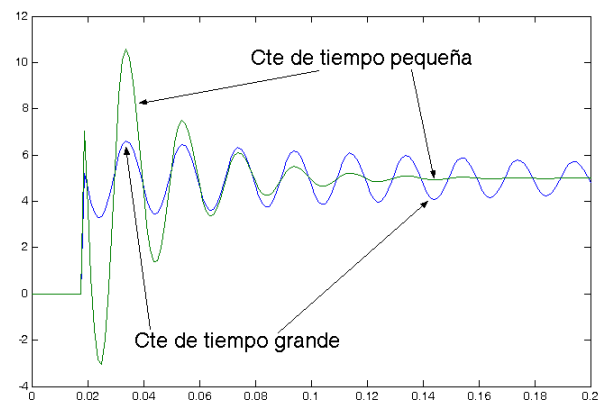


Fig. 3. Comportamiento del filtro DFT. Estimación del ángulo.

Por ello, debido a que la presencia de componente exponencial es habitual en transitorios eléctricos, se han desarrollado diversos métodos, basados en DFT, con el

fin de eliminar la componente exponencial de las muestras registradas [3],[4]. La estructura básica de este tipo de métodos consta de tres pasos:

- Cálculo de la amplitud y constante de tiempo de la exponencial.
- Obtención de las muestras corregidas mediante la eliminación de la componente exponencial en las muestras registradas.
- Aplicación de un método de estimación de armónicos a las muestras corregidas.

3. Influencia de la saturación de los CT's

Como es bien sabido, los transformadores de intensidad introducen un error en la corriente secundaria respecto al valor teórico que la onda real del primario debiera producir en el secundario. Este error se traduce en un menor valor de la corriente medida en el secundario y es muy elevado si el transformador entra en saturación (Figura 4).

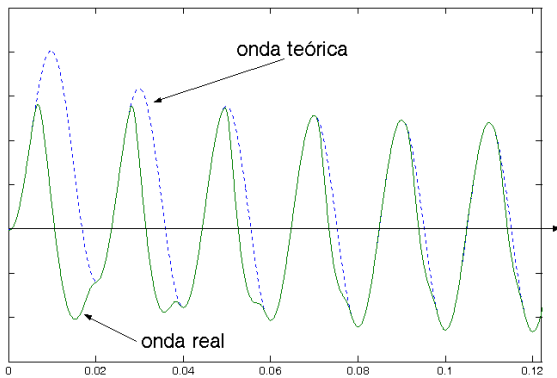


Fig. 4. Efectos de la saturación en la corriente secundaria de un transformador de intensidad (CT)

Partiendo de la base de que los transformadores de intensidad han sido bien seleccionados, en régimen permanente los errores introducidos por los CT's son poco importantes y su efecto no influye de forma decisiva en los resultados del filtrado.

Sin embargo, en régimen transitorio la situación puede cambiar de manera radical. Para valores elevados de corriente los errores en la medida son mayores. Además, para valores muy elevados de intensidad, como los que pueden llegar a producirse en el transitorio tras una falta, se corre el peligro de que el CT entre en saturación y se dispare el valor de los errores en la corriente secundaria. Este efecto puede incluso verse acrecentado como consecuencia del efecto del flujo remanente.

No es necesario señalar que la aplicación de un filtro tipo DFT a ondas de corriente afectadas por fuertes errores, implican una incorrecta y poco fiable estimación del armónico fundamental u otros que compongan la onda.

Tal y como se ha indicado anteriormente, es precisamente en el régimen transitorio posterior a una falta cuando es más necesario que la protección sea alimentada con valores fiables, en este caso, de corriente. Por esta razón es muy importante poder estimar los componentes de la onda real sin arrastrar los errores derivados de la saturación de los transformadores de intensidad.

El desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación de CT's no ha solventado este problema. El cambio de equipamiento en sistemas eléctricos de potencia tiene una gran inercia y pasarán muchos años, en caso de que esto alguna vez suceda, hasta que se pueda empezar a hablar de la desaparición del problema de los errores incorporados por los transformadores de intensidad en la corriente secundaria.

En los últimos años, de manera general y no específicamente enfocada al campo de las protecciones, se han propuesto diversos métodos encaminados a compensar el error debido a los CT's. Estos métodos tienen el objetivo de calcular la onda teórica (carente de error) en base a estimar para cada muestra la diferencia entre la onda real registrada y la onda teórica. Sumando a cada muestra registrada el valor correspondiente de esta diferencia se obtiene la forma de onda que se habría registrado en caso de que el CT no hubiese introducido error en la corriente secundaria [1], [2].

4. Objetivo

El filtro digital a utilizar en una protección digital debe garantizar resultados fiables bajo cualquier condición de operación pero, especialmente, durante el transitorio inmediatamente posterior a una falta. Por tanto, a la vista de lo expuesto anteriormente, debe ser un filtro capaz de estimar correctamente las magnitudes demandadas por las funciones de protección con independencia de los componentes y grado de saturación de la onda registrada.

Cabe la posibilidad de implementar por separado los métodos que solventen estas problemáticas. Sin embargo, la implementación por separado de tres métodos distintos (un método de compensación de los errores debidos a la saturación, un método de eliminación de la componente exponencial y un método de estimación de armónicos) aumenta la carga computacional necesaria para realizar el filtrado y compromete su aplicación al campo de las protecciones ya que dificulta su funcionamiento en tiempo real.

Una posible solución para solventar este problema es definir algoritmos capaces de realizar en una sola operación más de una de las funciones anteriores. Por esta razón, los autores de este trabajo fijaron su objetivo en desarrollar una nueva metodología de filtrado multipropósito basada en la definición de algoritmos de cálculo sencillos encaminados a la estimación de armónicos (módulo y ángulo). Sus características de funcionamiento, en lo que a carga computacional y

precisión de resultados se refiere, debían además hacerla válida para ser utilizada en el campo de las protecciones.

El resultado del trabajo es la definición del multipurpose digital filter (MDF).

5. Multipurpose digital filter (MDF)

El nuevo filtro digital que se ha definido facilita la estimación de armónicos basándose en la eliminación de la componente exponencial independientemente del grado de saturación del transformador de intensidad que transmite la información de la onda de corriente, del valor de la constante de tiempo de la exponencial y del número de armónicos que componen la onda. Su sencillez de implementación y la precisión de los resultados que proporciona lo hacen adecuado para poder ser implementado en relés de protección.

El cálculo de la amplitud (A) de la exponencial se realiza mediante la expresión:

$$A = \frac{s(m+1) - s(1)}{(a^m - 1)} \quad (2)$$

donde:

$s(1)$ = Valor de la señal registrada correspondiente a la primera muestra

$s(m+1)$ = Valor de la señal registrada correspondiente a la muestra (m+1)

m = número de muestras por ciclo del armónico fundamental

a = Parámetro adimensional calculado mediante la expresión

$$a = \frac{s(m+2) - s(2)}{s(m+1) - s(1)} \quad (3)$$

En esta expresión, el significado de $s(2)$ y $s(m+2)$ es análogo al señalado anteriormente para $s(1)$ y $s(m+1)$.

Aunque para el proceso de eliminación de la componente exponencial de las muestras registradas no es necesario realizar su cálculo, la constante de tiempo (τ) correspondiente a la exponencial puede determinarse mediante la expresión:

$$\tau = -\frac{1}{m \cdot f \cdot \ln a} \quad (4)$$

donde f es la frecuencia fundamental del sistema eléctrico origen de la señal eléctrica analizada..

Sus principales características son:

- Es aplicable para cualquier valor de la constante de tiempo de la componente exponencial de la señal. Esto supone una ventaja frente a otros métodos ya que, gran parte de ellos, solo son aplicables para un determinado rango de valores de la

constante de tiempo ya que, en general, solamente garantizan resultados fiables dentro de ese rango.

- Es aplicable para cualquier contenido en armónicos de la señal. Algunos de los métodos existentes hasta el momento requieren para su aplicación que la composición de la señal a analizar cumpla una serie de condiciones.
- Es inmune a los errores debidos a la saturación de los CT's. Esto supone una gran ventaja frente al resto de métodos que, si no aplican previamente algún método de compensación, se ven afectados de manera muy importante por los errores derivados de la saturación de los CT's. El MDF se aplica de igual forma y ofrece resultados de gran precisión con independencia de que los transformadores de intensidad hayan entrado o no en saturación.
- Utiliza directamente los valores de las muestras registradas. La mejoría respecto a otros métodos es que no necesita aplicar ningún método especial, ni someter a las muestras a un complejo proceso de cálculo para poder eliminar la exponencial.
- Es independiente del número de muestras con que es registrada la señal. Tal y como puede apreciarse en las ecuaciones que definen su aplicación, independientemente del número de muestras por ciclo con que es registrada la señal el MDF utiliza solamente cuatro muestras para determinar las características de la componente exponencial a eliminar. Además, la precisión de sus resultados tampoco depende del número de muestras con que es registrada la onda.
- Su proceso de cálculo es muy sencillo. Frente al resto de métodos, las características del MDF implican una mayor sencillez de cálculo que redundan en una menor carga computacional que facilita su aplicación en tiempo real.

6. Resultados

Para mostrar el comportamiento del MDF se muestran los resultados que proporciona su aplicación bajo diferentes condiciones. En concreto, del amplio espectro de pruebas realizadas, se presentan los casos correspondientes a su respuesta bajo la influencia derivada de la existencia de exponencial, de la presencia de determinados componentes armónicos en la onda filtrada y, finalmente, bajo la influencia de errores debidos a la saturación del transformador de intensidad que transmite la onda de corriente. Las señales de intensidad utilizadas en los casos presentados corresponden a ondas de 50 Hz registradas a 16 muestras/ciclo.

La figura 5 muestra una corriente de falta que ha sido registrada sin que el correspondiente CT alcance valores apreciables de saturación. Tal y como puede apreciarse, el instante en que se ha producido la falta ha provocado una importante exponencial en la forma de onda.

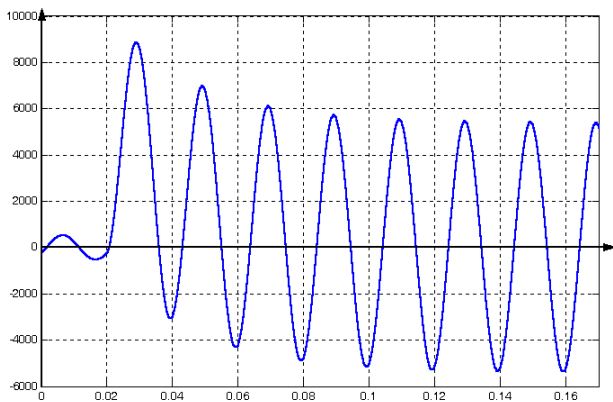


Fig. 5. Corriente de falta

La figura 6 muestra la estimación del módulo del armónico fundamental y la figura 7 los resultados de la estimación del ángulo correspondiente.

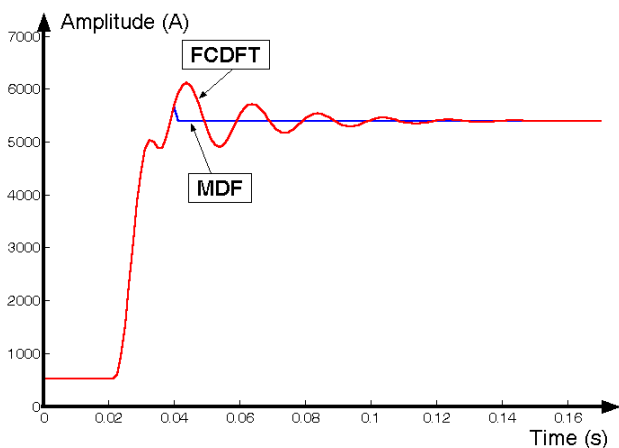


Fig. 6. Influencia de la exponencial en la respuesta: Estimación de la amplitud

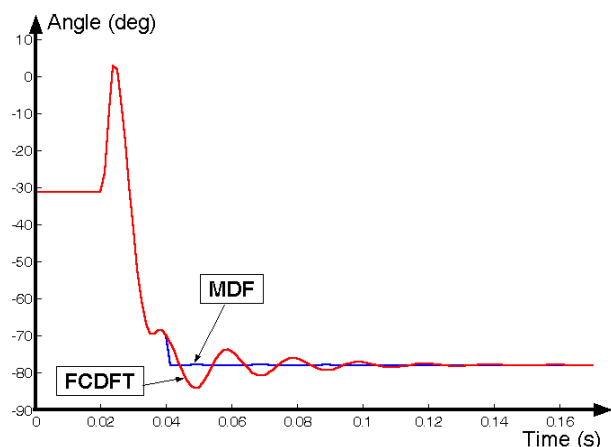


Fig. 7. Influencia de la exponencial en la respuesta: Estimación del ángulo

Un filtro que vaya a ser implementado en protecciones debe garantizar un correcto funcionamiento tanto bajo condiciones normales de operación como bajo condiciones de falta. Los resultados presentados en las figuras 6 y 7 muestran el buen funcionamiento del MDF en ambas situaciones.

En ambos casos se presenta la respuesta del MDF en comparación con la respuesta del FCDFT (full cycle discrete Fourier transform). En ellas puede apreciarse como el MDF es más rápido y da resultados más exactos que el FCDFT. Con otros tipos de filtros, como los señalados en las referencias y similares, se obtienen resultados análogos a los del MDF. La ventaja del MDF es, en este caso, su mayor sencillez de cálculo y, en consecuencia, su menor carga computacional.

Las figuras 8 y 9 permiten comprobar la influencia en la respuesta de algunos componentes específicos que pueden estar presentes en la señal analizada. Estas figuras corresponden, respectivamente, a la estimación del módulo y el ángulo del armónico fundamental de una señal que contiene exponencial y un octavo armónico de amplitud 1% del fundamental.

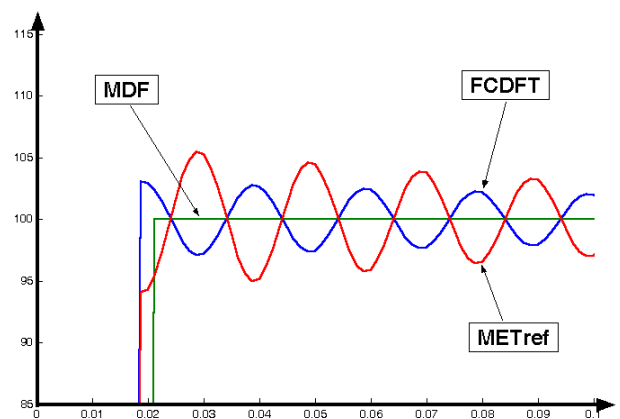


Fig. 8. Sensibilidad frente a componentes armónicos específicos: Estimación de la amplitud

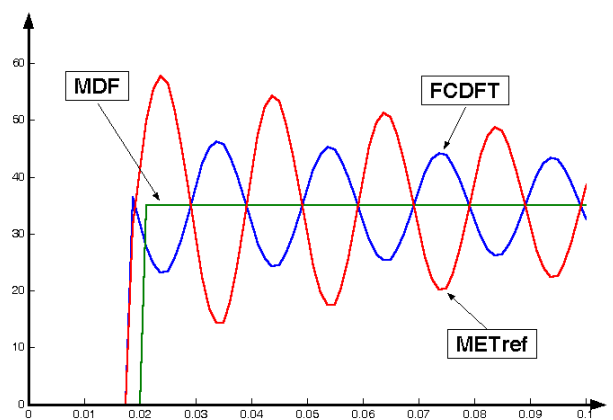


Fig. 9. Sensibilidad frente a componentes armónicos específicos: Estimación del ángulo

En estas figuras 8 y 9 se muestran los resultados proporcionados por el MDF, FCDFT y el método

presentado en la referencia [3] (METref) que, tal y como puede observarse en las figuras, es altamente sensible a la presencia del octavo armónico. Esta sensibilidad es debida a que la presencia de este componente armónico distorsiona de manera muy importante la estimación de las características de la exponencial. Aspecto este que, como también puede comprobarse, no influye en el MDF que sigue calculando la exponencial de manera muy precisa ante cualquier contenido en armónicos de la señal.

Este hecho pone una vez más de manifiesto que, con el fin de poder después estimar adecuadamente los armónicos que la componen, es muy importante estimar de la manera más exacta posible las características de la componente exponencial que forma parte de la señal a filtrar.

La figura 10 muestra precisamente la influencia del valor de la corriente primaria en el error cometido en la estimación de la componente exponencial que forma parte de la onda. Las curvas (a) y (b) son curvas tipo que representan el error correspondiente a los métodos que utilizan todas las muestras para determinar la exponencial. (a) corresponde al caso en que no hay magnetismo remanente en el CT y (b) corresponde al caso en que el magnetismo remanente provoca una mayor saturación del CT. La curva (c) representa el error existente cuando se aplica el MDF. Puede considerarse que esta curva (c) corresponde tanto a la situación sin presencia de flujo remanente como a la situación en la que hay flujo remanente ya que, en ambos casos, los errores son prácticamente despreciables.

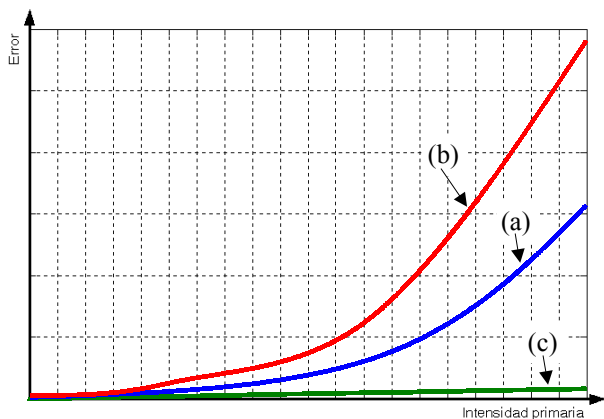


Fig. 10. Error en la determinación de la componente exponencial.

En realidad, el factor que influye en el error incorporado en la corriente secundaria es la saturación que se alcanza en el CT, y en esta influye tanto el valor de la corriente primaria como la posible presencia de flujo remanente. Por tanto, cabe realizar una representación más compacta del error cometido en la estimación de la exponencial si se expresa en función del grado de saturación. La figura 11 muestra la forma de las curvas tipo correspondientes al MDF y los otros métodos (ARUM) que utilizan todas las muestras para determinar la exponencial.

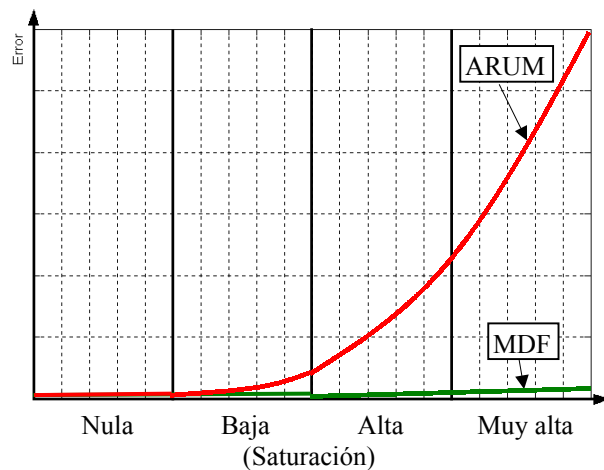


Fig. 11. Influencia de la saturación en el error cometido al estimar la componente exponencial.

El MDF es inmune a la saturación que pueda producirse en el transformador de intensidad que transmite la onda de corriente. Solamente para altísimos grados de saturación es apreciable una pequeña influencia en la precisión de sus resultados.

7. Conclusiones

En este trabajo se presenta un nuevo filtro digital diseñado con el fin de facilitar la correcta estimación de armónicos (fundamental o cualquier otro) bajo condiciones que comprometen la exactitud de otros métodos propuestos en los últimos tiempos. El MDF elimina la componente exponencial independientemente del número de armónicos que componen la onda, de las características de la exponencial (amplitud y constante de tiempo) y del grado de saturación del transformador de intensidad que transmite la información de la onda de corriente.

Debido a la sencillez de su proceso de cálculo, a su baja carga computacional y a la precisión de sus resultados el MDF es adecuado para ser implementado en protecciones digitales.

Agradecimientos

El contenido de la presente ponencia forma parte de los trabajos que se están llevando a cabo en el Proyecto de Investigación UPV 00142.345-E-15318/2003 financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Los autores agradecen a la empresa GE Multilin (Zamudio-Spain) el apoyo prestado al desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] Locci N. ; Muscas C., "A digital compensation method for improving current transformer accuracy", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, Nº 4, July 2000.

- [2] Yu D.C. ; Cummins J.C. ; Wang Z. ; Yoon H. Kojovic L.A., "Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neutral networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, N° 2, July 2001
- [3] Guo Y.; Kezunovic M.; Chen D, "Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying DC-offset on the Fourier algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, N° 3, July 2003
- [4] Gu Jyh-Cherng; Yu Sun-Li, "Removal of DC offset in current and voltage signals a novel Fourier filter algorithm ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, N° 1, January 2000