



JORNADAS DE JÓVENES INVESTIGADORES DE LA A.U.G.M.

“CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA INTEGRACIÓN REGIONAL”

Universidad: Universidad Nacional de La Plata
Facultad/Instituto/Centro, etc: CeTAD (Centro de Técnicas Analógico-Digitales)
Departamento Cátedra:
Curso de Posgrado (si fuera necesario)
Dirección: Facultad de Ingeniería, Depto. de Electrotecnia, Calle 48 y 116, La Plata (1900), Pcia. de Bs. As., Argentina.
Teléfono: +54 221 4227628 Fax: E-mail: hpascual@ivolta.ing.unlp.edu.ar
Autor: Hector o. Pascual, José A. Rapallini y Antonio A Quijano
Título: Análisis de algoritmos digitales para su implementación en un sistema de medida de impedancia
Núcleo Disciplinario o Comité Académico
Otros miembros del grupo (si fuera necesario):
Palabra Clave: Codiseño Hardware/Software, Medición de Impedancia, Filtros de Fourier, Coseno y Seno. (Español) (Portugués)



Asociación de universidades
grupo montevideo



Análisis de algoritmos digitales para su implementación en un sistema de medida de impedancia.

Héctor. O. Pascual
hpascual@volta.ing.unlp.edu.ar

José A. Rapallini
josrap@ing.unlp.edu.ar

Antonio A. Quijano
quijano@ing.unlp.edu.ar

CeTAD, Dto. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Univ. Nacional de La Plata, 1900, La Plata, Argentina.

Resumen:

El objetivo del presente trabajo es mostrar la primera etapa en el desarrollo de un sistema de medida digital de impedancia en tiempo real, para un sistema eléctrico monofásico a su frecuencia fundamental (50 Hz), realizándose en esta etapa, según corresponde a la metodología de Codiseño Hardware/Software, el estudio del problema, la simulación y el análisis de los algoritmos.

El resultado esperado del proyecto completo será la implementación de los algoritmos en un Circuito Integrado, para su uso como sistema embebido en el citado equipo.

El cálculo de la impedancia se basa en el cociente de los fasores de tensión y corriente a la frecuencia deseada y para tal fin se analizan los filtros de Fourier, Coseno y Seno mostrándose el efecto que produce el ancho de ventana de datos sobre los algoritmos presentados, en función de esos resultados se caracterizará a los filtros anti-aliasing que se adapten correctamente y así determinar las especificaciones del circuito electrónico que resuelva el problema planteado.

Palabras claves: Codiseño Hardware/Software, Medición de Impedancia, Filtros de Fourier, Coseno y Seno.

1. Introducción

Un sistema de medida de impedancia para una frecuencia determinada (50 Hz), tiene aplicación en protecciones de sistemas eléctricos, su objeto es detectar las fallas de cortocircuitos y separar a través de los interruptores la parte del sistema fallado. El funcionamiento de estas protecciones consiste en el cálculo de una impedancia aparente (proporcional a la distancia entre el punto de falla y la ubicación de la protección), basado en un cociente entre tensión y corriente.

Para la obtención de la componente de frecuencia fundamental de las señales de entrada, se pueden utilizar distintos tipos de algoritmos como los de Fourier, Seno, Coseno, Walsh, CAL, SAL, Mínimos cuadrados, Kalman, etc., [1]-[6].

Teniendo en cuenta que los filtros de Fourier tienen una amplia difusión y han sido utilizados para la estimación de parámetros en protecciones de impedancia, y el filtro Coseno también ha encontrado aplicación en relevadores de impedancia comerciales, en el presente trabajo se describen los filtros de Fourier, Coseno y Seno para determinar que características son deseables para su implementación electrónica.

2. Algoritmos de Fourier, Coseno y Seno.

Los algoritmos de Fourier, Coseno y Seno son algoritmos basados en las características de la señal de entrada y poseen respuesta finita al impulso (FIR), para el análisis del comportamiento de este tipo de algoritmos de filtrado se puede usar de base el diagrama mostrado en la Fig. 1.

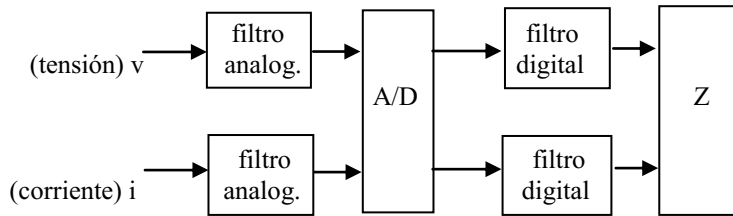


Fig. 1

Teniendo en cuenta que la longitud de ventana juega un papel importante en la respuesta de los filtros a ser analizados (Fourier, Coseno y Seno), para el estudio de su comportamiento se seleccionan cuatro ventanas diferentes en longitud. Considerando que estos filtros encuentran aplicación en protecciones de impedancia, donde el cálculo de la impedancia proporcional a la distancia eléctrica a la falla se realiza, en general, dentro de tiempos que oscilan en el entorno de un ciclo de la frecuencia fundamental después de haberse producido la falla, las ventanas seleccionadas son de 1, 1/2, 1 1/2 y 2 ciclos, correspondientes a la frecuencia fundamental del sistema eléctrico.

Para el caso de filtro de Fourier las componentes real e imaginaria del fasor de frecuencia fundamental estarán dadas por (1) a (8), que serán las ecuaciones de las cuales se extraen los coeficientes del filtro.

Ventana de 1 ciclo:

$$\hat{x}_{or} = \frac{2}{N_c} \sum_{n=0}^{N_c-1} x(n) \cos\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (1)$$

$$\hat{x}_{oi} = -\frac{2}{N_c} \sum_{n=0}^{N_c-1} x(n) \sen\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (2)$$

Ventana de 1/2 ciclo:

$$\hat{x}_{or} = \frac{4}{N_c} \sum_{n=0}^{N_c/2-1} x(n) \cos\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (3)$$

$$\hat{x}_{oi} = -\frac{4}{N_c} \sum_{n=0}^{N_c/2-1} x(n) \sen\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (4)$$

Ventana de 1 1/2 ciclo:

$$\hat{x}_{or} = \frac{4}{3 N_c} \sum_{n=0}^{3N_c/2-1} x(n) \cos\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (5)$$

$$\hat{x}_{oi} = -\frac{4}{3 N_c} \sum_{n=0}^{3N_c/2-1} x(n) \sen\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (6)$$

Ventana de 2 ciclos:

$$\hat{x}_{or} = \frac{1}{N_c} \sum_{n=0}^{2N_c-1} x(n) \cos\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (7)$$

$$\hat{x}_{oi} = -\frac{1}{N_c} \sum_{n=0}^{2N_c-1} x(n) \sen\left(\frac{2 \pi n}{N_c}\right) \quad (8)$$

N_c Número de muestras por ciclo.

\hat{x}_{or} Representa el valor pico de la componente real del fasor de frecuencia fundamental de la señal $x(n)$.

\hat{x}_{oi} Representa el valor pico de la componente imaginaria del fasor de frecuencia fundamental de la señal $x(n)$.

La representación en forma polar del fasor correspondiente estará dada por (9) y (10).

$$|\hat{x}_o| = \sqrt{(\hat{x}_{or})^2 + (\hat{x}_{oi})^2} \quad (9)$$

$$\varphi_o = \arctg\left(\frac{\hat{x}_{oi}}{\hat{x}_{or}}\right) \quad (10)$$

El fasor calculado tiene la magnitud correcta pero gira a medida que la ventana de datos se desplaza con respecto a la señal, a razón de un ángulo θ dado por: $\theta = 2 \pi F_o/F_s$ (en donde F_s es la frecuencia de muestreo en [muestras/seg] y F_o es la frecuencia fundamental de las señales de tensión o corriente en [Hz]).

Esta rotación no afecta el correcto funcionamiento ya que el cálculo de la impedancia se basa en el cociente de dos señales de entrada (tensión y corriente), de manera que el desplazamiento en ángulo se anula.

Las respuesta en frecuencia del filtro de Fourier para las longitudes de ventanas de datos analizadas, considerando una frecuencia de muestreo de 1600 muestras/seg ($N_c=32$), se aprecian en las Figs. 2 a 5.

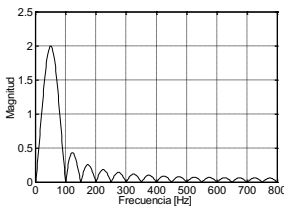


Fig. 2: Filtro Fourier, ventana de 1 ciclo.

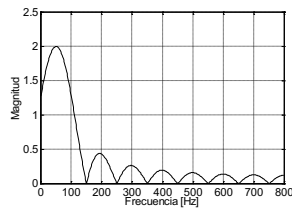


Fig. 3: Filtro Fourier, ventana de 1/2 ciclo.

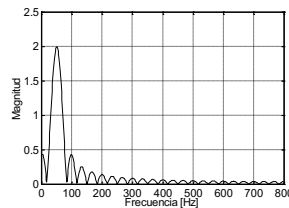


Fig. 4: Filtro Fourier, ventana de 1 1/2 ciclos.

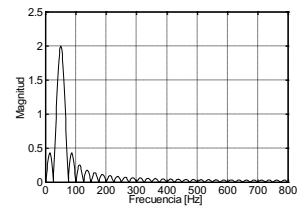


Fig. 5: Filtro Fourier, ventana de 2 ciclos.

En el filtro de Fourier las componentes ortogonales del fasor de frecuencia fundamental, correspondiente a la señal de entrada $x(n)$, se obtienen mediante la combinación de un filtrado Seno y uno Coseno. Otra alternativa para conseguir los fasores es obtener las componentes ortogonales de los mismos a través de desplazar un cuarto de ciclo la salida de cualquiera de los filtros sencillos mencionados anteriormente (Seno o Coseno).

La respuesta en frecuencia de un filtro tipo Coseno y tipo Seno con ventanas rectangulares de datos correspondiente a 1, 1/2, 1 1/2 y 2 ciclos se observan en las Figs. 6 a 13, para las cuales se consideró una frecuencia de muestreo de 1600 muestras/seg. ($N_c=32$).

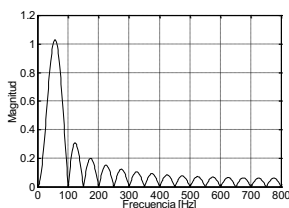


Fig. 6: Filtro Coseno, ventana de 1 ciclo

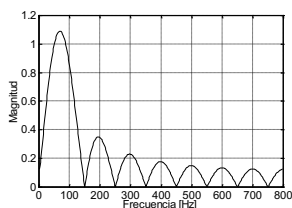


Fig. 8: Filtro Coseno, ventana de 1/2 ciclo

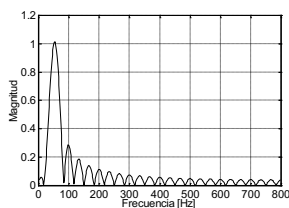


Fig. 10: Filtro Coseno, ventana de 1 1/2 ciclos

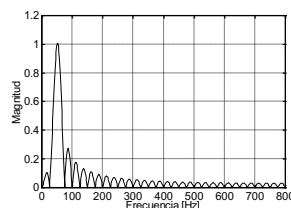


Fig. 12: Filtro Coseno, ventana de 2 ciclos

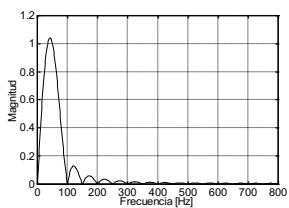


Fig. 7: Filtro Seno, ventana de 1 ciclo

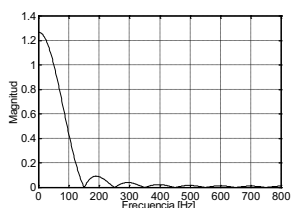


Fig. 9: Filtro Seno, ventana de 1/2 ciclo

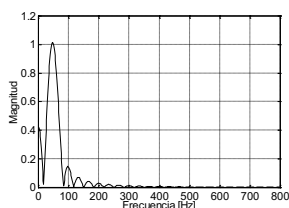


Fig. 11: Filtro Seno, ventana de 1 1/2 ciclos

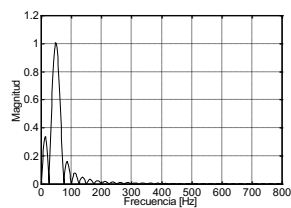


Fig. 13: Filtro Seno, ventana de 2 ciclos

3. Filtro analógico anti-aliasing.

En general, si la banda de transición es muy estrecha, el retardo que se produce en el filtro analógico es elevado. Cuando estos algoritmos son utilizados en sistemas de protecciones de impedancia existe consenso en distintos investigadores [1] y [7], en la conveniencia de utilizar filtros activos de segundo orden, fundamentalmente del tipo de Butterworth o Chebyshev. Teniendo en cuenta lo dicho y con el objeto de analizar el efecto que produce el filtro anti-aliasing sobre el filtro digital se consideran los filtros de Butterworth y Chebyshev de 2° orden.

Del análisis de las respuestas en frecuencia y de las características transitorias de los filtros analógicos anti-aliasing mencionados anteriormente se obtienen conclusiones que se contraponen, lo que lleva a tomar una decisión que responda bien en lo que se refiere a régimen estable, pero sin que perjudique las características transitorias.

4. Cálculo de impedancia cuando se aplican señales distorsionadas.

Con el objeto de mostrar el comportamiento de algunos de los algoritmos digitales de Fourier, Coseno y Seno ante una señal distorsionada se realiza el cálculo de la impedancia cuando se ingresan las señales de tensión y corrientes mostradas en las Figs. 14 y 15. Es de notar que en este caso, la impedancia correspondiente a la frecuencia fundamental es $(0.866+j0.5)$ pu (por unidad).

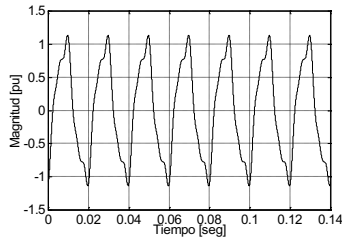


Fig. 14: Señal de tensión

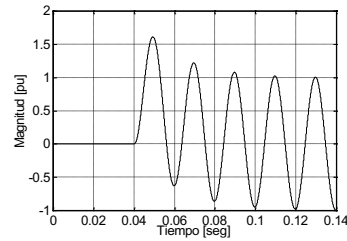


Fig. 15: Señal de corriente

Para este ejemplo se consideran los algoritmos digitales de Fourier, Coseno y Seno, con ventana de dato de 1 ciclo, la componente de las señales que se desea extraer son de 50 Hz, frecuencia de muestreo de 1600 muestras/seg ($N_c=32$ muestras/ciclo), y se utiliza un filtro anti-aliasing de Butterworth de 2° orden, con frecuencia de corte en 400 Hz, el cual se adapta correctamente para esta situación. Los resultados se muestran en las Figs. 16 a 18, la indicación numérica en los puntos de estas figuras representa el número de cálculo que arroja el algoritmo desde que la ventana de datos ingresa al punto de discontinuidad que se observa en la corriente (Fig. 15), de modo que el punto con denominación 1 correspondería al primer punto de impedancia calculado cuando se hace presente el primer valor de corriente distinto de cero.

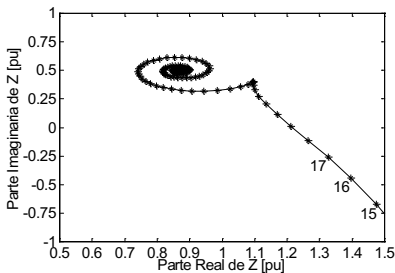


Fig. 16: Filtro Fourier, ventana 1 ciclo.

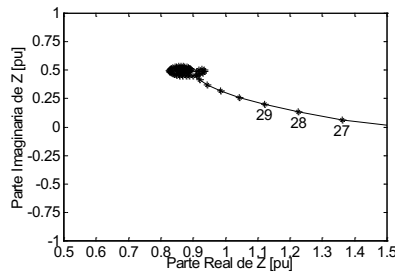


Fig. 17: Filtro Coseno, ventana 1 ciclo.

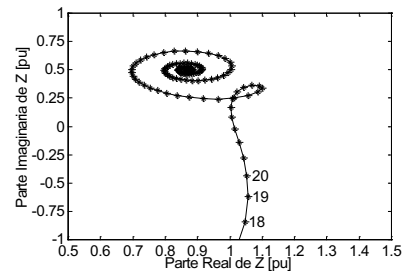


Fig. 18: Filtro Seno, ventana 1 ciclo.

5. Conclusiones

Del análisis de la simulación realizado de los filtros digitales Fourier, Seno y Coseno para ser aplicados en protecciones de impedancia, teniendo en cuenta que la capacidad de rechazo de las frecuencias de ruido que contaminan las señales de entrada dependen de la longitud de ventana; de los gráficos de respuesta en frecuencia (Figs. 2 a 13) se desprende que los de mejor comportamiento son aquellos que tienen ventanas de datos de uno y dos ciclos. Pero como un requerimiento importante en una protección de impedancia es la velocidad de operación, o sea disminuir el retardo de tiempo en su respuesta final, es que desde el punto de vista de funcionamiento estable es aconsejable la ventana de un ciclo para este tipo de equipos.

Por lo tanto, se pueden determinar como especificaciones para los siguientes pasos del diseño una frecuencia de muestreo de 1600 muestras/seg. ($N_c=32$ muestras/ciclo), con la utilización de un filtro anti-

aliasing de Butterworth de 2° orden, con frecuencia de corte de 400 Hz, y la implementación de los filtros digitales con una ventana de 1 ciclo de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico.

6. Referencias

- [1] Arun G. Phadke and James S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, Research Studies Press LTD., 1988.
- [2] Díaz I., Altuve H., Vázquez E., "Evaluación de filtros digitales de Fourier, seno y coseno para protección de distancia," *Memorias del V Seminario Técnico de Protección y Control*, Curitiba, Paraná, Brasil, 28 de Agosto al 1 de septiembre de 1995.
- [3] H. J. Altuve, I. Diaz and E. Vazquez, "Fourier and Walsh digital filtering algorithms for distance protection," *Proceedings of the 1995 IEEE Power Industry Computer Applications Conference*, Salt Lake City, Utah. May 1995, pp. 423-428.
- [4] J.W. Horton, "The use of Walsh functions for high speed digital relaying," *IEEE Publication No. 75CH1034-8 PWR*, Paper No. A75 582 7, *IEEE PES Summer Meeting*, San Francisco, pp. 1-9, July 1975.
- [5] Altuve H., Posadas D., Diaz I., Vázquez E., Chacón O., "Evaluación del filtro digital de mínimos cuadrados para su aplicación en protección de distancia," *Memorias del V Seminario Técnico de Protección y Control*, Curitiba, Paraná, Brasil, 28 de Agosto al 1 de septiembre de 1995.
- [6] A.A. Girgis and R. Grover. Brown. "Application of Kalman Filtering in Computer Relaying," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No 7, July 1981, pp. 3387-3397.
- [7] Díaz I., Altuve H., Vázquez E., "Estudio comparativo de filtros analógicos pasabajos para relevadores digitales de distancia," *VIII Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México*, Acapulco, Gro., Julio de 1995.
- [8] Altuve H., Vázquez E., Lorenzo J., Martínez A., "Efecto de las funciones de ponderación de ventana sobre los filtros digitales para relevadores de distancia," *Memoria Técnica del II Simposio Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia*, Monterrey, N.L., Noviembre de 1993, pp. 215-224.
- [9] John G. Proakis y Dimitris G. Manolakis, *Tratamiento digital de señales*, Prentice-Hall, 1998.
- [10] Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1989.
- [11] Alan V. Oppenheim y Alan S. Willsky, *Señales y Sistemas*, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1983.
- [12] Ramón Pallás Areny, *Adquisición y Distribución de Señales*, Marcombo, 1993.
- [13] Wolf, Wayne. "Hardware-Software Co-Design of Embedded Systems". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No 7, July 1994, pp. 967-989.
- [14] Antonio García Rozo (compilador), *Sistemas Digitales*, CYTED, Colombia, 1999.
- [15] Ceballos J. L., Villagarcía H., Quijano A. A., "Filtros de anti-alias y de suavizado para sistemas de capacidades conmutadas," *VI Workshop IBERCHIP*, San Pablo, Brasil, Marzo de 2000.
- [16] Pascual H. O., *Comportamiento estable y transitorio de los algoritmos de Fourier, Coseno y Seno para ser usados en protecciones digitales de impedancia, considerando el efecto que provoca la saturación de un transductor magnético de corriente*, Informe Técnico N°: 4.00, Rev: 0, Dto. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP, Septiembre de 2000.
- [17] Pascual H. O., Rapallini José A., Quijano Antonio A., "Implementación de un sistema de medida de impedancia para redes eléctricas en tiempo real," *VII Workshop IBERCHIP IWS'2001*, Montevideo, Uruguay, Marzo de 2001.