

Detección de cortocircuito en el devanado de un motor sincrónico de imanes permanentes usando corriente de secuencia negativa en dominio tiempo

Stator winding short-circuit fault detection in a permanent magnet synchronous motor (PMSM) using negative sequence current in time domain

Jabid E. Quiroga¹

RESUMEN

La técnica de corriente de secuencia negativa en dominio tiempo es aplicada a la detección del cortocircuito en una fase del devanado en el estator de un PMSM, de sus siglas en inglés (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). Inicialmente, los componentes fundamentales de las señales de corriente son obtenidos usando un filtro tipo Notch, y basado en los componentes fundamentales se obtiene la corriente secuencial negativa en dominio tiempo, la cual se constituye en el indicador de cortocircuito en el devanado del estator. Además de la detección de la falla, la corriente de secuencia negativa proporciona una medida relativa de la severidad de la falla. El método propuesto detectó oportuna (< 22 ms) y de manera confiable el cortocircuito en el devanado del estator para niveles de severidad alrededor y mayores del 6,25% de cortocircuito de la fase en cortocircuito. Adicionalmente se confirmó la relación proporcional entre el indicador de falla y el grado de severidad de esta. El uso de la corriente secuencial negativa en dominio tiempo reduce de manera significativa el costo computacional y el tiempo de detección asociado al uso de Fourier cuando la técnica es empleada en el dominio de la frecuencia. El método propuesto puede extenderse para ampliar el proceso de detección a la determinación de la fase involucrada en el corto, mejorando el proceso de detección de la falla estudiada. La validación del método es efectuada en línea usando un banco experimental de un PMSM bajo ambientes computacionales de dSpace[®] y Matlab[®]/Simulink[®].

Palabras clave: PMSM, detección de fallas, cortocircuito en el devanado, corriente de secuencia negativa.

ABSTRACT

A negative sequence analysis in time domain was applied to fault detection of permanent magnet synchronous motors (PMSM). The fundamental components of the motor terminal currents were obtained using a Notch filter, based on which the negative sequence components in time domain were then calculated; the negative sequence current constituted the stator winding short-circuit fault indicator. The negative sequence current also provided a qualitative evaluation regarding the severity of the fault. The proposed method promptly (< 22 ms) and reliably determined the stator winding short for different levels of severity in faults around and greater than 6.25% of the shorted phase. Experimental studies confirmed the proportional relationship between fault indicator and the level of severity. Using negative sequence current in time domain reduced computational cost and detection time compared to that in frequency domain. The proposed method could be extended to detect the shorted phase to improve monitoring. The method was validated online using a PMSM experimental setup with dSPACE and Matlab/Simulink environment.

Keywords: PMSM, fault detection, winding short-circuit, negative sequence current.

Recibido: agosto 13 de 2008

Aceptado: junio 3 de 2009

Introducción

PMSM son encontrados en aplicaciones de baja y alta potencia en sistemas tan variados como propulsión de barcos, robots, máquinas herramienta, etc. Los PMSMs son atractivos debido a su eficiencia y desempeño. Los PMSM exhiben varias ventajas cuando se comparan con los motores de inducción, el actuador rotativo más popular. Estas ventajas son: alta densidad de potencia, bajo peso, menores pérdidas y un rotor pequeño para la misma potencia de salida si se compara con el rotor de un motor de inducción. Estos atributos resultan de su construcción, en la cual el campo magnético es proporcionado por imanes permanentes montados

en la superficie del rotor. Así, la armadura puede suministrar una mayor densidad de campo para entrehierros similares a los encontrados en las máquinas de inducción, produciendo un mayor torque para un menor volumen y una menor corriente.

Dentro de las operaciones de mantenimiento industrial sobresale el mantenimiento basado en la condición, cuya filosofía se centra en detectar y evaluar las fallas cuando estas no son significativas (incipientes). Recientemente ha crecido el interés en el mantenimiento basado en la condición (CBM), siglas del inglés (*Condition-Based Maintenance*), como se ilustra en Liu *et al.* (2007) y Benbouzid (2000). Dentro de las ventajas operacionales atribuidas a este tipo de mantenimiento se pueden enumerar las siguientes:

¹ Ingeniero mecánico y Especialista, Docencia Universitaria, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Especialista, en Robótica, Polytechnic University, Japón. M.Sc., en Ingeniería Mecánica, Florida State University, Estados Unidos. Profesor asociado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. jabib@uis.edu.co

-Monitoreo permanente de los equipos sin detener la producción.

-Detección de la falla antes de que esta se torne severa, o que la máquina pueda programarse para mantenimiento cuando no sea requerida para producción.

Los sistemas de monitoreo para detección de falla involucran una evaluación continua del sistema, determinando, basado en la condición de este, la presencia de falla. Por lo tanto, aspectos como la eliminación de posibles fuentes de falsa alarma deben ser considerados en todo sistema de detección.

Actualmente, en la literatura técnica la mayor parte de los trabajos en detección de fallas en máquinas eléctricas se han enfocado principalmente en los motores de inducción; algunos ejemplos se encuentran en Trutt *et ál.* (2002), Filippetti *et ál.* (2000), Cruz y Cardozo (2004) y las referencias contenidas en estas publicaciones. Contrariamente, la investigación en PMSM es inadecuada considerando el incremento de las aplicaciones de este tipo de motor en sistemas de alto desempeño tales como vehículos eléctricos y sistemas de propulsión en barcos.

Recientemente se ha popularizado el uso de los componentes secuenciales para la detección del cortocircuito en el devanado del estator en motores de inducción (Trutt *et ál.*, 2002; Albizu *et ál.*, 2006), el cual puede ser considerado como una aproximación válida para la detección de esta falla en PMSM. En Albizu *et ál.* (2006) se provee un análisis comparativo para detección en línea del cortocircuito en el devanado del estator en motores de inducción. Entre las técnicas analizadas, aquellas basadas en los componentes secuenciales son consideradas las más promisorias. Según Albizu *et ál.* (2006), la corriente de secuencia negativa presenta una alta eficiencia en la detección y simplicidad en la implementación.

Dentro de los inconvenientes del uso de los componentes secuenciales en los anteriores estudios se tiene el costo computacional asociado al uso de la *Fast Fourier Transform*, (FFT) en la obtención de la magnitud de la corriente de secuencia negativa. Sin embargo, en Bollen y Yu-Hua (2006) se propone la determinación de los componentes secuenciales, entre ellos la secuencia negativa, en el dominio del tiempo. La implementación de los componentes secuenciales en dominio tiempo, en particular de la corriente secuencial negativa, facilita el desarrollo e implementación del algoritmo de detección y su costo computacional se reduce significativamente. Adicionalmente es posible estudiar el comportamiento de cada fase al compararla con el componente secuencial positivo de la corriente, ampliando el potencial de este indicador hacia un posible uso para la detección de la fase en la cual se presenta la falla.

El presente artículo se organiza inicialmente introduciendo el cortocircuito en el devanado del estator y la técnica de corriente de secuencia negativa empleada para su detección. Posteriormente, se describe el banco de pruebas empleado en la implementación de la técnica propuesta y su validación. A continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos sometiendo el banco de pruebas a sucesivas fallas de distintos grados de severidad. Por último, se mencionan las conclusiones más sobresalientes del presente trabajo.

Cortocircuito en el devanado de máquinas eléctricas

Las estadísticas muestran que las fallas en el devanado del estator constituyen la mayor proporción de fallas en máquinas eléctricas

(Ojo *et ál.*, 2002; y Allbrecht *et ál.*, 1986). El cortocircuito en el devanado del estator en motores eléctricos usualmente se inicia con una indetectable falla en el aislamiento entre dos espiras adyacentes y progresivamente la falla crece hasta producir un cortocircuito involucrando un mayor número de espiras (Awadallah y Morcos, 2004; Penman *et ál.*, 1994). El resultado es una alta corriente que puede eventualmente producir la pérdida total de una de las fases del motor, un cortocircuito entre dos fases o el cortocircuito entre una fase y tierra. Las fallas incipientes en el devanado del estator pueden tener relativamente poco efecto en el desempeño del motor pero pueden afectar la confiabilidad, disponibilidad y longevidad del motor (Nelson y Chow, 2002).

Las causas de la falla en el devanado del estator según Austin *et ál.* (1992) y Nandi *et ál.* (2005) pueden resumirse en:

1. Durante el arranque del motor, el aislamiento entre las espiras se afecta por el transiente producido por el sobrevoltaje.
2. Variaciones en el voltaje producen incremento en la temperatura del embobinado y el deterioro del aislamiento.
3. Problemas de ajuste mecánico en los terminales del devanado.
4. Cortocircuitos y descargas eléctricas
5. Ambientes agresivos tales como contaminación, humedad, químicos y altas temperaturas, que debilitan el aislamiento.

Análisis de corriente de secuencia negativa

Asimetrías de las cantidades eléctricas en los motores pueden ocasionarse por varias razones, entre ellas: el cortocircuito en el devanado del estator, asimetrías inherentes a la construcción de la máquina o los sensores, fluctuaciones en la carga, y un suministro de voltaje desbalanceado. Estas asimetrías se manifiestan con un cambio en la magnitud de la corriente de secuencia negativa. Analítica y experimentalmente se ha demostrado un incremento en la magnitud del componente negativo secuencial de la corriente cuando los motores eléctricos presentan cortocircuito en el devanado del estator (Williamson y Mirzoian, 1985). El componente negativo secuencial se obtiene a través de las señales de corriente y empleando la Ec. (1).

$$I_{a2} = \frac{1}{3} \left(I_{a,f} + \alpha^2 I_{b,f} + \alpha I_{c,f} \right) \quad (1)$$

donde $I_{a,f}$, $I_{b,f}$ y $I_{c,f}$ son las magnitudes de los componentes fundamentales de la señal trifásica de corriente y α es un operador rotacional de fase equivalente a $e^{j \frac{2\pi}{3}}$ o 120° .

Por otro lado, en Bollen y Yu-Hua (2006) se provee una interpretación de la ecuación (1) en dominio tiempo. En la ecuación presentada el operador α , que corresponde a una rotación de 120° en el plano complejo, se reemplaza por un retardo en el tiempo sobre un tercio del ciclo. Este resultado permite reinterpretar la Ec. (1) usando las señales sinusoidales a través de la Ec. (2).

$$I_{a2} = \frac{1}{3} \left\{ I_{a,f}(t) + I_{b,f} \left(t - \frac{1}{3}T \right) + I_{c,f} \left(t - \frac{2}{3}T \right) \right\} \quad (2)$$

donde T es el periodo de la señal de corriente. Esta formulación implica un menor costo computacional aunque presenta como desventaja el retardo de un ciclo en la calculación. Esta limitante no afecta significativamente el proceso de detección del cortocircuito del devanado, por cuanto este tipo de falla se caracteriza por un deterioro progresivo.

Fase experimental

Estudios experimentales en detección de fallas usualmente requieren operar un sistema físico bajo alguna condición de falla, lo cual puede ser peligroso, destructivo y costoso. La figura 1 corresponde a una foto del banco de pruebas usado en este trabajo. El sistema consiste de un *drive* de frecuencia variable de 28 kVA conectado a un *bus* que suministra las señales de potencia y el control a un PMSM de 8 polos, 11,25 kW, 640 V, 60 Hz, y conectado en Y.

En esta configuración experimental, el PMSM está diseñado específicamente para estudios en detección de fallas, especialmente cortocircuito en el devanado del estator. Para imitar la falla el devanado del estator ha sido reconstruido. Una ilustración esquemática de esta reconstrucción es mostrada en la figura 2. La figura ilustra que el devanado de una fase del motor está equipado con varias conexiones accesibles de tal forma que es posible producir un cortocircuito en el devanado del estator de diferentes niveles de severidad.

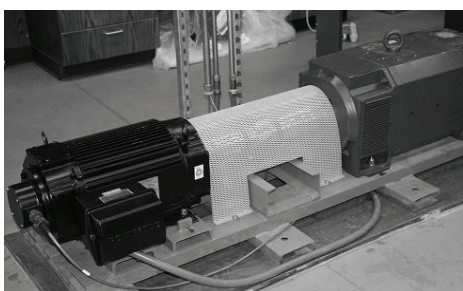


Figura 1. Banco de prueba experimental para el PMSM

Un interruptor normalmente abierto fue adicionado entre los terminales de cada par de conexiones. La falla se introduce cerrando los interruptores, causando un flujo de corriente a través del lazo del cortocircuito. Un fusible es ubicado en serie con el interruptor, el cual provee una protección pasiva al motor bajo condiciones de falla. Esta protección demostró ser necesaria debido a que la corriente que circula por el lazo donde se ubica el interruptor en pruebas realizadas elevó entre tres y cuatro veces el valor de corriente en condiciones normales de operación. Los diferentes grados de severidad de la falla pueden ser emulados cerrando diferentes pares de conexiones, lo cual puede ser observado a través del monitoreo de la corriente de falla generada en el lazo del cortocircuito. Actualmente, solo dos conexiones están ubicadas en la fase A, las cuales proporcionan fallas equivalentes a un cortocircuito del 6,25% y 12,5% del total del devanado.

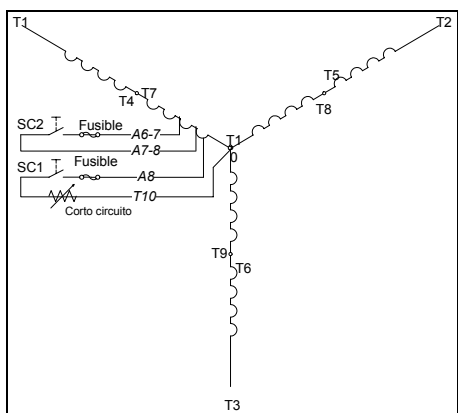


Figura 2. Configuración del cortocircuito en el devanado del estator con resistencia variable

Con el propósito de producir una condición menos severa de falla (incipiente), una resistencia variable ha sido usada como se muestra en la figura 2. El cambio en el nivel de severidad del cortocircuito en el devanado del estator puede ser emulado a través del ajuste del valor de la resistencia, el cual se refleja en la variación de la corriente en el lazo del cortocircuito, como se señala en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de corriente en el lazo comparados con el porcentaje de cortocircuito en el devanado en la fase A del PMSM

Implementación	Corriente en el lazo (A)	Porcentaje de cortocircuito en el devanado (%)
Conexiones	115	12.5
	75	6.25
Resistencia Variable	65	6.25 % + R1
	41	6.25 % + R2
	25	6.25 % + R3

El sistema de monitoreo y detección de fallas es implementado usando Matlab®/Simulink® con dSpace® como interfaces con el hardware. El algoritmo primero es desarrollado en Simulink®, luego de ser verificado en simulación el modelo es compilado usando Real Time Workshop (RTW®), para después ser ejecutado en tiempo real. El algoritmo completamente verificado es entonces aplicado al sistema y su desempeño puede ser estudiado.

En el sistema de detección de fallas propuesto, el sistema de adquisición permite muestrear en tiempo real las tres señales de corriente $I(t)$ en el PMSM. Las señales son capturadas a una frecuencia de muestreo de 625 Hz, posteriormente ser procesadas usando un filtro tipo Notch para obtener el componente fundamental de cada fase. Los componentes fundamentales de la corriente son empleados para generar el indicador de falla, que en este estudio es la corriente de secuencia negativa, la cual se calcula usando la Ec. (2). La representación esquemática del sistema propuesto se reseña en la figura 3.

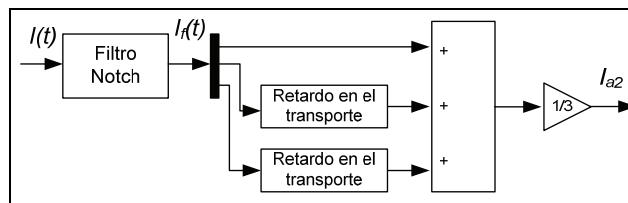


Figura 3. Representación esquemática del sistema de detección propuesta

Resultados experimentales

Una serie de pruebas son diseñadas para demostrar la detectabilidad de la falla emulada usando el sistema propuesto. Las pruebas son ejecutadas en línea, intentando cubrir una amplia variedad de condiciones de operación y niveles de severidad de la falla. Sin embargo, debido a limitaciones de espacio, solamente 3 casos típicos son presentados, los cuales corresponden a fallas con corrientes en el lazo del cortocircuito de 29A, 43A y 73A, respectivamente, que representan fallas incipientes en el motor. En la ventana de tiempo de las pruebas, las fallas son aplicadas a intervalos variables, cubriendo condiciones normales y condiciones de falla. Los resultados experimentales se muestran en las figuras (4-6).

Las figuras (4-6) ilustran el incremento en la magnitud de la corriente de secuencia negativa en presencia de falla. Adicionalmente, la magnitud de la corriente de secuencia negativa se incrementó con el aumento de la severidad de la falla, (Figura 7). A través del uso de esta metodología es posible implementar un sistema

de monitoreo para la detección de esta falla en línea a través de la definición de los umbrales apropiados, por encima de los cuales la condición de la máquina sea catalogada como de falla.

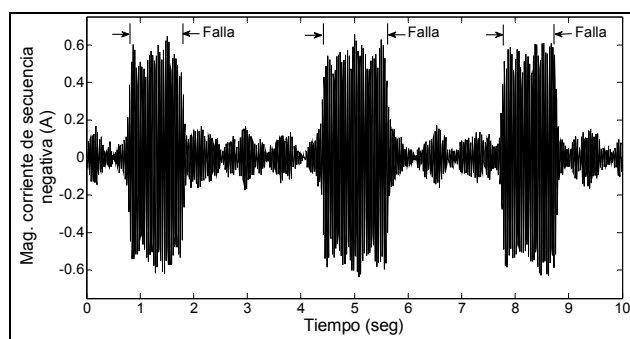


Figura 4. Magnitud de la corriente de secuencia negativa (corriente de lazo 29 A).

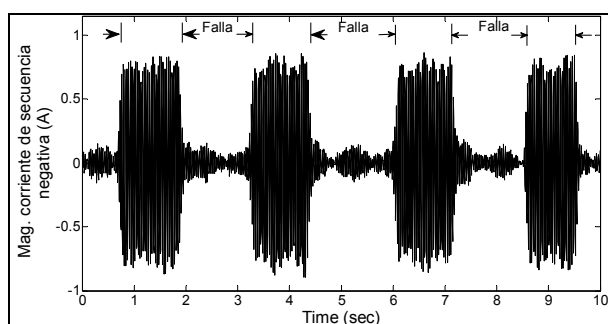


Figura 5. Magnitud de la corriente de secuencia negativa (corriente de lazo 43 A).

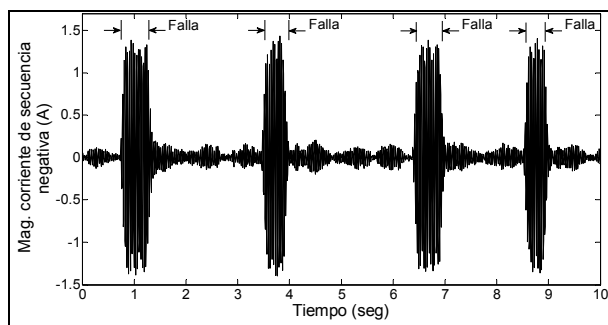


Figura 6. Magnitud de la corriente de secuencia negativa (corriente de lazo 73 A).

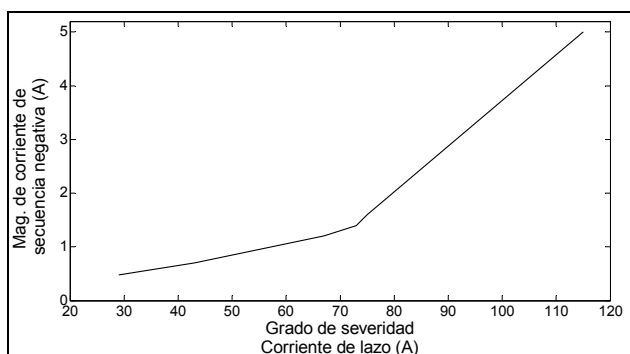


Figura 7. Magnitud de corriente de secuencia negativa para diferentes grados de severidad.

En la Figura 8 se muestra el indicador de falla calculado usando las Ecs. (1) y (2) respectivamente. En la gráfica se ilustra que el componente secuencial negativo en dominio tiempo presenta valores negativos, debido al valor negativo de la señal de corriente en la mitad de su ciclo. Adicionalmente se observa que los valores de la corriente de secuencia negativa en presencia de falla son muy cercanos usando las técnicas en dominio tiempo y dominio frecuencia. En resumen, se puede establecer que la corriente de secuencia negativa calculada en dominio tiempo es buen candidato para un sistema de monitoreo de cortocircuito en el devanado del estator en tiempo real.

Conclusiones

En este artículo se ha propuesto un método para la detección del cortocircuito en el devanado del estator en un PMSM, usando la corriente de secuencia negativa en el dominio del tiempo. El uso de esta técnica simplifica el algoritmo necesario en la implementación del sistema de monitoreo para la detección de esta falla en particular. Los resultados experimentales mostraron la eficacia del sistema propuesto al detectar la falla consistentemente y en un intervalo de tiempo lo suficientemente corto (22 ms) para no comprometer la integridad del equipo monitoreado. Adicionalmente, los ensayos efectuados en el banco de pruebas demostraron que la corriente de secuencia negativa provee una medida del nivel de severidad de la falla por cuanto su valor fue incrementado con la falla. En el futuro, este trabajo se puede extender para ampliar el proceso de detección a la determinación de la fase involucrada en el cortocircuito y ser implementado en otros equipos eléctricos, como motores de inducción, transformadores y generadores. En términos metodológicos, el presente estudio demostró que el uso de la corriente de secuencia negativa en dominio tiempo es una técnica confiable y fácil de implementar debido a su bajo costo computacional.

Bibliografía

- Allbuzo, I., Zamora, A. J., Mazon., Tapia, A., Techniques for Online Diagnosis of Stator Shorted Turns in Induction Motors., *Electric Power Components and Systems* Vol. 34, No.1, Enero, 2006, pp. 97-114.
- Allbrecht, P. F., Appiaris, J. C., McCoy, R., Assessment of the reliability of motors in utility applications – updated., *IEEE Transactions Energy Conversion*, Vol. 1, No.1, 1986, pp. 39-46.
- Austin, H. Bonnett, G. C., Soukup. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel cage induction motors., *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 4, Julio, 1992, pp. 921-937.
- Awadallah, M. A., Morcos, M. M., ANFIS-based diagnosis and location of stator interturn faults in PM brushless DC motors., *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No.4, Dic., 2004, pp. 795-796.
- Benbouzid, M. E. H., A review of induction motors signatures analysis as a medium for fault detection., *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 47, No. 5, Oct., 2000, pp. 984 – 993.
- Bollen, M., Yu-Hua, I., *Signal Processing of Power Quality Disturbances.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. John Wiley & Sons, Sweden, 2006.
- Cruz, S. M. A., Cardoso, A. J. M., Diagnosis of stator inter-turn short circuits in DTC induction motor drives., *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 5, Sep., 2004, pp. 1349-1360.

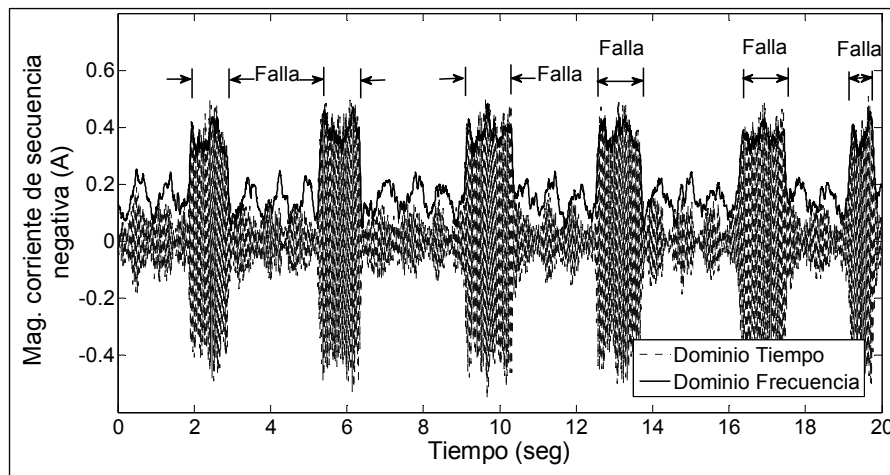


Figura 8. Corriente de secuencia negativa calculadas en dominio tiempo y dominio frecuencia

Filippetti, G., Franceschini, C., Tassoni, P. V., Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques., IEEE Transactions Industrial Electronics Vol. 47, No. 5, Oct., 2000, pp. 994–1004.

Liu, L., Logan, K.P., Cartes, D. A., Srivastava S. K., Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics: Software Agent Solutions., IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 4, Julio, 2007, pp. 1613-1622.

Nandi, S., Toliyat, H.A., Xiaodong L., Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors- a review., IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No.4, Dic., 2005, pp. 719-729.

Nelson, L., Chow, M. Y., Characterization of coil faults in an axial flux variable reluctance PM motor., IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, Sept., 2002, pp. 340–348.

Ojo, O., Osaloni O., Kshirsagar, P., Models for the control and simulation of synchronous type machine drives under various fault conditions., Conference Record Ind. Applicat. Conference, 37th IAS Annual Meeting 3, Vol. 3, Dic., 2002, pp.1533–1540.

Penman, J., H. Sedding, G. B., Lloyd, A., Fink, W. T., Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors., IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 9, No.4, Ene., 1994, pp. 652–658.

Trutt, F. C., Sottile, J., Kohler, J. L., Online condition monitoring of induction motors., IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 38, No. 6, Nov/Dic., 2002, pp. 1627 – 1632.

Williamson, S., Mirzoian, K., Analysis of cage induction motors with stator windings faults., IEEE Transactions Power App. Systems, Vol. 104, No. 7, Julio, 1985, pp.1832-1842.