

Contributions to the online fault diagnosis of interturn short circuit in three-phase induction motor by of means negative sequence components

Javier Ernesto Micolta ^a, José Luis Oslinger ^a & Edinson Franco ^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. micolta.javier@gmail.com, jose.oslinger@correounivalle.edu.co, edinson.franco@correounivalle.edu.co

Received: May 03th, 2015. Received in revised form: October 20th, 2015. Accepted: May 12th, 2016.

Abstract

In this article the current and the negative sequence impedance as fault indicators inter-turn short-circuit of an induction motor squirrel cage is used. The effect of voltage unbalances and different load levels in these diagnostic parameters is also discussed, which are calculated from data obtained from simulations using the Finite Element Method (FEM) and laboratory experiments.

Keywords: Induction motor fault diagnosis, negative sequence current, negative sequence impedance, finite element method, voltage unbalance, CVUF factor.

Aportes al diagnóstico en línea de fallas de cortocircuito entre espiras de un motor de inducción mediante parámetros eléctricos de secuencia inversa

Resumen

En este artículo se emplea la corriente y la impedancia de secuencia negativa como indicadores de fallas de cortocircuito entre espiras de un motor de inducción tipo jaula de ardilla. También se analiza el efecto que tienen los desequilibrios de tensión y los diferentes niveles de carga en dichos parámetros de diagnóstico, los cuales se calcularon a partir de datos obtenidos de simulaciones por medio del Método de Elementos Finitos (MEF) y experimentos de laboratorio.

Palabras clave: Motor de inducción, diagnóstico de fallas, Corriente de secuencia negativa, impedancia de secuencia negativa, Método de elementos finitos, desequilibrio de tensión, factor CVUF.

1. Introducción

Las máquinas de inducción tipo jaula de ardilla constituyen más del 90 por ciento del total de las máquinas eléctricas rotativas [1], esto se debe a su bajo costo, robustez y bajo mantenimiento comparado a otro tipo de máquinas eléctricas rotativas, aun así, éstas no se encuentran exentas de fallas, las cuales causan paradas en los procesos de producción y por lo tanto pérdidas económicas.

Las fallas en el motor de inducción están distribuidas principalmente en el rotor, los rodamientos y el estator, donde éstas últimas constituyen unas de las causas de daño más común [2-9]. De ahí la importancia de emplear métodos de diagnóstico para este tipo de fallas.

Entre los diferentes métodos de diagnósticos de fallas estáticas [10], Los métodos de la corriente y la impedancia de secuencia negativa tienen la ventaja de ser técnicas no invasivas y de bajo requerimiento computacional [11], y

How to cite: Micolta, J.E.; Oslinger, J.L. & Franco, E. Aportes al diagnóstico en línea de fallas de cortocircuito entre espiras de un motor de inducción mediante parámetros eléctricos de secuencia inversa DYNA 83 (198) pp. 213-218, 2016.

aunque son confiables, se pueden presentar errores en el diagnóstico debido al efecto de los desequilibrios de tensión en los parámetros de secuencia inversa.

Diferentes autores han estudiado el efecto que tiene el factor desequilibrio de tensión en los parámetros de secuencia negativa, donde como resultado muestran las variaciones de dichos parámetros en función del factor VUF (factor de desequilibrio de tensión) [11-18] pero como muestran algunos estudios, existe una cantidad infinita de desequilibrios de tensión con igual factor. Por lo anterior, útilmente la comunidad científica está empleando un nuevo factor denominado CVUF (factor complejo de desequilibrio de tensión), el cual caracteriza el desequilibrio de tensión por magnitud y ángulo [19-24].

En este artículo se analizará el efecto de las variaciones de la magnitud y ángulo del factor CVUF en el módulo de la corriente y la impedancia de secuencia negativa del motor de inducción cuando éste se encuentra bajo fallas de cortocircuito entre espiras.

2. Cálculo de los parámetros de secuencia negativa

Las componentes de secuencia negativa se determinan por medio de la transformación de Fortescue, donde las tensiones y las corrientes de secuencia se obtienen de las tensiones y corrientes de fase por medio de las ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde $V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c$ corresponden a los valores de fase de tensión y corriente expresados en forma fasorial y $V_0, V_1, V_2, I_0, I_1, I_2$ son las componentes de secuencia, donde I_2 es empleada como indicador de falla [25].

Debido a que I_2 aparece cuando el motor de inducción presenta fallas y también cuando es alimentado con fuentes desequilibradas, es necesario dividir la corriente de secuencia negativa calculada en dos componentes:

$$I_2 = I_2^f + I_2^V \quad (3)$$

Donde I_2^f e I_2^V corresponde a la componente de la corriente de secuencia negativa generada por la condición de falla y a la componente de la corriente de secuencia negativa asociada al desequilibrio de tensión de la fuente de alimentación respectivamente. Para calcular I_2^V , se emplea el modelo matemático del motor de inducción sin falla alimentado con fuentes desequilibradas [13,17] o la impedancia de secuencia negativa, Z_2^s , del motor real sin falla, como lo muestra la siguiente ecuación [16].

$$I_2^V = \frac{V_2}{Z_2^s} \quad (4)$$

Para el cálculo de la impedancia de secuencia negativa, usada como parámetro de diagnóstico se emplea la siguiente expresión [26]:

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (5)$$

3. Cálculo del desequilibrio de tensión

Para el cálculo del desequilibrio de tensión, se empleará el factor CVUF (factor complejo de desequilibrio de tensión) propuesto por Wang [19,20] el cual además del módulo, incluye la diferencia angular entre la tensión de secuencia negativa y positiva, como se muestra en la siguiente expresión:

$$CVUF = \frac{V_2 \angle \theta_2}{V_1 \angle \theta_1} \quad (6)$$

$$CVUF = VUF \angle \theta_V \quad (7)$$

Donde

V_1 : tensión de secuencia positiva

V_2 : tensión de secuencia negativa

θ_2 : ángulo de la tensión de secuencia negativa

θ_1 : ángulo de la tensión de secuencia positiva

θ_V : ángulo del CVUF, que establece que tan separados están los fasores de secuencia positiva y negativa.

De lo anterior se puede decir que el factor VUF por sí sólo no da información completa debido a que existe una cantidad infinita de desequilibrios de tensión con igual modulo.

La Fig. 1 muestra las tensiones de fase en función del ángulo θ_V para $V_1 = 127$ V y $VUF = 3\%$. En ella se puede observar que hay un número infinito de distribución voltajes con igual módulo de desequilibrio de tensión, por lo tanto, para hacer una mejor caracterización es necesario considerar el ángulo que hay entre la tensión de secuencia negativa y la tensión de secuencia positiva.

4. Resultados de simulación y laboratorio

A continuación se muestran los resultados obtenidos empleando el método de corriente de secuencia negativa y el método de impedancia de secuencia negativa como herramientas para detectar fallas de cortocircuito entre espiras

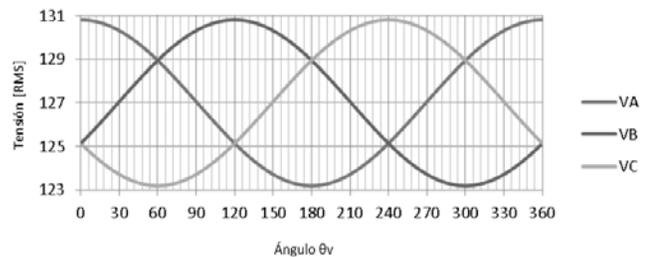


Figura 1. Distribución de tensiones en función de θ_V para un $VUF = 3\%$. Fuente: Los autores.

de un motor de inducción tipo jaula de ardilla. En los resultados se presentan datos de laboratorio y de simulación, donde estos últimos se obtuvieron empleando el método de elementos finitos (MEF) por medio del software Flux2D®.

En la Tabla 1, se muestran los datos del motor de inducción usado en el estudio, La Fig. 2, muestra el enmallado del motor de inducción en elementos finitos y la Fig. 3, muestra el motor real acoplado al generador de CC con el cual se aplicaron los diferentes niveles de carga.

Tabla 1.

Características del motor de inducción.

Marca	: Westinghouse
Tipo	: Asíncrono tipo jaula de ardilla NEMA B
Potencia	: 3 HP
Tensión	: 220/440 V
Corriente	: 4,2/8,4 A
Fases	: 3
Velocidad	: 1740 RPM
Frecuencia	: 60 Hz

Fuente: Los autores.

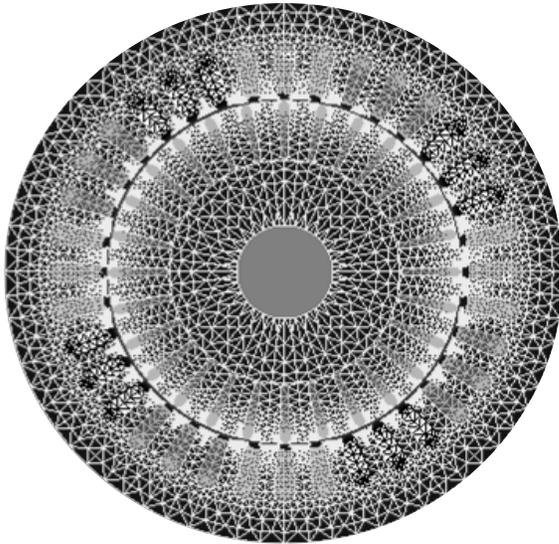


Figura 2. Modelo del motor en elementos finitos.

Fuente: Los autores.

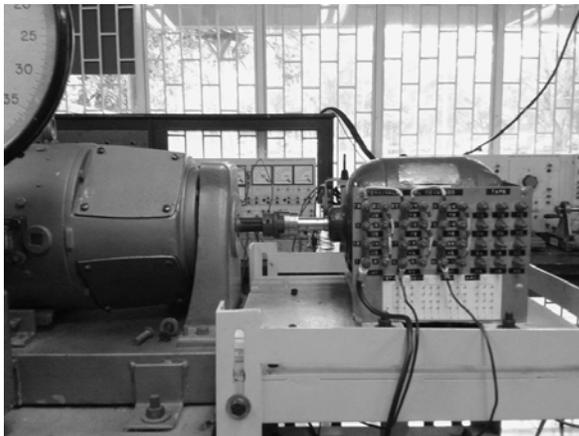


Figura 3. Generador CC acoplado al motor de inducción.

Fuente: Los autores.

El motor bajo estudio fue acondicionado para introducir fallas de cortocircuito entre espiras, para lo cual se rebobinó y se derivaron terminales hacia el exterior de la máquina conformando una bornera.

Para registrar los datos de tensión y corriente, se empleó el equipo medidor de calidad de potencia Power Xplorer PX5. Con el fin de proteger el devanado de la máquina, se empleó una resistencia de falla de 0.14Ω para realizar el cortocircuito entre espiras. La Fig. 4, muestra el banco de pruebas empleado en el laboratorio.

La Fig. 5, muestra los resultados experimentales y de simulación de la corriente y la impedancia de secuencia negativa en función del número de espiras en cortocircuito, de ella se puede observar que el módulo de I_2 aumenta conforme el número de espiras en cortocircuito se hace mayor, mientras ocurre lo contrario con Z_2 . Lo anterior se debe a que el desequilibrio en el devanado del motor de inducción se hace mayor a medida que el grado de falla aumenta.

Para observar el efecto de las variaciones del ángulo θ_V en los parámetros de secuencia negativa, se realizaron simulaciones en elementos finitos del motor bajo diferentes espiras en cortocircuito y alimentado con un desequilibrio de tensión $VUF = 3\%$, $V_1 = 127 \text{ V}$. Los resultados se muestran en la Fig. 6, en ellos se puede observar que para un mismo valor de VUF se pueden tener diferentes valores en los módulos de los parámetros de secuencia negativa según el número de espiras en cortocircuito y el ángulo del factor CVUF.

La Tabla 2, muestra las tensiones aplicadas al motor de inducción real y al modelo en MEF con 10 espiras en cortocircuito en la fase C bajo diferentes niveles de carga. Para obtener los diferentes valores del ángulo θ_V , la magnitud de tensión de fase más bajo debido al desequilibrio de tensión se rotó en cada una de las fases de motor, de esta manera la diferencia entre el voltaje de secuencia negativa y positiva

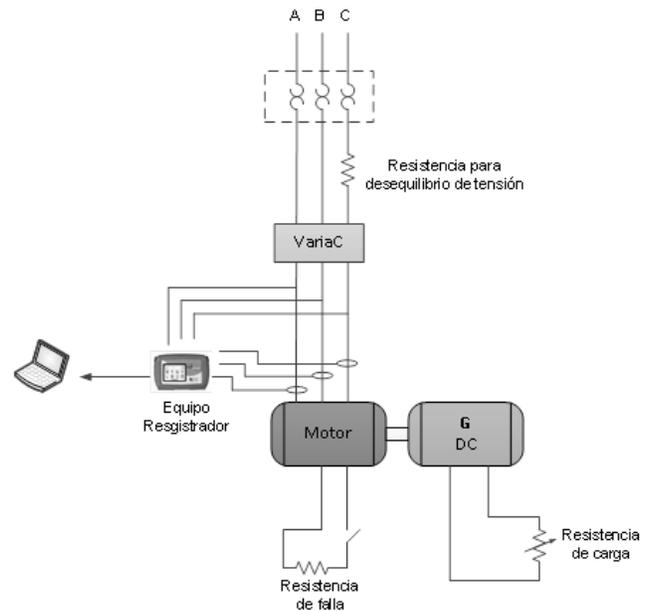


Figura 4. Esquema general del banco de pruebas del laboratorio.

Fuente: Los autores.

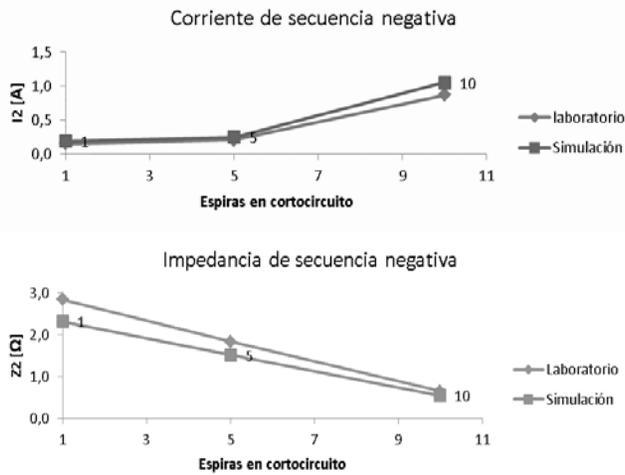


Figura 5. Corriente e impedancia de secuencia negativa en función del número de espiras en cortocircuito. Fuente: Los autores.

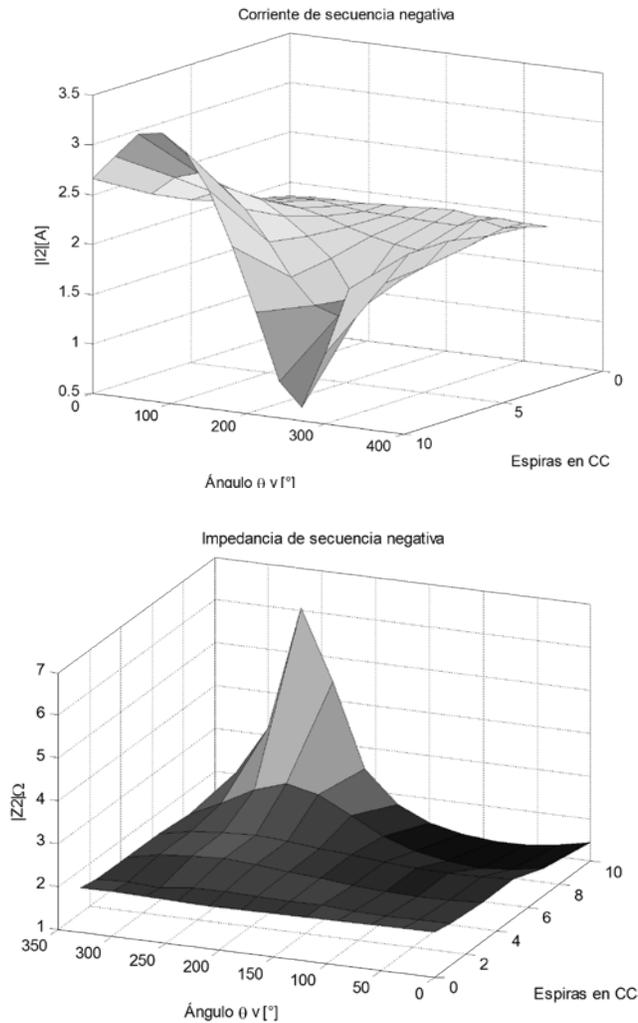


Figura 6. Corriente e impedancia de secuencia negativa en función del número de espiras en cortocircuito y del ángulo del factor CVUF. Fuente: Los autores.

Tabla 1. Características tensión aplicada al motor de inducción.

Deslizamiento	Kv	Ángulo θ_v	V1	V2
VC menor que VA y VB				
0.010	3.97	262.18	122.68	4.87
0.015	4.24	269.72	122.78	5.20
0.019	4.81	272.37	121.58	5.84
VA menor que VB y VC				
0.005	2.85	143.24	123.49	3.52
0.010	3.36	153.39	122.52	4.11
0.015	3.93	160.51	122.02	4.80
0.019	4.07	160.42	121.59	5.07
VB menor que VA y VC				
0.005	2.64	5.82	123.92	3.27
0.010	2.92	19.25	122.66	3.58
0.015	3.51	30.00	121.68	4.27
0.019	3.77	35.13	121.85	4.59

Fuente: Los autores.

era la siguiente: para magnitudes de voltajes en la fase A menores a las demás fases se obtuvieron ángulos entre los 143° y 160° , para magnitudes voltajes en la fase B menores a las demás fases se obtuvieron valores de ángulos entre los 5° y 35° , y para magnitudes voltajes en la fase C menores a las demás fases se obtuvieron ángulos entre los 262° y 272° .

Los resultados de la corriente y la impedancia de secuencia negativa bajo las condiciones mencionadas anteriormente, se encuentran graficados en las Figs. 7 y 8, donde se puede apreciar el efecto del ángulo θ_v en los parámetros de secuencia inversa empleados para el diagnóstico de fallas. Estos cambios en I_2 y Z_2 se deben principalmente a que las variaciones de θ_v pueden producir un efecto de compensación en el motor en falla, el cual enmascara los cambios en los parámetros de secuencia negativa debido al cortocircuito y por lo tanto, producir un error en el diagnóstico de la falla en el motor.

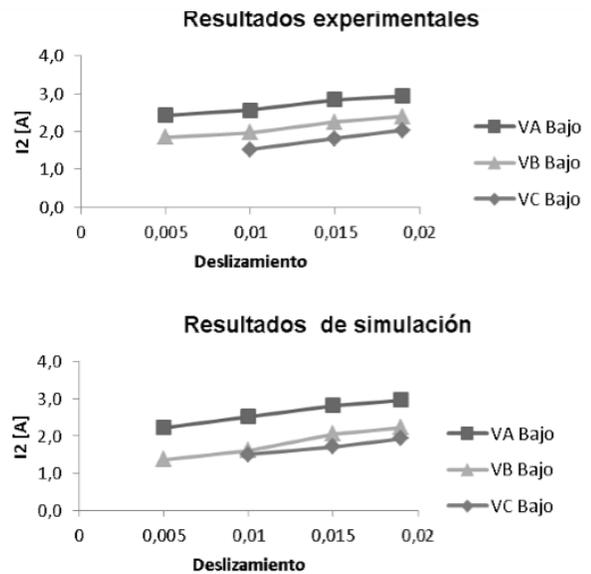


Figura 7. Corriente de secuencia negativa bajo diferentes desequilibrios de tensión. Fuente: Los autores.

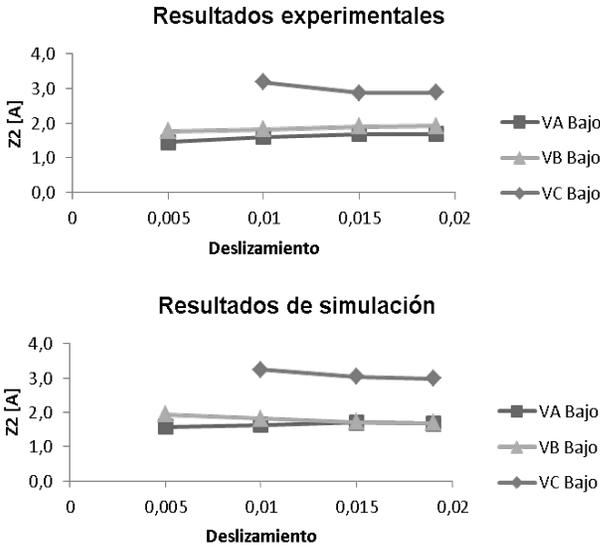


Figura 8. Impedancia de secuencia negativa bajo diferentes desequilibrios de tensión.
Fuente: Los autores.

La Fig. 9, muestra los resultados experimentales y de simulación de la componente de corriente de secuencia negativa debida sólo a fallas en el estator, es decir I_2^f , esta corriente es calculada por medio de las ecuaciones 3 y 4. Z_2^S es obtenida por simulación y de manera experimental, sus valores son a $2.11 \angle 59.2^\circ$ para el motor real y $2.09 \angle 51.9^\circ$ para el motor simulado.

La expresión empleada en el análisis es la siguiente.

$$I_2^f = I_2 - \frac{V_2}{Z_2^S} \quad (8)$$

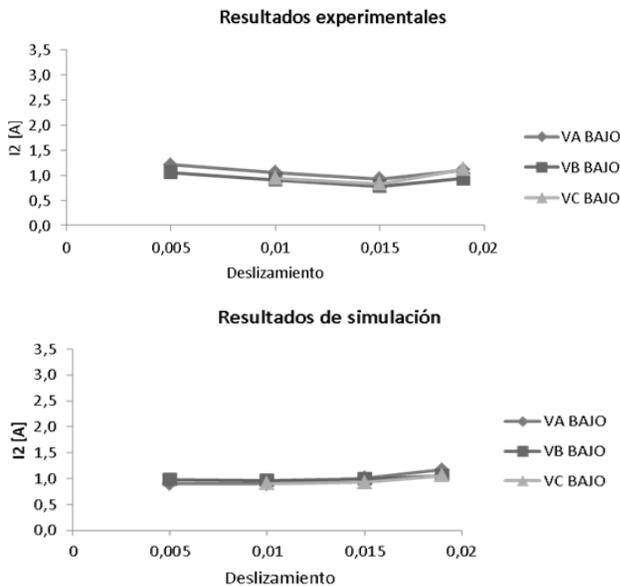


Figura 9. Corriente I_2^f donde I_2^V es calculada por medio de Z_2^S .
Fuente: Los autores.

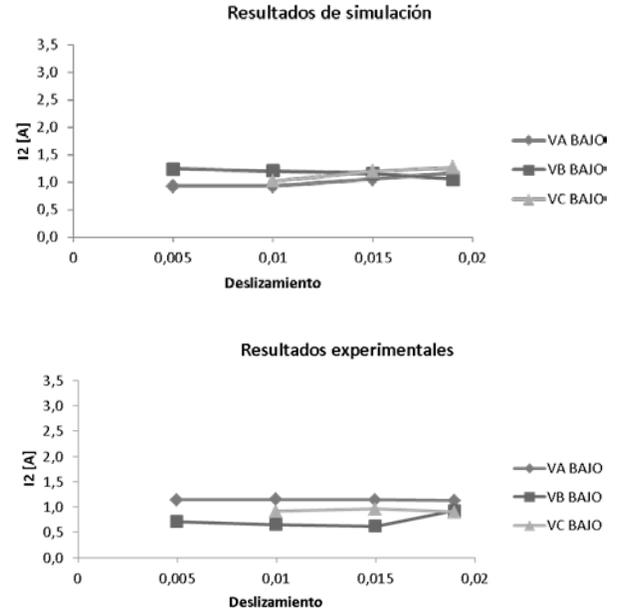


Figura 10. Corriente I_2^f donde I_2^V es calculada por medio del modelo matemático del motor sin falla.
Fuente: Los autores.

La Fig. 10, muestra la componente de la corriente de secuencia negativa debido sólo a fallas en el estator, I_2^f , obtenida por medio de la ecuación 3. A diferencia del método anterior, la componente de la corriente de secuencia negativa debido al desequilibrio de tensión, I_2^V , es obtenida del modelo en elementos finitos (MEF) del motor sin fallas.

Lo anterior indica que I_2^V , es obtenida a partir del modelo matemático del motor (MEF) en estado sano y alimentado con fuentes desequilibradas.

En este caso la expresión empleada en el análisis es la siguiente:

$$I_2^f = I_2 - I_2^V \quad (9)$$

5. Conclusión

Los resultados experimentales y de simulación muestran que cuando el motor de inducción se encuentra bajo falla, la impedancia y la corriente de secuencia negativa calculada a partir de las corrientes y las tensiones de fase, no solo son afectadas por las variaciones en magnitud del desequilibrio de tensión (VUF), sino también por el ángulo (θ_v) del factor CVUF, lo cual puede producir errores en el diagnóstico de falla. Por lo anterior, se emplearon dos métodos de desagregación de la corriente de secuencia negativa con el fin de obtener la componente debida solo a falla. Los resultados muestran que ésta última componente es menos sensible ante el desequilibrio de tensión.

Referencias

[1] Diaz, D., Amaya, M.C. and Paz, A., Inter-turn short-circuit analysis in an induction machine by finite elements method and field tests,

- Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on, pp.1757-1763, 2012.
- [2] Pinjia, Z., Yi, D., Habetler, T.G. and Bin, L., A Survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors, industry applications, IEEE Transactions on, 47(1), pp. 34-46, 2011.
- [3] Paz, A., Reliability on operation of three-phase squirrel-cage induction motors on industry application Tesis de Dr., s.a.
- [4] Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I, Industry Applications, IEEE Transactions on, IA-21(4), pp. 853-864, 1985.
- [5] Albrecht, P.F., Appiarius, J.C., McCoy, R.M., Owen, E.L. and Sharma, D.K., Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated, energy conversion, IEEE Transactions on, EC-1(1), pp. 39-46, 1986.
- [6] Albrecht, P.F., Appiarius, J.C., Cornell, E.P., Houghtaling, D.W., McCoy, R.M., Owen, E.L. and Sharma, D.K., Assessment of the reliability of motors in utility applications, Energy Conversion, IEEE Transactions on, EC-2(3), pp. 396-406, 1987.
- [7] Thorsen, O.V. and Dalva, M., A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries, Industry Applications, IEEE Transactions on, 31(5), pp. 1186-1196, 1995.
- [8] Thorsen, O.V. and Dalva, M., Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry, Electrical Machines and Drives, 1997 Eighth International Conference on (Conf. Publ. No. 444), pp.109-113, 1997.
- [9] Thorsen, O.V. and Dalva, M., Failure identification and analysis for high voltage induction motors in petrochemical industry, Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting. The IEEE, 1, pp. 291-298 1998.
- [10] Verucchi, C.J. and Acosta, G.G., Fault detection and diagnosis techniques in induction electrical machines, Latin America Transactions, IEEE, 5(1), pp. 41-49, 2007.
- [11] Bakhri, S., Ertugrul, N. and Soong, W.L., Practical issues on negative sequence current monitoring for condition monitoring in induction motors, Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2012 22nd Australasian, pp.1-6, 2012.
- [12] Bakhri, S., Ertugrul, N. and Soong, W.L., Negative sequence current compensation for stator shorted turn detection in induction motors, IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1921-1926, 2012.
- [13] Bakhri, S., Ertugrul, N., Soong, W.L. and Arkan, M., Investigation of negative sequence components for stator shorted turn detection in induction motors, Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian, pp. 1-6, 2010.
- [14] Kohler, J.L., Sottile, J. and Trutt, F.C., Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors, Industry Applications, IEEE Transactions on, 28(5), pp. 1109-1117, 1992.
- [15] Kliman, G.B., Premerlani, W.J., Koegl, R.A. and Hoeweler, D., A new approach to on-line turn fault detection in AC motors, Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, 1, pp. 687-693, 1996.
- [16] Arkan, M., Perovic, D.K. and Unsworth, P., Online stator fault diagnosis in induction motors, Electric Power Applications, IEE Proceedings, 148(6), pp. 537-547, 2001.
- [17] Bouzid, M. and Champenois, G., Accurate stator fault detection insensitive to the unbalanced voltage in induction motor, Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on, pp. 1545-1551, 2012.
- [18] Paz, A., Amaya, M., Palacio, J. y Díaz D., Consideraciones acerca del uso de la corriente de secuencia negativa como herramienta de diagnóstico de fallas estatísticas en motores de inducción de jaula de ardilla, 16va Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Palacio de convenciones de la Habana, Cuba, 2012.
- [19] Wang, Y.-J., An analytical study on steady-state performance of an induction motor connected to unbalanced three-phase voltage, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, 1, pp. 159-164, 2000.
- [20] Wang, Y.-J., Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor, Energy Conversion, IEEE Transactions on, 16(3), pp. 270-275, 2001.
- [21] Faiz, J. and Ebrahimpour, H., Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages, Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, 1, pp. 485-491, 2005.
- [22] Gnacinski, P., Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over- or undervoltages, Energy Conversion, IEEE Transactions on, 23(2), pp. 363-371, 2008.
- [23] Quispe, E.C., Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación el motor de inducción trifásico. Énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal, Tesis PhD, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- [24] Filho, A.L.F., Garcia, D.C., Nascimento, F.A.O. and Cormane, J.A.A., Study of voltage unbalance conditions based on the behavior of the complex voltage unbalance factor (CVUF), Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES, pp. 184-189, 2010.
- [25] Williamson, S. and Mirzoian, K., Analysis of cage induction motors with stator winding faults, power apparatus and systems, IEEE Transactions on, PAS-104(7), pp. 1838-1842, 1985.
- [26] Kohler, J.L., Sottile, J. and Trutt, F.C., Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors, Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, 2, pp. 1580-1586, 1989.

J.E. Micolta, es Ing. Electricista de la Universidad del Valle, Colombia, en 2009 y MSc. en Ingeniería Eléctrica de la misma Universidad, en 2015.
ORCID: 0000-0002-0766-3507

J.L. Oslinger, es Ing. Electricista de la Universidad del Valle, Colombia, 1996. Dr. en Ingeniería de la Universidad del Valle en 2007. Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (EIEE) de la Universidad del Valle desde 1996. Su área de trabajo es la teoría, diseño, diagnóstico, mantenimiento, modelamiento de máquinas eléctricas rotativas y el diagnóstico de aislamiento de grandes máquinas eléctricas rotativas. Es miembro del grupo de investigación en Conversión de Energía CONVERGIA de la Universidad del Valle.
ORCID: 0000-0001-9004-3562

E. Franco, es Ing. Electricista de la Universidad del Valle, 1991. MSc. en Automática en 1994. Dr. en Ingeniería de la Universidad del Valle en 2007. Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (EIEE) de la Universidad del Valle desde 1993. Su área de trabajo en investigación son las tecnologías en sistemas de control con aplicaciones a control de sistemas electromecánicos y de procesos. Es miembro del grupo de investigación en Control Industrial GICI de la Universidad del Valle.
ORCID: 0000-0003-4045-3808