

Alternativa de aplicación del método del momento en el entrehierro para la evaluación de la eficiencia del motor de inducción

Gabriela Romero Reyes

grreyes@ismm.edu.cu

Ignacio Romero Rueda

iromero@ismm.edu.cu

Universidad de Moa

Resumen: Se determinó la eficiencia del motor de inducción por el método del momento en el entrehierro con especificación de armónicos y desbalance en la fuente eléctrica, lo cual constituye una corrección del método que aparece en la literatura. Se sustituye un motor de inducción por un conjunto de motores de diferentes frecuencias y secuencias, conectados a un eje común; se descomponen las ondas de tensiones y corrientes en armónicos y en sistemas trifásicos de secuencias, que posibilitan utilizar las ecuaciones analíticas para calcular el flujo en la expresión del método del momento en el entrehierro y prescindir de la integración numérica, necesaria en el método clásico. Resultó un error promedio de 0,47 % en la eficiencia estimada por la vía propuesta, con respecto al valor obtenido experimentalmente, contra 0,85 % resultado de aplicar el método en su forma clásica; también se demostró mayor precisión en los resultados frente a diferentes niveles de desbalance y de armónicos en el suministro eléctrico, al mantenerse constante la potencia de salida para los valores de contaminación experimentados. La variante del método del momento en el entrehierro con las correcciones por descomposición armónica de Fourier y transformaciones de Fortescue para el desbalance es efectiva en la determinación de la eficiencia de motores de inducción con un suministro eléctrico contaminado por armónicos y desbalance.

Palabras claves: Armónico y desbalance; método del momento en el entrehierro; eficiencia del motor de inducción.

Alternative application of the method of the moment in the air gap for the evaluation of the efficiency of the induction motor

Abstract: The efficiency of the induction motor was determined by the method of the moment in the air gap with specification of harmonics and unbalance in the electrical source, which constitutes a correction of the method that appears in the literature. An induction motor is replaced by a set of motors of different frequencies and sequences, connected to a common axis; the voltage and current waves are broken down into harmonics and in triphasic sequence systems, which make it possible to use the analytical equations to calculate the flux in the expression of the air-gap moment method and dispense with the numerical integration, necessary in the classical method. It resulted in an average error of 0.47 % in the estimated efficiency by the proposed route, with respect to the value obtained experimentally, against 0.85 % resulting from applying the method in its classical form; It was also demonstrated greater precision in the results against different levels of imbalance and harmonics in the electrical supply, by keeping the output power constant for the pollution values experienced. The variant of the moment in the air gap method with Fourier harmonic decay corrections and Fortescue transformations for unbalance is effective in determining the efficiency of induction motors with a power supply contaminated by harmonics and unbalance.

Keywords: Harmonic and imbalance; method of the moment in the air gap; induction motor efficiency.

Introducción

Idealmente la fuente de potencia para un motor de inducción debe ser balanceada y sin armónicos. La realidad es, que en más del 95 % la misma está contaminada con armónicos de órdenes superiores y desbalance de tensión, aunque en ocasiones por debajo de lo establecido por las normas (Eguiluz, Lavandero *et al.*, 1999; Romero *et al.*, 2012).

La norma IEEE-519 (IEEE Std. 519 1993) ofrece las recomendaciones prácticas y los requerimientos para el control de los armónicos en el sistema eléctrico de potencia. La NEMA (2004) especifica los límites de variación para la tensión y frecuencia nominal; esto es $\pm 10\%$ de la tensión nominal a frecuencia nominal y $\pm 5\%$ de la frecuencia nominal con tensión nominal. El desbalance de tensión en los terminales del motor está limitado al 5 %. La IEEE-112 (2004), estándar para el ensayo de motores de inducción especifica un límite gráfico. Los métodos que establecen las normas para la determinación de la eficiencia en motores de inducción no son aplicables en condiciones de campo (Ghai, 1999; Cao, 2009; César da Silva *et al.*, 2020). En aras de dar solución a esta problemática se han desarrollado diferentes métodos aplicables bajo condiciones industriales y con un nivel de precisión generalmente proporcional al grado de invasividad requerido (Vilaragut, *et al.*, 2004; Bin, Habetler & Harley, 2006; Gharakhani, 2012). Los métodos de aplicación directa en el campo, presentan limitaciones cuando se está en presencia de armónicos y desbalance en la fuente de alimentación, ya que no contemplan las especificaciones de los métodos específicos de análisis de ambos aspectos.

En la era de la información digital, la adquisición de datos y el procesamiento es una técnica que ha devenido accesible. El análisis por Fortescue y la descomposición de Fourier, especifican el trabajo con el desbalance y los armónicos en la fuente del suministro eléctrico, respectivamente. La presente investigación combina la utilización de ambas técnicas con la aplicación del método del momento en el entrehierro para obtener la eficiencia del motor de inducción.

El método del momento en el entrehierro (MME) requiere de los valores instantáneos de dos tensiones de líneas y dos corrientes de fase para determinar el momento y la potencia de salida en el eje; a diferencia de otros métodos considera las condiciones de

calidad del suministro eléctrico (Kueck *et al.*, 1996; Figura, Szychta & Szychta, 2011; Zhang *et al.*, 2011).

Gharakhani (2012), sintetiza y amplía con gran precisión las particularidades de los diferentes métodos de evaluación de la eficiencia en el campo, incluyendo aquellos que utilizan algoritmos evolutivos, bajo condiciones de tensión diferente a la nominal, desbalance y armónicos, aunque nunca se consideran al unísono.

Bin (2006) realiza tres modificaciones al método del momento en el entrehierro, para eliminar las desventajas del mismo y convertirlo en una vía poco invasiva y de amplias posibilidades industriales en la determinación de la eficiencia. Esta investigación considera que los desbalances de tensiones y corrientes son despreciables.

De Armas, Gómez & Viego (2011) desarrollan un método para graficar la potencia en el eje del motor, evaluar la eficiencia y otros parámetros operacionales y, en adición, verificar si la selección ha sido la correcta para el mecanismo que acciona. El procedimiento se fundamenta en el método del momento en el entrehierro con un algoritmo incorporado, el cual facilita la información necesaria, y evita el uso de costosos y complejos sensores en condiciones de campo.

Se aprecia en las últimas investigaciones referidas, la inclusión de las condiciones de armónicos, desviaciones y desbalance de tensión para determinar la eficiencia del motor de inducción, esto habla por sí solo de la importancia que se le atribuye a tales efectos, no solo porque constituyen aspectos que afectan el tiempo de vida útil del motor, sino también porque constituyen pérdidas que disminuyen la eficiencia y, sin embargo los métodos en sus formas originales no lo contemplan.

Materiales y métodos

Varios experimentos a lo largo del tiempo han verificado el método del momento en el entrehierro (MME) y han concluido que el mismo es efectivo para estimar la eficiencia (Hsu & Scoggins 1995; Kueck *et al.*, 1996; Al-Badri, Pillay & Angers, 2017). Para medir las pérdidas en el acero y las pérdidas por fricción y batimiento del aire, es necesario un ensayo en vacío, lo cual constituye una de las dificultades de este método.

Para minimizar estas dificultades y convertir el MME en una técnica no invasiva, la ecuación se desarrolla con transformaciones en la concepción original, de donde surge

el método del momento en el entrehierro modificado, que mantiene una precisión satisfactoria y reduce grandemente el nivel de intrusión (Bin, Habetler & Harley, 2006).

Para un sistema de referencia estacionario por las magnitudes trifásicas se obtiene la ecuación ampliamente utilizada en la literatura (Hsu & Scoggins, 1995; Hsu & Sorenson, 1996; Bin, Habetler & Harley, 2006; De Armas, Gómez & Viego, 2011).

$$M_{en} = \frac{\sqrt{3}p}{6} \left\{ \begin{aligned} & (2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s(i_a - i_b)] dt \\ & + (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s(2i_a + i_b)] dt \end{aligned} \right\}, \quad [\text{Nm}]$$

Donde:

p : número de polos del motor

i_a, i_b : corrientes instantáneas de las fases A y B en A

R_s : resistencia del devanado del estator en Ω ; y v_{ab}, v_{ca} tensión de líneas AB y CA en V.

La eficiencia η está dada por **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**

Donde:

P_{eje} : potencia de salida en el eje en W

M_{eje} : momento en el eje en Nm

ω_r : velocidad del rotor en rad/s

p_{fwn} : pérdidas mecánicas y del núcleo en W

p_{adr} : pérdidas adicionales del rotor con la carga en W

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{ent}} = \frac{M_{eje} \omega_r}{P_{ent}} = \frac{M_{en} \omega_r - p_{fwn} - p_{adr}}{P_{ent}}, \quad [\text{pu}]$$

Como se observa el método del momento en el entrehierro, aunque considera la calidad de la energía en la evaluación de la eficiencia por su naturalidad, no contempla las vías de su implementación y la determinación de la influencia de los armónicos superiores.

Cuando se aplica el método en su forma clásica son necesarias dos integrales indefinidas ecuación **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**, las cuales se calculan por algún método numérico conocido (Trapezoidal, de Simpson, entre

otros) y necesitan de parámetros iniciales que se desconocen, los cuales influyen en los resultados.

Un algoritmo para resolver las integrales se describe en (Otto & Denier, 2005) como sigue:

1. Tomando un paso de integración

$$h = t_{(2)} - t_{(1)}$$

2. Las condiciones iniciales se desconocen, y se toman iguales a cero

$$\phi_{ab(1)} = 0,$$

$$\phi_{ca(1)} = 0,$$

3. Lazo para el cálculo desde 2 hasta el total de intervalo N

for J = 2:N

$$\phi_{ab(J)} = \phi_{ab(J-1)} + \frac{h}{2} (\phi_{ab(J)} + \phi_{ab(J-1)})$$

$$\phi_{ca(J)} = \phi_{ca(J-1)} + \frac{h}{2} (\phi_{ca(J)} + \phi_{ca(J-1)})$$

end

4. Cálculo del TAG instantáneo (NC ciclos; N número de muestra por ciclo)

Corrección del método con especificación de armónicos y desbalance

La presencia de un sistema de secuencia negativa provoca en el motor de inducción el incremento de las pérdidas y, por consiguiente, la disminución de la eficiencia, como se refleja en la tesis doctoral (Gómez, 2006). También incide en la reducción del momento electromagnético que se transmite al rotor por el entrehierro.

Bajo distorsión armónica de la tensión, las pérdidas mecánicas por fricción y batimiento del aire no son afectadas (Sen & Landa, 1990), y son proporcionales al cuadrado de la velocidad y al área de la superficie de contacto. Se incrementarán las

pérdidas por efecto joule, las pérdidas del acero y las pérdidas adicionales. También disminuye el momento desarrollado.

La resistencia del estator considerando el efecto pelicular puede aproximarse según (Masi & Chassande 1996) como:

$$R_{sk} = R_s (0,4 + 0,6\sqrt{k})$$

donde k es el orden del armónico.

En el análisis de no sinusoidalidad y el desbalance en un motor asincrónico, el mismo se sustituye por un grupo de motores ubicados en un eje común (Figura 1). Cada uno de estos motores está conectado a una tensión que corresponde a la frecuencia f_h y a la secuencia de fases k . Los parámetros de cada motor deben corresponder a ciertas frecuencias.

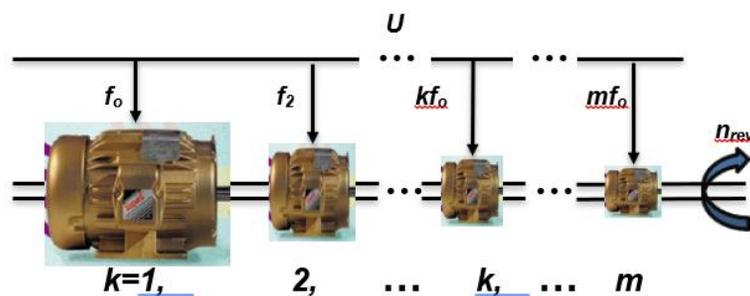


Figura 1. Motor asincrónico representado como la suma de los motores.

Para cada sistema trifásico armónico, se separan las componentes de secuencia cero que puedan contener según (Ivanon Smolenski, 1984) y son divididos en secuencia positiva y negativa según Fortescue (Grainger & Stevenson, 1996).

Algoritmo para la evaluación energética del motor de inducción

En la Figura 2 se representa el esquema del algoritmo de evaluación de motores de inducción en presencia de armónicos y asimetría.

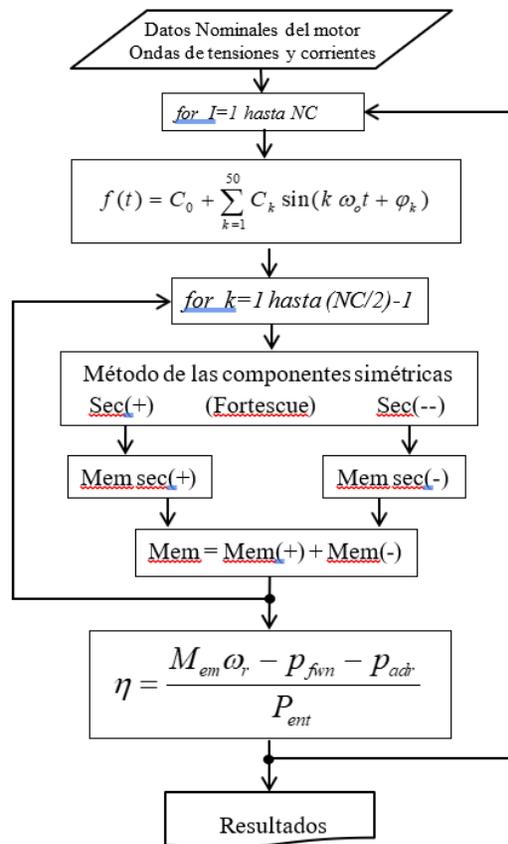


Figura 2. Algoritmo del método del momento en el entrehierro con armónicos y desbalance.

Cuando se calcula el consumo de energía, las pérdidas y sus costos, el procedimiento ha sido someter, a la máquina seleccionada por el programa, al mismo diagrama de carga que el desarrollado por el motor en servicio (De Armas, Gómez & Viego, 2011).

El algoritmo incorpora la selección de la potencia de los motores asíncronos para el servicio continuo, lo cual se justifica cuando la velocidad de la carga no varía apreciablemente; en este caso la potencia se puede considerar directamente proporcional al momento y se puede aplicar el método de la potencia equivalente (De Armas, Gómez & Viego, 2011).

También el algoritmo contempla la evaluación económica de la sustitución de motores; en este trabajo se utiliza el método del Costo del Ciclo de Vida (CCV) como una opción en la evaluación energética del motor de inducción, utilizando la metodología de Borroto & Montegaudó (2006).

Resultados y discusión

Varios investigadores han realizado la comparación de los resultados del método del momento en el entrehierro, con respecto a los obtenidos experimentalmente, para demostrar la precisión del mismo, después de realizar transformaciones en su forma clásica (Bin, Habetler & Harley, 2006; De Armas, Gómez & Viego, 2011; Gharakhani 2012). En lo adelante, la aplicación del método del momento en el entrehierro en su forma actual se hará referencia por *clásico* y cuando se aplique con las correcciones, se hará referencia por *corregido*.

A continuación, se comparan los resultados que se obtienen por la forma clásica y la corregida para tres casos experimentales, lo cual sirve para verificar la precisión de los valores obtenidos por ambos métodos.

Las condiciones experimentales tienen un bajo contenido de armónicos y desbalance de tensión. Se aplica el método con las correcciones en la descomposición armónica de Fourier y se utiliza el método de la componente simétrica para descomponer cada armónico en secuencias positiva y negativa.

La disyuntiva de experimentar con diferentes niveles de armónicos en la fuente, se ha sustituido por la simulación del motor bajo tres condiciones de asimetría y contenido de armónicos diferentes. Se aplica la tensión y se obtienen las corrientes necesarias para la aplicación del método del momento en el entrehierro clásico y corregido.

Respuestas del método del momento frente a los armónicos y el desbalance

Se analizan los resultados obtenidos para tres condiciones diferentes de operación, a partir del método del momento en el entrehierro en su forma clásica y con las correcciones planteadas, para valorar la influencia de los armónicos y el desbalance en la eficiencia y el comportamiento energético del motor de inducción.

Los datos nominales del motor de inducción son los siguientes: tensión 220 V; corriente 73,74 A; potencia 22,5 kW; eficiencia 91 %; factor de potencia 88 %; velocidad 3550 rev/min; conexión en Y y motor clase de diseño B.

Condiciones de operación del motor:

1. Normal: (Coeficiente de desbalance (DESBv) de 0,81 % y una distorsión armónica total de tensión (THDv) de 1,39 %.
2. THDv y DESBv dentro de las normas: (DESBv) de 2,25 % y (THDv) de 4,12 %.
3. THDv y DESBv fuera de las normas: (Coeficiente de desbalance (DESBv) de 5,80 % y una distorsión armónica total de tensión (THDv) de 6,55 %.

La Tabla 1 muestra los resultados operaciones del motor de inducción para las tres condiciones, por ambos métodos.

Tabla 1. Datos operacionales del motor para tres condiciones de operación

Parámetros	Simb	UM	THDv y DESBv muy inferior a las normas		THDv y DESBv en los límites de las normas		THDv y DESBv exceden las normas	
			Clásico	Corr.	Clásico	Corr.	Clásico	Corr.
Desbalance de tensión	DB	%	0,81		2,25		5,80	
THD de tensión	THDv	%	1,39		4,12		6,55	
Tensión en el estator	V_1	V	235,70	235,71	239,04	239,04	251,91	251,91
Corriente del estator	I_s	A	61,65	61,68	63,60	63,60	65,38	65,38
Potencia de entrada	P_1	kW	21,16	21,18	22,02	21,40	23,19	22,11
Potencia en el eje	P_2	kW	18,19	18,54	18,05	18,54	18,85	18,54
Pérdidas totales	Z_p	kW	2,98	2,64	3,98	2,86	4,34	3,58
Eficiencia	E_f	pu	0,86	0,88	0,82	0,87	0,81	0,84
Factor de potencia	F_p	pu	0,84	0,84	0,84	0,84	0,81	0,82
Momento en el eje	M_2	Nm	49,02	49,98	48,65	49,97	50,81	49,94
Coeficiente de Carga	kc	pu	0,81	0,82	0,80	0,82	0,84	0,82

Según los resultados mostrados en la Tabla 1 por el método corregido, la potencia de salida permanece constante, independientemente de las condiciones en que fueron determinadas, coincidiendo con el enunciado de que los armónicos y el desbalance no participan en la conversión electromecánica, sin embargo, constituyen pérdidas (2,64; 2,86 y 3,58) kW y se refleja en el incremento de la potencia de entrada. Cuando se aplica el método en su forma clásica existen variaciones en la potencia de salida, lo cual no debía ocurrir ya que la misma está determinada por la carga; esta comparación ofrece una mayor veracidad al método propuesto, Figura 3, donde "P1 Clásico", "P2 Clásico" son las potencias de entrada y de salida por el método clásico y "P1 Corrección", "P2 Corrección" las potencias de entrada y de salida por el método corregido; en el eje de la abscisa están los valores de la distorsión armónica total (THDv) y el desbalance (DBv) de tensión.

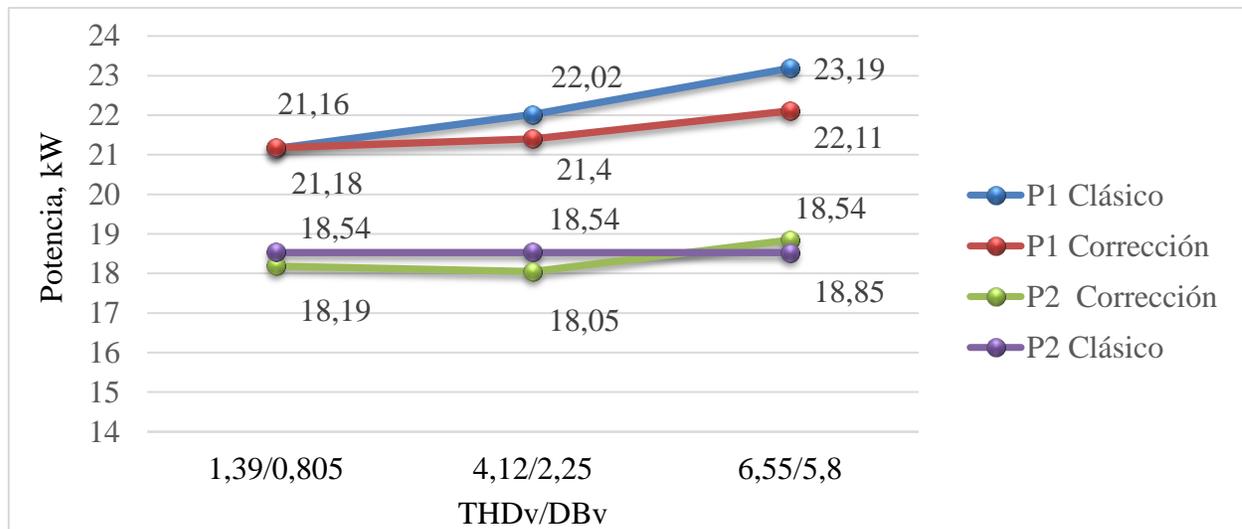


Figura 3. Potencia para las tres condiciones y por los dos métodos.

Por la Figura 4 se puede observar que los valores de eficiencias varían significativamente entre ambos métodos cuando se enfrentan a iguales condiciones del suministro eléctrico: (0,86 vs 0,88 en condiciones normales; 0,82 vs 0,87 en condiciones límites y 0,81 vs 0,84 en condiciones extremas para el método clásico y el corregido, respectivamente).

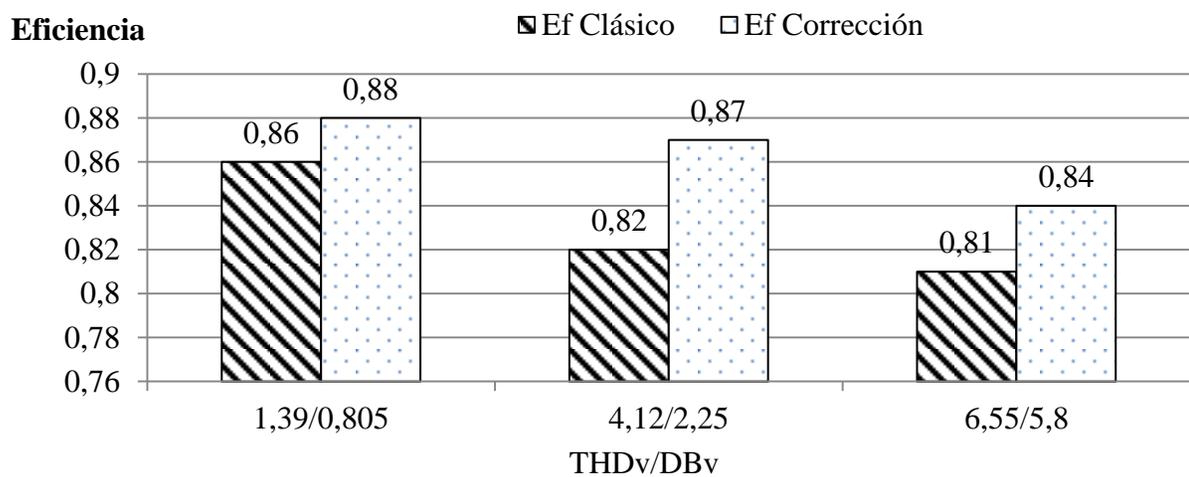


Figura 4. Eficiencia para las tres condiciones y por los dos métodos.

En la Figura 4 "Ef Clásico" y "Ef Corrección" son las eficiencias por el método clásico y corregido, respectivamente; en el eje de la abscisa están los valores del contenido armónico y del desbalance de tensión.

Pequeñas diferencias entre las eficiencias generan una gran diferencia en el ahorro de energía eléctrica que se estima a partir de las mismas: 1741,4 kWh para condiciones normales; 2136,6 kWh para valores dentro de normas y próximo al límite de las mismas y 3434,9 kWh cuando se exceden de los valores máximos recomendados por las normas, referente al nivel de armónico y desbalance en la fuente de suministro eléctrico.

En la Tabla 2 se resume el ahorro de la energía por ambos métodos para las tres condiciones que se analizaron. Es de observar una gran diferencia entre los resultados del ahorro que se estima por ambos métodos. De gran importancia radica el hecho que cuando las condiciones se acercan a los límites de lo establecido por las normas se obtiene la mayor diferencia en los resultados por ambos métodos.

Tabla 2. Ahorro de energía en kWh para tres condiciones por los dos métodos

Parámetros	THDv y DESBv muy inferior a las normas	THDv y DESBv en los límites de las normas	THDv y DESBv exceden las normas
Ahorro por el método Clásico	2426,6	4254,6	4899,1
Ahorro por el método Corregido	1741,4	2136,6	3434,9
Diferencia entre ambos métodos	685,2	2118,0	1464,2

El método corregido ofrece los mejores resultados desde el punto de vista de la transformación electromecánica de la potencia en el motor, cuando mantiene la potencia de salida independientemente de las condiciones de la fuente del suministro eléctrico.

Conclusiones

El error de cuantificación de la potencia de entrada, el flujo magnético y de la eficiencia estimada en redes contaminadas por armónicos y desbalance, dado por la solución numérica de las integrales en la ecuación del momento en el entrehierro durante la aplicación del método en su forma clásica, se resuelve a través del modelo matemático de este último con la descomposición de Fourier y las transformaciones de Fortescue en las ondas de tensiones y corrientes, equivalente a la sustitución de un motor por un conjunto de motores de diferentes frecuencias y secuencias, las cuales introducen originalidad y rigor en la evaluación de la eficiencia de motores de inducción.

Cuando se compara con los resultados experimentales en el motor analizado, la obtención de una potencia de salida constante independientemente de las condiciones

en que fueron determinadas, demostró mayor precisión y veracidad al método propuesto.

El procedimiento que propone, en la aplicación del método del momento en el entrehierro sobre un algoritmo que estima la eficiencia, permite evaluar las prestaciones energéticas de los motores asincrónicos en explotación que operen a velocidad constante o ligeramente variable e iniciar proyectos de sustitución de motores y perfeccionamiento energético.

La variante del método del momento en el entrehierro con las correcciones por descomposición armónica de Fourier y transformaciones de Fortescue para el desbalance es efectiva en la determinación de la eficiencia de motores de inducción con un suministro eléctrico contaminado por armónicos y desbalance.

Referencias bibliográficas

- AL-BADRI, M.; PILLAY, P. & ANGERS, P. 2017. A Novel In Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-Phase Induction Motors Operating With Distorted Unbalanced Voltages. *IEEE Transactions on Industry Applications* 53(6): 5338-5347.
- BIN, L. 2006. *Energy usage evaluation & condition monitoring for electric machines using wireless sensor network*. Tesis doctoral. Escuela de ingeniería eléctrica e informática, Georgia.
- BIN, L.; HABETLER, T. G. & HARLEY, R. G. 2006. A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors. *IEEE Transaction on Industry Applications* 42(4): 924-933.
- BORROTO, A. E. & MONTEGAUDO P. Y. 2006. *Gestión y Economía Energética*. Editorial Universo Sur, Cienfuegos.
- CAO, W. 2009. Comparison of IEEE 112 & New IEC Standard 60034-2-1. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 24(3): 802-808.
- CÉSAR DA SILVA, J.; LEITE DE VASCONCELOS, T.; DE LUCENA JÚNIOR, J. A.; JORDÃO LYRA, G.; VIDAL SOUTO, F.; DE SOUZA PIMENTEL, H.; ANTÔNIO BELO, F. & CAVALCANTE, A. 2020. Non-Invasive Method for In-Service Induction Motor Efficiency Estimation Based on Sound Acquisition. *Applied Sciences* 10(11).

- DE ARMAS, M.; GÓMEZ, J. & VIEGO, P. 2011. *Evaluación de Motores en Servicio*. Convención de Ingeniería Eléctrica CIE. Santa Clara, Cuba.
- EGUILUZ, L.; LAVANDERO, P.; MAÑANA, M. & LARA, P. 1999. Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal & Unbalanced Conditions. Simposio Internacional IEEE sobre diagnóstico de máquinas eléctricas, electrónica de potencia y accionamientos. Gigón, España.
- FIGURA, R.; SZYCHTA, E. & SZYCHTA, L. 2011. In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor. *Electronics & Electrical Engineering* 8(114): 51-56.
- GHAI, N. K. 1999. IEC & NEMA standards for large squirrel-cage induction motors. A comparison. *IEEE Transaction on Energy Conversion* 14(3): 545-552.
- GHARAKHANI, A. 2012. *Efficiency estimation of induction machines with limited measurements*. Tesis doctoral. Universidad de Concordia, Canadá.
- GÓMEZ, J. R. 2006. *Determinación de la eficiencia de los motores asíncronos con tensiones desbalanceadas en condiciones de campo*. Tesis doctoral. Universidad Central de Las Villas. Villa Clara, Cuba.
- GRAINGER, J. J. & STEVENSON, W. 1996. *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill, Mexico.
- HSU, J. S. & SCOGGINS, B. P. 1995. Field Test of Motor Efficiency & Load Changes Through Air-Gap Torque. *IEEE Transaction on Energy Conversion* 10(3): 477- 483.
- HSU, S. & SORENSON, P. J. 1996. Field assessment of induction motor efficiency through air-gap torque. *IEEE Trans. Energy Conversion* 11: 489-494.
- IEEE STANDARD 112. 2004. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors & Generators. American National Standard. New York, USA.
- IEEE STD. 519 1993. IEEE Recommended Practices & Requirements for Harmonic Control in Electrical systems. IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society. New York, IEEE Press.

- IVANON SMOLENSKI, A. V. 1984. *Máquinas eléctricas*. Mir, Moscú.
- KUECK, J. D.; GRAY, J. R.; DRIVER, R.C. & HSU, J. 1996. Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency. ORNL/TM-13237.
- MASI, V. & CHASSANDE, J. P. 1996. Dimensionamiento de un motor de inducción para su utilización con variador de frecuencia. *Revista de la Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER)* 5(16): 55-59.
- NEMA 2004. Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors & Generators. Washington, D.C.
- OTTO, S. R. & DENIER, J. P. 2005. *An Introduction to Programming & Numerical Methods in MATLAB*. Springer-Verlag, Australia.
- ROMERO, I.; DE ARMAS, M.; PÉREZ, B. M. & GUERRERO, Y. 2012. Evaluación energética de motores asíncronos ante armónicos y desbalance de voltaje en una empresa minera. *Minería y Geología* 28(1): 47-59.
- SEN, P. K. & LANDA, H. 1990. Derating of induction motors due to waveform distortion. *IEEE Transactions on Industry Applications* 26(6): 1102-1107.
- VILARAGUT, M., COSTA, A.; GARCÍA, A. & AYALA, A. C. 2004. Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos. *Ecosolar*(10).
- ZHANG, H.; ZANCHETTA, P.; GERADA, C.; BRADLEY, K. & LIU, J. 2011. Performance evaluation of induction motor efficiency & in-service losses measurement using standard test methods. Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE International Niagara Falls, ON.