



APLICACIONES INDUSTRIALES

Análisis de eficiencia de motores asincrónicos en presencia de desbalances y armónicos en la tensión

Efficiency analysis of induction motors in the presence of harmonics and unbalance voltage

Vladimir - Sousa Santos
Percy - Viego Felipe

Julio - Gómez Sarduy
Marcos - de Armas Teyra

Recibido: Diciembre del 2012

Aprobado: Febrero del 2013

Resumen/ Abstract

En los sistemas eléctricos de potencia es muy común encontrar problemas de calidad de la energía. La circulación de armónicos de tiempo en las redes de suministro eléctrico industrial junto al desbalance de tensión, afecta considerablemente el funcionamiento de los motores asincrónicos trifásicos y dificulta su caracterización energética. Existen diferentes métodos in situ para la estimación de la eficiencia de los motores. Sin embargo, ninguno ha sido lo suficientemente preciso para el análisis bajo la influencia de armónicos, desviaciones y desbalance de tensión. En este trabajo se presenta un procedimiento basado en los circuitos equivalentes, con segregación de pérdidas y empleando un Algoritmo de Forraje Bacterial (AFB), que permite determinar en condiciones de campo y con baja invasividad, la eficiencia energética de motores asincrónicos trabajando en las condiciones señaladas. El método se probó satisfactoriamente en un motor de 1,5 kW alimentado con niveles significativos de desbalance y armónicos de tensión.

Palabras clave: algoritmo de forraje bacterial, armónicos con desbalance de tensión, eficiencia, máquinas asincrónicas.

In electric supply systems it is very common to find problems of power quality. The time harmonic flow in industrial electrical grids with voltage deviations and unbalance, significantly affects three phase induction motor operation and makes difficult energy characterization. There are different methods for in situ estimation of motors efficiency. However, none of them have been sufficiently precise for the analysis under non-sinusoidal, deviated and unbalanced voltage conditions. This paper presents a method based on the equivalent circuits, with losses segregation and using Bacterial Foraging Algorithm (BFA). It allows determining under field conditions and low invasiveness, energy efficiency of induction motors operating under the before mentioned conditions. This method was tested successfully on a 1,5 kW motor, fed with significant levels of unbalance and voltage harmonics.

Key Words: bacterial foraging algorithm, harmonic with unbalance voltage, efficiency, induction motor.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo acelerado de la electrónica de potencia y las tecnologías de la información y las comunicaciones, ha provocado que se acentúe la circulación de armónicos de tiempo en las redes de suministro eléctrico industrial.

Este fenómeno, provoca el mal funcionamiento de los motores asíncronos, el aumento de las pérdidas y la disminución de su vida útil, encareciendo el costo de mantenimiento y de explotación. El problema se vuelve más complejo si aparece junto a desviaciones y desbalances de tensión [1].

Los motores asíncronos, de manera general, consumen la mayor parte de la energía eléctrica en las industrias. Por lo tanto, es imprescindible realizar un monitoreo energético sistemático durante su funcionamiento, sobre todo, para evaluar las afectaciones a la eficiencia, cuando se encuentran trabajando en un sistema de suministro contaminado de armónicos, con desviaciones y desbalances de tensión.

Las normas IEEE Std-112-2004 [2] e IEC Std-60034-2-1 [3], a pesar de ofrecer los resultados más precisos en la determinación de la eficiencia del motor, no son aplicables en condiciones de campo [4]. Por esta razón, se han desarrollado varios métodos que permiten realizar un análisis energético de los motores de inducción trabajando in situ. Sin embargo, en ningún caso se considera de manera satisfactoria el efecto provocado por la alimentación del motor mediante redes contaminadas de armónicos de tiempo, con desviaciones y desbalances de tensión.

Los métodos de placa, de la corriente y del deslizamiento, son de los más utilizados en condiciones de campo, debido al bajo costo del equipamiento necesario, y al bajo nivel de intrusión en su aplicación. Sin embargo, su uso en presencia de problemas de calidad de la energía, conlleva a errores inaceptables. De igual manera sucede con programas basados en métodos empíricos y estadísticos como el Motormaster y Ormel 96 [5].

En [6-8], se analiza el efecto de los armónicos en los motores asíncronos, pero se proponen circuitos equivalentes cuyos parámetros dependen de datos de catálogo difíciles de acceder. En [9-10], se proponen métodos que precisan de la realización de pruebas de vacío, mientras que en [1], el análisis del funcionamiento del motor en condiciones de armónicos y desbalance en la tensión, se efectúa mediante mediciones directas en un laboratorio. En resumen estos trabajos, si bien consideran el funcionamiento de los motores trabajando en presencia de armónicos y desbalance en la tensión, no son aplicables en condiciones de campo.

En [11], se propone el método del torque en el entrehierro, como una herramienta aplicable en condiciones de campo y en presencia de armónicos y desbalance de tensión. Sin embargo, las pérdidas mecánicas y de núcleo, se consideran como una constante de la potencia de entrada nominal para todo tipo de motor, lo cual no siempre se comporta de esa manera; y las pérdidas adicionales se determinan según la norma IEEE Std-112-2004 [2], sin corregir su valor con la corriente de carga del rotor. Estas consideraciones afectan la precisión del método [5].

El desarrollo de técnicas computacionales basadas en la optimización, ha impulsado el uso del método del circuito equivalente, pues se facilita la identificación de los parámetros, permitiendo determinar in situ la eficiencia y otras características operacionales del motor en varios puntos de operación.

Entre las técnicas heurísticas utilizadas se encuentra el algoritmo genético (AG) y el algoritmo de forraje bacteriano (AFB). En [12-13], se utiliza un AG para la estimación de la eficiencia de motores asíncronos trabajando en presencia de desbalance de tensión, mientras que en [14], se utiliza un AFB con el mismo fin y bajo las mismas condiciones. Otros trabajos reportan el uso de AG [15-16], y AFB [17], para condiciones de tensiones balanceadas. Sin embargo, en la literatura consultada no se reporta ninguna investigación que utilice la combinación del circuito equivalente, con técnicas de optimización evolutivas, para estimar la eficiencia cuando el motor está alimentado con tensiones distorsionadas.

En el presente trabajo se propone un procedimiento que combina un AFB con el método del circuito equivalente, para determinar en condiciones de campo y baja invasividad, la eficiencia del motor asíncrono en presencia de armónicos, desviaciones y desbalance de tensión.

El trabajo se organiza de la forma siguiente. En la sección 2 se describe los materiales y métodos empleados presentándose los circuitos equivalentes utilizados y las consideraciones del modelo. Se expone además las características del AFB desarrollado, las funciones objetivo empleadas y los pasos para la aplicación del procedimiento propuesto. En la sección 3 el procedimiento se

emplea para estimar la eficiencia y las potencia de salida de un motor de 1,5 kW para tres estados de cargas, con significativos niveles de armónicos y desbalance de tensión. Los resultados obtenidos de la simulación son comparados con las mediciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formulación del problema

El comportamiento del motor de inducción alimentado con tensiones no sinusoidales desbalanceadas, puede ser analizado utilizando las componentes de secuencia o fase para cada componente armónica [7]. Las componentes armónicas tienen su propia secuencia y se dividen en armónicos de secuencia positiva y negativa. Los armónicos de corriente de secuencia positiva $(3n+1)$, $n = 1, 2, \dots$, desarrollan un momento en el mismo sentido que el momento fundamental, mientras que los armónicos de corriente de secuencia negativa $(3n+2)$, $n = 0, 1, 2, \dots$, presentan un momento contrario al fundamental [9]. En presencia de desbalance, cada armónico además de su componente de secuencia característica, presentará una componente de secuencia en sentido contrario.

En la figura 1, se muestran los circuitos equivalentes empleados para el procedimiento propuesto. El circuito superior de la figura se corresponde con el análisis de motor para la secuencia propia de cada armónico incluyendo la componente fundamental. En la resistencia variable con el deslizamiento, el signo (+) se corresponde con la componente fundamental y los armónicos de secuencia positiva, mientras que el signo (-) se corresponde con los armónicos de secuencia negativa. En el circuito inferior se representa el circuito equivalente para la secuencia contraria de cada armónico (invirtiéndose los signos antes señalados), representando (-) la secuencia contraria de los armónicos de secuencia positiva y (+) la secuencia contraria de los armónicos de secuencia negativa. No se considera la circulación de terceros armónicos y sus múltiplos, debido a que la conexión del motor en delta o estrella sin neutro, no permite la circulación de corriente homopolar por las líneas [7].

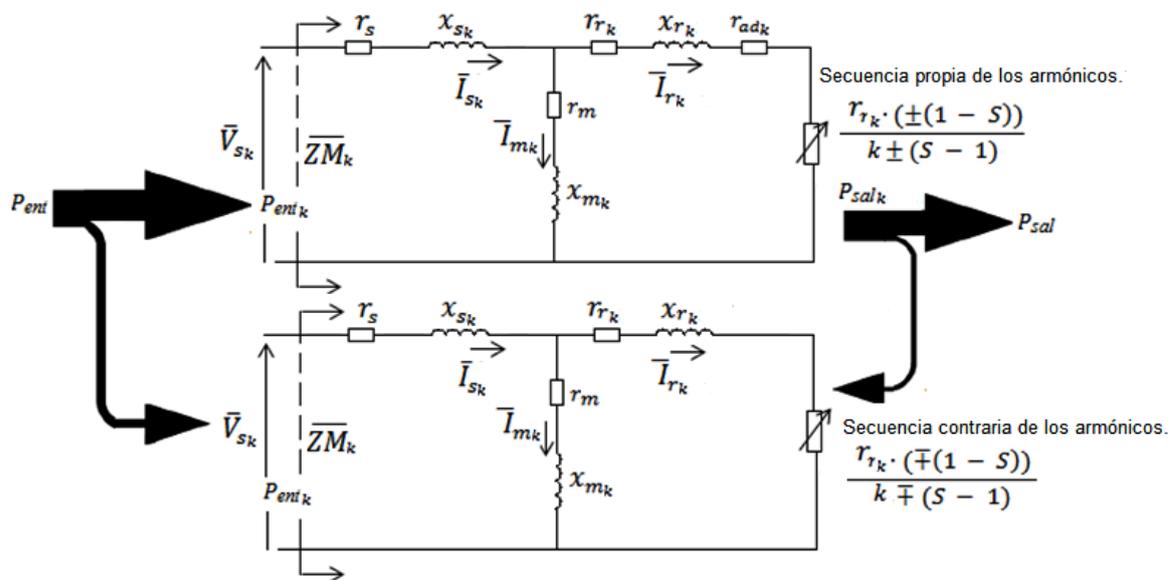


Fig. 1. Circuitos equivalentes por fase del motor alimentado con tensiones distorsionadas y desbalanceadas.

En los circuitos:

Subíndice k : Orden del armónico (incluyendo la componente fundamental); r_s : Resistencia del estator (Ω); x_s : Reactancia de dispersión del estator (Ω); r_{ad} : Resistencia representativa de las pérdidas adicionales (Ω); r_m : Resistencia representativa de las pérdidas de núcleo (Ω); x_m : Reactancia de magnetización (Ω); r_r : Resistencia del rotor (Ω); x_r : Reactancia de dispersión del rotor (Ω); S : Deslizamiento del motor; P_{ent} : Potencia de entrada (W); P_{sal} : Potencia de salida (W); ZM : Impedancia del motor (Ω); Im : Corriente en la rama de magnetización (A); V_s : Tensión de fase (V); I_s : Corriente de fase (A).

A partir de la estimación de los parámetros de los circuitos equivalentes, la eficiencia puede calcularse como:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \cdot 100 = \frac{P_{salkp} + P_{salkn} - P_{fb}}{P_{ent}} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

Donde:

P_{salkp} , P_{salkn} : Potencias de salida correspondientes a las componentes de secuencia positiva y negativa respectivamente del armónico de orden k (W); P_{fb} : Pérdidas mecánicas (W).

La potencia de entrada total P_{ent} se mide directamente en las líneas de alimentación del motor, mientras que las potencias de salida P_{salkp} , P_{salkn} de cada armónico k , considerando las componentes de secuencia, se estiman para cada punto de operación a partir de la resistencia variable con el deslizamiento.

Consideraciones para el modelo

Los parámetros de los circuitos de la figura 1, se determinan para cada condición de operación a partir de la solución de un sistema de ecuaciones, donde la cantidad de parámetros incógnitos es mayor que la cantidad de ecuaciones conocidas.

Para lograr que la solución del algoritmo de solución converja a valores próximos, es necesario disminuir la cantidad de parámetros incógnitos, teniendo en cuenta las consideraciones siguientes:

- Los parámetros del estator y de la rama de magnetización se consideran iguales para ambas secuencias de cada armónico, incluyendo el fundamental [18].
- La resistencia del estator se puede medir directamente con el mínimo nivel de intrusión y corregirse a la temperatura de trabajo según la clase de aislamiento aplicando la norma IEEE Std-112-2004 [2]. El valor de la resistencia se considera igual para todos los circuitos de secuencia correspondiente a cada armónico, despreciándose el efecto pelicular [18].
- La reactancia del estator de los armónicos superiores se relaciona con la de la componente fundamental con el orden de armónico de la manera siguiente [18]:

$$x_{sk} = k \cdot x_s \quad (2)$$

- Para la componente fundamental, la reactancia del rotor de secuencia positiva se relaciona con la reactancia del estator según el diseño NEMA del motor [5].
- Las resistencias representativas de las pérdidas adicionales se ubican en el rotor y se calculan para la componente fundamental según la ecuación(3), a partir de la norma IEEE Std-112-2004 [2]:

$$r_{adfund} = 0.018 \cdot r_{rfund, pos} \cdot \frac{(1 - S_n)}{S_n} \quad (3)$$

Donde:

r_{adfund} : Resistencia representativa de las pérdidas adicionales para la componente fundamental (Ω); $r_{rfund, pos}$: Resistencia del rotor de secuencia positiva de la componente fundamental (Ω); S_n : Deslizamiento nominal (p.u.).

- La relación entre la resistencia representativa de las pérdidas adicionales para los armónicos superiores y la componente fundamental es [18]:

$$r_{adk} = k^{0.8} \cdot r_{adfund} \quad (4)$$

Donde:

r_{adk} : Resistencia representativa de las pérdidas adicionales de los armónicos superiores (Ω).

- La reactancia de magnetización de los armónicos superiores se relaciona con la de la componente fundamental con el orden de armónico de la manera siguiente [18]:

$$x_{mk} = k \cdot x_{mfund} \quad (5)$$

Donde:

x_{mk} : Reactancia de magnetización de los armónicos superiores (Ω); x_{mfund} : Reactancia de magnetización de la componente fundamental (Ω).

- La resistencia representativa de las pérdidas de núcleo r_m se considera igual para los circuitos de secuencia propia y contraria de la componente fundamental [5; 12-13]. Para los circuitos correspondientes a los armónicos superiores también se considera constante [10], debido a la poca influencia del incremento de la frecuencia de excitación en las pérdidas de núcleo.

En el modelo, siguiendo el criterio recomendado en [19], la resistencia de magnetización se considera entre un (10-20) % de la impedancia base del motor:

$$r_m = (0,1...0,2) \cdot Z_b \quad (6)$$

Donde:

Z_b : Impedancia base del devanado del estator (Ω).

Esta impedancia se determina como la relación entre la tensión y corriente nominales:

$$Z_b = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (7)$$

Donde:

V_n : Tensión nominal (V).

I_n : Corriente nominal (A).

Esta forma de estimar r_m permite que las pérdidas de núcleo se determinen a partir de las tensiones y corrientes de línea, sin tener que considerarlas como un factor constante de la potencia nominal para todo tipo de motor, como se propone en el método del torque en el entrehierro, lo cual no es apropiado en todos los casos [13].

- Las pérdidas mecánicas se consideran como 1,2 % de la potencia de entrada. Esta es una suposición muy común en la mayoría de las técnicas de determinación de la eficiencia in situ [5].
- La velocidad se puede medir directamente en el eje con un tacómetro o utilizando algunos de los métodos "sensorless" como el propuesto en [20].

Desarrollo del algoritmo de forraje bacterial

El AFB es una técnica de búsqueda de la mejor solución a un problema, que parte de la idea de la selección natural y está basado en los métodos para la localización, manipulación e ingestión de los alimentos que emplean las bacterias Escherichia Coli y que se conoce como forraje. Se ha demostrado que el AFB ofrece un mejor funcionamiento en términos de calidad de la solución y velocidad de convergencia que el AG y el enjambre de partículas [17]. Esta técnica ha sido empleada para resolver varios tipos de problemas de ingeniería [21-23], entre los cuales se encuentra también, la determinación de la eficiencia de motores en condiciones de campo, mediante la solución del circuito equivalente, sin embargo, solo se considera ondas sinusoidales [4; 17].

En el trabajo se desarrollan dos AFB con los pasos siguientes en común [4]:

Paso 1: Entrar los datos de chapa, las mediciones de las tensiones y corrientes de línea, la resistencia en el estator y la velocidad en el eje del rotor.

Paso 2: Entrar los parámetros del AFB: Número de poblaciones (P), número de bacterias (s), número de pasos quemotácticos (Nc), número de desplazamientos (Ns), número de eventos de reproducción (Nre) , número de eventos de eliminación-dispersión (Ned), número de reproducción de bacterias por generación (Sr), probabilidad de que cada bacteria sea eliminada y dispersa (Ped).

Paso 3. Generar las posiciones de los parámetros del circuito equivalente aleatoriamente para una población de bacteria.

Paso 4. Evaluar la posición de cada bacteria en la población según el cumplimiento de la función objetivo.

Paso 5. Modificar las posiciones de todas las bacterias usando los procesos de desplazamientos. Cada coordenada de la posición de una bacteria se corresponde con un parámetro desconocido del circuito equivalente del motor.

Paso 6. Ejecutar las operaciones de reproducción y eliminación-dispersión.

Paso 7. Si se alcanza el número máximo de pasos quemotácticos, de reproducción y de dispersión-eliminación, ir al paso 8, si no, ir al paso 5.

Paso 8. Obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes en correspondencia con las bacterias mejor evaluadas.

Paso 9. Con los parámetros obtenidos calcular la potencia de salida y la eficiencia del motor.

Función objetivo global

Para determinar los parámetros de los circuitos de la figura 1, se obtienen primeramente los correspondientes al circuito equivalente de secuencia positiva de la componente fundamental mediante la función objetivo representada en la ecuación(8). Esta función la compone el error relativo entre las potencias y corrientes de entrada medidas y estimadas para este caso.

$$MinJ = \left| \frac{Pent_{fund, pos, med}}{Pent_{fund, pos, est}} - 1 \right|^2 + \left| \frac{\overline{Is}_{fund, pos, med}}{\overline{Is}_{fund, pos, est}} - 1 \right|^2 \quad (8)$$

Donde:

MinJ: Función objetivo; *Pent_{fund, pos, med}*, *Pent_{fund, pos, est}*: Potencia de entrada de secuencia positiva de la componente fundamental medida y estimada, respectivamente (W). *Is_{fund, pos, med}*, *Is_{fund, pos, est}*: Corriente de fase de secuencia positiva de la componente fundamental medida y estimada respectivamente (A).

El resto de los parámetros, esto es, los parámetros del circuito de secuencia negativa de la componente fundamental y de los circuitos correspondientes a los armónicos superiores, se determinan a partir de los valores de *x_s*, *x_m*, *r_m* y *r_{ad}* obtenidos mediante la ecuación (8), y a partir de la función objetivo representada en la ecuación (9). Esta función está compuesta por la diferencia entre las impedancias por fase calculadas a partir de las mediciones de tensiones y corrientes, y las respectivas impedancias estimadas a partir de los circuitos equivalentes representados en la figura 1. En este caso no se tiene en cuenta la secuencia positiva de la componente fundamental.

$$MinK = \left| \frac{Z_{fund, neg, est}}{Z_{fund, neg, cal}} - 1 \right|^2 + \left| \frac{[Z_{kp, pos, est}]}{[Z_{kp, pos, cal}]} - 1 \right|^2 + \left| \frac{[Z_{kp, neg, est}]}{[Z_{kp, neg, cal}]} - 1 \right|^2 + \left| \frac{[Z_{kn, pos, est}]}{[Z_{kn, pos, cal}]} - 1 \right|^2 + \left| \frac{[Z_{kn, neg, est}]}{[Z_{kn, neg, cal}]} - 1 \right|^2 \quad (9)$$

Donde:

MinK: Función objetivo; *Z_{fund, neg, est}*, *Z_{fund, neg, cal}*: Impedancias de secuencia negativa de la componente fundamental estimadas y calculadas, respectivamente (Ω); *[Z_{kp, pos, est}]*, *[Z_{kp, pos, cal}]*: Matrices de impedancias de secuencia positiva de los armónicos de secuencia positiva estimadas y calculadas, respectivamente (Ω); *[Z_{kp, neg, est}]*, *[Z_{kp, neg, cal}]*: Matrices de impedancias de secuencia

negativa de los armónicos de secuencia positiva estimadas y calculadas, respectivamente (Ω); $[Z_{kn,pos,est}]$, $[Z_{kn,pos,cal}]$: Matrices de impedancias de secuencia positiva de los armónicos de secuencia negativa estimadas y calculadas, respectivamente (Ω); $[Z_{kn,neg,est}]$, $[Z_{kn,neg,cal}]$: Matrices de impedancias de secuencia negativa de los armónicos de secuencia negativa estimadas y calculadas, respectivamente (Ω).

Un enfoque, en que primero se determinan los parámetros del circuito de secuencia positiva de la componente fundamental y con estos se obtienen el resto de los parámetros, fue utilizado en [5], pero solo para el análisis con desbalance de tensión. En este trabajo, se utiliza esta idea para el desarrollo por primera vez, de un procedimiento que combina el uso del circuito equivalente en estado estable y un algoritmo de forraje bacteriano como herramienta de optimización, para el análisis de la eficiencia de motores asíncronos trabajando en presencia de armónicos junto a desbalance de tensión. El procedimiento consta de los pasos siguientes:

- 1- Descomponer en componentes de secuencia las tensiones y corrientes de línea medidas de cada armónico y obtener los correspondientes valores de fase.
- 2- Calcular la potencia de entrada y la corriente de fase de secuencia positiva de la componente fundamental, así como, las impedancias de fase de la secuencia propia y contraria de cada armónico.
- 3- Obtener los parámetros (x_s , x_m , r_m y r_{ad}) del circuito equivalente de secuencia positiva de la componente fundamental, mediante la aplicación del AFB con la función objetivo (8), empleando además los datos de chapa, la velocidad en el eje y la resistencia del estator.
- 4- Con los valores de estos parámetros como referencia, se aplica otro AFB con la función objetivo (9), obteniéndose los parámetros correspondientes al circuito de secuencia negativa de la componente fundamental, y de los circuitos de secuencia propia y contraria de los armónicos superiores.
- 5- Con los parámetros y corrientes de los circuitos se calcula la eficiencia, la potencia de salida y otras características operacionales para el estado de carga analizado.
- 6-

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procedimiento propuesto fue probado en un motor de 1,5 kW para tres estados de cargas, en presencia de armónicos y desbalance de tensión. Los datos nominales del motor se presentan en la tabla 1. Las mediciones se realizaron en un banco de prueba de motores y el desbalance de tensión y los armónicos fueron generados por una fuente programable trifásica marca "Agilent Technologies" modelo HP6834B. Esta fuente es capaz de entregar hasta 4,5 kVA y tensiones por fase de hasta 300 V con amplitud, forma, y fase programables. Las mediciones eléctricas se realizaron con un analizador de redes. La potencia de salida se midió con un dinamómetro y la velocidad con un tacómetro óptico. Estos instrumentos poseen una precisión que cumple con lo establecido por las normas [2-3]. En la figura 2, se muestra el diagrama de la estación experimental.

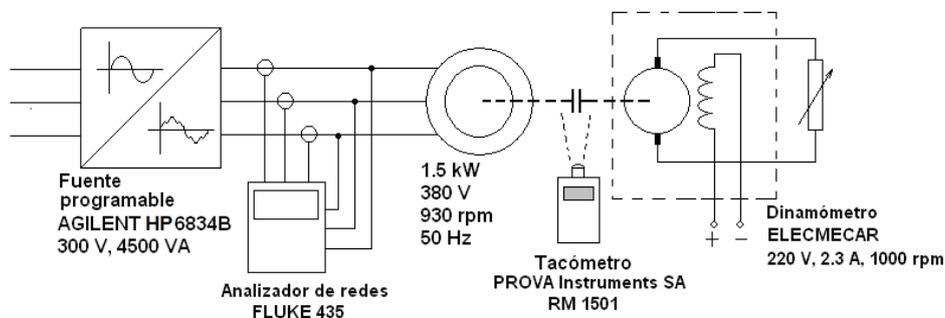


Fig. 2. Diagrama de bloque de la estación experimental.

Pn (kW)	η (%)	V (V)	I (A)	F (Hz)	P	n (rpm)	Conex.	T.A.	Dis.	rs (Ω)
1,5	77	380	4	50	6	930	Y	B	A	3,85

Donde:

Pn: Potencia nominal (kW), η : Eficiencia del motor (%); V: Tensión nominal (V); I: Corriente nominal (A); F: Frecuencia (Hz); P: Número de polos; n: Velocidad nominal (rpm); Conex.: Conexión del devanado del estator; T.A.: Tipo de aislamiento; Dis.: Diseño NEMA, rs: Resistencia del estator (Ω).

En la tabla 2, se muestran las corrientes y tensiones de líneas efectivas para cada estado de carga (EC), así como el desbalance de tensión (LVUR) calculado por la norma NEMA [24].

EC	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	LVUR (%)
1	381,10	371,40	392,10	3,60	2,60	3,10	2,77
2	381,10	371,30	392,00	3,90	3,00	3,60	2,76
3	380,8	371,1	392	4,6	3,7	4,4	2,8

Como se observa, los valores de desbalance de tensión son superiores al 1% en todos los casos, valor establecido por la norma NEMA [24] como límite para el funcionamiento normal del motor.

En la figura 3, se muestra el espectro del factor de distorsión individual de las tensiones de líneas (FDIT) para el 5to y 7mo armónico, correspondiente a cada estado de carga analizado. El FDIT, se determina como la relación entre la tensión de línea de cada nivel de armónico superior y el fundamental [25].

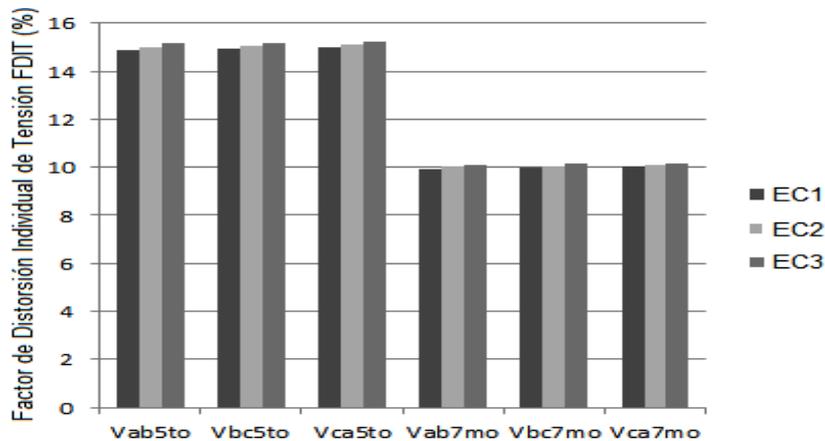


Fig. 3. Espectro del factor de distorsión individual de las tensiones de línea FDIT.

Como se observa en la figura 3, para cada estado de carga los niveles de armónicos fueron significativos, con el 5to armónico con valores superiores al 14% y el 7mo armónico con valores superiores al 9%. La combinación de armónicos y desbalance de tensión se puede apreciar en la figura 4, donde se muestra la forma de onda de las tensiones y corrientes de línea para el estado de carga 3.

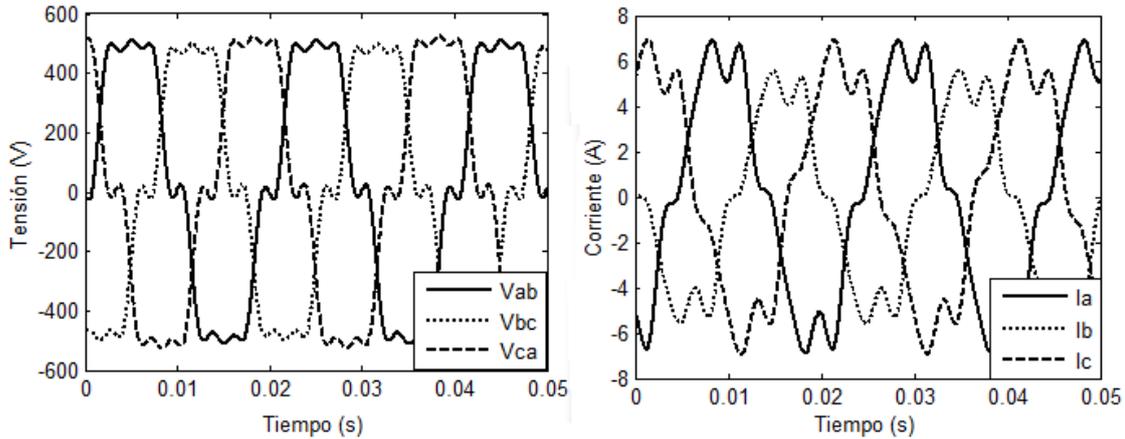


Fig. 4. Señales de la tensión de línea (a) y corriente de línea (b) con LVUR de 2.8% y FDIT del 5to armónico superior al 15% y 7mo armónico superior al 10%.

En la tabla 3, se presenta la comparación entre los resultados obtenidos por el método propuesto y las mediciones realizadas para la potencia de salida y la eficiencia de los tres estados de cargas.

Tabla 3. Comparación entre los resultados medidos y calculados a partir de los resultados de la simulación.

EC	Velocidad (rpm)	Potencia de entrada (W)	Potencia de salida (medida) (W)	Potencia de salida (estimada) (W)	Eficiencia (medida) (%)	Eficiencia (estimada) (%)	Error en la eficiencia (%)
1	973,50	1107	729,55	739,54	65,90	66,81	1,37
2	960,50	1527	1079,72	1089,87	70,71	71,37	0,94
3	870,12	2077	1304,16	1315,57	62,79	63,34	0,87

Como se observa, el procedimiento permitió obtener resultados con una buena precisión para los estados de carga analizados, con porcentajes de error relativo en el cálculo de la eficiencia inferior al 2%, y que no superó el 1% en dos de los estados de cargas.

CONCLUSIONES

- Ha sido descrito un procedimiento económico, preciso y poco invasivo, basado en un AFB, que permite obtener la potencia de salida y la eficiencia de motores asíncronos en condiciones de campo y en presencia simultánea de armónicos, desviaciones y desbalance de tensión.
- El procedimiento está basado en la determinación de los parámetros de los circuitos equivalentes correspondientes a cada secuencia de los armónicos presentes en las tensiones de alimentación del motor, cuando están distorsionadas y desbalanceadas.
- Las pérdidas de núcleo, que usualmente significan una parte importante del total de las pérdidas, son determinadas por el método a partir de las mediciones de tensiones y corrientes de línea, sin necesidad de asumirlas como fijas, como en el método del torque en el entrehierro.
- El procedimiento fue validado en un motor de 1,5 kW para varios estados de carga con resultados satisfactorios, demostrando su efectividad para el uso en auditorías energéticas industriales.

REFERENCIAS

- [1]. Eguiluz, L. I., *et al.*, "Performance analysis of a three-phase induction motor under non-sinusoidal and unbalanced conditions". En: IEEE International symposium on diagnostic for electrical machines, power electronics and drives on. Gijón, España, 1999, p. 5, ISBN 84-699-0977-0.
- [2]. "IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators", IEEE Std 112™-2004, New York, USA: IEEE standards project editor, 2004, ISBN 0-7381-3977-7.
- [3]. "Standard methods for determining losses and efficiency from tests", IEC 60034-2-1-2007, Geneva, Suiza: international standard, 2007, ISBN 2-8318-9250-3.
- [4]. Sakthivel, V.; *et al.*, "Non-intrusive efficiency estimation method for energy auditing and management of in-service induction motor using bacterial foraging algorithm". IET Electric power applications. 2010, vol.4, n.8, p. 579–590, ISSN 1751-8660.
- [5]. Gharakhani, A.; Pillay, P., "An in situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies". IEEE transactions on energy conversion. 2012, vol. 27, n. 1, p. 85-95, ISSN 0885-8969.
- [6]. Issouribehere, P. E.; *et al.*, "Medición de la emisión armónica en variadores de velocidad y desarrollo de modelos de simulación". En: décimo tercer encuentro regional iberoamericano de CIGRÉ on. Puerto Iguazú, Argentina, 2009. [consulta: noviembre del 2011], Disponible en: www.labplan.ufsc.br/congressos/XIII%20Eriac/C4/C4-15.pdf.
- [7]. Pedra, J.; *et al.*, "Harmonic modeling of induction motors". Electric power systems research. 2006, vol 76, n. 11, p. 936-944, ISSN 0378-7796.
- [8]. Hildebrand, E. N.; Roehrdanz, H., "Losses in three-phase induction machines fed by PWM converter". IEEE Transactions on energy conversion. 2001, vol. 16, n. 3, p. 228-233, ISSN 0885-8969.
- [9]. Jornet, A., "Contribución al estudio de las ondas de campo armónico y las pérdidas adicionales que se originan en los motores eléctricos de inducción asíncronos alimentados con convertidor de frecuencia en modulación del ancho de los impulsos". [Tesis de doctorado], Terrasa, España: Universidad politécnica de Cataluña, 2005, [consulta: 14 de septiembre de 2011], Disponible en: www.dee.upc.edu/en/doctorat/tesis.php?fitxa=54.
- [10]. García, M., "Eficiencia de los motores asíncronos en presencia de ondas no sinusoidales", [Tesis de master en eficiencia energética], Cienfuegos, Cuba: Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", 2004.
- [11]. Lu, B.; *et al.*, "A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring". IEEE Transactions on industrial application. 2008, vol. 44, no. 6, p. 1666–1674, ISSN 0093-9994.
- [12]. Gomez, J. R.; *et al.*, "Estimation of induction motor efficiency in-situ under unbalanced voltages using genetic algorithms", En: Proceedings of the 2008 international conference on electrical machines on. Vilamoura, Portugal, 2008, p. 1- 4, ISBN 978-1-4244-1736-0.
- [13]. Gharakhani, A., "Efficiency estimation of induction machines with limited measurements". [Tesis de doctorado], Quebec, Canadá: Concordia University, 2012, Disponible en: <http://spectrum.library.concordia.ca/974563/>
- [14]. Sousa, V.; *et al.*, "Aplicación de algoritmo de forraje bacterial para determinar en condiciones de campo la eficiencia de motores de inducción en presencia de desbalance de tensión". En: 7mo Taller de energía y medio ambiente on. Cienfuegos, Cuba, 2012, ISBN 978-959-257-323-9.
- [15]. Cunkas, M.; Sag, T., "Efficiency determination of induction motors using multi-objective evolutionary algorithms". Advances in engineering software. 2010, vol. 41, n. 2, p. 255–261, ISSN 0965-9978.
- [16]. Aspalli, M. S.; *et al.*, "Estimation of induction motor field efficiency for energy audit and management using genetic algorithm". En: Proceedings of the 3rd international conference on sensing technology on. Tainan, Taiwan, 2008, p. 440-445, ISBN 978-960-6766-71-8.
- [17]. Sakthivel, V.; *et al.*, "An accurate and economical approach for induction motor field efficiency estimation using bacterial foraging algorithm". Measurement. 2011, vol. 44, n. 4, p. 674–684, ISSN 0263-2241.
- [18]. Cummings, P., "Estimating effect of system harmonics on losses and temperature rise of squirrel-cage motors". IEEE Transactions on industry applications. 1986, vol. IA-22, n. 6, p. 1121-1126, ISSN 0093-9994.

- [19]. Ivanov-Smolenski, A.V; "Máquinas eléctricas". Tomo 2, Moscú: Mir Moscú, 1984, ISBN 5-03-0006184.
- [20]. Hurst, K. D.; Habetler, T. G., "Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives". IEEE Transactions on power electronic. 1996, vol. 11, no. 1, p. 66-73, ISSN 0885-8993.
- [21]. Mangaraj, B. B.; *et al.*, "Application of bacteria foraging algorithm for the design optimization of multi-objective Yagi-Uda array". International journal of RF and microwave computer-aided engineering. 2011, vol. 21, n. 1, p. 25-35, ISSN 1096-4290.
- [22]. Subramanian, S.; Padma, S., "Bacterial foraging algorithm based multiobjective optimal design of single phase transformer". Journal of computer science and engineering. 2011, vol. 6, p. 1-6, ISSN 2229-5631.
- [23]. Bhushan, B.; Singh, M., "Adaptive control of DC motor using bacterial foraging algorithm". Applied soft computing journal. 2011, vol. 11, n. 8, pp. 4913-4920, ISSN 1568-4946.
- [24]. "American national standard motors and generator", ANSI/NEMA MG1-2011, USA: American national standards institute, Inc., 2011.
- [25]. "IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems", IEEE Std 519-1992, New York, USA: IEEE, 1992, ISBN 1-55937-239-7.

AUTORES

Vladimir Sousa Santos

Ingeniero Electricista, Máster en Eficiencia Energética, Profesor Asistente, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

email: vsousa@ucf.edu.cu

Percy Viego Felipe

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

email: pviego@ucf.edu.cu

Julio Gómez Sarduy

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

email: jgomez@ucf.edu.cu

Marcos de Armas Teyra

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

email: marmas@ucf.edu.cu