



Nuevo procedimiento para la evaluación de los motores monofásicos de inducción

New approach to single-phase induction motors performance evaluation

Marcos A.- de Armas Teyra
Julio R. - Gómez Sarduy
Percy R.- Viego Felipe

Recibido: Agosto del 2012
Aprobado: Noviembre del 2012

Resumen/ Abstract

En el presente trabajo se desarrolló un algoritmo basado en el método del torque en el entrehierro que evalúa el comportamiento de los motores monofásicos de inducción y determina la potencia desarrollada, la eficiencia y otros parámetros operacionales a partir de las mediciones obtenidas de un analizador de redes instalado en los terminales del motor. Los resultados poseen adecuada precisión independientemente de si existen variaciones de tensión y de frecuencia, o si las tensiones están desfasadas o no e incluso donde la disposición espacial de los devanados pueda ser arbitraria con distinto número de vueltas en las bobinas así como diferentes calibres en los conductores. La solución se alcanza sin necesidad de conocer los parámetros del circuito equivalente. Como casos de estudio se muestra su aplicación a motores de fase dividida, capacitor permanente y asimétrico comparando los resultados con el método tradicional basado en la teoría de los campos rotatorios.

Palabras clave: evaluación operacional, motores monofásicos de inducción, método del torque en el entrehierro.

In this paper was developed an algorithm based in air gap torque method to evaluate the performance of single phase induction motors. The developed shaft power, efficiency and other parameters are determined using a power analyzer installed in motor terminals in field conditions. Results are adequate independently if there exist voltage or frequency deviation, voltage unbalance or different voltage phase between main and auxiliary winding and different spatial disposition of windings, wire size or winding distribution. The solution is obtained without knowledge of motor equivalent circuit's parameters. As cases its application to split phase, permanent capacitor and asymmetric motors are exposed comparing the results with the classic rotating field theory.

Key words: air gap torque method, performance evaluation, single phase induction motors.

INTRODUCCIÓN

Los motores monofásicos de inducción son ampliamente utilizados en aplicaciones de todo tipo. En particular se emplean en servicios domésticos y en el sector terciario o industrial donde no

esté disponible el servicio trifásico o donde la carga demande una potencia moderada. En general estos tipos de máquinas se encuentran comúnmente accionando bombas, ventiladores o compresores y en conjunto constituyen un importante consumidor de energía eléctrica al cual se asocia determinado impacto ambiental. Los métodos tradicionales de análisis utilizados durante ya más de un siglo, se basan en la modelación de estas máquinas fundamentada en la teoría de los circuitos magnéticos acoplados o en la teoría de los campos rotatorios para lo cual se deben conocer los parámetros de resistencias y reactancias del motor [1-7]. Estos datos en ocasiones son complicados o imposible de obtener en condiciones de campo. Bajo estas circunstancias es importante que se posean los algoritmos necesarios para evaluar el comportamiento de estos motores con una precisión adecuada, sin la necesidad de conocer los parámetros de sus circuitos equivalentes y poder determinar la potencia desarrollada, su eficiencia y otros parámetros operacionales, y a la vez, comprobar si es correcta o no su aplicación en específico. Este tipo de análisis exige mayor atención en tanto crece el costo de la energía y se deteriora el medioambiente. Las mejores prestaciones en muchos de estos casos pueden lograrse reemplazando el motor o mediante otras estrategias. Por supuesto, efectuar una adecuada evaluación es determinante en este empeño.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la teoría de circuitos las magnitudes escalares que varían siguiendo un orden sinusoidal, se representan en forma de funciones complejas cuyas proyecciones sobre el eje del tiempo, corresponden a los valores instantáneos de las tensiones, corrientes, concatenaciones de flujo, etc. En una máquina trifásica el valor instantáneo de la corriente i_a es igual a la proyección de la función compleja $I_A = |I_A| e^{j\omega t}$ sobre el eje del tiempo $i_a = \text{Re}[I_A] = |I_A| \cos \omega t$. Las magnitudes de las fases B y C, son funciones complejas del tiempo desplazadas $-2\pi/3$ y $-4\pi/3$ respectivamente de la fase A. De esta forma para una secuencia A, B, C, los sucesos en las fases B y C están retrasados simétricamente con relación a lo que ocurre en la fase A en esos ángulos respectivamente como se muestra en la figura 1.

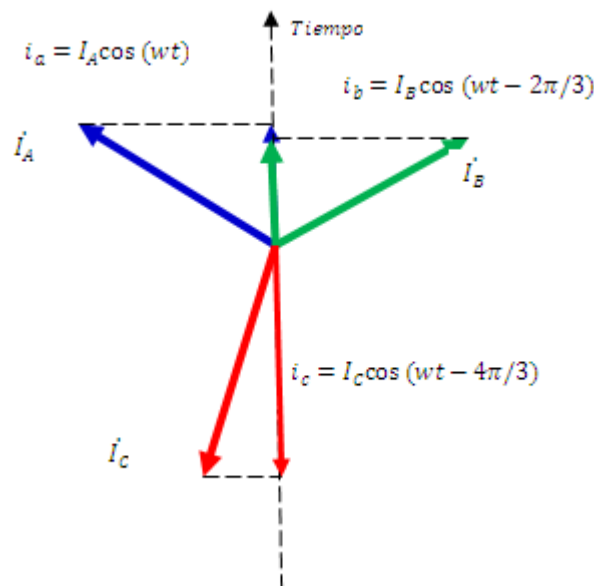


Fig. 1 Representación compleja temporal de las magnitudes trifásicas.

En la teoría de las máquinas eléctricas además de la representación compleja en el tiempo, se utiliza la representación en el plano complejo espacial o la representación vectorial espacial de las corrientes, voltajes y concatenaciones de flujo. En este caso, se debe tener presente, que el vector espacial rota a la velocidad ωt y los ejes de las fases están fijos. De este modo, primero sucederán los fenómenos en la fase A, después en la B y finalmente en la C por lo que los ejes de las fases B y C están desplazados en el sentido de giro positivo de los ángulos o en el sentido de giro del vector espacial. De forma similar al caso temporal el valor instantáneo de la corriente se determina como la proyección de la función compleja espacial sobre el eje de la fase correspondiente como se muestra en la figura 2.

Sean las corrientes de las fases las dadas por la expresión:

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$$

Se define el vector espacial de corriente por: [8-9]

$$i_s = k(i_{sa} + ai_{sb} + a^2i_{sc}) \quad (1)$$

Donde: a y a^2 Son los operadores $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ y $e^{j\frac{4\pi}{3}}$ respectivamente y $k = 2/3$

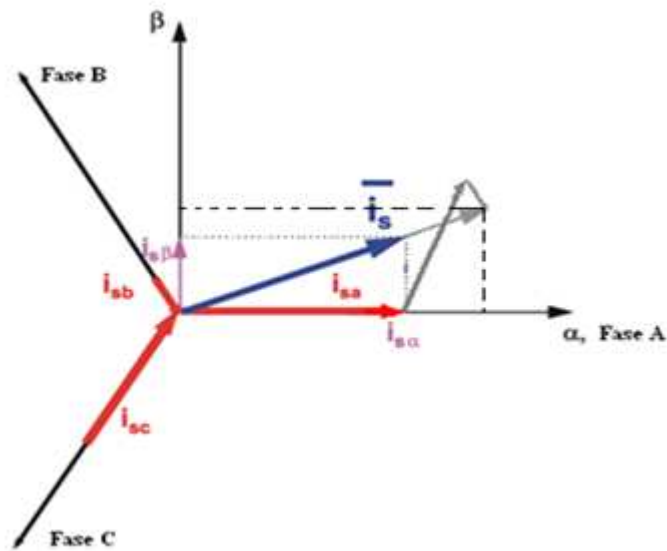


Fig. 2 Representación compleja espacial de las magnitudes trifásicas.

En un caso generalizado, como el mostrado en la figura 3, la máquina puede estar formada por devanados con diferente factor de distribución, calibres en los conductores, número de vueltas y además estar ubicados espacialmente ángulos α y β diferentes y arbitrarios.

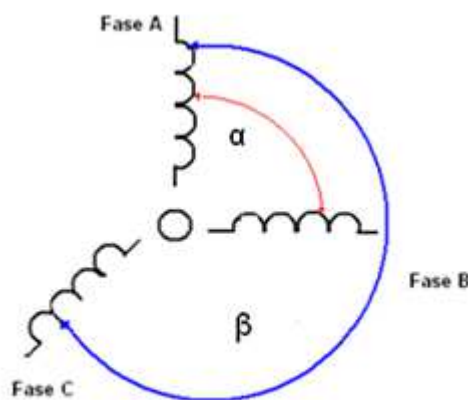


Fig. 3 Máquina asimétrica espacialmente.

En una máquina generalizada en similitud con (1) se puede definir el vector espacial de la corriente por:

$$i_s = k(i_{sa} + \alpha i_{sb} + \beta i_{sc}) \quad (2)$$

Tanto la tensión como la corriente y el flujo concatenado se expresan por los vectores espaciales correspondientes.

El torque electromagnético está dada por.

$$T_{AG} = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \operatorname{Re}(jw\lambda_s i_s^*) \quad (3)$$

El vector espacial definido en (2), puede ser expresado en términos de sus componentes sobre dos ejes denominados d y q desplazados 90 grados y fijos en el estator:

$$i_s = i_{sd} + j i_{sq} \quad (4)$$

Igualmente las concatenaciones de flujo estarán dadas por:

$$\lambda_s = \lambda_{sd} + j \lambda_{sq} \quad (5)$$

De donde al sustituir en (4) y (5) en (3) se obtiene:

$$T_{AG} = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \operatorname{Re}(\lambda_{sd} + j \lambda_{sq}) \times (i_{sd} - j i_{sq}) \quad (6)$$

Las corrientes i_{sd} e i_{sq} son corrientes ficticias que están relacionadas con las corrientes reales en las fases a, b y c por las expresiones:

$$i_{sd} = k(i_{sa} + i_{sb} \cos \alpha + i_{sc} \cos \beta) \quad (7)$$

$$i_{sq} = k(i_{sb} \operatorname{sen} \alpha + i_{sc} \operatorname{sen} \beta) \quad (8)$$

Los vectores espaciales de tensiones, flujos magnéticos, etc., son definidos ecuaciones similares.

$$\lambda_{sd} = k(\lambda_{sa} + \lambda_{sb} \cos \alpha + \lambda_{sc} \cos \beta) \quad (9)$$

$$\lambda_{sq} = k(\lambda_{sb} \operatorname{sen} \alpha + \lambda_{sc} \operatorname{sen} \beta) \quad (10)$$

De (6) el torque electromagnético expresado en términos de los componentes de flujo y de corriente del vector espacial en los ejes d y q está dado por:

$$T_{AG} = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \operatorname{Re}(\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad (11)$$

Luego de sustituir (7), (8), (9) y (10) en (11) y desarrollar obtiene la expresión:

$$T_{AG} = \frac{3}{2} \times \frac{P \times k^2}{2} \left[\begin{aligned} & -i_{sa} (\lambda_{sb} \operatorname{sen} \alpha + \lambda_{sc} \operatorname{sen} \beta) + i_{sb} (\lambda_{sa} \operatorname{sen} \alpha + \lambda_{sc} \cos \beta \operatorname{sen} \alpha - \lambda_{sc} \cos \alpha \operatorname{sen} \beta) \\ & + i_{sc} (\lambda_{sa} \operatorname{sen} \beta + \lambda_{sb} \cos \alpha \operatorname{sen} \beta - \lambda_{sb} \operatorname{sen} \alpha \cos \beta) \end{aligned} \right] \quad (12)$$

Con la ecuación (12), por su deducción generalizada, se puede determinar el torque en el entrehierro de cualquier tipo de máquina de tres devanados y en particular permite evaluar las características operacionales de los diversos tipos de motores monofásicos.

La potencia de entrada se calcula a partir de los voltajes y corrientes de línea mediante la expresión:

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \tag{13}$$

Si se conoce el torque en el entrehierro; T_{AG} , el torque y la potencia en el eje y la eficiencia se determinan según: [10-15]

$$T_{EJE} = T_{AG} - \frac{(P_{FBN} + P_{AD})}{\omega_r} \tag{14}$$

$$P_{EJE} = T_{EJE} \times \omega_r \tag{15}$$

$$Eficiencia = P_{EJE} / P \tag{16}$$

Donde ω_r es la velocidad de rotación de la máquina, P_{FBN} son las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo o pérdidas rotacionales y P_{AD} las pérdidas adicionales.

El diagrama que expresa gráficamente los flujos de potencia en un motor de inducción es el mostrado en la figura 4.

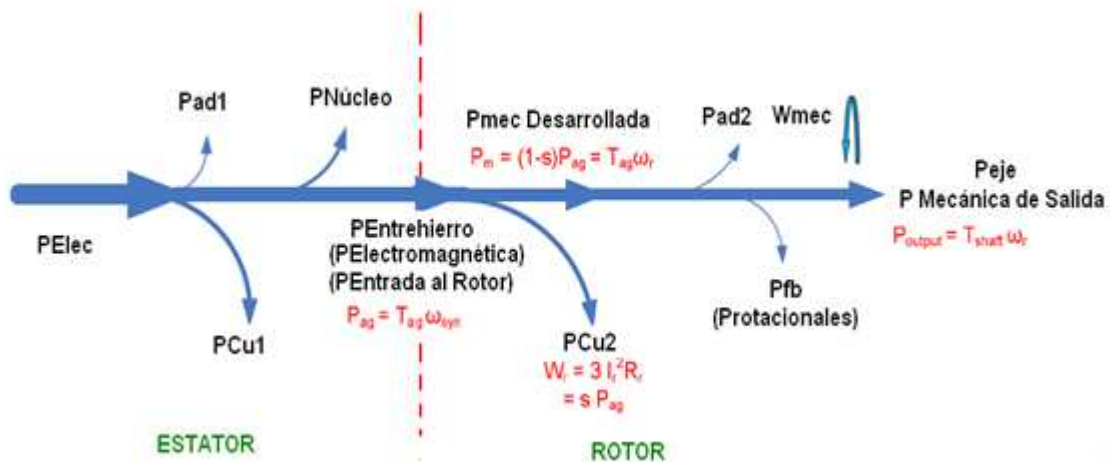


Fig.4 Flujo de potencia.

Para poder aplicar la ecuación del torque en el entrehierro generalizada o particularizada a una máquina en específico sin el empleo de sensores especiales, es necesario determinar previamente la posición angular de las tensiones y corrientes. Esta posición espacial de los vectores se determina a partir de los valores efectivos de potencia, tensión y corriente arrojados por las mediciones de un analizador de redes instalado en los terminales del motor. Con esta información se construyen las funciones de las ecuaciones de tensión y corriente que son introducidas en las ecuaciones que permiten determinar el torque en el entrehierro, la potencia en el eje, las pérdidas y la eficiencia. El resto de las informaciones requeridas son la medición de la velocidad de rotación del motor, la resistencia de los devanados y las pérdidas rotacionales consideradas generalmente constantes. Las pérdidas adicionales no son comúnmente consideradas en los análisis operacionales de los motores monofásicos llevados a cabo por la teoría de los campos rotatorios y este procedimiento sigue igual patrón. [6-7].

Desarrollo de la ecuación general para un motor de fase dividida

El esquema de una máquina monofásica de fase dividida, con los devanados de marcha y auxiliar a 90 grados eléctricos uno de otro y con el devanado auxiliar desconectado se muestra en la figura 5.

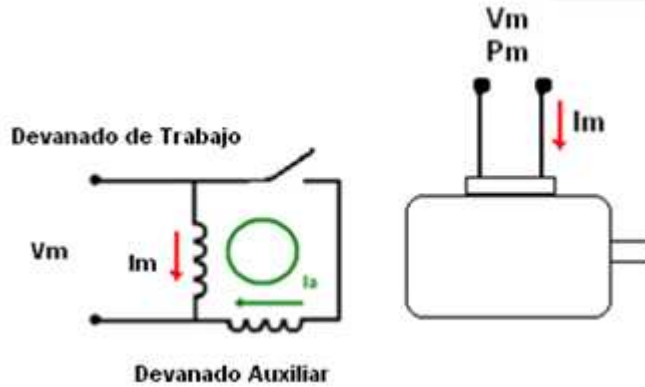


Fig. 5 Motor de fase dividida.

La potencia demandada está dada por:

$$P = v_m i_m \tag{17}$$

Para este motor la tensión en el devanado de marcha se determina de acuerdo con:

$$v_m = i_m r_m + p \lambda_m \tag{18}$$

Donde λ_m representa la concatenación de flujo resultante en el devanado de marcha y p es el operador dx/dt .

De acuerdo con (18) el flujo concatenado está dada por:

$$\lambda_m = \int_0^{2\pi} (v_m - i_m r_m) dt \tag{19}$$

Dado que:

$$\begin{aligned} i_{sa} &= i_m \\ i_{sb} &= 0 \\ i_{sc} &= 0 \end{aligned}$$

Luego de algunas operaciones matemáticas se obtiene:

$$T_{AG} = \frac{\sqrt{3}P}{6} \left[i_m \times \int_0^{2\pi} (v_m - i_m r_m) dt \right] \tag{20}$$

La ecuación (24), permite determinar el torque en el entrehierro. A partir de este valor y conocidas las pérdidas rotacionales y la velocidad de rotación, se determina el torque en el eje empleando (18) y de (19) y (20) la potencia en el eje y la eficiencia. La potencia de entrada se determina de (21) y es igual a la medida por el analizador de redes. Al conocer la potencia de salida o en el eje, las pérdidas totales son la diferencia entre la potencia de entrada y ésta. Las pérdidas en el

estator son el producto de las corrientes que circulan por los devanados elevadas al cuadrado y multiplicadas por las resistencias correspondientes. Las pérdidas del rotor se obtienen al restar de las pérdidas totales las rotacionales y de cobre en el estator.

Desarrollo de la ecuación para un motor de capacitor permanente

El esquema de una máquina monofásica con capacitor permanente con los devanados de marcha y auxiliar a 90 grados eléctricos, se muestra en la figura 6. La potencia que demandada por el motor en ese caso está dada por:

$$P = v_m i_m + v_a i_a \tag{21}$$

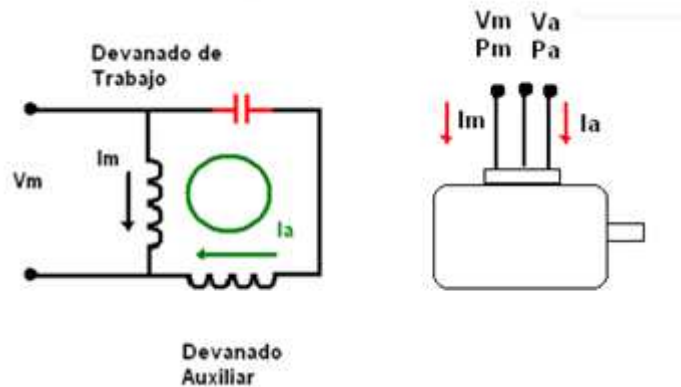


Fig. 6 Motor de inducción de capacitor permanente.

Las tensiones en cada uno de los devanados se determinan de acuerdo con:

$$v_m = i_m r_m + p \lambda_m \tag{22}$$

$$v_a = i_a [(r_a + r_c) - jX_c] + p \lambda_a \tag{23}$$

Donde:

r_m y r_a son las resistencias del devanado de trabajo y auxiliar respectivamente, r_c y $X_c = 1/2\pi fC$ son la resistencia interna y la reactancia capacitiva del capacitor.

$$Z_a = (r_a + r_c) - jX_c$$

En este caso las concatenaciones de flujo correspondientes están dadas por:

$$\lambda_a = \int_0^{2\pi} (v_a - i_a Z_a) dt = \int_0^{2\pi} E_a dt \tag{24}$$

$$\lambda_m = \int_0^{2\pi} (v_m - i_m r_m) dt \tag{25}$$

Tomando en consideración que:

$$\begin{aligned} i_{sa} &= i_a \\ i_{sb} &= i_m \\ i_{sc} &= 0 \\ v_m &= v_a \\ \alpha &= 90 \end{aligned}$$

Y luego de algunas transformaciones matemáticas se obtiene:

$$T_{AG} = \frac{\sqrt{3}P}{6} \left[i_m \times \int_0^{2\pi} (v_m - i_m r_m) dt - i_a \int_0^{2\pi} E_a dt \right] \quad (26)$$

Método generalizado aplicado a un motor monofásico con devanados desplazados 120 grados y tensiones desfasadas 90 grados eléctricos.

El esquema de un motor monofásico asimétrico, con los devanados desplazados 120 grados espaciales uno de otro, se muestra en la figura 7.

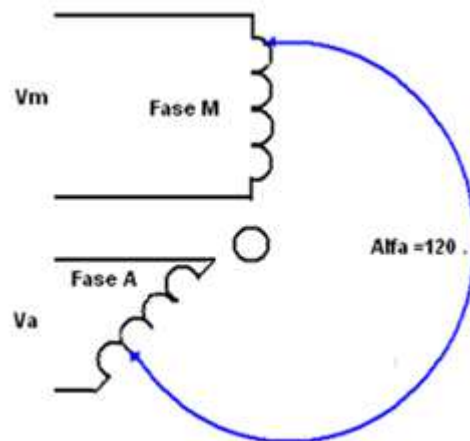


Fig. 7 Máquina monofásica asimétrica.

La potencia de entrada en ese caso está dada por:

$$P = v_m i_m + v_a i_a \quad (27)$$

Las tensiones y las concatenaciones de flujo en cada uno de los devanados están dadas por:

$$v_m = i_m r_m + p \lambda_m \quad (28)$$

$$v_a = i_a r_a + p \lambda_a \quad (29)$$

Particularizando y tomando en consideración que:

$$\begin{aligned}
 i_{sa} &= i_a \\
 i_{sb} &= i_m \\
 i_{sc} &= 0 \\
 v_m &= v_a \\
 \alpha &= 120 \\
 v_m &= V_m \\
 v_a &= V_m e^{j\varphi}
 \end{aligned}$$

De (12) se obtiene:

$$T_{AG} = \frac{\sqrt{3}P}{6} \left[i_m \times \int_0^{2\pi} (v_a - i_a r_a) dt - i_a \int_0^{2\pi} (v_m - i_m r_m) dt \right] \quad (30)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para validar las ecuaciones (24), (30) y (37), que determinan el torque en el entrehierro y permiten calcular la eficiencia y la potencia de salida, se efectuaron evaluaciones de diferentes tipos de motores tanto por el método tradicional de la teoría de los campos rotatorios como por el algoritmo desarrollado. Con este propósito se diseñó un programa concebido en MATLAB que resuelve las integrales correspondientes a cada tipo de motor evaluado empleando matemática simbólica. También pueden ser resueltas por un método numérico lo cual incrementaría la velocidad de cómputo. Pero esto no es decisivo. Las posiciones exactas de los fasores de tensión y corriente se determinan de las mediciones de tensión, corriente, potencia y factor de potencia arrojadas por un analizador de redes instalado en los terminales de cada motor analizado. La velocidad de rotación y las pérdidas rotacionales son datos conocidos. El resto del procedimiento es el clásico al considerar los efectos de los campos "forward" y "backward" y sus circuitos y ecuaciones correspondientes.

En la tabla 1, se muestran los resultados de los cálculos efectuados a un motor de ¼ HP, 110 V, 4 polos, 1710 rpm, 60 Hz, una resistencia del devanado de marcha de 2.02 Ohm y 37 W de pérdidas rotacionales, por los métodos de los campos rotatorios y por el algoritmo generalizado propuesto en el presente trabajo; **AGTG**.

Tabla 1. Datos operacionales del motor monofásico de fase dividida.		
Parámetro	C. Rotatorios	AGTG
Tensión Promedio (V)	110	110
Corriente Promedio (A)	3.59	3.59
Potencia nominal (W)	186.45 (1/4 HP)	186.45 (1/4 HP)
Velocidad (rpm)	1710	1710
Potencia Media de Entrada (W)	244.9	244.01
Potencia Media en el Eje (W)	146.04	133.29
Factor de Potencia Medio	0.619	0.62
Potencia Reactiva Media (VAr)	310.15	310.50
Potencia Aparente Media (VA)	395.63	394.90
Estado de Carga Medio	0.78	0.71
Pérdidas de FB (W)	13	13
Pérdidas de Núcleo (W)	24	24
Pérdidas de Cobre (W)	25.78	26.03
Perdidas en el rotor (W)	35.58	47.68
Pérdidas Medias Totales (W)	98.36	110.72
Eficiencia Media	0.60	0.55

Como puede observarse tanto la potencia de salida como la eficiencia resultan ligeramente inferiores cuando se determinan por el **AGTG**. Ello se debe a que existen un grupo de pérdidas adicionales en la máquina que ocurren en el estator del motor que no son consideradas por el método de los campos rotatorios. Estas pérdidas se incluyen implícitamente en el método del **AGTG**. Entre ellas se comprenden las pérdidas debidas a los armónicos espaciales de flujo, al efecto superficial, a la apertura de la ranura, estado de saturación, etc. [13].

En la tabla 2, se muestran los resultados de los cálculos llevados a cabo en un motor de capacitor permanente de 25 W, 110 V, 4 polos, 1400 rpm, 60 Hz, una resistencia del devanado de marcha y auxiliar de 114.4 y 168 Ohm, 1920 y 2200 vueltas en el devanado de marcha y auxiliar respectivamente, pérdidas rotacionales de 5 W, un capacitor de 3,5 μ F por los métodos de los campos rotatorios y por el algoritmo del **AGTG**.

Tabla 2. Datos operacionales del motor monofásico con capacitor permanente.		
Parámetro	C. Rotatorios	AGTG
Tensión Promedio	110	110
Corriente Promedio	0.36	0.36
Potencia nominal (W)	25	25
Potencia Media de Entrada m (W)	17.88	17.88
Potencia Media de Entrada a (W)	21.37	21.87
Potencia Media de Entrada Total (W)	39.25	39.75
Potencia Media en el Eje (W)	15.53	14.13
Momento medio en el eje (Nm)	0.105	0.13
Factor de Potencia Medio	0.999	1.00
Potencia Reactiva Media (VAr)	-	-
Potencia Aparente Media (VA)	39.25	39.25
Estado de Carga Medio	0.776	0.708
Pérdidas de PfbN (W)	5	5
Pérdidas de Cobre (W)	10.95	10.94
Pérdidas en el rotor (W)	7.75	9.17
Pérdidas Medias Totales (W)	23.7	25.12
Velocidad (rpm)	1400	1400
Eficiencia Media	39.5	36.0

En la tabla 3, se muestran comparativamente los resultados de la evaluación de un motor de 5 HP (3731.34 W), 220 V, 60 Hz con una relación unitaria de vueltas entre los devanados, 4 polos, pérdidas rotacionales de 120 W, girando a 1620 rpm y con devanados desplazados 120 grados en el espacio donde la tensión del devanado auxiliar adelanta en 90 grados a la tensión del devanado de marcha.

Como puede observarse, las desviaciones son similares a las presentadas en el caso de los motores monofásicos de fase dividida y de capacitor permanente. Es decir: Una eficiencia ligeramente inferior con mayores pérdidas totales. Finalmente debe considerarse que no es común realizar este análisis ahora posible con una herramienta de campo como la propuesta en este trabajo y que su aplicación es más relevante en estos tiempos de incremento del costo de la energía, dificultades financieras y deterioro creciente del medioambiente.

Tabla 3. Datos operacionales del motor monofásico asimétrico.		
Parámetro	C. Rotatorios	AGTG
Tensión Promedio dev m (V)	220	220
Tensión Promedio dev a (V)	220	220
Corriente Promedio m (A)	19.0	19.0
Corriente Promedio a (A)	14.06	14.06
Potencia nominal (W)	3670	3670
Velocidad (rpm)	1620	1620
Potencia Media de Entrada m (W)	4123.52	4123.0
Potencia Media de Entrada a (W)	547.76	556.78
Potencia de Entrada Total (W)	4671.28	4679.9
Potencia Reactiva de Total (Var)	3729.93	3730.7
Potencia Aparente Total (VA)	5977.73	5984.8
Potencia Media en el Eje (W)	2750.4	2402.84
Factor de Potencia Medio	0.78	0.78
Estado de Carga Medio	0.73	0.65
Pérdidas de FBN (W)	120	120
Pérdidas de Cobre m (W)	722.0	722.0
Pérdidas de Cobre a (W)	395.4	395.37
Pérdidas Medias Totales (W)	1798.14	2277.01
Eficiencia Media	0.58	0.51

CONCLUSIONES

1. El método desarrollado constituye una nueva forma de evaluar, con datos de poca complejidad y disponibles en el estado del arte actual, las prestaciones de los motores monofásicos de inducción.
2. El procedimiento puede ser aplicado a cualquier tipo de motor en servicio incluyendo máquinas trifásicas alimentadas o no con redes monofásicas, motores monofásicos de polos sombreados u otros diseños especiales.

REFERENCIAS

- [1]. Christos Mademlis, Iordanis Kioskeridis, and Theodoros Theodoulidis "Optimization of Single-Phase Induction Motors— Part I: Maximum Energy Efficiency Control". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 1, march 2005 p.p. 187-195
- [2]. Christos Mademlis, Iordanis Kioskeridis, and Theodoros Theodoulidis "Optimization of Single-Phase Induction Motors— Part II: Magnetic and Torque Performance under Optimal Control". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.20, n.1, march 2005, p. 196-203.
- [3]. Claus B. Rasmussen and T. J. E. Miller, "Revolving-Field Polygon Technique for Performance Prediction of Single-Phase Induction Motors" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 5, September/October 2003 pp 1300-1305
- [4]. IEEE Std 114-2010. IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors. 2010, p. 1-44, ISBN: 978-0-7381-6478-6, Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5682868>.
- [5]. N. Naewngerndee and T. Kulworawanichpong "Voltage-dependent Parameter Refinement for Single-phase Induction Motors using Genetic Algorithms" WSEAS Transactions on Systems and Control. Issue 1, Volume 4, January 2009. ISSN: 1991-8763 pp 45-54
- [6]. Fitzgerald, Kingsley and Umans "Electric Machinery " Mc Graw Hill, ISBN 0-07-123010-6,2003
- [7]. Zerquera Izquierdo Mariano. "Motores de inducción monofásicos y bifásicos". Editorial Félix Varela. ISBN 969-07-0025-X, La Habana, 1992, 375 p.
- [8]. Nguyen Phung Quang and Jorg-Andreas Dittrich "Vector Control of Three Phase AC Machines, System Development in the Practice " Springer ISBN 978-3-540-79028-0

- [9]. R. Krishnan "Electric Motor Drives - Modeling, Analysis, and Control", Prentice Hall , ISBN 0-13-091014-78-7 2001
- [10]. Bin Lu, Thomas G. Habetler and Ronald G. Harley "A Nonintrusive and In Service Motor Efficiency Estimation Method Using Air Gap Torque with Considerations of Condition Monitoring" in Proc. IEEE Industry Applications Annual Meeting, Vol 3, pag. 1533-1540, October 2006
- [11]. Bin Lu, Thomas G. Habetler and Ronald G. Harley "A Survey of Efficiency Estimation Methods of in Service Induction Motors with Considerations of Condition Monitoring" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 42, No 4. pag. 924-933 July/August 2006
- [12]. J.Hsu and B.P. Scoggins "Field test of motor efficiency and load changes through air gap torque" IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 10, pp 477 - 483, September 1995.
- [13]. "Considerations on In Field Induction Motor Load Estimation Methods". Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines. Paper ID 1313.
- [14]. B. Herndler, Dr P. Barendse and Dr M.A. Khan "Considerations for Improving the Non-Intrusive Estimation of Induction Machines Using the Air Gap Torque Method" IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011
- [15]. R. Figura, E. Szychta, L. Szychta, "In service Efficiency Estimation with use Modified –Air Gap Torque Method for Squirrel-cage Induction". Electronics and Electrical Engineering, No 8, ISSN 1392 – 1215, 2011

AUTORES

Marcos Alberto de Armas Teyra

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.
e-mail: marmas@ucf.edu.cu

Julio Rafael Gómez Sarduy

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.
e-mail: jgomez@ucf.edu.cu

Percy Rafael Viego Felipe

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.
e-mail: pviego@ucf.edu.cu