



Eficiencia de los motores de inducción con carga cíclica

Elías de la Rosa
José E. Montejo
Percy Viego
Ángel Costa

Recibido: Octubre del 2006
Aprobado: Diciembre del 2006

Resumen / Abstract

Se propone un nuevo método para determinar la eficiencia de trabajo de los motores de inducción que accionan cargas cíclicas tales como bombas reciprocantes, martinets, etc. El método se basa en la segregación de pérdidas, y la determinación del gráfico de corriente y la energía total del ciclo. Se muestra una comprobación experimental basada en un método de Monte Carlo.

Palabras clave: Motores de inducción, eficiencia en motores de inducción, eficiencia en máquinas eléctricas

A new method for finding the working efficiency of the induction motors moving cyclic loads is proposed. This type of loading is frequent in mechanism like piston pumps, hammers, etc. The method is based in the losses segregation and the determination of the current graphic and the total energy in the cycle. An experimental proof based on Monte Carlo method is shown.

Key words: Induction motors, induction motors efficiencies, electric machines efficiency

INTRODUCCIÓN

Con el advenimiento de la crisis energética mundial, que ha seguido profundizándose en los últimos años debido al continuo crecimiento de los precios y escasez cada vez mayor del petróleo, el tema de la eficiencia de trabajo de los motores eléctricos se ha hecho cada vez más importante.

A ello se han dedicado numerosos artículos en la literatura mundial, apareciendo periódicamente trabajos sobre métodos de determinación de la eficiencia de trabajo de los motores eléctricos de inducción en la industria. Estos métodos se refieren casi siempre al caso particular de motores trabajando con carga continua y constante como es el caso de bombas centrífugas, ventiladores, etcétera.

Sin embargo, existen numerosas cargas que por su naturaleza varían cíclicamente en un corto tiempo. Estas se encuentran especialmente en las industrias metalmeccánica y de conformación del plástico, del petróleo y la azucarera. Están representadas por cizallas, sierras mecánicas, inyectoras de plástico, prensas de volante, bombas reciprocantes y muchas otras más.

En la revisión bibliográfica realizada, solo se localizaron dos artículos de Durham^{1,2} que abordan la determinación de la eficiencia con cargas cíclicas, y aplicados al caso particular de las bombas de pozos de petróleo. Este autor utiliza las curvas dinámicas de las bombas, y la curva de eficiencia del motor, establecidas por los fabricantes, lo que en ocasiones

o no se conoce, o su exactitud no es correcta, al reflejar el valor promedio de un grupo de equipos. No se encontró ningún método de determinación de la eficiencia mediante mediciones directas en la industria para este tipo de cargas.

Por todo lo anterior es que se desarrolló un método para determinar la eficiencia de trabajo de los motores asincrónicos que mueven cargas cíclicas que pueda ser utilizado en las condiciones de la industria.

PÉRDIDAS Y EFICIENCIA EN ACCIONAMIENTOS CÍCLICOS GOBERNADOS POR MOTORES DE INDUCCIÓN

Para el cálculo de la eficiencia de estos accionamientos se propone un método basado en la segregación de pérdidas por ser uno de los más sencillos y alcanzar una buena exactitud en los cálculos.^{3,4}

Para ello se trabajan todas las magnitudes en términos de energía, debido a que las pérdidas y las potencias varían en el tiempo al no ser constante la carga.

Se ha tratado que el método sea fácil de realizar en la industria, teniendo en cuenta la posible escasez de recursos para la medición y la imposibilidad de parar algún ciclo de producción solo para realizar pruebas.

Para la medición de la eficiencia en la industria es necesaria la realización de un ensayo de vacío, el cual puede ser efectuado después del mantenimiento o desacoplado del motor de la carga durante las paradas, en el mismo deben ser medidas las siguientes magnitudes:

- P_0 : Potencia de vacío.
- I_0 : Corriente de vacío.
- V_0 : Tensión de vacío.

Una prueba de medición de resistencia, donde debe medirse la resistencia entre dos terminales del estator (R_{cd}).

La resistencia debe ser corregida a la temperatura de trabajo, aceptándose en la práctica que la misma dependa del tipo de aislamiento (tabla 1).

Dicha magnitud puede ser medida con un puente de Wheastone o preferiblemente por el método del voltímetro y el amperímetro de corriente directa y se mide entre dos terminales cualesquiera independientemente de si la conexión es delta o estrella.⁵

TABLA 1
Corrección de temperatura^{5,6}

Clase de aislamiento	Temperatura (°C)	
	IEC	IEEE
A	75	75
E	75	-
B	95	95
F	115	115
H	130	130

Además, se realizará un ensayo con carga del motor en su puesto de trabajo, debiéndose medir las siguientes magnitudes:

E_1 : Energía de entrada por ciclo.

$I_{1(t)}$: Gráfico de corriente de línea.

V_1 : Tensión de línea.

T : Tiempo de duración del ciclo o ciclos.

La corriente de línea debe ser medida con un instrumento que permita conocer la característica de la corriente en función del tiempo, este puede ser un amperímetro registrador o un analizador industrial de redes.

Con las magnitudes medidas se procede al cálculo de las pérdidas de energía por las siguientes expresiones.

$$P_{rot} = P_0 (I_0^2 R_{cd} 3/2) \quad \dots(1)$$

$$E_{rot} = p_{rot} T \quad \dots(2)$$

donde:

p_{rot} : Pérdidas rotacionales.

E_{ro} : Pérdidas de energía rotacionales.

Las pérdidas rotacionales pueden dividirse en pérdidas mecánicas y de hierro, pero como esto no es posible en la industria, ya que se necesita una fuente de tensión trifásica variable, difícil de encontrar en ella, se hace necesario tomar las pérdidas rotacionales en su conjunto y contemplarlas dentro de las pérdidas del estator (diagrama energético modificado).

En la figura 1 se muestra el diagrama energético modificado.

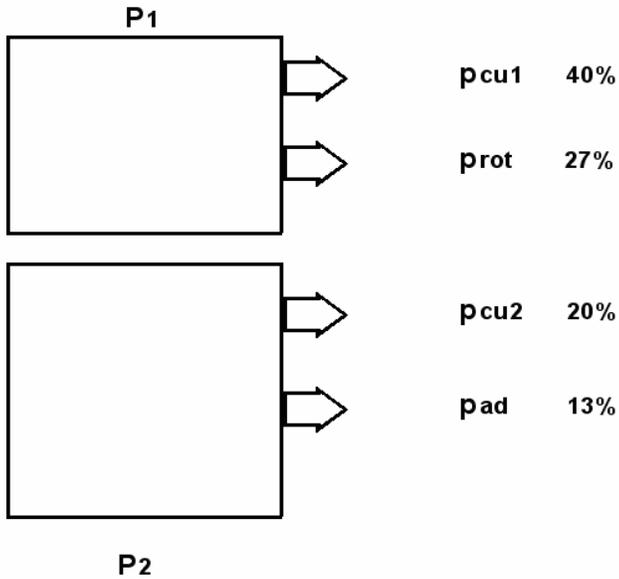


Diagrama energético modificado.

1

Las pérdidas de energía en el estator se calculan según las expresiones siguientes:

$$P_{cu1(t)} = \frac{3}{2} I_{1(t)}^2 R_{cd} \quad \dots(3)$$

$$E_{cu1} = \int_0^T P_{cu1(t)} dt \quad \dots(4)$$

donde:

E_{cu1} : Pérdidas de energía en las resistencias de los devanados del estator.

$P_{cu1(t)}$: Pérdidas de cobre del rotor en el tiempo.

Sustituyendo (3) en (4):

$$E_{cu1} = \frac{3}{2} R_{cd} \int_0^T I_{1(t)}^2 dt \quad \dots(5)$$

donde:

$\int_0^T I_{1(t)}^2 dt$ es el área bajo la curva de $V_s t$, para un período.

Como se conoce la curva de $I_{(t)}^2 I(1) V_s t$, es fácil determinar gráficamente $I_{(t)}^2 V_s t$, el área bajo esta curva puede calcularse mediante los métodos numéricos de integración que pueden ser el de los trapecios, Simpson, u otro apropiado.

Haciendo corresponder el valor de dicha área a una variable se obtiene que:

$$\int_0^T I_{1(t)}^2 dt = A \quad \dots(6)$$

Entonces las pérdidas de cobre del estator serán:

$$E_{cu1} = \frac{3}{2} R_{cd} A \quad \dots(7)$$

La energía electromagnética desde el estator al rotor será igual a:

$$E_{em} = E_1 - (E_{cu1} + E_{rot}) \quad \dots(8)$$

donde:

E_{em} : Energía electromagnética transmitida del estator al rotor.

Las pérdidas de energía en el rotor se determinan por las expresiones que siguen:

$$E_{cu2} = \int_0^T P_{cu2(t)} dt \quad \dots(9)$$

donde:

E_{cu2} : Pérdidas de energía en la resistencia de los devanados del rotor.

Pero como:

$$P_{cu2} = m r_2 I_2^2 \quad \dots(10)$$

Y del circuito equivalente⁷ se sabe que:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2 \quad \dots(11)$$

Haciendo:

$$\bar{I}_0 \approx j |I_0| \quad \dots(12)$$

Si se desprecia la componente activa de la corriente de vacío ya que esta es casi netamente reactiva y se toma que:⁸

$$\bar{I}_2 \approx |I_2| \quad \dots(13)$$

Ya que para deslizamientos pequeños⁷ el término

$$\frac{R_2}{S} \gg X_{cc}^7$$

Entonces del diagrama fasorial de la máquina se tiene que:⁷

$$I_2^2 = I_1^2 - I_0^2 \quad \dots(14)$$

Y como las pérdidas de cobre del rotor se pueden determinar similarmente a las del estator por la expresión:

$$E_{cu2} = \int_0^T I_{2(t)}^2 r_2 m dt \quad \dots(15)$$

Extrayendo los términos constantes de la integral:

$$E_{cu2} = r_2 m \int_0^T I_{2(t)}^2 dt \quad \dots(16)$$

Sustituyendo (14) en (16):

$$E_{cu2} = r_2 m \int_0^T (I_{1(t)}^2 - I_{0(t)}^2) dt \quad \dots(17)$$

Aplicando propiedades de integración, teniendo en cuenta que I_0 es constante y sustituyendo (6) en (17) se obtiene que:

$$E_{cu2} = r_2 m [A - I_0^2 T] \quad \dots(18)$$

Pero del circuito equivalente⁷ también se conoce que:

$$P_{mec} = m_1 I_2^2 \frac{r_2 (1-S)}{S} \quad \dots(19)$$

donde:

P_{mec} : Potencia mecánica del motor.

Considerando que $S = S_n$ para potencia nominal y $P_n \approx P_{mec}$ entonces la resistencia del rotor se calculará por los datos de chapa como:

$$r_2 = \frac{P_n S_n}{(1-S_n) m_1 (I_n^2 - I_0^2)} \quad \dots(20)$$

Sustituyendo se obtiene que:

$$E_{cu2} = \frac{P_n S_n}{(1-S_n)(I_n^2 - I_0^2)} [A - I_0^2 T] \quad \dots(21)$$

Las pérdidas de energía adicionales se calculan como un porcentaje de la nominal de la máquina y que son proporcionales al estado de carga lo que esta basado en las recomendaciones de la norma IEC 60034-2,⁹ su expresión es la siguiente:

$$E_{ad} = 0,005 \frac{P_n}{I_n^2} \int_0^T I_{1(t)}^2 dt \quad \dots(22)$$

Sustituyendo (6) en (22) se obtiene que:

$$E_{ad} = 0,005 \frac{P_n}{I_n^2} A \quad \dots(23)$$

donde:

E_{pad} : Energía de las pérdidas adicionales.

La eficiencia del accionamiento es calculado por la conocida expresión basada en las pérdidas que se puede expresar en términos energéticos como:

$$\eta = \frac{E_1 - \sum E_p}{E_1} \quad \dots(24)$$

donde:

$\sum E_p$: Sumatoria de las pérdidas de energía.

Se calcula como:

$$\sum E_p = E_{cu1} + E_{cu2} + E_{rot} + E_{ad} \quad \dots(25)$$

COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO UTILIZANDO MONTECARLO

Para tener una validación del método propuesto (método A), se hizo el cálculo de la eficiencia a tres motores para cargas escalón diferentes mediante una simulación Montecarlo, comparando de este modo los resultados con los obtenidos por medio del cálculo de las pérdidas durante cada período del escalón (método B), determinando las pérdidas de energía totales y la eficiencia. Esto es posible ya que se hizo una calibración del motor 1 utilizando el método de segregación de pérdidas por la norma BS - 269¹⁰ y los motores 2 y 3 se calibraron por el método del diagrama circular según la norma IEC-37.¹¹ Estos motores forman parte de un lote calibrado para un cliente industrial, sin tener en cuenta que se utilizarían en este trabajo, por lo que los datos

se consideran confiables. En las tablas de la 2 a la 6, se muestran los datos de chapa y de ensayos.

TABLA 2
Datos de chapa de los motores

No.	P_n	I_n	V_n	N_n	N_1	S_n
	(kW)	(A)	(V)	(r/min)	(r/min)	(%)
1	3,0	13	220	1 750	1 800	2,77
2	2,05	5,5	220	1 750	1 800	2,77
3	5,5	20,1	220	1 750	1 800	2,77

TABLA 3
Datos de las pruebas de vacío

Motor	P_o (W)	I_o (A)	V_o (V)
1	286	6,5	220
2	190	1,1	220
3	300	6,9	220

TABLA 4
Pruebas con carga

Motor	V_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	S (%)
1	228	9,2	1 820	2,77
2	220	5,0	1 600	3,00
3	220	11,75	3 436	2,8

TABLA 5
Medición de resistencia

Motor	Resistencia a la temperatura ambiente (Ω)	Resistencia a la temperatura de trabajo (Ω)
1	1,01	1,37
2	3,08	3,6
3	0,49	0,58

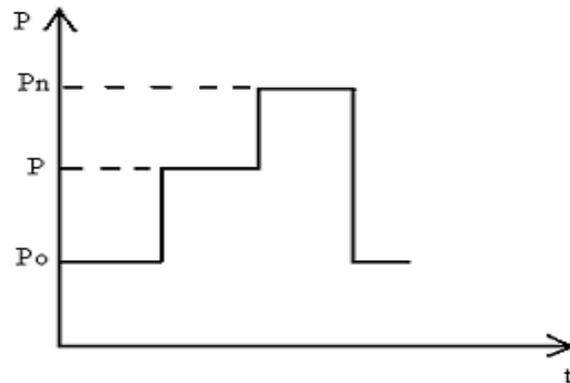
Con los resultados de dichas pruebas se conformaron de manera aleatoria los gráficos de carga para de ellos calcular la eficiencia de los motores.

Los gráficos de cargas conformados fueron:

1. Un estado de carga a una potencia de trabajo (P), otro a potencia nominal (P_n) y otro a potencia de vacío (P_o), como se puede observar en la figura 2.

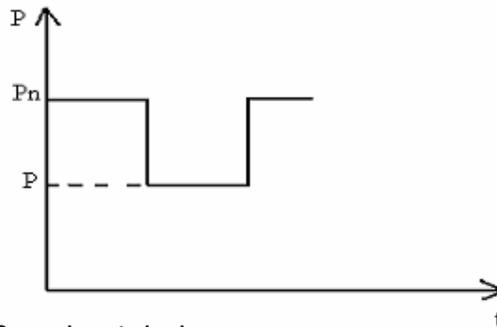
2. Un estado de carga a (P_n) y otro a (P), como se muestra en la figura 3.

3. Un estado de carga a (P_o) y otro a (P), como se presenta en la figura 4.



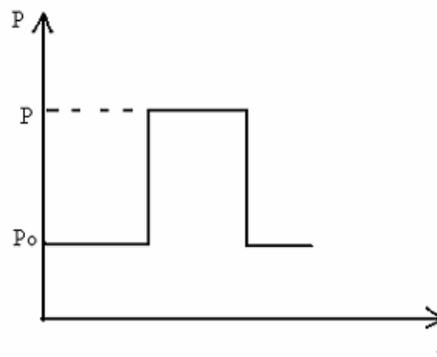
Primer estado de carga.

2



Segundo estado de carga.

3



Tercer estado de carga.

4

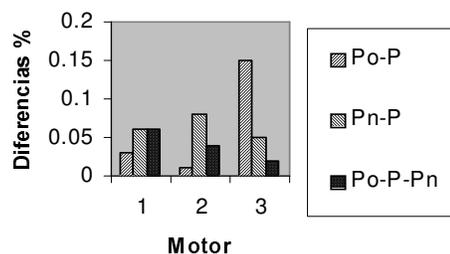
Se utilizaron escalones de la misma duración en todos los casos. Con los datos que se obtuvieron en los ensayos realizados se determinaron las eficiencias de las máquinas por ambos métodos y se confeccionó la tabla 6 con los resultados obtenidos, además en la misma se realizó una comparación de los resultados por ambos métodos, arrojando que es posible la medición de la eficiencia en condiciones industriales para cargas cíclicas con una precisión acorde con las normas establecidas internacionalmente de 10-15% de las pérdidas totales al no tener diferencias apreciables entre ambos métodos.

TABLA 6
Comparación de métodos con carga cíclica

Motor	1			2			3		
	A %	B %	Dif %	A %	B %	Dif %	A %	B %	Dif %
$\eta (P_o-P)$	64,6	64,9	0,03	69,0	69,1	0,01	80,6	79,1	0,15
$\eta (P_n-P)$	80,0	79,4	0,06	79,9	80,7	0,08	87,9	87,4	0,05
$\eta (P_o-P-P_n)$	78,9	79,5	0,06	76,7	77,1	0,04	85,0	84,8	0,02

En la figura 5 se pueden observar mejor las diferencias para cada motor y carga, siendo mayores pero no significativas en el motor 3 para el caso de un período en vacío P_o y otro con carga P menor que la nominal. Todo esto permite afirmar que el método puede ser utilizado con una exactitud semejante al método de segregación en carga constante. Un análisis completo de la incertidumbre del método queda fuera del alcance de este trabajo.

El método se ha aplicado a la industria de plástico utilizando un analizador de redes y el software establecido por el fabricante del equipo, que permite la exportación de los datos a una hoja de cálculo en excel, demostrando su facilidad de aplicación.



Diferencias comparativas de los motores.

CONCLUSIONES

1. Se ha demostrado la posibilidad real de medir la eficiencia de los motores asincrónicos con carga cíclica en condiciones industriales.
2. La validez del método quedó establecida mediante una simulación tipo Montecarlo, la cual arroja diferencias pequeñas en comparación con calibraciones realizadas a estos motores.

REFERENCIAS

1. **Durham, M.:** "Effect of Cyclic Loading on Motor Efficiency", *IEEE Trans on I.A.*, Vol. 26, No. 6, pp. 1156-1159, Nov./Dic., 1988.
2. ———: "Motor Design Slip Performance on Cyclic Loads", *IEEE Trans on I.A.*, Vol. 28, No. 5, pp. 919-925, Sep./Oct., 1990.
3. **De la Rosa, E.:** *Importance of the Uncertainty in the Efficiency Determination of Induction Motors on Industry*, Memories of CEETE, Bahir Dar, Ethiopia, 2003.
4. ———: *Errores en la medición de la eficiencia de los motores asincrónicos en la industria*, Memorias del Congreso Metrología 96', La Habana, 1996.
5. **IEC, Norma IEC 60034-2 amd 2 ed 3.0**, 1996.
6. **IEEE, IEEE Standard 112-2004**, 2004.
7. **Kostenko, M.:** *Máquinas eléctricas*, t. I y II, Ed. MIR, Moscú, 1976.
8. **Chan, T. A.:** Method to Determine the Temperature Rise of Induction Motors, *Int. Journal of Engineering Education*, Vol. 27, pp. 45-52, 1990.
9. **IEC, Norma IEC 60034-2 ed 3.0**, 1996.
10. **British Standard, Standard BS269**.
11. **JEC, Standard JEC-37 1961**.

AUTORES

Elías de la Rosa Masdueño

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Cuba
e-mail:elias.delarosa@reduc.edu.cu

José E. Montejo Sivila

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Cuba
e-mail:jose.montejo@reduc.edu.cu

Percy Viego Felipe

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba
e-mail:pviego@fmec.ucf.edu.cu

Ángel Costa Montiel

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:aacm@electrica.cujae.edu.cu