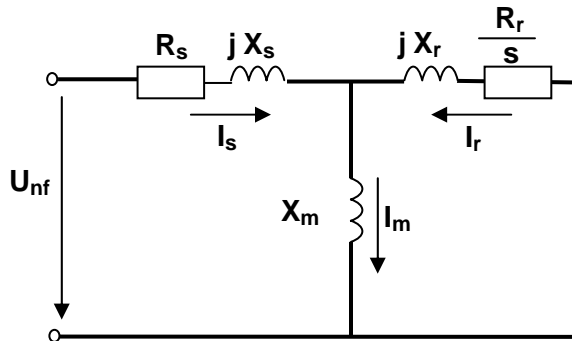


# Cálculo de los Parámetros del Motor de Inducción a partir de Datos de Catálogo

## RESUMEN

En este artículo se propone un método para calcular los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción a partir de datos de catálogo. Con estos datos y utilizando un programa en MATLAB para resolver el circuito equivalente del motor se determinan las características de comportamiento de la máquina. El método se aplica a tres motores diferentes y los resultados obtenidos se validan con la propia información del catálogo



## PALABRAS CLAVES

Motor de Inducción, Circuito equivalente, Máquinas eléctricas .

## ABSTRACT

*In this paper, a simple and easy method for calculating the induction motor parameters is described. Only the data catalogue information is needed. With this data and applying the solution by MATLAB of the motor equivalent circuit it is possible to calculate the machine performance characteristics. The method is applied to three different motors and validated comparing the obtained results with the catalogue information.*

## KEYWORDS:

*Induction Motors, Equivalent Circuit, Electrical Machines, Lumped parameters.*

### □ Angel Costa Montiel, Ph.D.

Profesor Auxiliar.  
Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Habana Cuba.

### □ Neculai Galan, Ph.D.

Profesor  
Universidad Politécnica de Bucarest,  
Bucarest,  
Rumanía.

### □ Gloria Ciumbulea, Ph.D.

Profesora  
Universidad Politécnica de Bucarest,  
Bucarest,  
Rumanía

### □ Xose M. López Fdez, Ph.D.

Profesor Titular  
Escuela de Ingenieros Industriales,  
Universidad de Vigo  
Vigo,  
España.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como es bien conocido, el circuito equivalente del motor de inducción es ampliamente utilizado para la determinación de sus características de comportamiento en estado estacionario y, a partir de los mismos parámetros y sus ecuaciones dinámicas, se determina su comportamiento transitorio<sup>(1),(2)</sup>. Para la correcta aplicación de este método es, por tanto, necesaria una identificación adecuada de estos parámetros. Son conocidos los siguientes procedimientos:

1. A partir de las características constructivas de la máquina y utilizando diferentes métodos de cálculo del campo magnético como puede ser el Método de los Elementos Finitos<sup>(3),(4)</sup>.
2. A partir de ensayos en estado estacionario y sin carga<sup>(1),(2),(5),(6)</sup>.
3. Por los métodos de respuesta de frecuencia e identificación de la respuesta transitoria<sup>(7)</sup>.
4. A partir de datos de catálogo y de estimación de la distribución de pérdidas<sup>(8),(9),(10)</sup>.

El primer método necesita de una información completa relativa a las características constructivas de la máquina y de un software poderoso si quiere aumentarse la exactitud. El segundo requiere un laboratorio bien equipado. El tercero permite resultados muy exactos pero requiere un equipamiento aún más complejo y caro que el anterior y también un software especializado.

En ocasiones no se dispone de la información constructiva ya que los fabricantes no suelen brindarla fácilmente o del equipamiento para la realización de los ensayos y métodos de identificación o inclusive no se dispone ni siquiera del motor pues aún no se ha comprado. En estos casos, si no se requiere una exactitud muy grande (mejor que un 15 %, por ejemplo) es posible utilizar el método 4 el cual es muy sencillo y se basa en el conocimiento de los datos de catálogo del motor y de una estimación de las pérdidas. En la literatura científica internacional existen varios métodos para lograr este objetivo pero o no son fáciles de aplicar o no están bien sistematizados y validados. El

presentado en este trabajo cumple estos dos requisitos.

## 2. PARÁMETROS A DETERMINAR E INFORMACIÓN NECESARIA

Los parámetros a determinar son:

1. La resistencia del estator del motor  $R_s$
2. Las constantes  $K_1$  y  $K_2$  que permiten determinar la resistencia del rotor en función del deslizamiento mediante la expresión

$$\bullet R_r(s) = K_1 + K_2 \cdot \sqrt{s}$$

3. Las constantes  $K_3$  y  $K_4$  que permiten determinar la reactancia de dispersión total en función del deslizamiento.

$$\bullet X_{cc}(s) = K_3 + \frac{K_4}{\sqrt{s}} \quad y$$

4. La reactancia magnetizante  $X_m$ .

Como se observa, se ha supuesto que la resistencia y la reactancia varían en función del deslizamiento debido al denominado Efecto Pelicular (Skin Effect)<sup>(1)</sup>

Para determinarlos debe disponerse de los siguientes datos de catálogo:

1. La potencia nominal en kW  $P_n$
2. La velocidad nominal en r/min  $n_n$
3. La tensión nominal en V.  $U_n$
4. La corriente nominal del estator en A.  $I_n$
5. La frecuencia nominal en Hz  $f_n$
6. La eficiencia nominal en %  $\eta_n$
7. El factor de potencia nominal  $\text{fp}_n$
8. El par o momento de arranque en por unidad del nominal  $m_a$
9. La corriente de arranque en por unidad de la nominal  $i_a$  y
10. El par o momento máximo en por unidad del nominal  $m_{max}$

## 3. EXPLICACIÓN DEL MÉTODO

Deben seguirse los siguientes pasos:

1. Calcular la resistencia del rotor referida al estator en operación normal  $R_r$ . Partiendo de la expresión de la potencia convertida a la forma mecánica y despreciando las pérdidas de fricción y batimiento, se emplea la siguiente expresión:

$$R_r = \frac{s_n P_n}{3(1-s_n)(I_{sn} \cos \varphi_{sn})^2} \quad (1)$$

2. Calcular el deslizamiento para el momento máximo  $s_m$ . Esta expresión se deduce de la fórmula de Kloss menos aproximada<sup>(1)</sup>.

$$s_m = s_n \frac{m_m + \sqrt{m_m^2 - 1 - 2s_n \lambda + 2m_m s_n \lambda}}{1 + 2s_n \lambda - 2m_m s_n \lambda} \quad (2)$$

En esta expresión  $\lambda = R_s / R'_r$  y se puede suponer aproximadamente igual a 1.

3. Calcular la corriente de vacío nominal  $I_{on}$

$$I_{on} = I_n \left( \sqrt{1 - fp_n^2} - \frac{s_n}{s_m} \cdot fp_n \right) \quad (3)$$

4. Calcular la reactancia e inductancia magnetizante

$$X_m = 0,95 \cdot \frac{U_{nf}}{I_{on}} \quad \text{y} \quad L_m = \frac{X_m}{2\pi \cdot f_n} \quad (4)$$

5. Calcular la reactancia de dispersión total en el punto correspondiente al momento máximo.

$$X_{ccn} = \frac{R_r}{s_m} \quad (5)$$

6. Calcular la resistencia del estator. Para determinarla, se sigue el siguiente procedimiento:

- a. Se calculan las pérdidas totales mediante la expresión:

$$perd = \frac{P_n \cdot 1000}{\eta_n} - P_n \quad (6)$$

- b. Se calcula la corriente nominal del rotor mediante la expresión

$$I_m = I_{1n} \sqrt{1 + \left( \frac{s_n}{s_m} \right)^2} \cos \varphi_{1n} \quad (7)$$

- c. Se calculan las pérdidas de cobre totales suponiendo que las de acero son un 25 %, las mecánicas un 14 % de la sumatoria de pérdidas<sup>(11)</sup> y las adicionales un 0,5 % de la potencia nominal de entrada<sup>(12)</sup>.

- d. Se calculan las pérdidas de cobre del rotor como:

$$pcobr = 3 \cdot I_m^2 \cdot R_R$$

- e. Se calculan las del estator como:

$$pcobs = pcob - pcobr$$

- f. Se determina entonces la resistencia del estator:

$$R_s = \frac{pcobs}{3 \cdot I_n^2}$$

7. Calcular la resistencia del rotor en el arranque a partir de la expresión del momento de arranque y con los valores en por unidad del catálogo.

$$R_{rk} = R_r \cdot \frac{m_a}{i_a^2 \cdot s_n}$$

8. Calcular las constantes  $K1$  y  $K2$

$$K1 = \frac{R_r - R_{rk} \cdot \sqrt{s_n}}{1 - \sqrt{s_n}}$$

$$K2 = \frac{R_{rk} - R_r}{1 - \sqrt{s_n}}$$

9. Calcular la reactancia de dispersión total en el arranque:

$$X_{cckpu} = \sqrt{\left( \frac{1}{i_a^2} \right) - (R_{Spu} + R_{Rkpu})^2}$$

En esta expresión todos los parámetros están expresados en por unidad de la

impedancia base definida anteriormente. La reactancia total de dispersión en el arranque es igual entonces a  $X_{cck} = X_{cckpu} \cdot Z_b$

10. Calcular las constantes  $K_3$  y  $K_4$

$$K_3 = \frac{(X_{cck} - X_{ccn})}{1 - \sqrt{s_m}}$$

$$K_4 = \frac{(X_{ccn} - X_{cck}) \cdot \sqrt{s_m}}{1 - \sqrt{s_m}}$$

### 3. APLICACIÓN DEL MÉTODO

Con el objetivo de comprobar la validez y aplicabilidad del método se aplicó éste a los tres motores que aparecen en la tabla I. Como puede verse se han seleccionado un motor de gran potencia y dos de potencia media, uno de 50 Hz y dos de 60 Hz, uno de 4 polos y dos de 8 polos, dos de tensión baja y uno de media tensión, y uno de ellos es de alta eficiencia.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla II. Para esto se elaboró un programa en MATLAB que, además, determina las características de resistencia del rotor y reactancia total en función del deslizamiento.

TABLA I

	MOTOR 1*	MOTOR 2	MOTOR 3
$P_n$ (kW)	15	200	1000
$N_n$ (r/min.)	1766	739	888
$U_n$ (volts)	400	400	6000
$f_n$ (Hz)	60	50	60
$I_n$ (A)	24,5	370	121
$fp_n$	0,85	0,82	0,835
$\eta_n$ (%)	91	94,1	94,8
$m_a$	2,8	2	1,2
$i_a$	9,6	6,3	5,6
$m_{max}$	3,5	2,5	1,9

\* Motor de Alta Eficiencia

TABLA II

	MOTOR 1	MOTOR 2	MOTOR 3
Resistencia del estator	0,29	0,0085	0,31
Reactancia Magnetizante	21,66	1,451	85,4
Resistencia del rotor a deslizamiento nominal	0,22	0,0108	0,4413
Resistencia del rotor en el arranque	0,26	0,025	0,8857
Constante K1	0,216	0,0088	0,3832
Constante K2	0,042	0,0162	0,51
Constante K3	0,382	0,0737	3,8
Constante K4	0,431	0,02	1,18

Nota: Todos los parámetros están en ohms.

### 4. VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Para validar el método se realizó un programa en MATLAB que permite obtener las características mecánicas y de comportamiento del motor a partir de estos parámetros variando el deslizamiento adecuadamente. De estas características se determinaron el par de arranque, la corriente de arranque, el par máximo, la corriente nominal, la eficiencia nominal, el factor de potencia nominal y la velocidad nominal y se compararon con los que aparecen en el catálogo. El valor absoluto del error cometido se muestra en la tabla III para cada motor.

Como puede observarse, los mayores errores se cometen en el par máximo. Esto se debe a que este parámetro es muy dependiente de la reactancia de dispersión total en cuya variación sólo se ha considerado el efecto pelicular y no el debido a la saturación de los dientes sobre todo del rotor.

Como puede apreciarse, los errores cometidos en el cálculo de la eficiencia y el factor de potencia son muy bajos lo cual permite utilizar el método para cualquier análisis energético

Errores en %	MOTOR 1	MOTOR 2	MOTOR 3
Par de arranque	2,5	3,3	4
Corriente de arranque	1,46	2,3	2,1
Par máximo	9	11	8
Corriente nominal	10	6	1,8
Eficiencia nominal	2,2	0,5	0,06
F.P. Nominal	6	6	5
Velocidad nominal	0,3	0,3	2,1
Errores en %	MOTOR 1	MOTOR 2	MOTOR 3
Par de arranque	2,5	3,3	4
Corriente de arranque	1,46	2,3	2,1
Par máximo	9	11	8
Corriente nominal	10	6	1,8
Eficiencia nominal	2,2	0,5	0,06
F.P. Nominal	6	6	5
Velocidad nominal	0,3	0,3	2,1

### 5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método para la determinación de los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción que tiene las siguientes ventajas:

1. Es muy fácil de aplicar, pues sólo se necesita la información de catálogo del motor, la cual siempre está disponible.
2. Permite considerar la variación de los parámetros del rotor con el deslizamiento de una forma sencilla con el nivel de aproximación requerido.
3. A partir de él pueden ser determinadas todas las características de operación de la máquina bajo diferentes condiciones de operación.
4. Tiene aplicación a la docencia pues permite que el estudiante pueda conocer rápidamente todas las características de

operación del motor y como influencia cada parámetro en las mismas.

Las desventajas del método son el nivel de los errores cometidos y no poder considerar la variación de la reactancia de dispersión con la carga debido a la saturación de los dientes. La primera es inevitable pues parte de los datos de catálogo los cuales reflejan los parámetros promedios de una gran muestra de motores iguales. Ahora bien de acuerdo a lo demostrado en este trabajo, puede ser utilizado con confianza en cualquier estudio de balance energético o de variación del comportamiento del motor ante diferentes condiciones de operación como pueden ser baja o alta tensión, desequilibrio de tensiones, variaciones de carga, etc. La no consideración de la variación de la reactancia con la carga, sólo influye sustancialmente en el cálculo del par máximo el cual es poco utilizados en los estudios del motor de inducción en régimen permanente o estable.

### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1]- Kostenko, M. ;Piotrovsky, L. "Máquinas Eléctricas , Tomo II", Editorial Mir, Moscú, 1976.
- [2]- Fitzgerald, A., Kingsley, Ch., Umans, S. "Electric Machinery", Editorial McGraw Hill, New York, 2000.
- [3]- Lipo, Thomas, "Design of AC Machines", University of Wisconsin, 1999.
- [4]- Dolina, D; Stumberger, G.; De Weerd, R.; Belmans, R. ; Freeman, E. M.; "Determination of the Induction Motor Model Parameters using Finite Elements", International Conference on Electrical Machines, Vol 2, Sept. 1996, Vigo, España.
- [5]- Gastli, A. ; "Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters using the Single Phase Tests", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 14, No 1, March 1999, pp 51-56.
- [6]- Gastli, A; Takeshita, M. ; Matsui, N.; "An Automated Equivalent Circuit Parameters Measurement of an Induction Motor using a V/f PWM Inverter" Proceedings of the International Power Electronics Conference, Japan, April 2-6, 1990, vol 2, pp 659-666.
- [7]- De Riberio, L. A. ; Jacobina, C. B.; Liman, A. M.; "Parameter Estimation of Induction Machines Under Sinusoidal PWM Excitation", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 14, No 1, December 1999, pp 51-56.
- [8]- Ruppert Filho, E.; Avolio, E. ; " Squirrel Cage Induction Motor Dynamic Simulation using an Electrical and Thermal Mathematical Model Based on Manufacturer Technical Bulletin Data and on Technical Standard Statements", International

Journal of Power and Energy Systems, " vol 14, No. 1, 1999, pp 13-16.

[9]- Ciumbulea, G., Galan, N., Lopez Fernández, X., Costa, A. "Estudio del Comportamiento del Motor de Inducción en Base a Datos de Catálogo". 7as Jornadas Hispano Lusas de Ingeniería Eléctrica, Madrid, Julio 2001.

[10]- Galan, N.; Vives Fos, R. ; « The Determination of the Parameters of the Equivalent Scheme with Rotor Resistive Circuit of Asynchronous Motors, International Conference on Electrical Machines, August 2002, Brugues, Belgica.

[11]- Lawrie, R. J.; "Biblioteca Práctica de Motores Eléctricos, Tomo I, Editorial Océano/Centrum, Barcelona, España, 1994.

[12] – Norma CEI 34-2

### AUTORES



**Angel Alberto Costa Montiel.** Ingeniero Electricista (1968), Doctor en Ciencias Técnicas (1987). Trabaja como profesor auxiliar (1977) en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL)

del ISPJAE, Cuba, en la disciplina de Máquinas y Accionamiento Eléctrico y en el grupo de Diagnóstico de Centrales Eléctricas. Actualmente investiga en el modelado, simulación y diagnóstico de máquinas eléctricas.

Email: [aacm@electrica.cujae.edu.cu](mailto:aacm@electrica.cujae.edu.cu)



**Gloria Stefania Ciumbulea.** Graduada en la Universidad de Bucarest en 1982 en la especialidad de Máquinas y Accionamientos Eléctricos.

Trabaja como profesora en este centro docente. Defendió su doctorado compartido de esta universidad con la Universidad de Valencia , España en 1997. Trabaja en identificación de parámetros de las máquinas, en el desarrollo de sistemas de accionamiento eléctrico de motores lineales y rotatorios.

e mail [cgloria@amotion.pub.ro](mailto:cgloria@amotion.pub.ro)  
[ciumbulea@yahoo.com](mailto:ciumbulea@yahoo.com)



**Neculai Galan.** Graduado de Ing. Eléctrica en la Universidad de Bucarest en 1959 donde trabaja como profesor. Recibió el doctorado en esta universidad en 1972. Ha publicado gran número de trabajos en revistas

especializadas sobre máquinas y accionamientos eléctricos, calentamiento por inducción, ultrasonido y MHD. Actualmente trabaja en Micromotores eléctricos, conversión de energía y control vectorial.



**Xosé Manuel López**

**Fernández.** Ingeniero Industrial (1992), Doctor Europeo (1997), profesor titular de la Universidad de Vigo-España desde 1999. Ha realizado importantes investigaciones relacionadas con el comportamiento de las Máquinas Eléctricas y su enseñanza. Ha trabajado y trabaja con otros centros de Educación Superior de Europa y América tales como las Universidades de Bucarest-Rumania, Lodz-Polonia, Liege-Bélgica y el ISPJAE-Cuba.

e mail [xmlopez@ieee.org](mailto:xmlopez@ieee.org)