

Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción

REVUELTA-GARCÍA, José*†, GONZÁLEZ-PARADA, Adrián y BOSH-TOUS, Ricard.

Recibido Julio 20, 2016; Aceptado Septiembre 16, 2016

Resumen

La determinación y medición de los parámetros de un motor de inducción es una actividad importante en el diseño y modelado de estas máquinas eléctricas. Conociendo los parámetros del circuito equivalente de cualquier motor se pueden realizar simulaciones para predecir su comportamiento bajo diferentes regímenes como pueden ser régimen transitorio, régimen en estado estable o régimen bajo condiciones de una falla incipiente. Por lo que en este trabajo, se presenta una metodología alterna para la determinación de los parámetros eléctricos de un motor de inducción y se compara con el procedimiento propuesto por la IEEE Std 112-2004, obteniendo buena concordancia con respecto a las evaluaciones realizadas de acuerdo a la norma IEEE 112-2004 y la metodología propuesta.

Motor de inducción, parámetros eléctricos, pérdidas eléctricas, circuito equivalente

Abstract

The identification and measurement of the parameters of an induction motor is an important activity on the design and modeling of these electric machines. Knowing the equivalent circuit parameters of any electrical motor can be performed simulations to predict their behavior under different regimes such as steady state regime or under conditions of incipient failure. So in this paper, an alternative low cost methodology for determining the electrical parameters of an induction motor is presented and compared with the procedure methodology in the IEEE Std 112-2004, obtaining good agreement with respect to assessments under IEEE 112-2004 standard and the proposed methodology.

Induction motors, electrical parameters, electrical losses, equivalent circuit

Citación: REVUELTA-GARCÍA, José, GONZÁLEZ-PARADA, Adrián y BOSH-TOUS, Ricard. Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 8-17

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jrevuelta29066@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La determinación de los parámetros eléctricos en los motores de inducción es un tema importante en el diseño y construcción de los motores eléctricos con la determinación de sus parámetros eléctricos, es posible determinar las pérdidas teóricas, verificar su comportamiento en el arranque y todos los parámetros de diseño, lo cual puede ser comprobado posteriormente durante las pruebas de laboratorio.

El presente trabajo tiene la finalidad de evaluar y comparar diferentes metodologías de prueba para la obtención de los parámetros eléctricos de un motor de inducción. En la obtención de cada uno de los parámetros se aplicaron dos métodos y se realiza una comparación de ambos resultados. Uno de los métodos para obtener estos parámetros es el propuesto por la norma IEEE 112-1996: Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators y el otro método se realiza a partir de mediones directas de cada uno de los componentes del motor considerando equipo convencional.^[2]

Desarrollo

En primer término se realizó la determinación de parámetros de acuerdo a la metodología propuesta en la norma IEEE-112 y después se realizó la determinación alternativa de los mismos parámetros empleando equipo convencional y al final se hace una comparación de los resultados obtenidos con ambas metodologías.

Determinación de parámetros eléctricos de acuerdo a IEEE 112-2004

En la norma IEEE, se menciona el procedimiento para llevar cabo la determinación de los parámetros eléctricos en un motor de inducción, esta metodología se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

Prueba para determinar la resistencia del estator

La medición de la resistencia del estator (R_s) se puede obtener alimentando con una fuente de corriente directa los devanados del estator. Experimentalmente se puede realizar de dos formas principalmente:

1. La resistencia efectiva por fase del estator a corriente directa, se pudiera medir aplicando una alimentación a los devanados del estator mediante una fuente regulable de corriente directa y luego aplicar las correcciones del efecto pelicular y la corrección por temperatura (Recomendada por la norma IEEE).
2. La resistencia efectiva por fase del estator a corriente directa, se pudiera medir mediante un puente de RLC, luego se le aplicaría la corrección por temperatura (Método experimental).

En este trabajo se verá el propuesto por la IEEE; a la resistencia obtenida se le aplicará una corrección por temperatura. La corrección por temperatura permite obtener la resistencia a la temperatura de trabajo. La prueba para determinar la resistencia del estator se realiza a corriente continua, pues de esta forma no hay tensión inducida en el circuito del rotor y no hay flujo de corriente resultante en él. Además la reactancia del motor es cero a corriente directa

[1]

Por lo tanto lo único que va a limitar el flujo del corriente en el motor es la resistencia en el estator.

Medición alimentando el embobinado con una fuente variable de corriente directa

Para la realización de este ensayo se utilizaron un amperímetro, un voltímetro y una fuente variable con las siguientes características descritas en la tabla 1.

Instrumento	Características	Cantidades
Fuente de Voltage DC variable	Topward 6303D-1 0 V-500 V	1
Amperímetro	Fluke 337 600 V, 1000 A	1
Voltímetro	Fluke 87-V	1

Tabla 1 Instrumentos utilizados en la prueba.

El diagrama de conexión del motor a la fuente de alimentación de corriente continua se hace de la siguiente manera:

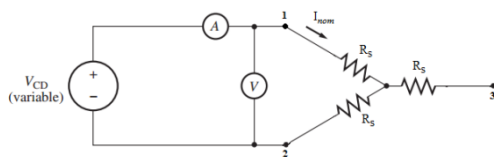


Figura 1 Diagrama de conexión para medir la resistencia de estator.

Se realizaron las mediciones de la resistencia del estator entre cada una de las fases (1-2, 2-3 y 1-3), y los resultados se muestran a continuación en la tabla 2.

Bornes	Amperímetro (A)	Voltímetro (V)
1-2	1,4	26,8
2-3	1,4	27
3-1	1,4	26,9

Tabla 2 Mediciones de la resistencia del estator.

Con la reducción del circuito equivalente por medio de la conversión estrella- delta, encontramos la resistencia del estator como:

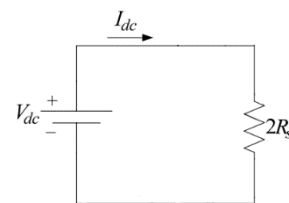


Figura 2 Circuito equivalente resultante de la resistencia del estator.

$$R_{cd} = \frac{V_{cd}}{2I_{cd}} = \frac{27 V}{2 * 1.4 A} = 9.6428 \text{ ohms} \quad (1)$$

Donde:

R_{cd} : Resistencia a corriente directa (ohms)

V_{cd} : Voltaje a corriente directa (Volts)

I_{cd} : Corriente directa nominal. (Amperes)

Esta resistencia fue medida a una temperatura ambiente de 25 °C. Para lograr obtener una resistencia del estator lo más cercano a las condiciones de trabajo del motor se realiza una corrección por temperatura. La siguiente expresión es la recomendada por la IEEE [2].

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (2)$$

Donde:

R_a : Resistencia que se conoce a una temperatura t_a (ohms).

t_a : Temperatura a la que fue medida R_a (°C).

t_b : Temperatura a la cual se requiere hallar R_b (°C).

R_b : Resistencia que se desea determinar a una temperatura t_b (ohms).

k_I : es 234.5 para 100 % cobre, o 225 para el aluminio [2].

El motor permite un aumento de la temperatura de 40 °C por encima de la temperatura ambiente. Se determinó la resistencia del estator a 65 °C y se obtuvo el siguiente resultado:

$$R_b = \frac{9.6428(65 + 234.5)}{(25 + 234.5)} = 11.1291 \text{ ohms}$$

Conclusión de la prueba de corriente directa.

La resistencia de estator (R_s) es igual a **11.1291 Ω**.

Prueba en vacío

La prueba en vacío a un motor de inducción es de gran importancia pues permite determinar las pérdidas rotacionales del motor e información acerca de los parámetros del núcleo. Esta prueba consiste en hacer girar el motor sin ninguna carga en el eje y alimentado por el estator a frecuencia nominal y tensión nominal. En la figura 3 se muestra el esquema de conexión utilizado para realizar esta prueba.

Básicamente lo que muestra el esquema es la conexión de un analizador de redes en la entrada de la alimentación del motor. La prueba se realizó de manera tal de que el aumento de la tensión fuera de manera controlada hasta llegar la tensión nominal del motor.

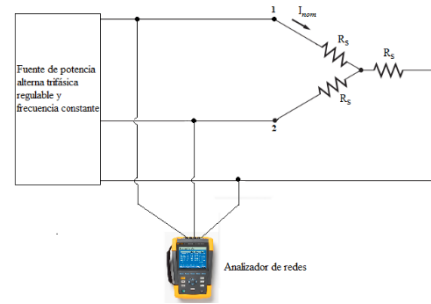


Figura 3 Esquema para el ensayo en vacío.

En la tabla 3, se muestra los resultados de las mediciones obtenidas para la prueba de vacío del motor de inducción en cuestión.

Incremento del Voltaje (%)	10	30	50	70	90	100	110
Voltaje de fase (V)	13.8	38.2	63.2	88.8	114.2	127.3	134
Voltaje de línea (V)	22.2	65.9	109.8	154.2	198.3	220.2	232.5
Corriente de fase (A)	0.3	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.7
Potencia absorbida (kW)	0.02	0.02	0.03	0.05	0.09	0.11	0.13
Factor de potencia			0.29	0.29	0.3	0.3	0.3

Tabla 3 Resultados de la prueba de vacío.

La única carga en el motor son las pérdidas por fricción y por rozamiento con el aire, por lo que todas las P_{conv} del motor se consumen en pérdidas mecánicas y el deslizamiento del motor es muy pequeño (alrededor del 0.001) [1]. En la figura 4, se puede ver el circuito equivalente de este motor.

Con este deslizamiento tan pequeño, la resistencia que corresponde a la potencia convertida, $R_R(1-s)/s$, es mucho mayor que la resistencia que corresponde a las pérdidas en el cobre del rotor R_R y mucho mayor que la reactancia del rotor X_2 . En este caso, el circuito equivalente se reduce aproximadamente al último circuito de la figura 4. En donde el resistor de salida está en paralelo con la reactancia de magnetización X_M y las pérdidas en el núcleo R_C .

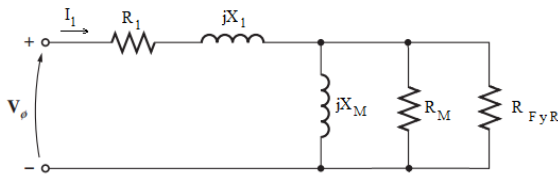


Figura 4 Circuito equivalente de motor de inducción.

Las pérdidas en el cobre del estator se calculan mediante la expresión:

$$P_{pce} = 3 * I_1^2 * R_S \quad (3)$$

$$P_{pce} = 3 * (1.5)^2 * 11.1291$$

$$P_{pce} = 75.12 \text{ W}$$

Donde:

P_{pce} : Pérdidas en el cobre del estator.

I_1 : Corriente medida a tensión nominal.

Para un motor de inducción en marcha en vacío, la potencia de entrada viene dada por:

$$P_O = P_{pce} + P_{núcleo} + P_{F y R} + P_{Miscel} \quad (4)$$

Donde:

P_O : Potencia de vacío.

$P_{núcleo}$: Pérdidas en el núcleo.

$P_{f y r}$: Pérdidas por fricción y rozamiento.

P_{miscel} : Pérdidas por miscelánea.

Las pérdidas rotacionales de un motor de inducción se puede expresar por medio de:

$$P_{Rot} = P_{núcleo} + P_{F y R} + P_{Micelaneas} \quad (5)$$

Despejando de la ecuación (4) se obtiene que:

$$P_{rot} = P_O - P_{pce} \quad (6)$$

Sustituyendo los valores se obtiene que:

$$P_{rot} = 34.88 \text{ W}$$

Prueba a Rotor Bloqueado

La prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción se llevó a cabo para determinar los parámetros del circuito equivalente del motor. Cuando se menciona prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción, es similar a decir prueba de cortocircuito un transformador.

Bloqueo total de rotor del motor de inducción

Este es el método más común de realizar esta prueba. Consiste en bloquear de una forma segura logrando así que este no gire. Bajo la condición de rotor bloqueado el deslizamiento es ($s=1$) y la resistencia de carga R_2 será próximo a cero.

Para realizar la prueba se alimenta el motor con una fuente de corriente alterna y se ajusta el valor de la tensión de alimentación hasta alcanzar la corriente nominal a plena carga; cuando se alcanza este valor de corriente se mide el valor de tensión alcanzado y la potencia que se consume en el motor. En la figura 5 se muestra las conexiones para esta prueba.

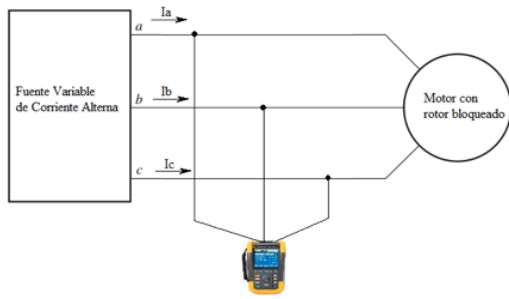


Figura 5 Esquema de prueba a rotor bloqueado.

Parámetro	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Voltaje de Fase	25.9 V	26 V	25.8 V	
Voltaje de Línea	44.6 V	44.5 V	44.5 V	
Corriente de línea	1.3 A	1.4 A	1.4 A	
Frecuencia	59.97 Hz			
Potencia activa	0.02 kW	0.03 kW	0.03 kW	0.08 kW
Potencia activa	0.03 kW	0.04 kW	0.04 kW	0.11 kW
Potencia activa	0.02 kW	0.03 kW	0.03 kW	0.07 kW
Factor de potencia	0.71			

Tabla 4 Resultados de la prueba a rotor bloqueado.

Como se había dicho anteriormente puesto que el rotor no se mueve, el deslizamiento ($s=1$) y por lo tanto la resistencia del rotor (R_R/s) es igual a R_R (un valor bastante pequeño). Debido a que R_R y X_2 son tan pequeños, casi toda la corriente de entrada fluye a través de ellos, en lugar de a través de la reactancia de magnetización X_M que es mucho más grande. Por lo tanto, el circuito en estas circunstancias se ve como una combinación en serie de X_1 , R_s , X_2 y R_R [1], como se observa en la figura 6.

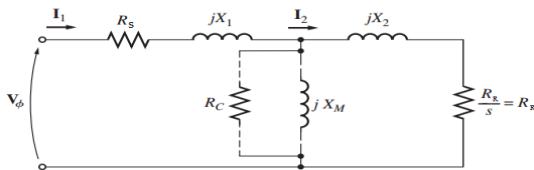


Figura 6 Circuito equivalente sin la rama del núcleo.

A partir de las mediciones de los parámetros de esta prueba y utilizando como guía el circuito de la figura 6, se obtuvieron los siguientes parámetros:

$$I_{L prom} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = 1.4 A \quad (7)$$

Donde:

$I_{L prom}$: Corriente de línea promedio en (Amper).

La impedancia a rotor bloqueado se puede calcular mediante:

$$Z_{RB} = \frac{V_f}{I_{L prom}} = \frac{25.8}{1.4} = 18.428 \Omega \quad (8)$$

Donde:

Z_{RB} : Impedancia a rotor bloqueado en (Ohms).

O podría también calcularse mediante:

$$Z_{RB} = \frac{V_L}{\sqrt{3} * I_{L prom}} = 18.4 \Omega \quad (9)$$

Se puede determinar la resistencia a rotor bloqueado (R_{RB}) mediante la siguiente expresión:

$$R_{RB} = Z_{RB} * \cos\theta = 13.083 \Omega \quad (10)$$

Donde:

R_{RB} : Resistencia a rotor bloqueado (Ohms).

θ : es el ángulo del factor de potencia (44.765°).

Si se observa el circuito equivalente de la figura 2.1.3.1,

$$R_{RB} = R_s + R_R \quad (11)$$

Despejando la ecuación y sustituyendo el valor de la resistencia del estator se obtiene que:

$$R_R = 13.083 - 11.1291 = 1.954 \Omega$$

De manera similar se calcula la reactancia a rotor bloqueado (X_{RB}):

$$X_{RB} = Z_{RB} * \text{sen}\theta = 12.995 \Omega \quad (12)$$

De acuerdo a la norma IEEE 112 para los motores de inducción clase B la relación:

$$\frac{X_1}{X_2} = 0.67 \quad (13)$$

Por lo tanto:

$$X_1 = 0.4 * X_{RB} = 0.4 * 12.995 = 5.198 \Omega$$

La reactancia en el rotor sería:

$$X_2 = 0.6 * X_{RB} = 0.6 * 12.995 = 7.797 \Omega$$

Solo queda determinar la reactancia de magnetización, la cual es igual a:

$$X_M = |Z_{SC}| - X_1 \quad (14)$$

Donde:

X_M : Reactancia de magnetización.

Z_{sc} : Impedancia sin carga.

La impedancia sin carga se obtiene mediante la expresión:

$$Z_{SC} = \frac{V_f}{I_f} = 84.6 \Omega \quad (15)$$

Sustituyendo en la ecuación (15) se determina que la reactancia de magnetización (X_M) es de 79.46Ω .

Resultados

En un resumen de resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas siguiendo la IEEE 112-2004, se obtienen los parámetros de circuito equivalente del motor de inducción.

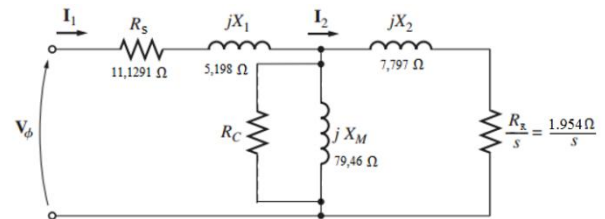


Figura 7 Circuito equivalente con los parámetros calculados.

Resistencia de estator

Utilizando el procedimiento de la norma IEEE:

$$R_s = 11.1291 \Omega.$$

Prueba de vacío

$$P_{pce} = 75.12 \text{ W}$$

$$P_{rot} = 34.88 \text{ W}$$

Prueba a rotor bloqueado

Utilizando el procedimiento de la norma IEEE:

$$R_r = 1.954 \Omega$$

$$X_M = 79.46 \Omega$$

$$X_1 = 5.198 \Omega$$

$$X_2 = 7.797 \Omega$$

Determinación de parámetros eléctricos por medios experimentales alternativos

A continuación se describe la metodología alternativa para la determinación de parámetros de un motor de inducción, considerando el uso de equipamiento convencional, para esto se utilizaron los siguientes equipos que se mencionan en la tabla 5.

Instrumento	Características	Cantidades
Puente RLC	GWINSTEK LCR-916	1
Amperímetro	Fluke 337 600 V, 1000 A	1
Voltímetro	Fluke 87-V	1

Tabla 5 Instrumentos utilizados.

Los parámetros determinados fueron los mismos que la norma IEEE-112, para su posterior comparación.

Prueba para determinar la resistencia del estator

El esquema de conexión para medir la resistencia de estator con el puente RLC, se muestra en la siguiente figura:

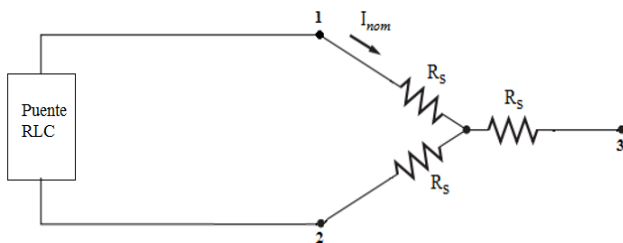


Figura 8 Esquema de conexión del puente RLC.

Para la utilización del puente RLC primeramente se calibró de acuerdo al procedimiento descrito en el manual de operación y se midió la resistencia del estator.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla 6.

Bornes	Impedancia
1-2	18.35 ∠ 57° Ω
2-3	18.32 ∠ 56.9° Ω
3-1	18.34 ∠ 57.2° Ω

Tabla 6 Resultados utilizando el puente.

Convirtiendo a forma binómica las impedancias del estator se obtiene que: $Z=9.99+j15.35$

Se dice entonces que la resistencia del estator a una temperatura de 25°C es de 9.99 Ω, realizando la conversión de acuerdo a la norma IEEE 112, la resistencia del estator a la temperatura de trabajo del motor se tiene que:

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \tag{16}$$

Sustituyendo el nuevo valor de resistencia en la expresión de la ecuación (2) se obtiene

$$R_b = \frac{9.99(65 + 234.5)}{(25 + 234.5)} = 11.531 \text{ ohms}$$

La resistencia de estator (R_s) es igual a **11.531 Ω**.

Cálculo de pérdidas

Utilizando los resultados obtenidos en la prueba de vacío en cuanto a la corriente se refiere se calcula las pérdidas del motor.

$$P_{pce} = 3 * I_1^2 * R_s \tag{17}$$

$$P_{pce} = 3 * (1.5)^2 * 11.531$$

$$P_{pce} = 77.83 \text{ W}$$

Se calculan las pérdidas rotacionales:

$$P_{rot} = P_0 - P_{pce} \quad (18)$$

Sustituyendo los valores se obtiene que:

$$P_{rot} = 32.17 \text{ W}$$

Medición de los parámetros del rotor mediante el puente RLC

Mediante el puente RLC se realiza una medición directa en el rotor. La medición se realizó colocando los electrodos de medición directamente en los anillos de cortocircuito del rotor. Esta medición arrojó como resultado que la impedancia en el rotor es de $0.001 \angle 1.3^\circ \Omega$ que convirtiéndolo a su forma binómica en $Z = 0.0099 + j0.000268$. Como se puede apreciar medir el rotor de esta manera no es correcto pues el resultado arrojado es completamente erróneo.

Prueba de rotor bloqueado alternativa

La prueba a rotor bloqueado se puede realizar sin la necesidad de bloquear el rotor, solo aplicando la corriente nominal al estator del motor de inducción. Este procedimiento consiste en retirar el rotor del motor, aplicando únicamente el valor de la corriente nominal al estator por medio de una fuente variable de corriente y se incrementa la corriente hasta lograr la nominal, en ese punto se tomaron las mediciones siguientes:

Parámetro	Fase A	Fase B	Fase C	Total
Voltaje de Fase	21.07 V	21.06 V	21.08 V	
Voltaje de Línea	36.6 V	36.4 V	36.6 V	
Corriente de línea	1.4 A	1.4 A	1.4 A	
Frecuencia	60 Hz			
Potencia activa	0.02 kW	0.03 kW	0.02 kW	0.07 kW
Potencia activa	0.03 kW	0.03 kW	0.04 kW	0.1 kW
Potencia activa	0.02 kW	0.03 kW	0.02 kW	0.07 kW
Factor de potencia	0.7			

Tabla 7 Tabla de resultado.

Aplicando la misma metodología para el cálculo de los parámetros de acuerdo a la norma IEEE-112, se obtienen los siguientes resultados.

$$I_{L \text{ prom}} = 1.4 \text{ A}$$

$$Z_{RB} = 15.57 \Omega$$

$$R_{RB} = 10.53 \Omega$$

$$R_r = 0.79 \Omega$$

$$X_{RB} = 13.248 \Omega$$

$$X_M = 79.301 \Omega$$

$$X_l = 5.299 \Omega$$

$$X_2 = 7.949 \Omega$$

Comparación de resultados.

Después de haber obtenidos todos los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción utilizando los dos métodos, se puede realizar una tabla comparativa para ver las desviaciones respecto a cada una de las metodologías como se muestra

Parámetros	Resultados (IEEE)	Resultados (Ensayos)	% Diferencia
R_s	11.1291 Ω	11.531 Ω	3.48
R_r	1.954 Ω	0.79 Ω	58
X_M	79.46 Ω	79.301 Ω	0.2
X_l	5.198 Ω	5.299 Ω	2
X_2	7.797	7.949 Ω	1.91
P_{pce}	75.12 W	77.83 W	3.4
P_{rot}	34.88 W	32.17 W	7.79

Tabla 8 Tabla de resultados generales.

Como se observa la diferencia de resultados entre en un método y otro es muy pequeña solo existe una gran diferencia en el valor obtenido de la resistencia del rotor, esto es debido a que no se considera dentro de la medición la reactancia de dispersión debido a los materiales del rotor tomando en cuenta únicamente el campo magnético del estator en la velocidad de sincronismo, aunque esta diferencia es menor del 1%.

Conclusiones

El método alternativo implementado sirve para determinar los parámetros en un motor de inducción. Se recomienda seguir los criterios establecidos por la IEEE, pero en una situación donde no se tengan las condiciones necesarias para cumplirlas, este método alternativo puede ser una variante que permite estimar de manera aproximada los parámetros del circuito.

Agradecimiento

Quisiera agradecer a CONACYT por la beca otorgada para realizar mi Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. A mis compañeros de la maestría por el apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] Chapman, S. J. “Máquinas eléctricas”. Editorial McGrawHill-Interamericana, Cuarta Edición. México 2005.
- [2] IEEE 112-2004: “Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”
- [3] Fitzgerald, A. E., C. Kmgley, Jr., y S. D. Umans. “Electric Machinery”. 5th ed. New York. McGraw Hill, 1990.
- [4] Frailes Mora, “Máquinas Eléctricas”. Editorial McGraw Hill – Interamericana, 2003.
- [5] Sadiku, Alexander. Fundamentos de circuitos eléctricos. Editorial Mc Graw Hill, México, 2000.
- [6] M. Kostenko, L.Piotrovski. Máquinas Eléctricas II 1ra Edición.
- [7] K.S. Huang, Q.H. Wu, D.R. Turner “Effective identification of induction motor parameters base don fewer measurements”, IEEE Transaction on energy conversión, Vol. 17 No. 1, March 2002.
- [8] A. Gastli, “Indetification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test”, IEEE Transaction on energy conversión”, Vol. 14, No.1, March 1999.