

RESPUESTA EN FRECUENCIA MONOFÁSICA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO PARA LA DETERMINACIÓN DE SUS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Gilberto Becerra Arévalo, Agustín Gutiérrez Paucar, Ismael Ochoa Jiménez
Facultad de Ingeniería Mecánica

E-mails: mmensel@congreso.gob.pe, agutierrez@uni.edu.pe, iochoa@ieee.org

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental mostrar un nuevo método para la determinación de los parámetros del circuito equivalente del motor trifásico de inducción. Este nuevo método consiste en utilizar los resultados de la prueba monofásica como prueba base a frecuencia variable.

La prueba monofásica se realiza utilizando voltaje y frecuencia variable provenientes de una fuente de potencia (Grupo Ward-Leonard).

Palabras claves: Motor de Inducción, Prueba Monofásica, Circuito Equivalente, Parámetros.

ABSTRACT

This research work has for fundamental object to show a new method of identification of the induction three-phase motor equivalent circuit parameters.

This new method consist of to use the result of the single phase test as a base test to variable frequency.

The single-phase is performed using a variables voltage and frequency from a power supply (Ward-Leonard Group).

Key words: Induction Motor, Single phase test, Equivalent Circuit, Parameters.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los procedimientos de pruebas eléctricas, una de las pruebas más exigentes en su implementación es el de las máquinas eléctricas, dado que se requieren equipos eléctricos y mecánicos que puedan soportar los esfuerzos a que es sometida la máquina al realizar los ensayos respectivos.

En este trabajo se centra el tema en un motor trifásico de inducción [1].

De acuerdo al protocolo de prueba de la norma IEEE-Std 112-1997, (IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators) [1], se requiere para la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un motor trifásico de inducción, fundamentalmente la prueba de rotor bloqueado y la prueba sin carga (en vacío).

La prueba de rotor bloqueado, es una de las mas exigentes de conseguir para motores de inducción de gran tamaño, dado que se necesitan de elementos mecánicos conectados al motor para lograr el bloqueo total del rotor (bajo las condiciones de seguridad establecidas), estos mecanismos están en relación directa a la potencia del motor de inducción bajo prueba.

La prueba sin carga o de vacío, es una prueba realmente aproximada, debido a que no se consigue la condición de carga igual a cero, dado que hay presencia de rozamiento en los ejes del motor, así como la presencia del ventilador y el efecto ventilador del rotor en operación, además de otros efectos de pérdidas.

Para ambas pruebas, el motor de inducción tendrá

que ser retirado del lugar de operación; para un caso debe ser llevado a un centro especializado, y para el otro caso debe desconectarse toda la carga de su eje.

Los requerimientos de prueba para los motores de inducción se hacen más exigentes según sea su potencia nominal.

En la actualidad existen diversos métodos para la determinación del circuito equivalente del motor de inducción, entre ellos el que se desarrolla en el presente trabajo.

Este trabajo trata de comparar el método convencional anteriormente mencionado, con el método de prueba monofásica a frecuencia variable.

CARACTERÍSTICA DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

Se entiende por respuesta en frecuencia, el comportamiento de una relación de magnitudes a diferentes valores de frecuencia; para nuestro caso tendremos como primera magnitud a la tensión y como segunda a la corriente, obteniendo de esta manera la impedancia en función de la frecuencia.

Las frecuencias que obtendremos son del Sistema Convertidor Electromecánico SIMENS; este convertidor tiene un rango de posibles valores de frecuencia desde 41 Hz. hasta 68 Hz. (estos valores son límites inminentes antes de su desconexión automática por los relés de protección de sub y sobre velocidad del sistema).

Se tendrá en consideración, el mantener la densidad de flujo constante, es decir, se mantendrá en todo momento V/f constante. Se tendrá en cuenta los efectos por histéresis cuando se realice la experiencia en laboratorio (sólo en ese caso).

CARACTERÍSTICA DE LA EXCITACIÓN MONOFÁSICA

Existen dos teorías referentes a este tema , la Teoría de Campo Cruzado y la Teoría de dos Campos giratorios, para nuestro caso nos basaremos en la teoría de campos revolventes.

Consideremos que :

N_e = número de vueltas del estator.

k_e = factor de embobinado del estator.

Expresamos la componente fundamental de la Fuerza Magnetomotriz (FMM) del estator en el ángulo del espacio θ como:

$$FMM = \frac{4}{\pi} \frac{k_e N_e}{2} i_e \text{Sen}\theta \quad (1)$$

donde : i_e = corriente instantánea en el estator que expresamos como:

$$i_e = \sqrt{2} I_e \text{Sen}(wt - \varphi) \quad (2)$$

En esta expresión φ es el ángulo de atraso con respecto a la tensión aplicada al estator, el cual es :

$$v = \sqrt{2} V \text{Sen}(wt) \quad (3)$$

Reemplazando (2) en (1) tenemos:

$$FMM = \frac{4}{\pi} \frac{k_e N_e}{2} \sqrt{2} I_e \text{Sen}(wt - \varphi) \text{Sen}\theta \quad (4)$$

$$FMM = \frac{1}{2} F \text{Cos}(\theta - wt + \varphi) + \frac{1}{2} F \text{Cos}(\theta + wt - \varphi) \quad (5)$$

$$\text{Donde: } F = \frac{4}{\pi} \frac{k_e N_e}{2} \quad (6)$$

De (5) se puede observar que, el primer término representa una FMM1 que gira a la derecha, y el segundo una FMM2 gira a la izquierda

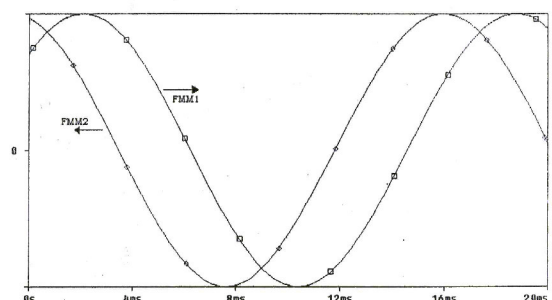


Fig. 1 Fuerzas Magnetomotrices.

En el punto de reposo estas dos FMM producen flujos iguales en dirección opuesta, éstas a su vez producirán las corrientes inducidas. Por lo tanto, se producirá dos componentes de pares oponiéndose entre si, el cual da como resultante un par resultante cero. Esto se manifiesta físicamente con el rotor detenido.

ENSAYO DE RESPUESTA EN FRECUENCIA MONOFÁSICA

Una de las variables que puede ser determinada directamente es la resistencia en DC del devanado del estator; es recomendable usar tensión DC y calcular la resistencia aplicando la ley de Ohm.

El procedimiento de prueba de rotor bloqueado 3φ, será reemplazado por la prueba 1φ, dado que el motor de Inducción a una excitación monofásica no producirá ningún torque, según lo visto en la sección anterior. La característica y el desempeño del motor de inducción con torque cero es la misma que cuando el motor de inducción es excitado con una fuente trifásica [2]; esto es posible si se trabaja dentro del rango lineal de operación del motor de inducción, aunque en saturación trifásica y monofásica la inductancia magnetizante es ligeramente diferente.

Así mismo, el procedimiento de prueba sin carga 3φ, puede ser omitido, si hacemos variar la frecuencia de la tensión de alimentación en la prueba 1φ, esto lleva a obtener un grupo de ecuaciones, de las cuales es posible determinar los parámetros del circuito equivalente.

El circuito utilizado para la prueba monofásica consta de :

- 01 Instrumento electrónico FLUKE 39 Power Meter.
- Fuente de tensión y frecuencia variables (V f=const.).

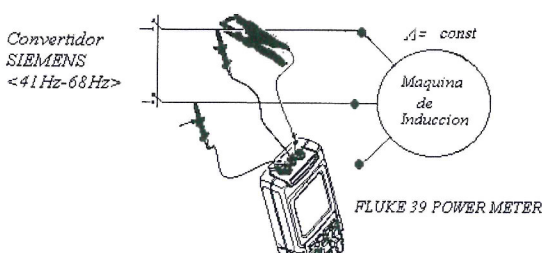


Fig .2 Circuito de Laboratorio.

MODELO IΓ (Γ INVERSO) DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Para nuestro caso, realizamos las pruebas preliminares y se concluyó que el modelo que tiene mejor comportamiento a la respuesta en frecuencia en el modelo IΓ (Γ inverso) del Circuito equivalente, debido a que las variaciones de frecuencia provocan variaciones proporcionales en la impedancia.

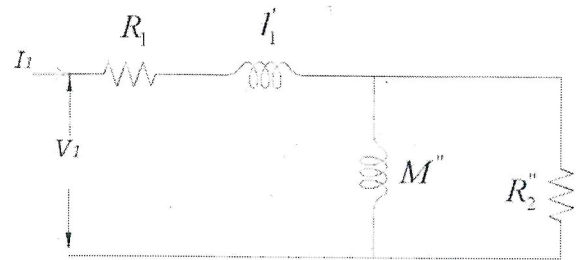


Fig. 3 Circuito equivalente del Modelo IΓ (Γ inverso).

Donde:

R_1 : Resistencia del estator

l_1' : Inductancia de dispersión en el estator

M'' : Inductancia magnetizante

R_2'' : Resistencia del rotor reflejada al estator

Para el caso del circuito IΓ (Γ inverso) del Circuito equivalente tenemos :

$$\bar{Z}_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$$

$$\bar{Z}_{eq} = R_1 + jX_1' + \frac{jX_m'' R_2''}{R_2'' + X_m''}$$

Partiendo de estas ecuaciones definimos las ecuaciones en función de dos frecuencias dadas (ω_1, ω_2) y resolvemos el conjunto de ecuaciones y comprobamos con la ecuación sobrante:

$$R_2'' = \frac{R_{2eq}(\omega_2) R_{2eq}(\omega_1) [\omega_1^2 - \omega_2^2]}{R_{2eq}(\omega_2) \omega_1^2 - R_{2eq}(\omega_1) \omega_2^2}$$

$$M'' = \frac{R_2''}{\omega_1} \sqrt{\frac{R_{2eq}(\omega_1)}{R_{2eq}(\omega_1) - R_2''}}$$

$$l_1' = \frac{X_{eq}(w_1)}{w_1} - \frac{M'' R_2''^2}{R_2''^2 + (w_1 M'')^2}$$

donde:

$$R_{2eq} = R_{eq} - R_1$$

Las relaciones con el Modelo circuital T son las siguientes:

$$\begin{aligned} r_1 &= R_1 \\ l_m &= \sqrt{M''(l_1' + M'')} \\ l_1 &= l_2 = l_1' + M'' - l_m \\ r_2' &= \frac{R_2''}{M''}(l_1' + M'') \end{aligned}$$

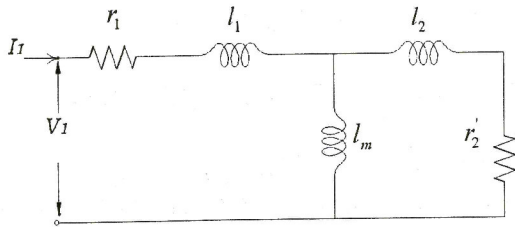


Fig. 4 Circuito equivalente del Modelo T.

- r_1 : Resistencia del estator.
- l_1 : ctancia de dispersión en el estator.
- l_2 : Inductancia de dispersión en el rotor.
- l_m : Inductancia magnetizante.
- r_2' : Resistencia dl rotor reflejada al estator.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Para la prueba se utilizó una máquina de inducción con los siguientes datos de placa:

Tabla 1

MAQUINA ASINCRONA	
Δ/Y 400/692	1.0/0.58
0.37KW	$\text{Cos } \phi = 0.74$
1680 RPM	60 Hz
ISO: BF	IP 20

RESULTADOS OBTENIDOS

Primero realizamos las pruebas convencionales descritas en la norma IEEE-Std 112-1997 con estos datos calculamos el circuito equivalente aproximado según recomendación IEEE, obteniéndose:

Tabla 2

r_1	l_m (mH)	l_1 (mH)	l_2 (mH)	r_2'
59.41	2068.99	168.63	168.63	56.89

Segundo, se realizo el ensayo de respuesta en frecuencia monofásica a la máquina de inducción trifásica, obteniendo como resultados:

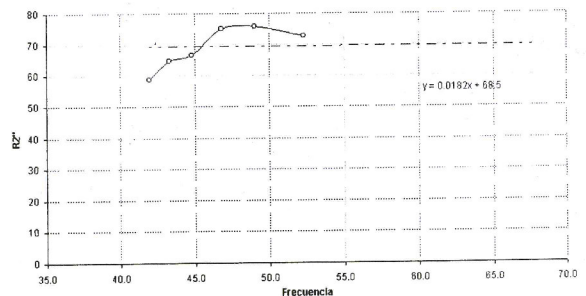
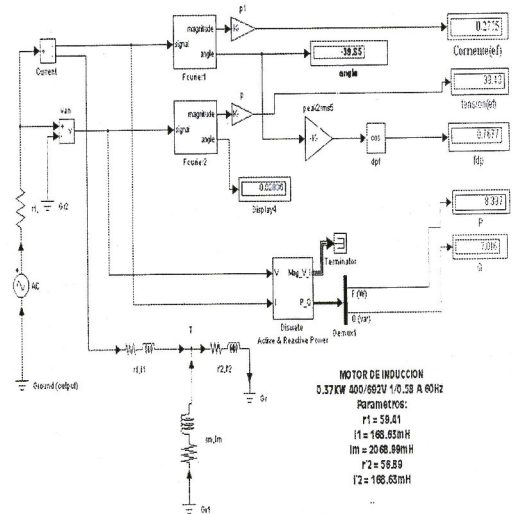


Fig. 5 Respuesta en frecuencia de R^2 .

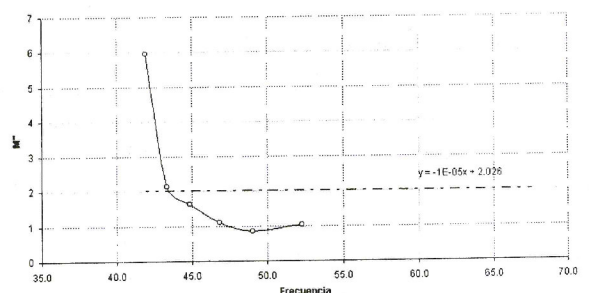


Fig. 6 Respuesta en frecuencia de M'' .

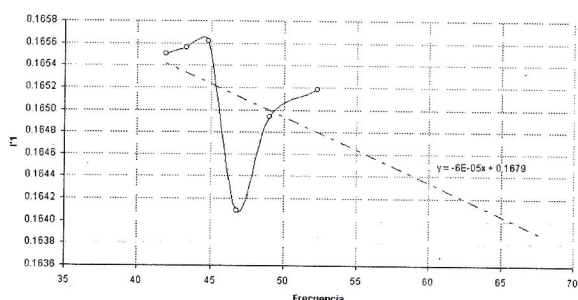


Fig 7 Respuesta en frecuencia l'1.

Tabla 3

	r_1	$L_m(mH)$	$L_1(mH)$	$L_2(mH)$	r_2
Pruebas IEEE	59.41	2068.99	168.63	168.63	56.89
Respuesta en Frecuencia	59.41	2060.0	167.90	167.90	68.5
Error %	---	0.435	0.433	0.433	20.4

Se realizaron simulaciones usando el software Matlab para la comprobación de los valores experimentales.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

El modelo corresponde a un circuito equivalente para aplicaciones de accionamientos eléctricos.

Las gráficas se determinaron teniendo como referencia el valor de 60 hz.

Se trazaron rectas de tendencias equivalentes a una recta con pendiente aproximadamente igual a cero.

Se considera que en todo momento la máquina de inducción mantiene su linealidad, no existe saturación. La relación V/f es aproximada, debido a la caída de tensión en la resistencia del estator.

Se observan grandes variaciones en la inductancia magnetizante del Modelo Γ (Γ inverso), esto es debido a que su cálculo depende de una diferencia de dos números grandes dependientes de la frecuencia. Según la Tabla No 3 observamos que los errores son muy pequeños, salvo el caso de la resistencia del rotor,

esto es debido a que la fuente de tensión en el laboratorio no es muy estable y su rango de frecuencias es bajo 41 – 68 Hz lo cual implica que el valor de r_2 es una tendencia, claro está que para los otros casos si se tiene buena aproximación debido a que éstas están en la zona lineal y la tendencia se mantendrá aun si aumentamos el rango de frecuencia.

Cabe señalar que para cualquier caso todos los métodos de cálculos de circuitos equivalentes son aproximaciones, y los errores mostrados en la tabla No3 son solo referenciales a uno de los métodos mas usados. Es así que las verdaderas comprobaciones se realizarán en el campo, teniendo la máquina de inducción con cierta carga y predecir su comportamiento en estado estable a través de ambos métodos.

REFERENCIAS

1. **IEEE-Std 112-1997**, (IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators)
2. **M. Denbrok and N.R. Klaes**, "Determination of Induction Machine Parameters and their Dependency on Saturation", Conference Record of 1989 IEEE Ind. Appl. Society, Annual Meeting, Part I, pp. 17-22.
3. **C. Wang, D. W. Novetny and T. Lipo**, "An automated Rotor Resistance Measurement System for Indirect Field-Oriented Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., vol 24, No 1, 1988.
4. **Magnetic Circuit and Transformer**, E.E.STAFF-M.I.T. Cambridge, Massachusetts.
5. **A. Gastli, M. Takeshita, N Matsui**, "An automated Equivalent Circuit Parameter Measurements of an Induction Motor Using a V/f PWM Inverter", Proceedings of the 1990 International Power Electronics Conference, Japan, April 2-6 1990, Vol-2, pp.659-666.
6. **Gordon R. Slemon**, "Modeling of Induction Machines for Electric Drives" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No 6 Nov/Dec 1989.
7. **Paul C. Krause, Oleg W., Scott S.** Analysis of Electric Machinery, IEEE Press, 1995.