

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN A PARTIR DE LOS DATOS DEL FABRICANTE

Estimation of Induction Motor Parameters from Manufacturer Data

RESUMEN

En este artículo se desarrolla una metodología para obtener los parámetros del motor de inducción en régimen permanente a partir de los datos entregados por los fabricantes en sus catálogos. El conjunto de ecuaciones no lineales obtenidas es resuelto mediante métodos numéricos convencionales. Parámetros como: la potencia nominal, el torque máximo, el torque nominal, la corriente de arranque, la corriente nominal y el factor de potencia serán de gran utilidad para la solución del problema.

Los parámetros calculados analíticamente son comparados y validados con aquellos que son obtenidos al realizar pruebas clásicas de determinación de parámetros en las máquinas de inducción.

PALABRAS CLAVES: Calculo de parámetros, datos de fabricante, motor de inducción.

ABSTRACT

This paper presents a method for the estimation of the induction motor in steady state from manufacturer data. Here we present a numerical method that solves the nonlinear equations set with the manufacturer data. Full load mechanical power, breakdown torque, rated torque, star current and toque are some of these parameters.

The compute parameters are compared and validated with classic tests for induction machines parameters determination.

KEYWORDS: Induction motor, manufacturer data, parameters estimation.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el motor de inducción ha sido la máquina rotativa más empleada a nivel industrial debido principalmente a su versatilidad. Su amplia utilización en muchas aplicaciones conlleva a que los investigadores se centren en temáticas como el control de la velocidad [7], control del par, programación para ciclos de trabajo y la determinación de parámetros [6].

El desarrollo en la electrónica de potencia y la disminución en los costos han hecho que dichos motores sean los más utilizados para cualquier condición de operación. Su sencillez, confiabilidad y eficiencia los han hecho los más preferidos para cualquier trabajo [10].

Gran cantidad de modelos de máquinas de inducción están disponibles en la literatura [6], [7] y son utilizados para comprobar las estrategias de control. Generalmente estos modelos son clasificados como estáticos y dinámicos, lineales y no lineales, parciales o integrales. La utilización de cada modelo está determinada por el tipo de análisis que se efectúa sobre la máquina y por el tipo de respuestas esperadas.

El clásico circuito del motor de inducción en régimen permanente es modelado con las resistencias y reactancias del rotor y del estator, la rama de magnetización se modela solamente con su reactancia de magnetización. Dicho circuito es ampliamente utilizado en estado estacionario para la determinación de las características de funcionamiento de la máquina.

Algunos de los métodos más utilizados para la determinación de parámetros son:

- Método de los elementos finitos.
- Pruebas de vacío y de rotor bloqueado.
- Método de respuesta transitoria.
- Datos de catalogo.
- Utilización de algoritmos de identificación.

El método de los elementos finitos o FEM requiere de un conocimiento de las características constructivas físicas de la máquina, su dimensionamiento, composición y de un software especializado [1]. Se requiere tener amplio conocimiento en este tipo de análisis para lograr interpretar correctamente los resultados.

ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
andreses1@utp.edu.co

FABIO A. OCAMPO MUÑOZ

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
faom@utp.edu.co

MAURICIO HOLGUÍN L.

Ingeniero Electricista.
Profesor Transitorio y Estudiante
Maestría en Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
ma_hol@ohm.utp.edu.co

Los métodos basados en pruebas sobre la máquina requieren de equipos como amperímetros, vatímetros y voltímetros para la medición de los parámetros [2]. Con estos solamente se logra establecer el comportamiento de la máquina de régimen permanente. Dicho método no es de gran utilidad cuando se pretende calcular los parámetros de las máquinas de inducción de doble jaula o de jaula profunda.

El método de la respuesta transitoria es poco utilizado ya que requiere de equipos especiales para la generación de la prueba [3].

Finalmente cuando se tienen los datos de catálogo del motor de inducción, se debe contar con metodologías que permitan la solución de un sistema de ecuaciones no lineales dada la complejidad del mismo.

Este último planteamiento es el que se pretende resolver con un método numérico que permita obtener varias ecuaciones no lineales partiendo de varias restricciones.

2. PARÁMETROS A DETERMINAR EN EL CIRCUITO

La figura 1 muestra el circuito equivalente para una máquina de inducción convencional en régimen permanente. Dicho circuito representa los parámetros del estator y de rotor de la máquina referidos al circuito del estator [2].

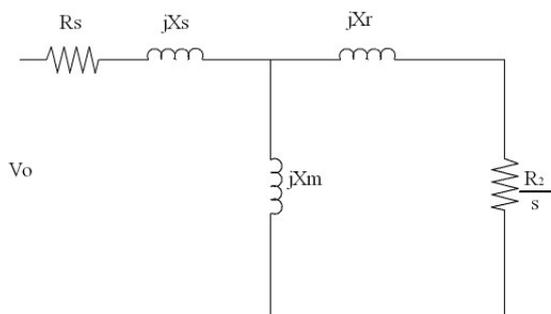


Figura 1. Circuito equivalente de la MI en régimen permanente

Dado un voltaje por fase aplicado a la máquina y suponiendo simetría en todas las fases, se requiere conformar un sistema de ecuaciones que permitan encontrar las 5 incógnitas del circuito.

El circuito se analiza bajo tres condiciones:

Funcionamiento a valores nominales: Bajo estas condiciones los parámetros de la máquina presentados por los fabricantes son: la velocidad en el eje, la potencia de salida, el factor de potencia, la eficiencia [4], [5].

Funcionamiento a torque máximo: En este caso se desconoce el deslizamiento s pero puede escribirse en términos de los parámetros de la máquina.

Funcionamiento en el momento del arranque: Para esta condición el deslizamiento es unitario. Los variables más comunes presentadas en los catálogos son la corriente de arranque y el torque de arranque.

La descripción matemática aquí presentada mostrará el comportamiento de la máquina en cada instante de funcionamiento.

Bajo las condiciones nominales y conociendo V e I , se puede conocer la impedancia total de la máquina. La parte real e imaginaria de esta impedancia permite obtener dos ecuaciones. La tercera ecuación, bajo esta condición de operación, se puede obtener con la potencia o el torque nominal de la máquina.

En el momento del arranque se puede determinar un valor para V e I , el ángulo que determina el factor de potencia del motor bajo esta condición es desconocido. Con esto se obtiene una cuarta ecuación. Finalmente con la ecuación del torque en el momento del arranque se tiene la quinta ecuación.

Bajo las condiciones nominales se tiene entonces que:

$$Z_{eq} = \frac{V|0}{I|\theta} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (1)$$

Los valores son todos conocidos, igualando la impedancia equivalente a la del circuito del motor de inducción se tiene entonces que:

$$Z_{eq} = R_s + jX_s + \frac{jX_m (R_r / s_n + jX_r)}{R_r / s_n + j(X_r + X_m)} \quad (2)$$

Manipulando esta ecuación y separando partes reales e imaginarias se obtiene las primeras 2 ecuaciones así:

$$R_{eq} = R_s + \frac{R_r X_m^2}{\left(\frac{R_r}{s_n}\right)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (3)$$

$$X_{eq} = X_s + \frac{\frac{X_m R_r^2}{s_n^2} + X_m X_r^2 + X_r X_m^2}{(R_r / s_n)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (4)$$

Bajo condiciones nominales y considerando las pérdidas rotacionales despreciables; la potencia de salida nominal es aproximadamente igual a la potencia desarrollada [11] y tomando en cuenta que la corriente del rotor es función de la corriente del estator, por un divisor de corriente se tiene fasorialmente que:

$$I_m = I_{sn} \frac{jX_m}{\frac{R_r}{s_n} + j(X_m + X_r)} \quad (5)$$

Y su magnitud es:

$$|I_m| = |I_{sn}| \frac{X_m}{\sqrt{(R_r / s_n)^2 + (X_m + X_r)^2}} \quad (6)$$

Utilizando esta expresión de corriente del rotor en la expresión de la potencia nominal se obtiene la tercera ecuación:

$$P_n = \frac{3R_r(1-s_n)}{s_n} \frac{X_m^2 |I_{sn}|^2}{(R_r / s_n)^2 + (X_m + X_r)^2} \quad (7)$$

Ahora bien, como ya se mencionó, en el momento del arranque se conoce la magnitud de la corriente y el torque. Con esto se establece la ecuación para la impedancia equivalente Z_{eqo} en el momento del arranque. De dicha impedancia solamente se conoce su magnitud dado que el factor de potencia en el momento del arranque es desconocido.

En magnitud se tiene entonces que:

$$Z_{eqo} = \sqrt{\left(R_s + \frac{R_r X_m^2}{R_r^2 + (X_r + X_m)^2} \right)^2 + \left(X_s + \frac{X_m (R_r^2 + X_r^2 + X_r X_m)}{R_r^2 + (X_r + X_m)^2} \right)^2} \quad (8)$$

Y para el torque se tiene que:

$$T_{arr} = \frac{3R_r}{\omega_s} \frac{|I_{sarr}|^2 X_m^2}{R_r^2 + (X_m + X_r)^2} \quad (9)$$

Las ecuaciones 3, 4, 7, 8 y 9 determinan el problema, sin embargo el fabricante nos aporta en sus catálogos [4] el torque máximo. Dicho torque está dado por:

$$T_{max} = \frac{3V^2 X_m^2}{2\omega_s} \frac{1}{[R_s^2 + (X_s + X_m)^2]} \frac{1}{[\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_r)^2} + R_{th}]} \quad (10)$$

En donde se pueden reemplazar R_{th} y X_{th} por:

$$R_{th} = \frac{R_s X_m^2}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \quad (11)$$

$$X_{th} = \frac{R_s^2 X_m + X_m X_s^2 + X_m^2 X_s}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2}$$

Como los parámetros a determinar son los presentados en la figura 1, se tienen más ecuaciones que incógnitas. El sistema de ecuaciones obtenido está sobredeterminado.

Existen diferentes métodos para solucionar sistemas no lineales de la forma $F(x) = 0$, siendo uno de los más usados el método de Newton-Raphson [9] cuyo inconveniente radica en que los valores iniciales deben de estar cerca de la solución para que el método converja rápidamente.

Otro método a utilizar es el de minimizar una función de error u objetivo con el fin de encontrar una solución. Su principal inconveniente radica en que se puede caer en un mínimo local sino se le da un intervalo de solución al algoritmo [11].

Ahora bien usando el método de Newton-Raphson presentado en [11] y la rutina *fsolve* de Matlab [7] que es empleada para resolver sistemas no lineales y que es basada en un algoritmo no lineal de tipo *least-squares* que emplea Gauss-Newton, se puede obtener una buena aproximación de la solución del conjunto no lineal. Este método es el empleado en este trabajo con el fin de dar solución al conjunto de ecuaciones no lineales planteadas.

3. PRUEBAS REALIZADAS

Con el fin de comprobar si se logra obtener la solución de las ecuaciones no lineales planteadas en 3, 4, 7, 8, 9, se

aplica el método propuesto a 4 motores de diferentes fabricantes. Los motores 1 y 2 son del fabricante [4], los motores 3 y 4 son del fabricante [5].

PARÁMETRO DEL FABRICANTE	MOTOR 1	MOTOR 2	MOTOR 3	MOTOR 4
Potencia (HP)	0.75	3	0.75	3
In a 220V (A)	2.4	9.0	3.2	8.7
Velocidad (rpm)	3430	3490	3420	3710
Eficiencia (%)	79	76	81	77
Tn (Nm)	1.56	6.12	1.78	6.2
Tn (Nm) en el arranque	2.7	2.7	2.7	2.4
Tn (Nm) máximo	4.5	3.2	4.7	5.1
In (A) en el arranque	6	5.7	6	4.9
fp nominal	0.86	0.88	0.88	0.89

Tabla 1. Datos del fabricante para diferentes motores [4], [5].

La tabla 1 muestra los datos más comunes que presentan los fabricantes de los motores de inducción bajo varias condiciones de operación. Los valores en el momento del arranque están dados en proporción con los valores nominales.

Para la solución del sistema no lineal se implementó el algoritmo presentado en [11] en el Matlab. Los resultados obtenidos con dicho algoritmo son presentados en la tabla 2.

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Con el fin de validar los resultados presentados con un motor real, se realizó en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira las pruebas de vacío, con carga y de corto circuito de una máquina real de 3HP 60Hz, trifásica, alimentada a 220V. Si bien los motores son de diferente fabricante se logra detallar que algunos de los datos de placa presentan similitudes para ambas máquinas.

Los resultados de dichas pruebas y la comparación con el motor 2 de la tabla 1 se presentan en la tabla 3. En dicha tabla se pueden detallar los valores de las resistencias y de las reactancias obtenidas mediante la solución de las ecuaciones no lineales de la máquina.

Aunque los datos presentados son de una sola prueba y sobre una máquina de inducción de otro fabricante, es claro ver como los resultados obtenidos mediante las pruebas de laboratorio se aproximan a los obtenidos en el método propuesto.

PARÁMETRO A ESTIMAR	MOTOR 1	MOTOR 2	MOTOR 3	MOTOR 4
Resistencia del estator (Ω)	0.2425	1.3741	0.3001	1.4857
Resistencia del rotor (Ω)	0.8555	0.9789	0.5789	0.4215
Reactancia de magnetización (Ω)	11.2578	17.2358	9.1254	15.1202
Reactancia del estator (Ω)	0.4319	1.441	2.7895	0.5564
Reactancia del rotor (Ω)	2.1254	2.7895	4.5601	6.7914

Tabla 2. Parámetros estimados de los motores presentados

PARÁMETRO A ESTIMAR	MOTOR 2	MOTOR DEL LABORATORIO	ERROR (%)
Resistencia del estator (Ω)	1.3741	1.8125	24.187
Resistencia del rotor (Ω)	0.9789	1.0515	6.904
Reactancia de magnetización	17.2358	15.1247	13.9579
Reactancia del estator (Ω)	1.741	2.071	15.934
Reactancia del rotor (Ω)	2.7895	2.8752	2.9806

Tabla 3. Parámetros estimados y los obtenidos en el laboratorio

5. OTRAS APROXIMACIONES

Es común realizar ciertas aproximaciones sobre el circuito equivalente de la figura 1 con el fin de simplificar un poco los análisis y el número de ecuaciones del sistema no lineal [7]. Una aproximación valedera consiste en desplazar hacia la entrada, y en paralelo con la fuente de alimentación, la rama de magnetización. Esto se hace ya que la corriente de entrada a la máquina es similar en magnitud a la corriente que circula por el circuito del rotor referido al estator. De igual forma la corriente de magnetización de la máquina es pequeña ya que los parámetros de dicha rama son muy grandes en comparación con los otros del circuito.

Teniendo en cuenta dicha aproximación se logra establecer un nuevo conjunto de ecuaciones. Las expresiones para el torque inducido bajo condiciones nominales y la del máximo son ahora:

$$T_{ind} = \frac{3V^2}{[(R_s + R_r/s)^2 + (X_{cc})^2]} \frac{R_r}{s\omega_s} \quad (12)$$

$$T_m = \frac{3V^2}{2\omega_s [R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{ccm})^2}]} \quad (13)$$

Dividiendo 13 entre 12 y escribiendo las reactancias de la máquina en términos de sus resistencias se puede obtener un conjunto de ecuaciones que solamente tienen dos incógnitas. Este planteamiento se deja para trabajos futuros.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo de investigación ha mostrado como se puede obtener a partir de los datos de los fabricantes los parámetros de los motores de inducción.

Los resultados obtenidos con el algoritmo implementado son satisfactorios ya que los parámetros estimados son muy próximos a los reales. Se puede observar como en el cálculo de los parámetros, el parámetro de reactancia de magnetización presenta el mayor error. Esto se debe a que este parámetro es muy dependiente de la reactancia de dispersión de la máquina cuyo valor no fue considerado para los análisis.

Los estudios de sensibilidad de parámetros muestran que la variable que menos influencia tiene sobre el comportamiento del motor es la resistencia del estator. Dicha resistencia no incide directamente en el modelo no lineal ya que su cálculo se puede hacer directamente conociendo el factor de potencia de la máquina y su potencia bajo condiciones nominales.

Es apenas lógico que los datos obtenidos a partir de los ensayos incluyan errores de apreciación del observador y de exactitud o precisión de los medidores. Además ciertos parámetros de la máquina no son totalmente constantes y algunas variables se ven afectadas por el grado de saturación del núcleo, la temperatura y el efecto *skin* o pelicular [2], [9], [10].

Se propone para trabajos futuros la utilización de técnicas más potentes que no necesiten de un modelo para plantear el conjunto de ecuaciones. Algunas de estas técnicas como la lógica difusa y las redes neuronales permiten la identificación en línea de los parámetros de la máquina [12].

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publisher, New York, 1995.
- [2] A. E. Fitzgerald, "Máquina Eléctricas", 5 ed., México McGraw-Hill, 1992.
- [3] P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", New York McGraw-Hill Book Company, 1997, pp. 29-324.
- [4] SIEMENS, Step 2000 AC Motor, Available: www.Siemens.com.

- [5] GENERAL ELECTRIC Industrial Systems, "AC Motors Selection and Application Guide", Available: www.ge.com.
- [6] W. Leonhard, "Control of Electrical Drives", power systems series, 3rd Edition, Springer, NewYork, 2001.
- [7] C.H. Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab - Simulink".
- [8] P. Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford science publications, NewYork, 2003.
- [9] J. Pedra, F. Córcoles, "Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters from Manufacturer Data", IEEE, Transactions on energy conversion, Vol. 19, No. 2, June 2004.
- [10] T. Wildi, "Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia", 6 ed, México, Prentice Hall, 2007.
- [11] J. E. Bravo, A. J. Botero, A. Botero, "El Método de Newton – Raphson – la Alternativa del Ingeniero Para Resolver Sistemas de Ecuaciones no Lineales", Scientia Et Technica, Año XI, No 27, Abril de 2005, pp 221 - 224.
- [12] J. Pedra, F. Córcoles, "Analysis of the Induction Machine Parameter Identification", IEEE, Transactions on energy conversion, Vol. 17, No. 2, June 2002.