

Identificación de parámetros de la máquina de inducción para su aplicación al control vectorial de aerogeneradores

I. Zubia¹, A. Zatarain², C. Alcalde² y X. Ostolaza³

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica
EUP- Donostia, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea
Plaza Europa, 1, 20018 Donostia-San Sebastián, Spain,
Tel.:+34 983 017238, fax:+34 983 017130, e-mail: itziar.zubia@ehu.es

² Departamento de Matemática Aplicada
EUP- Donostia, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea
Plaza Europa, 1, 20018 Donostia-San Sebastián, Spain,
Tel.:+34 983 017238, fax:+34 983 017130, e-mail: a.zatarain@ehu.es, c.alcalde@ehu.es

³ Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
EUP- Donostia, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea
Plaza Europa, 1, 20018 Donostia-San Sebastián, Spain,
Tel.:+34 983 017238, fax:+34 983 017130, e-mail: xabier.ostolaza@ehu.es

Resumen. El presente trabajo aborda un método de identificación de parámetros de la máquina de inducción típicamente utilizada en la generación eólica. Se proponen los ensayos de secuencia cero y de secuencia directa de rotor parado junto con el método frecuencial para identificar los 5 parámetros de la máquina de cara a poder implementar el control vectorial en la misma. Dichos ensayos reemplazan los ensayos clásicos de corriente continua, de cortocircuito y de rotor bloqueado para obtener los parámetros de la máquina de inducción.

Los resultados de las simulaciones realizadas para el caso de una máquina de inducción de jaula de ardilla de 7 kW avalan la idoneidad de los ensayos propuestos, que se esperan validar en la bancada real de forma experimental.

Palabras llave

Aerogenerador de inducción, identificación de parámetros, método frecuencial, lógica fuzzy.

1. Introducción

La caracterización o identificación de los parámetros de las máquinas eléctricas es muy importante para el diseñador de la máquina, de cara a su mejora y su dimensionado. Por otra parte, también es necesario conocer los parámetros para poder realizar las simulaciones realistas de las máquinas [1] y es interesante para el operador de accionamientos modernos que implementa los sistemas de control [2].

Además los cambios en algunos parámetros críticos de las máquinas pueden diagnosticar la existencia de distintas causas que dan lugar al mal funcionamiento de las mismas, lo cual permite prevenir las averías antes de

que ocurran [3]. Si la identificación se integra en los planes de mantenimiento, se puede pasar del sistema actual de planes de mantenimiento por intervalos de tiempo a planes de mantenimiento centrados en condiciones.

Las técnicas convencionales para determinar los parámetros de las máquinas (técnicas “off-line”) presentan la pega de que están basadas en un número de suposiciones que no son válidas en todo tipo de condiciones de operación. Además, estas técnicas pueden ser caras de realizar, requieren personal especialmente preparado y una previa preparación de la máquina antes de realizar los ensayos, por lo que deben ser realizadas en bancadas de ensayos de los propios fabricantes.

Los métodos convencionales más utilizados son el ensayo de rotor bloqueado y el ensayo de vacío, que han sido ampliamente descritos en libros básicos de Máquinas Eléctricas [4, 5, 6]. Estos métodos permiten determinar los parámetros del circuito equivalente de estado estacionario de la máquina de inducción y son aplicables para los modelos dinámicos de las máquinas utilizados en los generadores eólicos [7]. De esta forma, es posible analizar y predecir el impacto de los parques eólicos en la red eléctrica [8] y diseñar los controladores adecuados para su explotación óptima [9].

Sin embargo, en muchos casos las máquinas y los convertidores que alimentan las mismas son de distintos fabricantes y los parámetros de la máquina no son conocidos. Dado el aumento de la instalación de generadores de inducción debido a la proliferación de los parques eólicos y la dificultad de poder realizar los ensayos convencionales una vez realizada la instalación

de los mismos, se pretende ofrecer la posibilidad de realizar la identificación “on-line” de los citados parámetros.

La bibliografía revisada de la identificación “on-line” [10-15], generalmente estima un subconjunto de parámetros de la máquina, cuando se conoce el resto de los parámetros. La dificultad de la identificación de parámetros reviste en dos causas: por un lado, el efecto pelicular de la resistencia de rotor en máquinas de jaula de ardilla [16-21] y, por otro, la dificultad de identificar o estimar la velocidad de la máquina y los parámetros eléctricos y mecánicos, simultáneamente [22-26].

Los métodos de identificación más empleados se clasifican en métodos de dominio temporal y de dominio frecuencial. Los métodos frecuenciales son, en general más exactos que los basados en dominio temporal porque se basan en valores de estado estacionario y es posible aplicar filtros y valores medios que mejoran la obtención de datos. En la bibliografía consultada, se obtienen los parámetros de la máquina de inducción modelizada según ejes directos y de cuadratura –modelo d-q–, pero no se considera el eje de secuencia cero, porque se parte del hecho de que la alimentación es equilibrada [23,25,26].

Otra posibilidad, aportada por los avances realizados dentro del campo de la Inteligencia Artificial, es la utilización de metodología difusa. Son varias las soluciones propuestas que implican el uso de redes neuronales artificiales o controladores fuzzy [21,22,27].

El presente trabajo presenta una propuesta que consiste en el binomio “ensayo-algoritmo de identificación” que permite obtener los parámetros necesarios automatizando el procedimiento de medida utilizando señales de las tensiones y corrientes de la máquina a partir de los ensayos de secuencia directa y secuencia cero.

La solución ha sido desarrollada a partir del análisis del modelo “d-q-0” del generador de inducción [7], ha sido implementado en sistemas de simulación y está pendiente de su contrastación en una bancada de laboratorio de 7 kW.

2. Desarrollo de los ensayos de identificación

El modelo matemático utilizado típicamente para el análisis dinámico de máquinas y el diseño de los controles vectoriales es el modelo “d-q-0” que consta de 6 ecuaciones diferenciales no-lineales [7].

$$\begin{bmatrix} v_{sD} \\ v_{sQ} \\ v_{r\alpha} \\ v_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde, $p = \frac{d}{dt}$ es el operador de Laplace.

$$v_{s0} = R_s i_{s0} + L_{ls} \frac{di_{s0}}{dt} \quad (2)$$

$$v_{r0} = R_r i_{r0} + L_{lr} \frac{di_{r0}}{dt} \quad (3)$$

Los parámetros empleados en las ecuaciones (1)-(3) están relacionados con los parámetros del circuito monofásico equivalente de régimen estacionario, mostrado en la Fig1.

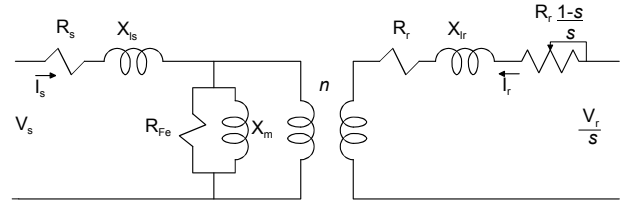


Fig. 1. Circuito monofásico equivalente de estado estacionario de la máquina de inducción.

En este circuito R_s y R_r son las resistencias de estator y de rotor. L_s es la inductancia propia de estator y está relacionada con la inductancia de dispersión por fase de las bobinas de estator – L_{ls} – y con la inductancia de magnetización total (trifásica) – L_m – según la ecuación:

$$L_s = L_{ls} + n \cdot L_m \quad (4)$$

De la misma manera, la inductancia propia de rotor L_r se relaciona con la inductancia de dispersión por fase de las bobinas de rotor – L_{lr} – y con la inductancia de magnetización total (trifásica) – L_m – según la ecuación:

$$L_r = L_{lr} + \frac{1}{n} \cdot L_m \quad (5)$$

Para poder analizar el comportamiento de la máquina se deben identificar los 5 parámetros eléctricos y la relación de espiras n .

El análisis de las ecuaciones (1)-(3) permite definir los ensayos que se deben realizar para caracterizar los parámetros. Por una parte, la ecuación de tensión de estator de secuencia cero –Eq.2– permite identificar los parámetros R_s y L_{ls} . Para ello se deberá excitar sólo la secuencia cero de tensiones. De la definición de la transformada de Park [3] se tiene que la condición para este ensayo es alimentar el estator de la máquina con la misma onda de tensión en las 3 fases – $v_{sA}(t) = v_{sB}(t) = v_{sC}(t) = V(t)$ – tal como se muestra en la Fig. 2.

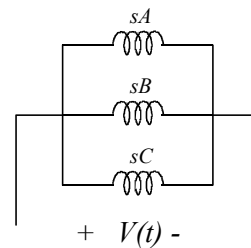


Fig. 2. Conexión de bornes de estator para excitación de la secuencia cero.

Con esta condición de alimentación, se cumple que las tensiones de estator de secuencia d-q-0 son:

$$v_{sD} = \frac{2}{3} \left(v_{sA} - \frac{1}{2} v_{sB} - \frac{1}{2} v_{sC} \right) = 0 \quad (7)$$

$$v_{sQ} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v_{sB} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{sC} \right) = 0 \quad (8)$$

$$v_{s0} = \frac{2}{3} \frac{1}{2} (v_{sA} + v_{sB} + v_{sC}) = V(t) \quad (9)$$

Estas condiciones implican que la suma de los campos magnéticos se anula con lo cual el rotor de la máquina no gira –standstill– y no es necesario bloquearlo.

Los ensayos para la identificación del resto de los parámetros debe cumplir también la característica de velocidad angular nula $-\omega r=0-$. Con esta condición y para el caso de una máquina de jaula de ardilla, las corrientes de rotor de secuencia directa y de secuencia en cuadratura dependen de las corrientes de estator de secuencia directa y de secuencia en cuadratura, es decir, están desacopladas. Debido a ello, también las tensiones de estator de secuencia directa y de secuencia en cuadratura están desacopladas entre sí, y permiten la identificación de los parámetros por medio de uno de los dos ensayos que se muestran en la Fig.3 y Fig.4.

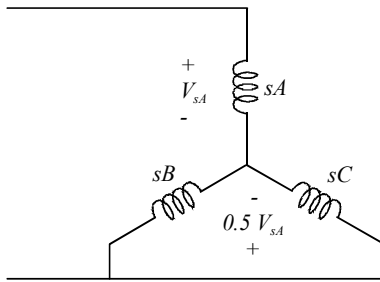


Fig. 3. Conexión de bornes de estator para excitación de la secuencia directa.

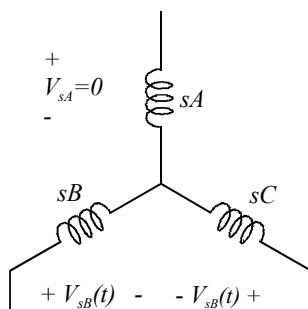


Fig. 4. Conexión de bornes de estator para excitación de la secuencia en cuadratura.

Las condiciones de alimentación propuestas en cada uno de los casos dan lugar a par nulo y, por lo tanto, no es necesario bloquear el rotor.

Los parámetros de cada ensayo R_s, L_{ls}, R_r, L_{lr} y L_m se identifican por el método frecuencial junto con y el diagrama de Bode.

3. Resultados

El método propuesto ha sido aplicado a la simulación de una máquina de inducción de Jaula de ardilla de 7 kW de tensión nominal de 380V, corriente nominal de 16 A, cuyos parámetros son conocidos en base a los ensayos clásicos “off-line”.

TABLA I. – Datos del generador de 7 kW

Potencia Nominal	7 kW
Tensión Nominal	380V
Corriente Nominal	16 A
Frecuencia	50 Hz
Resistencia de estator por fase	0.375 Ω
Inductancia de dispersión de estator por fase	3.17 10^{-3} H
Resistencia de rotor por fase	0.7 Ω
Inductancia de dispersión de rotor por fase	3.09 10^{-3} H
Inductancia de magnetización	8.06 10^{-2} H

Para el método de identificación frecuencial se ha alimentado la máquina con tensiones de amplitud y frecuencia variable en un rango de 0.25 Hz hasta 50Hz, según las configuraciones descritas en las Fig.2 y Fig.3.

La relación entre las tensiones de estator y las corrientes de estator para cada frecuencia definen la impedancia operacional de la máquina. Una vez aplicadas las técnicas de ajuste de onda a los datos obtenidos y calculando el módulo y el argumento del diagrama de Bode, se definen los parámetros de la máquina.

La Fig. 1 muestra el resultado del ensayo de secuencia cero. Mediante simulación se han logrado los datos experimentales de la máquina de 7 kW, se ha procedido a obtener la amplitud y el desfase de las ondas de tensión y corriente para cada frecuencia y se han representado en el diagrama de Bode (triángulos). De estos datos se puede ajustar la curva de Bode (color rojo).

Se observa que el módulo del diagrama de Bode corresponde a un sistema definido por una ecuación diferencial de primer orden. La ganancia de la función de transferencia de este sistema da lugar a la identificación de la resistencia de estator R_s y el polo de la función de transferencia permite identificar el valor de la reactancia de dispersión de estator L_{ls} . Ambos parámetros se identificaron con un error inferior al 0.00%

Con los datos conocidos de la máquina se puede representar el diagrama de Bode teórico de la máquina, llamado “curva exacta” (color verde) en la Fig.5. Se observa que las dos curvas coinciden exactamente.

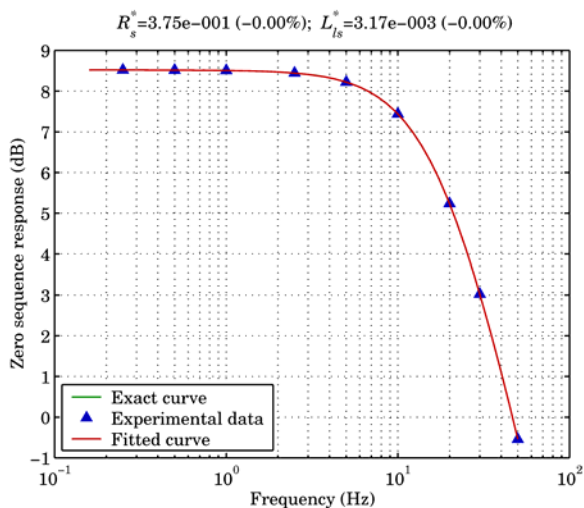


Fig. 5. Módulo del diagrama de bode de la respuesta de la secuencia cero.

La Fig. 6 muestra el módulo del diagrama de Bode obtenido de los resultados del ensayo de secuencia directa. Los datos de simulación se han trasladado al diagrama de Bode para ajustar la curva (color rojo) e identificar el resto de los parámetros.

Esta curva corresponde a un sistema descrito por una ecuación diferencial de orden dos cuya función de transferencia consta de un cero y dos polos. El análisis de los valores del cero y los polos permite identificar el valor de la resistencia de rotor R_r , y los valores de la inductancia de dispersión de rotor L_{lr} y la inductancia mutua L_m a partir de los datos experimentales del ensayo, con un error inferior al 0.00%.

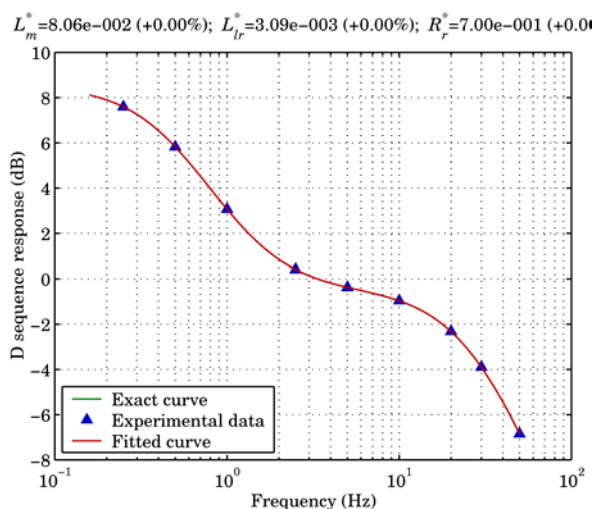


Fig. 6. Módulo del diagrama de bode de la respuesta de la secuencia directa.

El valor del parámetro n –relación de número de espiras entre estator y rotor– no afecta al caso de la identificación de parámetros de la máquina de inducción de jaula de ardilla.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se han desarrollado dos ensayos que permiten identificar los parámetros de las máquinas de inducción de jaula de ardilla: ensayo de secuencia cero y secuencia directa.

Las medidas de las tensiones y las corrientes de la máquina junto con el método frecuencial permiten el cálculo de dichos parámetros para su aplicación al control vectorial.

El método propuesto ha sido aplicado a la simulación de una máquina de inducción de 7 kW obteniendo unos valores que están de acuerdo con los valores conocidos a partir de los ensayos clásicos de laboratorio.

Se espera poder validar los resultados obtenidos con ensayos realizados en la bancada de 7 kW de laboratorio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por el grupo de investigación GIU07/45 de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y ha sido financiado por el proyecto de investigación DPI2006-06612 del Ministerio de Educación y Ciencia y el proyecto NUPV08/09 de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Referencias

- [1] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice, 1997.
- [2] P. Vas, "Vector Control of AC Machines", Oxford Science Publications, 1990.
- [3] P. Vas, "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines", Oxford Science Publications, 1993.
- [4] J. Fraile-Mora "Máquinas Eléctricas", McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A., 2008.
- [5] S. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill, 2005.
- [6] I. Boldea, S.A. Nasar, "The Induction Machine Handbook", CRC Press, 2001.
- [7] I. Zubia, "Análisis y diseño de estrategias de operación para la explotación de parques eólicos", Tesis, 2003.
- [8] I. Zubia, X. Ostolaza, A. Susperregui, G. Tapia, "Complete wind farm electromagnetic transient modelling for grid integration studies", Energy Conversion and Management, Vol. 50, no. 5, pp. 600–610, 2009.
- [9] G. Tapia., A. Tapia y J.X Ostolaza. "Proportional-Integral Regulation-Based Approach to Wind Farm Reactive Power for Secondary Voltage Control". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, pp. 1-11, (2007).
- [10] J. Aller, A. Bueno and W. Abad, "Comparison between Parameter Estimation Methods for Induction Machine Models using Arbitrary Reference Coordinates", in *Proc. UPEC'97*, UK, pp. 465-468.

- [11] F. Chen and M.W. Dunnigan, "Comparative Study of a Sliding Mode Observer and Kalman Filters for Full State Estimation in an Induction Machine", IEE Proceedings – Electric Power Applications, Vol. 149, no. 1, pp. 53-64, 2002.
- [12] M.M. Cirrincione, G. Pucci, G. Cirrincione, G.A. Capolino, "Constrained least-squares method for the estimation of the electrical parameters of an induction motor", in *Proc. ICEM 2002*.
- [13] T. Bahi, T. Rais, N.E. Debbache, "Observation of induction motor parameters", in *Proc 8^o CLEEE*, (2003).
- [14] M. Stiebler, "Determining Induction Machine Parameters using Equivalent Circuits Models", in *Proc ICEM 2004*.
- [15] U. Beckert, H. Arnold, "Identification and Verification of Parameters of the Asynchronous Machine During Field-Orientedly Controlled Operation", International Congress on Electrical Machines (ICEM 2004).
- [16] S. Wade, M.W. Dunnigan and B.W. Williams, "A New Method for Rotor Resistance Estimation for Vector Controlled Induction Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, no. 2, pp. 247-257, 1997.
- [17] M. Galan, R. Vives-Fos, "The Determination of the Parameters of the Equivalent Scheme with Rotor resistive Circuit of Asynchronous Motor", in *Proc ICEM 2002*.
- [18] X. Yu, M.W. Dunnigan and B.W. Williams, "A Novel Rotor Resistance Identification Method for an Indirect Rotor-Flux Oriented Controlled Induction Machine System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, no. 3, pp. 353-364, 2002.
- [19] T. Lehtla, J. Joller, M. Lehtla, J. Laugis, J. "Parameter identification and comparison of an induction motor models", Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, IEE Conf. Publ. No. 475, 2000.
- [20] M. Despalatovic, M. Jadric, B. Terzic, "Identification of Induction Motor Parameters from Free Acceleration and Deceleration Tests", AUTOMATIKA, Vol. 46, no. 3-4, pp. 123-128, 2005.
- [21] K. B. Bimal and R. P. Nitin, "Quasi-fuzzy estimation of stator resistance of induction machines", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, no. 3, pp. 401-409, 1998.
- [22] L. A. Cabrera et al., "Tuning the stator resistance of induction motors using artificial neuronal network", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, no. 5, pp. 779-787, 1997.
- [23] M.O. Sonnaillon, G. Bisheimer, C. de Angelo, G.O. García, "Automatic induction machine parameters measurement using standstill frequency-domain tests", IET Electr. Power Appl., Vol. 1, no. 5, pp. 833-838, 2007.
- [24] T. Caussat, X. Roboam, J-C. Hapiot, J. Faucher, M. Tientcheu, "Self-commissioning for PWM Voltage Source Inverter-fed Induction Motor at Standstill", Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994.
- [25] R.N. Conte, L.F.A. Pereira, J.F. Haffner, C.C. Scharlau, L. Campestrini, R.P. Fehlhberg, "Parameters Identification of Induction Machines Based on Frequency Response and Optimization Techniques", Conf. of the Ind. Electronics Society, IEEE 2003.
- [26] Y. Koubaa "Recursive identification of induction motor parameters", Simulation Modelling Practice and Theory 12 (2004) 363–381.
- [27] B. Karanayil, "Parameter identification for vector controlled induction motor drives using artificial neural networks and Fuzzy principles", Tesis, 2005.