

Identificación paramétrica de un generador síncrono a partir de la prueba de escalón de voltaje

M. Cisneros

M.A. Arjona

F.S. Sellschopp

Instituto Tecnológico de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Boulevard Revolución s/n, Torreón, Coahuila,
MÉXICO.

Correo electrónico: merit@faraday.itlalaguna.edu.mx
marjona@ieee.org

Recibido el 1 de septiembre de 2008; aceptado el 10 de febrero de 2009.

1. Resumen

En este trabajo se identifica paraméricamente el modelo de un generador síncrono de 7 kVA, 220 V, 60 Hz de polos salientes. El modelo de identificación empleado fue el autorregresivo con entrada exógena (ARX) clasificado dentro de los modelos de caja negra. Los datos experimentales, procesados por el toolbox de identificación de Matlab®, fueron tomados de la prueba de escalón de voltaje aplicado en los ejes dq del generador, mediante tareas adquisitoras de datos programadas en LabView®. Los resultados mostraron un ajuste aceptable entre el modelo polinomial ARX obtenido y las mediciones de corriente tomadas del generador bajo estudio.

Palabras clave: modelo de caja negra, parámetros, generador síncrono, identificación paramétrica.

2. Abstract (Parametric Identification of a Synchronous Generator Using the Step Voltage Test)

In this work a parametric identification in a synchronous generator salient-pole 7 kVA, 220 V, 60 Hz, is presented. In order to identify the synchronous generator parametric model, an Autoregressive model with Exogenous Input (ARX) was used, which is classified into black box models. The experimental

data used were extracted from the step test applied to the dq axis of the synchronous generator, through acquisition data tasks programmed in LabView™; the acquired data were processed by the Matlab™ system identification toolbox. Results show a good agreement between the current with estimated polynomial ARX model and measurements taken from the synchronous generator under study.

Key words: black-box model, parameters, synchronous generator, identification.

3. Introducción

La estimación de parámetros de generadores síncronos no es sólo de interés académico, también es útil para predecir las respuestas de los generadores durante transitorios a fin de seleccionar los parámetros de los controladores del generador [1]. Por otro lado, dada la importancia de los generadores síncronos como parte de una red eléctrica, el empleo de modelos matemáticos que permitan la predicción de su desempeño, lo convierte en tema de diversas investigaciones para su caracterización.

Los modelos matemáticos de los generadores se clasifican en dos tipos: aquellos en los cuales sólo se requiere conocer aspectos limitados de su comportamiento y los que se requiere conocer más a fondo su dinámica; lo que da origen a obtener modelos matemáticos regidos por leyes físicas, sin embargo, esto ocasiona que sean más elaborados y complejos. Existen diversos trabajos orientados a la obtención de parámetros fundamentales o derivados a partir de modelos basados en ecuaciones diferenciales, obtenidos mediante diversas pruebas, ya sea en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia aplicadas en generadores [2-5].

Algunos trabajos relacionados con la identificación recursiva han hecho énfasis en que una de sus ventajas principales, además de ser una herramienta muy empleada en la industria y en el área de control, es su fácil implementación en pequeñas computadoras, debido a que no demandan muchos recursos en el momento de emular algún proceso o sistema [6]. Convenientemente, en ocasiones

sólo es necesario el empleo de modelos sencillos, expresados en términos de ecuaciones polinomiales que son resultado de la utilización de técnicas de identificación de caja negra, en donde existe una relación de entrada-salida del sistema [7].

En este trabajo se realiza la identificación del modelo del generador sincrónico mediante la prueba de escalón de voltaje en estado estático aplicado en sus ejes magnéticos, teniendo el campo en corto circuito. Las respuestas obtenidas son: señales de corriente de estator y de campo, además del escalón de voltaje como entrada del sistema. La prueba es realizada por medio de una plataforma adquisitor de datos para, posteriormente ser analizada con el toolbox de identificación de sistemas de Matlab®, utilizando el modelo autorregresivo con entrada exógena (ARX por sus siglas en inglés), dando como resultado un conjunto de ecuaciones polinomiales, las cuales representan la dinámica del generador ante la perturbación del escalón aplicado en los ejes magnéticos del generador.

4. Identificación paramétrica

4.1. Configuración de la prueba

Se han empleado diversas señales de voltaje para excitar y analizar diferentes sistemas, además de máquinas eléctricas, por ejemplo: rampas, escalones, impulsos, ruido pseudo-aleatorio y señales senoidales [8]. Se considera que la prueba de escalón de voltaje, siendo una prueba en el dominio del tiempo, no es una prueba destructiva para la extracción de parámetros en generadores síncronos, además de que es fácil de realizar [2]. De acuerdo a [5], el escalón de voltaje se considera una señal con riqueza de excitación, por lo que para cualquier proceso de identificación, es importante la elección de la entrada del sistema, ya que de ésta depende el grado de excitación de los polos de la ecuación característica de la máquina, lo que repercutirá en la eficiencia de la caracterización.

El procedimiento empleado para la conexión del experimento está basado en estándar IEEE 115-A [9], el cual describe la forma en que el generador es conectado para su posicionamiento en los ejes dq . Después de que el generador está posicionado en uno de sus ejes magnéticos, se procede a aplicar la prueba de escalón de voltaje. La Fig. 1 muestra la configuración del experimento, que consta de un sistema adquisitor de datos, el cual a su vez genera una señal booleana que sale por un puerto digital de la tarjeta adquisitor PCI 6025E de National Instruments. La señal digital es enviada hacia un circuito electrónico que activa un relevador de mercurio (SW) y aplica el escalón de voltaje de corriente directa entre las fases a y b del estator del generador sincrónico. Las señales de corriente y voltaje serán sensadas a través de sensores de efecto Hall. Una vez que el escalón ha sido aplicado, las respuestas del sistema llegan a las entradas analógicas de la tarjeta adquisitor, en donde el programa las registra y las almacena en un archivo para su posterior identificación con el toolbox.

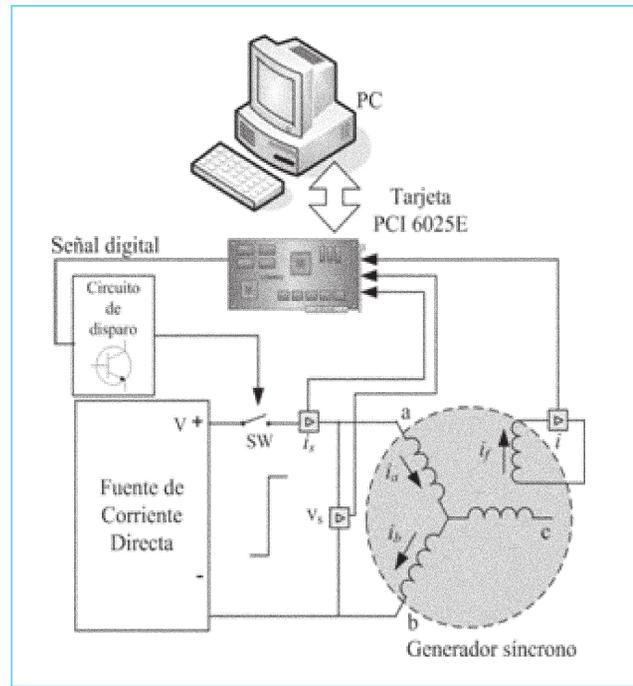


Fig. 1. Conexión de la prueba de escalón de voltaje.

El circuito de disparo que activa el relevador de mercurio está construido a base de transistores. Cabe mencionar que una de las características más importantes del relevador empleado, es que al momento de ser activado evita rebotes que serían reflejados en la señal de excitación, por consiguiente, cualquier rebote afectaría las señales de salida del sistema, y el modelo obtenido a partir de los datos adquiridos no reflejará con exactitud la dinámica del generador bajo estudio, dado que para la identificación de modelos de caja negra las mediciones son la fuente más importante de información.

4.2. Instrumento virtual

El programa del instrumento virtual está formado por dos partes: un panel frontal y un diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz en la cual el usuario tiene la libertad de construir controles e indicadores numéricos, de texto, booleanos, además de crear gráficos de acuerdo a sus requerimientos. Por otra parte, en el diagrama de bloques se programa el código que será ejecutado por el instrumento virtual, el cual se puede conformar por ciclos de control *for*, *while*, manejo de arreglos, lectura y escritura de archivos, rutinas de adquisición y generación de señales [10]. La Fig. 2 muestra el panel frontal del instrumento virtual empleado para la adquisición de las respuestas del generador sincrónico, programado en LabView®. El instrumento consta de dos áreas en donde las salidas del sistema son graficadas, además de contar con un control donde el usuario asignará la ruta y el nombre del

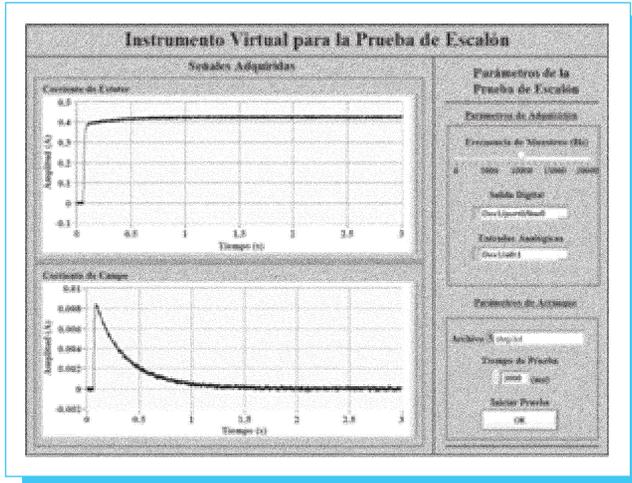


Fig. 2. Panel frontal del instrumento virtual.

archivo donde serán almacenadas las señales de interés en formato de texto. El instrumento virtual además de ser amigable y flexible, cuenta con dos controles que permiten seleccionar los canales correspondientes a una salida digital y dos analógicas, además de que el usuario puede asignar el tiempo de la prueba y la frecuencia de muestreo en que las señales serán adquiridas.

4.3. Identificación del generador síncrono

Los modelos se dividen básicamente en dos: paramétricos y no paramétricos. La diferencia entre ellos radica en que el primero caracteriza el sistema con un número finito de parámetros que describen, en este caso, la relación del sistema a través de expresiones matemáticas. Mientras que los modelos no paramétricos requieren de un número infinito de parámetros para describir el sistema a ser estudiado.

A. Identificación del generador síncrono como caja blanca

En el caso del generador síncrono, existen ecuaciones diferenciales que describen su dinámica por medio de leyes físicas que las convierte en modelos de caja blanca; dichas ecuaciones pueden estar en forma de función de transferencia o de ecuaciones de espacio de estados, y sus parámetros pueden ser constantes de tiempo, resistencias e inductancias. Las ecuaciones diferenciales de los generadores síncronos en general están expresadas en términos de la transformación $dq0$, la cual elimina la dependencia del valor de las inductancias con el ángulo θ , el cual varía con el tiempo y por tanto, refiere las variables del estator al rotor. Una de las formas de representar el generador síncrono en términos de parámetros operacionales está dada por:

$$\Delta\Psi_d = G(s) \Delta e_{fd}(s) - L_d(s) \Delta i_d(s) \quad (1)$$

$$\Delta\Psi_q = -L_q(s) \Delta i_q(s) \quad (2)$$

donde $G(s)$ es la función de transferencia que relaciona el estator y el campo, s es el operador de Laplace, $L_d(s)$ es la inductancia operacional del eje d , $L_q(s)$ es la inductancia operacional del eje q , Δ denota valores incrementales y e_{fd} es el voltaje de campo.

Cuando se suponen un número finito de circuitos de rotor, los parámetros operacionales pueden ser expresados como una relación de polinomios en s , y el orden de los numeradores de L_q y L_d serán igual al número de circuitos del rotor supuestos en cada uno de los ejes [11].

Otra forma de modelar el generador síncrono es con ecuaciones de espacio de estados [2], básicamente son ecuaciones diferenciales que se obtienen con base en estructuras de circuitos equivalentes de cada uno de los ejes del generador. Un modelo del circuito del eje d es descrito por (3)

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}_d^{-1} \mathbf{V}_d - \mathbf{L}_d^{-1} \mathbf{R}_d \mathbf{I}_d \quad (3)$$

donde \mathbf{I} es el vector de estados que contiene las corrientes presentes en el generador, \mathbf{V} es el vector que contiene las variables de entrada del generador, conformado por voltajes, \mathbf{L} es la matriz de inductancias, \mathbf{R} es la matriz de resistencias de la estructura del circuito equivalente.

A partir de estos modelos y de pruebas experimentales, se pueden obtener los parámetros que caractericen al generador, haciendo uso de una amplia gama de técnicas de estimación, ya sean determinísticas o estocásticas.

B. Identificación del generador síncrono como caja negra

Los sistemas pueden ser clasificados de acuerdo a su número de entradas y salidas, existen sistemas que cuentan con múltiples entradas y múltiples salidas, una entrada y múltiples salidas y múltiples entradas una salida. En [12] el generador síncrono es considerado como un sistema de múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO por sus siglas en inglés) que, para su caracterización, puede ser descompuesto en dos sistemas de una entrada una salida (SISO por sus siglas en inglés). Sin embargo al momento de hacer pruebas experimentales y descomponer el sistema MIMO en dos SISO no se garantiza que las mediciones se realicen bajo las mismas condiciones de magnetización, temperatura, etcétera.

Este trabajo se basa en considerar el eje d como un sistema SIMO, si se considera que en el eje d la única entrada del sistema es el escalón de voltaje, aplicado entre las fases a y b del generador y las dos salidas que entregará serán la corriente de campo y la corriente de estator, mientras el campo se encuentra en corto circuito. Por otra parte el eje q puede ser representado por un sistema SISO, como se muestra en las figuras 3 y 4.

Existen diversas estructuras de caja negra propuestas para el modelado de sistemas, éstas incluyen a: el modelo de promedio

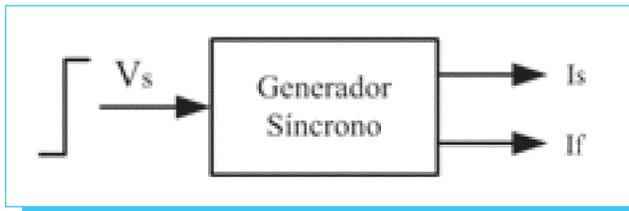


Fig. 3. Esquema SIMO del eje *d* del generador sincrónico.

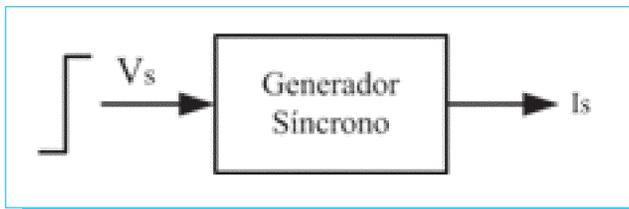


Fig. 4. Esquema SISO del eje *q* del generador sincrónico.

móvil (MA por sus siglas en inglés), modelo de promedio móvil autorregresivo (ARMA por sus siglas en inglés), modelo autorregresivo de promedio móvil con entrada exógena (ARMAX), modelo autorregresivo con entrada exógena (ARX).

La estructura del modelo ARX, empleado para la identificación del generador sincrónico, es un modelo lineal extendido del modelo autorregresivo (AR por sus siglas en inglés) que está basado en series de tiempo. Por otra parte, el modelo ARX toma en cuenta una entrada exógena (X), por lo que se pueden obtener modelos más exactos [13]. El diagrama de bloques de un modelo ARX se muestra en la Fig. 5, del cual se obtiene (4), donde *A* y *B* son polinomios, *u(k)* es la entrada, *y(k)* es la salida y *v(k)* es la entrada exógena del sistema,

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{1}{A(q)} v(k) \quad (4)$$

en (4) la función de transferencia que relaciona la entrada y la salida está denotada por: *A(q)/B(q)*, debido a que tiene una función de transferencia de ruido que relaciona la salida del sistema *y(k)* a la entrada exógena *v(k)*, este modelo está formado de dos partes, una determinística y otra estocástica.

4.4. Resultados

En la prueba de escalón de voltaje se consideró un nivel de entrada que representara niveles de corriente presentes en el generador, bajo condiciones normales de operación, para obtener un modelo aproximado a la realidad, sin tomar en cuenta condiciones de saturación. Las Figs. 6a y 6b muestran las dos entradas del generador de 7 kVA, 220 V, 60 Hz polos salientes en

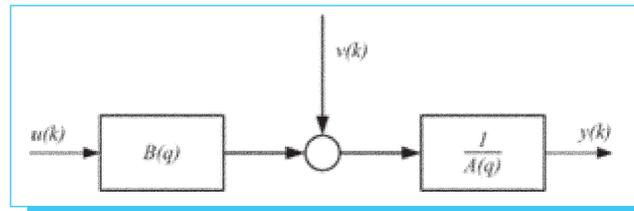


Fig. 5. Diagrama de bloques del modelo ARX.

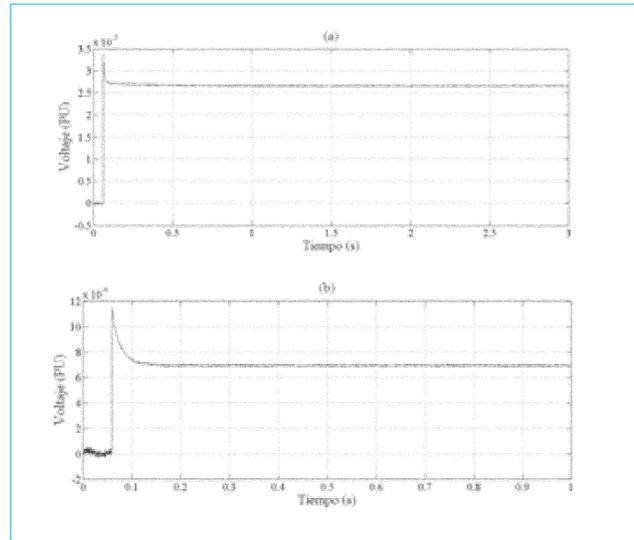


Fig. 6. (a) Escalón de entrada en el eje *d*, (b) Escalón de entrada en el eje *q*.

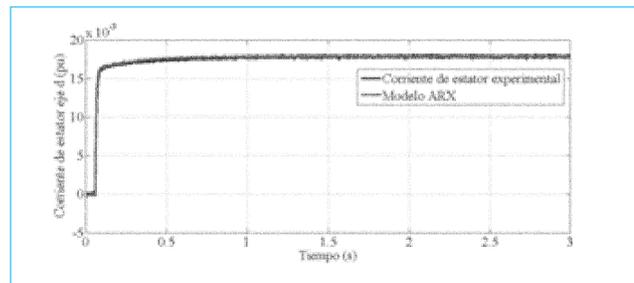


Fig. 7. Corriente de estator en el eje *d* ante la entrada escalón con ajuste del 95.15 %.

p.u. para los ejes *d* y *q* respectivamente. La identificación del generador se lleva a cabo usando el toolbox de identificación de Matlab®, obteniéndose los modelos y los ajustes correspondientes de cada una de las respuestas de los ejes *d* y *q* mostradas por las Figs. 7, 8 y 9. Mientras que el error entre las mediciones y el modelo para los ejes *d* y *q* del generador se muestra en las Figs. 10, 11 y 12.

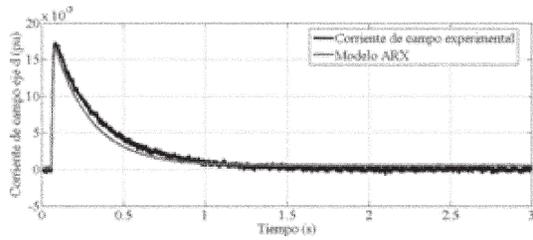


Fig. 8. Corriente de campo en el eje *d* ante la entrada escalón con un ajuste del 81.11%.

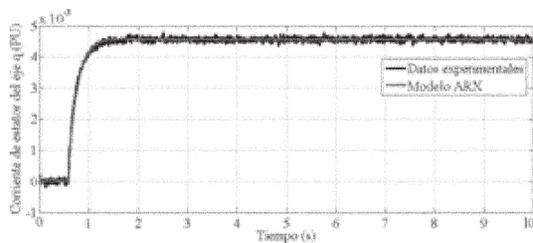


Fig. 9. Corriente de estator en el eje *q* ante la entrada escalón con un ajuste del 94.34%.

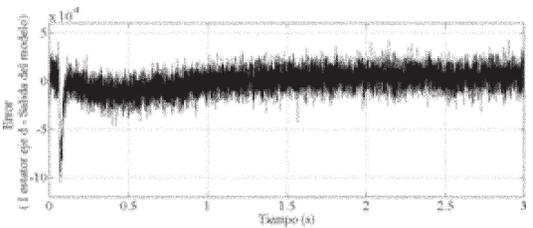


Fig. 10. Error de la corriente de estator en el eje *d* estimada.

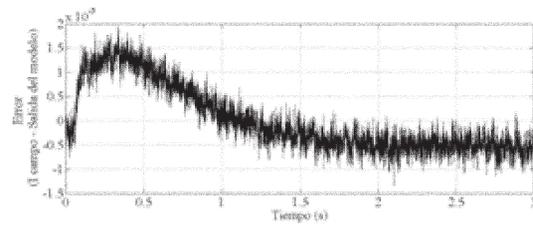


Fig. 11. Error de la corriente de campo estimada.

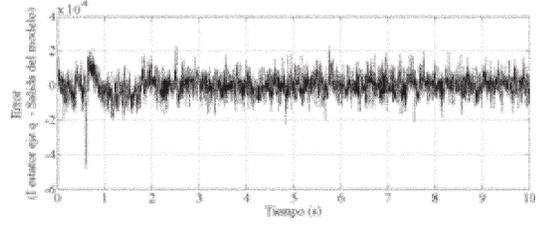


Fig. 12. Error de la corriente de estator en el eje *q* estimada.

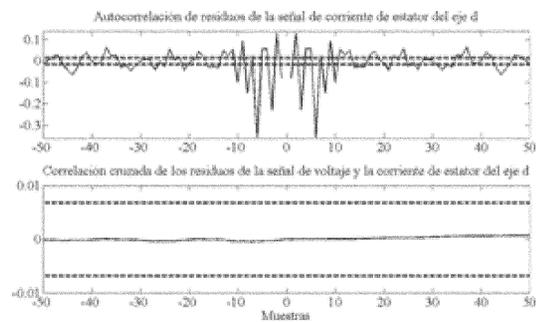


Fig. 13. Gráficas de autocorrelación y correlación cruzada de corriente de estator para el eje *d*.

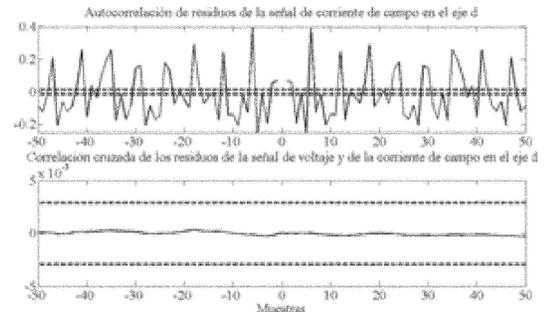


Fig. 14. Gráficas de autocorrelación y correlación cruzada de corriente de campo.

Cualquier modelo estimado tiene cierto grado de incertidumbre, lo cual afecta su confiabilidad, con este propósito se llevan a cabo análisis de la correlación que hay entre las señales obtenidas de entrada-salida. La validación de los modelos, ya sean paramétricos o no lo sean, se hace mediante el análisis de los residuos del modelo que representa parte de los datos de validación [14]. Las Figs. 13, 14 y 15 muestran el análisis estadístico realizado en el toolbox de identificación, donde las curvas de



Fig. 15. Gráficas de autocorrelación y correlación cruzada de corriente de estator para el eje q .

correlación para un modelo aceptable deben idealmente encontrarse entre las líneas achuradas en dichas gráficas.

Las ecuaciones obtenidas de la identificación empleando un modelo ARX para los ejes d están dadas por (5).

$$\begin{aligned}
 A_0 y(t) + A_1 y(t-1) + A_2 y(t-2) \\
 + A_3 y(t-3) + A_4 y(t-4) \\
 + A_5 y(t-5) + A_6 y(t-6) = B_0 u(t) \\
 + B_1 u(t-1) + B_2 u(t-2)
 \end{aligned} \quad (5)$$

donde:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1.6449 + 0.0057i & 0.0831 + 0.0047i \\ -0.1210 + 0.0068i & -1.4630 + 0.0057i \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.8412 + 0.0102i & -0.1387 + 0.0085i \\ -0.0515 + 0.0123i & 0.4607 + 0.0102i \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.5061 + 0.0091i & 0.0458 + 0.0083i \\ 0.3662 + 0.0109i & -0.2715 + 0.0099i \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -1.1464 + 0.0092i & -0.0999 + 0.0083i \\ -0.1477 + 0.0110i & 0.6079 + 0.0099i \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0.6383 + 0.0103i & 0.2083 + 0.0085i \\ -0.0677 + 0.0123i & -0.1287 + 0.0102i \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} -0.1829 + 0.0056i & -0.0973 + 0.0047i \\ 0.0308 + 0.0067i & -0.2037 + 0.0056i \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 B_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & B_1 &= \begin{bmatrix} 0.1435 + 0.0286i \\ 0.0028 + 0.0067i \end{bmatrix} \\
 B_2 &= \begin{bmatrix} -0.0677 + 0.0289i \\ 0.0586 + 0.0346i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Por otra parte, (6) es la ecuación que representa el modelo obtenido del eje q y que está dado por:

$$\begin{aligned}
 2.84y(t-1) + 2.741y(t-2) - 1.081y(t-3) \\
 + 0.5969y(t-4) + 0.02993y(t-5) \\
 - 1.767y(t-6) + 1.987y(t-7) \\
 - 0.066y(t-8) = \\
 0.1624u(t-1) - 0.4568u(t-2) \\
 + 0.4745u(t-2) + 0.4745u(t-3) \\
 - 0.1781u(t-4)
 \end{aligned} \quad (6)$$

4.5. Discusión

Es importante que ante cualquier problema de identificación, se cuente con un conocimiento *a priori* del sistema físico, debido a que existe una gran variedad de modelos de caja negra para identificación paramétrica, por ejemplo los modelos lineales: AR, ARX, ARMAX, OE (*Output Error* por sus siglas en inglés), BJ (*Box Jenkins* por sus siglas en inglés), o los modelos no lineales NARX (*No linear Autoregressive with Exogenous Input*). Por otro lado, también es recomendable, como una primera aproximación, identificar con modelos lineales.

Debido a que el eje d del generador sincrónico es un sistema SIMO, sólo los modelos de identificación ARX, espacio de estados, Hammerstein-Wiener y NARX del toolbox de identificación de Matlab son capaces de trabajar con éste. Durante el análisis se obtuvo un sistema de ocho polos para el eje q y un sistema de seis polos para el eje d , dada la cantidad de variables involucradas en el control para sistemas de más de cuatro polos, se optó por emplearlo dentro de simulaciones con propósitos puramente didácticos, debido a que no siempre se asegura la robustez en su solución. Lo anterior también se traduce en que este tipo de sistemas cuentan con estados que no son medibles, por lo que es común en la práctica, recurrir a observadores de estados.

5. Conclusiones

El comportamiento en una máquina sincrónica está compuesto por la interacción de fenómenos, eléctricos, magnéticos, térmicos y mecánicos; esto ocasiona que los fenómenos resultantes sean

numerosos y complejos. Emplear un modelo para representar tal cantidad de fenómenos requeriría de un considerable esfuerzo de cálculo y análisis. Una práctica común que minimiza este esfuerzo, sin sacrificar precisión, es modelarlo de forma sencilla considerando los fenómenos más relevantes. Lo cual brinda buenos resultados a un esfuerzo de análisis menor. Se empleó un relevador de mercurio, el cual tiene la característica de evitar rebotes en su activación, y consecuentemente evita el ruido indeseable en las señales transitorias de voltaje y de corriente del generador.

Por otra parte, en este trabajo no se estimaron los parámetros fundamentales del generador, sin embargo los datos obtenidos de pruebas pueden ser empleados con este fin, empleando algún método de optimización, ya sea determinístico o estocástico para obtener los parámetros de la máquina síncrona.

6. Referencias

- [1] Walton, A. "The Extraction of Parameters for Synchronous Machines from the Results of Frequency Response Tests", presented at the 6th *International Conference on Electrical Machines and Drives*, Oxford, UK, 1993.
- [2] Sellschopp, F.S. and Arjona, M.A. "Semi-analytical Method for Determining d-axis Synchronous Generator Parameters using the DC Step Voltage Test," *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, 1(3), May 2007 pp. 348-354.
- [3] Sellschopp, F.S., and Arjona, M.A., "A Virtual Instrument for Frequency Analysis of Electrical Machines," presented at *IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives*, Cambridge, MA, 2001.
- [4] Shaffer, E. C., and Gross C.A., "Methods for Determining Linear Synchronous Machine Parameters", presented at the 26th *Southeastern Symposium on System Theory*, Athens, OH, USA, 1994.
- [5] Sellschopp, F.S., Cisneros, M., Arjona, M.A., Vargas, R., Hernández, C., and Cabrera, V.M. "A Virtual Testbed for Characterizing Synchronous Generators Based on Time Domain Tests," presented at the 18th *International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 2008.
- [6] Kamwa I., Viarouge P., Le-Huy H., "Experiences of Recursive Identification Applied to Electrical Machines," presented at the *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Maui, HI, USA, 1993.
- [7] Ludwig, E., Crow, M.L., Erickson, K. and Shah, K., "A Feasibility Study of On-Line Excitation System Parameter Estimation," presented at the 20th *International Conference on Power Industry Computer Applications*, Columbus, OH, USA, 1997.
- [8] Walton, A. and Croft, J.S., "The Modeling of Synchronous Machines", Book of Abstracts IEMDC-1989, presented at the 4th *International Conference on Electrical Machines and Drives*, London, 1989.
- [9] IEEE Criteria for Tests Procedures for Synchronous Machines, Sponsor: *Electric Machines Committee of the IEEE Power Engineering Society*, IEEE Std 115-1995.
- [10] Essick, J., *Advanced LabVIEW Labs*, Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [11] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, The EPRI Report Power System Engineering Series, McGraw-Hill Press, 1994.
- [12] Verbeeck, J., Pintelon R. and Lataire P., "Identification of Synchronous Machine Parameters using a Multiple Input Multiple Output Approach," *IEEE Trans. Energy Conversion*, 14(4), Dec. 1999, pp. 909-917.
- [13] Nelles, O., *Nonlinear System Identification*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001.
- [14] Matlab, System Identification Toolbox (7.0), *User's Guide, The Math Works*, Natick, MA.

Latindex

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

www.latindex.unam.mx.