

Identificación y Control Adaptable aplicados a un Motor de Corriente Directa

William Torres Hernández¹, Rosalío Farfán Martínez¹, José A. Ruz Hernández²,
José L. Rullán Lara², Ramón García Hernández², Dionisio A. Suárez Cerda³

¹Universidad Tecnológica de Campeche, Carretera Federal 180 S/N, San Antonio Cárdenas,
C.P. 24381, Cd. del Carmen, Campeche, MÉXICO.

wtorres_rfarfan@utcam.edu.mx

²Universidad Autónoma del Carmen, Av. 56 #4 X Av. Concordia, Col. Aviación, C.P.
24180, Cd. del Carmen, Campeche, MÉXICO.

jruz_jrullan_rghernandez@uacam.unacar.mx

³Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, MÉXICO.
suarez@iie.org.mx

Resúmen. Este trabajo presenta la identificación del modelo de un motor de corriente directa empleando la metodología de mínimos cuadrados ARX. En el modelo identificado se emplea un algoritmo de control adaptable para presentar resultados sobre el control de la velocidad del motor de corriente directa. Se obtienen datos reales de entrada-salida del motor y se calcula el modelo empleando el método de identificación paramétrica de mínimos cuadrados. El modelo obtenido se valida en tiempo real comparando la señal de salida del motor con la del modelo obtenido para una misma señal de entrada. Se diseña un algoritmo de control adaptable indirecto recursivo para realizar el control de la velocidad del motor, estos resultados se presentan a nivel simulación.

Palabras Clave. Control de motores, asignación de polos, control de velocidad, control adaptable, identificación por mínimos cuadrados.

1 Introducción

Los motores de corriente directa se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales. No obstante que sus propiedades de operación son accesibles, son bien conocidos los efectos no lineales presentes en la máquina y que se reflejan durante el control de los mismos, particularmente en la región de operación del motor a baja velocidad. Aquí, los efectos de la fricción son los más significativos, además de otras no linealidades típicas como son: histéresis, zona muerta y saturación [1], [2].

Uno de los problemas para la implementación de sistemas de control automático es obtener un modelo que describa la dinámica del sistema a ser controlado. Normalmente este modelo no está disponible o es muy complicado para propósitos de diseño, por ello es importante disponer de un modelo lo suficientemente simple para

*M. A. Moreno, C. A. Cruz, J. Álvarez, H. Sira (Eds.)
Special Issue: Advances in Automatic Control and Engineering
Research in Computing Science 36, 2008, pp. 65-74*

trabajar con él, pero que incluya las características esenciales del proceso [3].

La identificación paramétrica, es el método más común de identificación de sistemas dinámicos, está basado en los denominados métodos de minimización del error de predicción, derivados de la tradicional teoría de mínimos cuadrados. La adaptación de esta teoría a la identificación de procesos se basa en aceptar como cierto que el proceso puede representarse por un modelo de estructura fija, generalmente una ecuación lineal en diferencias, lo que implica que dicho modelo tiene naturaleza discreta. La aplicación de este algoritmo puede hacerse fuera de línea o no recursiva, mediante el uso de toda la información disponible de entrada y salida del proceso para determinar un modelo invariante en el tiempo. También, puede hacerse de forma recursiva, de manera que partiendo de una estimación inicial generalmente arbitraria, de los parámetros del modelo, se va actualizando y mejorando con cada nueva información de entrada y salida obtenida, lo que permite obtener una estimación de parámetros variables con el tiempo. Resulta obvio que la identificación recursiva está especialmente concebida para usarse dentro de lo que se conoce en la bibliografía especializada como lazo de control adaptable.

En [4], utilizan el modelo no lineal de un motor de corriente directa con conexión en serie. Comparan sus resultados de simulación en lazo cerrado con resultados en lazo cerrado en tiempo real. Finalmente demuestran que un observador no lineal para la estimación de la velocidad y el par se puede construir basándose solamente en la medición de la corriente del motor. En [5], se realiza una identificación en línea y se diseña el controlador para un motor de corriente directa usando redes neuronales. En este trabajo se toma el problema del modo más general posible preservando la fidelidad del modelo completo, las cargas del motor se modelan en línea y se controlan mediante retropropagación de redes neuronales.

2 Descripción del Equipo

El problema en el motor de corriente directa consiste en controlar la velocidad de giro aplicando un voltaje al devanado de armadura del mismo. En la Figura 1 se aprecia el equipo a utilizar. En los datos de placa del motor se observa que la velocidad nominal es de 3600 rpm y la tensión de alimentación es de 220 Volts.

Se emplea el módulo DL 2637 de la marca de Lorenzo® para poder alimentar al devanado de armadura con un voltaje variable de corriente directa. Este módulo permite con un voltaje entre 0 y 10 volts (señal de control), variar un voltaje de corriente directa entre 0 y 220 volts. Con la finalidad de obtener la forma de la señal de voltaje aplicado a la armadura como señal de entrada a la planta, se utiliza un sensor de voltaje de la marca LEM, modelo LV100-300.

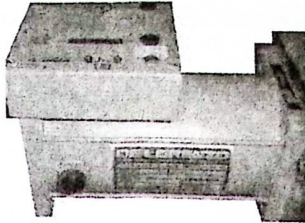


Fig. 1. Motor DL10200A1 de la marca De Lorenzo®.

Para obtener la señal de velocidad (ω) se emplea un módulo de la marca De Lorenzo®, modelo DL 10300PAC. Este módulo proporciona una ganancia de $1\text{mv}/\text{min}^{-1}$ es decir, para 3600 rpm del motor proporciona 3.6 Volts.

3 Identificación del Modelo del Motor

En esta sección se presenta la metodología empleada para identificar el modelo del motor de corriente directa, se emplea una estructura ARX para lograr este objetivo. A diferencia de los métodos de identificación clásica, los de identificación paramétrica permiten caracterizar de forma más ajustada los modelos, ya que incorporan en su estructura modelos de perturbación.

3.1 Desarrollo de la Identificación del Modelo del Motor

Para la adquisición de datos de la velocidad y voltaje se emplea la DAQ PCI 6071E de National Instruments®. Los sensores de velocidad y voltaje se conectan a las terminales de entrada analógica de la tarjeta de adquisición. Esta tarjeta también cuenta con una terminal de salida analógica que proporciona una señal de voltaje entre 0 y 10 volts, esta señal entra al módulo DL 2637 De Lorenzo®, el cual entrega un voltaje de corriente directa al devanado de armadura del motor entre 0 y 240 volts, de esta manera se puede controlar la velocidad del motor al variar el voltaje de armadura.

Para identificar los parámetros de un sistema, es necesario que la señal de entrada excite todos los modos rápidos y lentos de la planta, de tal forma que ésta pueda responder con información útil a ser procesada por los algoritmos de identificación.

El motor de corriente directa no se puede operar por debajo de un 60% de su velocidad nominal (dato del fabricante). En este trabajo se considera un mínimo del 70%, por lo tanto, la velocidad mínima que se considera es de 2500 rpm para un voltaje de entrada de 150 volts aproximadamente; y la velocidad máxima de 3600 rpm para un voltaje de entrada de 220 volts.

Tomando en cuenta lo anterior se genera la señal de entrada, la cual contiene excitación persistente dentro del rango de operación de este motor. Durante el proceso

de adquisición, se hicieron ocho experimentos de entrada y salida del sistema con el fin de implementarlas en el Toolbox IDENT de Matlab y obtener un modelo con la estructura ARX.

El tiempo de muestreo utilizado en este trabajo es de 0.01 seg . Se toma este tiempo teniendo en cuenta que la constante de tiempo del sistema es de $\tau = 0.1849 \text{ seg}$. Esta constante de tiempo se obtiene al observar la respuesta del motor ante una entrada escalón. Una regla comúnmente usada consiste en escoger un tiempo de muestreo alrededor de diez veces el ancho de banda del sistema. Esto corresponde aproximadamente a muestrear en torno a cinco u ocho valores del tiempo de subida de la respuesta al escalón del sistema [6]. Por lo tanto, el tiempo de muestreo escogido para este trabajo cumple con este requisito.

Los datos que resultaron con mejor porcentaje de ajuste se muestran en la Figura 2.

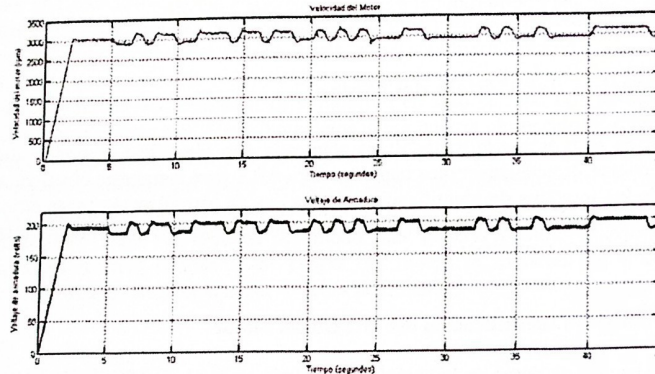


Fig. 2. Datos: arriba.- velocidad del motor; abajo.- voltaje de armadura.

Estos datos proporcionan la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{w(s)}{V(s)} = \frac{98.64s + 8844}{s^2 + 81.43s + 563.2} \quad (1)$$

donde: $V(s)$ es el voltaje aplicado a la armadura del motor, y $w(s)$ es la velocidad del motor en rpm.

Para validar el proceso de identificación, se sometió el modelo identificado a una prueba en tiempo real trabajando de manera paralela con el motor. Se aplica un voltaje de entrada y con ayuda de Simulink de Matlab se obtienen los resultados que se aprecian en la Figura 3. Como se observa, el modelo identificado responde aproximadamente igual que el motor para una misma señal de voltaje. El error entre ambas señales es de 1.1%.

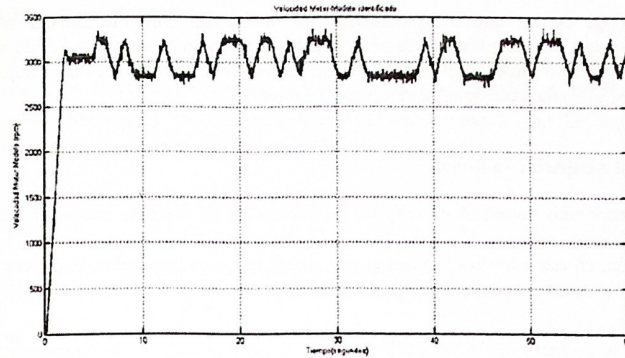


Fig. 3. Velocidad del Motor y del Modelo identificado en revoluciones por minuto.

Para realizar la adquisición de datos en tiempo real en este trabajo, se utiliza la herramienta xPC Target de Matlab. El xPC Target es una aplicación cliente/servidor que permite conectar los modelos creados en Simulink con sistemas físicos, y simularlos en tiempo real [7]. La aplicación se desarrolla en una PC de escritorio (host), con Matlab, Simulink, Real-Time Workshop y un compilador de C instalados. En esta PC se crean los modelos usando bloques de Simulink y se genera el código correspondiente. Posteriormente, este código se ejecuta en tiempo real en una segunda PC (target). Tanto el host como el target no requieren ningún hardware específico, basta con una PC de escritorio [8].

4 Control Adaptable

Un controlador adaptable puede verse como un controlador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del proceso, y puede reducir los efectos de las perturbaciones. De igual forma, puede verse como un controlador con parámetros ajustables y un mecanismo para ajustar estos parámetros.

4.1 Regulador Autosintonizable (STR)

El regulador auto sintonizable (STR) se obtiene mediante un acoplamiento entre el controlador convencional y los parámetros estimados on-line. La operación de este controlador es la siguiente: en cada instante, el estimador envía al controlador los valores estimados, los cuales son calculados a partir de las medidas de entrada-salida de la planta. El regulador calcula la acción de control correspondiente a esos valores, la cual causa una nueva salida de la planta. El ciclo de adaptación se repite, y así, la acción de control cambia cuando existen cambios en los parámetros de la planta.

Teniendo en cuenta que los parámetros del motor de corriente directa se desconocen y que pueden presentar cambios significativos a baja velocidad debido a las características no lineales del mismo, en este trabajo se diseña un regulador auto sintonizable (STR) para controlar la velocidad del motor.

4.2 Control Adaptable Indirecto

En el regulador auto sintonizable indirecto, los parámetros de la planta se identifican en línea. Varios métodos de identificación pueden utilizarse para realizar la identificación, en este trabajo se utiliza el método de mínimos cuadrados recursivos. Considere el proceso con una entrada y una salida [9]:

$$Ay(t) = Bu(t) + v(t). \quad (2)$$

donde y es la salida del sistema, u es la entrada al sistema y v es una perturbación.

El proceso representado por (2) puede escribirse como:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) - \dots - a_n y(t-n) + b_0 u(t-d_0) + \dots + b_m u(t-d_0-m) \quad (3)$$

El modelo (3) es lineal en los parámetros y puede ser representado de la siguiente manera:

$$y(t) = \varphi^T(t-1)\theta. \quad (4)$$

donde φ es el vector de regression y θ es el vector que contiene los parámetros:

$$\begin{aligned} \theta^T &= [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_0 \ \dots \ b_m] \\ \varphi^T(t-1) &= [-y(t-1) \dots -y(t-n) \\ &\quad u(t-d_0) \dots u(t-d_0-m)] \end{aligned} \quad (5)$$

El estimador de mínimos cuadrados con factor de olvido exponencial está dado por:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \\ \varepsilon(t) &= y(t) - \varphi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1) \\ K(t) &= P(t-1)\varphi(t-1)(\lambda + \varphi^T(t-1)P(t-1)\varphi(t-1))^{-1} \\ P(t) &= (I - K(t)\varphi^T(t-1))P(t-1) / \lambda \end{aligned} \quad (6)$$

donde $\varepsilon(t)$ es el error y $P(t)$ es la matriz de covarianzas.

Si la señal de entrada al proceso es capaz de excitarlo de manera persistente y la estructura del modelo estimado es compatible con el proceso, los valores estimados deben converger a los valores reales.

4.3 Ubicación de los Polos de Grado Mínimo

Una vez que se determinan los parámetros del modelo, se proponen los polinomios que contienen la respuesta deseada del sistema en lazo cerrado, A_m y B_m ; y un observador polinomial A_0 . Estos polinomios deben cumplir con las siguientes condiciones de compatibilidad:

$$\begin{aligned} \text{grado}(A_m) &= \text{grado}(A) \\ \text{grado}(B_m) &= \text{grado}(B) \\ \text{grado}(A_0) &= \text{grado}(A) - \text{grado}(B^*) - 1 \\ B_m &= B^- B_m^+ \end{aligned} \quad (7)$$

El polinomio B se factoriza como $B = B^+ B^-$, donde B^+ es mónico. B^+ es un polinomio que contiene todos los ceros estables y bien amortiguados del sistema, estos ceros pueden cancelarse mediante el controlador. B^- corresponde a los ceros inestables o pobremente amortiguados; B^- es un factor de B_m . Posteriormente se encuentran los polinomios R' y S con $\text{grado}(S) < \text{grado}(A)$ de:

$$AR' + B^- S = A_0 A_m. \quad (8)$$

se forman los polinomios $R = R' B^+$ y $T = A_0 B_m^+$ y se calcula la señal de control de:

$$Ru = Tu_c - Sy. \quad (9)$$

donde: u es la señal de control; u_c es la señal de referencia y y es la salida del sistema. Este método a menudo es llamado en la literatura como *ubicación de los polos de grado mínimo* [9]. En el caso particular de diseño en el que se cancelan todos los ceros de la planta:

$$\begin{aligned} \text{grado}(A_0) &= \text{grado}(A) - \text{grado}(B) - 1 \\ B_m &= A_m(1)q^{d_0} \\ B^- &= b_0 \\ B^+ &= B/b_0 \\ T &= A_m(1)q^{d_0}/b_0 \end{aligned} \quad (10)$$

El polinomio característico en lazo cerrado se calcula de la siguiente manera:

$$A_c = B^+ A_c'. \quad (11)$$

La ecuación Diofantina se reduce a:

$$AR' + b_0 S = A_c' = A_0 A_m. \quad (12)$$

4.4 Control Adaptable Indirecto aplicado al Motor de Corriente Directa

Para este trabajo el diseño del controlador se realizó de la siguiente manera: de la identificación recursiva se obtienen los siguientes polinomios que describen la planta en ese instante:

$$\frac{B(q)}{A(q)} = \frac{b_0 q + b_1}{q^2 + a_1 q + a_2}. \quad (13)$$

el $\text{grado}(A) = 2$ y el $\text{grado}(B) = 1$, los polinomios deseados para la respuesta del sistema en lazo cerrado son:

$$\frac{B_m(q)}{A_m(q)} = \frac{b_{m0} q}{q^2 + a_{m1} q + a_{m2}} = \frac{0.0094 q}{q^2 - 1.86 q + 0.8694}. \quad (14)$$

Los polinomios deseados corresponden a un sistema con una frecuencia natural de 5 rad/seg y un factor de amortiguamiento de 0.7. El parámetro b_{m0} se selecciona para que la ganancia estática del sistema sea unitaria. Siguiendo con el procedimiento se factoriza el polinomio B y se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} B^+(q) &= q + \frac{b_1}{b_0} \\ B^-(q) &= b_0 \\ B_m &= \frac{b_{m0} q}{b_0} \end{aligned} \quad (15)$$

Los polinomios R , S y T son de primer orden; el polinomio R' es de grado cero, es decir, $R' = 1$; el grado de B^+ es uno y el grado de A_0 es cero. Se elige $A_0(q) = 1$. La ecuación Diofantina es:

$$(q^2 + a_1 q + a_2) \cdot 1 + b_0 (s_0 q + s_1) = q^2 + a_{m1} q + a_{m2}. \quad (16)$$

la solución de esta ecuación es:

$$s_0 = \frac{a_{m1} - a_1}{b_0}; \quad s_1 = \frac{a_{m2} - a_2}{b_0}. \quad (17)$$

El controlador es caracterizado por los siguientes polinomios:

$$\begin{aligned}
 R(q) &= B^* = q + \frac{b_1}{b_0} \\
 S(q) &= s_0 q + s_1 \\
 T(q) &= A_0 B_m' = \frac{b_{m0} q}{b_0}
 \end{aligned}
 \quad (18)$$

Entonces la ley de control se calcula en línea como sigue:

$$u(t) = t_0 u_c(t) - s_0 y(t) - s_1 y(t-1) - r_1 u(t-1). \quad (19)$$

4.5 Resultados

El algoritmo de control se aplica a nivel simulación al modelo identificado del motor de corriente directa. En la Figura 4 (arriba), se observa el seguimiento de la trayectoria de velocidad por parte de la salida del sistema, presenta unos pequeños sobre impulsos de alrededor del 4%; el seguimiento se logra alrededor de 2 segundos. La señal de referencia utilizada es un tren de pulsos con una amplitud de 3000 rpm. En la Figura 4 (abajo), se presenta la ley de control, que para el caso del motor de corriente directa corresponde al voltaje de armadura, este alcanza en su punto más alto 220 volts, con lo cual se garantiza que el motor trabaja dentro de sus parámetros nominales.

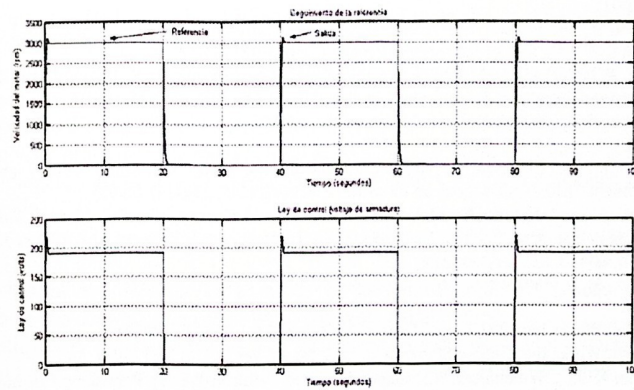


Fig. 4. Seguimiento de la referencia y ley de control.

5 Conclusiones

Se realizó la identificación del modelo de un motor de corriente directa empleando una estructura ARX y la metodología de mínimos cuadrados; este modelo se validó en tiempo real mostrándose la comparación con el motor real. Se diseñó un algoritmo de control adaptable indirecto y se aplicó a nivel simulación al modelo del motor. Como se apreció, los resultados fueron aceptables en cuanto al control de la velocidad del motor, la ley de control se muestra suave y dentro de los límites nominales de la máquina. Como trabajo futuro se propone aplicar el algoritmo de control diseñado en tiempo real.

6 Agradecimientos

Los dos primeros autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Campeche por todo el apoyo brindado para realizar este trabajo. El tercero, cuarto y quinto autor agradecen al Promep su apoyo a través del proyecto P/-CA-7 2006 05.

Referencias

1. Tsang, K.M., and Li, G.: Robust Nonlinear Nominal-Model Following Control to Overcome Deadzone Nonlinearities. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48, 177-184 (2001).
2. Chiasson, J., and Bodson, M.: Technical Notes and Correspondence Nonlinear Control of a Shunt DC. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 38, 935-942 (1993).
3. Garcia, R., Sánchez, E.N., Ruz, J. A., Pacheco, J. G., y Shelomov, E.: Seguimiento de Trayectorias Basado en Regulación Lineal y Control Difuso Takagi-Sugeno Aplicado al Problema de la Bola y la Viga. *Memorias de SAAEI*, pp. 365-370. Santander, España (2005).
4. Mehta, S., and Chiasson, J.: Nonlinear Control of a Series DC Motor Theory and Experiment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45, 134-141 (1998).
5. Rubaii, A., and Kotaru, R.: Online Identification and Control of a DC Motor Using Learning Adaptation of Neural Networks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36, 935-942 (2000).
6. Aguado, A., y Martínez, M.: Identificación y Control Adaptativo. Prentice Hall, España, (2003).
7. The MathWorks Inc. xPC Target, User's Guide, ver. 2.0.1. U.S.A., (2003).
8. The MathWorks Inc. Getting Started with xPC Target, ver. 2. U.S.A., (2003).
9. Åström, K. J., y Wittenmark, B.: Adaptive Control. Addison-Wesley Publishing Co. Inc., U.S.A., (1995).