

Detección de la Ruptura de una Banda en Sistemas Electromecánicos.

Martínez Guerra Rafael, Garrido Moctezuma Rubén, Palacios Chávez René

CINVESTAV-IPN, Departamento de Control Automático
Av. IPN 2508, AP 14-740, México DF. 07360, México
Tel: (55)5061-3800/ext. 42-23; e-mail: rpalacios{gguerra, garrido}@ctrl.cinvestav.mx

Resumen

En un sistema compuesto de un motor de corriente directa el cual impulsa a una carga a través de una banda, se detecta el rompimiento de una banda utilizando un observador proporcional de orden reducido el cual se diseña mediante el uso de técnicas álgebra-diferenciales. Se considera que el motor es controlado en lazo abierto mediante un voltaje aplicado a la armadura y, además, se considera que la velocidad en el motor es medible. Se evalúa el desempeño de la técnica propuesta mediante experimentos en un prototipo de laboratorio.

Palabras clave: Detección de fallas, observabilidad algebraica, observador proporcional de orden reducido.

1. Introducción

El deseo de una alta confiabilidad en los procesos industriales ha creado la necesidad de detectar las condiciones anormales que se presentan durante su operación. Estas condiciones son llamadas fallas y es importante su detección oportuna. Los impulsores con banda son los dispositivos electromecánicos que con más frecuencia son utilizados en la industria para transmitir potencia o para el accionamiento de varias piezas de maquinaria, por lo regular este tipo de dispositivos trabaja a velocidades altas donde, los efectos dinámicos como las fuerzas centrífugas, el chicoteo de la banda así como la vibración reducen la eficiencia del impulsor. Por tanto, los impulsores con banda están sujetos a múltiples esfuerzos. Debido a que la banda en este tipo de sistemas es el elemento más frágil y, además, es el encargado de transmitir potencia y movimiento a elementos cruciales dentro de sistemas

electromecánicos, el presente trabajo tiene como principal objetivo detectar el rompimiento de este elemento.

El problema de detección de fallas en sistemas electromecánicos que utilizan bandas ha sido tratado en [1] usando técnicas de estimación de parámetros combinado con el conocimiento heurístico de un operador. El enfoque presentado en ese trabajo explica como se pueden diagnosticar fallas en sistemas electromecánicos a partir de la identificación de varios parámetros como: resistencia, inductancia y flujo magnético de la armadura de un motor de CD. Los parámetros obtenidos a través del método de Mínimos Cuadrados son utilizados en las ecuaciones dinámicas del sistema para después comparar estos resultados con una base de datos obtenidos previamente, de esta manera, el operador es capaz de diagnosticar fallas en estos sistemas y tomar acciones de corrección.

Como una alternativa a la identificación de parámetros, el presente trabajo propone el enfoque álgebra-diferencial para detectar el rompimiento de la banda utilizando un observador proporcional de orden reducido, la principal ventaja de este enfoque es que solo se consideran dos mediciones en el motor, la estimación fuera de línea de solo dos parámetros y con la ventaja de que el observador resultante tiene un comportamiento lineal por lo que resulta fácil su implementación en circuitos electrónicos analógicos o en procesadores digitales.

La organización de este trabajo es como sigue: en la sección 2 se introducen definiciones y notaciones básicas del álgebra diferencial; en la sección 3 se define el modelo dinámico del sistema y se plantea el problema de detección de fallas como un problema de observación; en la sección 4 se diseña un observador proporcional de orden

reducido para un estado del sistema que permite la detección de la ruptura de la banda y se propone un método para su empleo; en la sección 5 se realizan los experimentos en un prototipo de laboratorio y al final se dan algunas conclusiones acerca de los resultados obtenidos en la experimentación.

2. Definiciones Básicas

La notación y algunas definiciones elementales sobre el álgebra diferencial se describen a continuación:

Definición 1. La extensión de un campo diferencial L/k está dada por dos campos diferenciales k y L , tal que: *i)* k es un subcampo de L , *ii)* la derivación de k es la restricción a k de la derivación de L .

Ejemplo 1. R, Q, C son campos triviales constantes.

Ejemplo 2. $R\langle e^t \rangle / R$ es una extensión del campo diferencial $R \subseteq R\langle e^t \rangle$, e^t es una solución de $P(x) = \dot{x} - x = 0$.

Definición 2. Una dinámica es una extensión diferencial algebraica finitamente generada $G/k\langle u \rangle$ ($G = k\langle u, \xi \rangle, \xi \in G$). Cualquier elemento de G satisface una ecuación diferencial algebraica con coeficientes en k y en las componentes de u , así como en un número finito de sus derivadas de esta.

Definición 3. Sea el subconjunto $\{u, y\}$ de G en una dinámica $G/k\langle u \rangle$. Un elemento en G se dice que es algebraicamente observable con respecto a $\{u, y\}$ si es algebraicamente observable sobre $k\langle u, y \rangle$. Por lo tanto, un estado x se dice que es algebraicamente observable si, y solamente si, éste es algebraicamente observable con respecto a $\{u, y\}$. Una dinámica $G/k\langle u \rangle$ con salida y en G se dice que es algebraicamente observable si, y solamente si, cualquier estado tiene esta propiedad.

3. Planteamiento del Problema

Sea el modelo dinámico de un sistema electromecánico que consiste en un motor de CD conectado a una carga a través de una banda (ver Fig. 1), dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + f_1 \dot{\theta}_1 + 2\rho(r_1\theta_1 - r_2\theta_2)r_1 &= \tau \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + f_2 \dot{\theta}_2 + 2\rho(r_2\theta_2 - r_1\theta_1)r_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde

- J_1 : Inercia del motor
- J_2 : Inercia de la carga
- f_1 : Fricción del motor
- f_2 : Fricción en la carga
- ρ : Coeficiente de elasticidad de la banda
- τ : Par aplicado
- θ_1 : Angulo del motor
- θ_2 : Angulo de la carga
- r_1 : Radio del disco del motor
- r_2 : Radio del disco de la carga

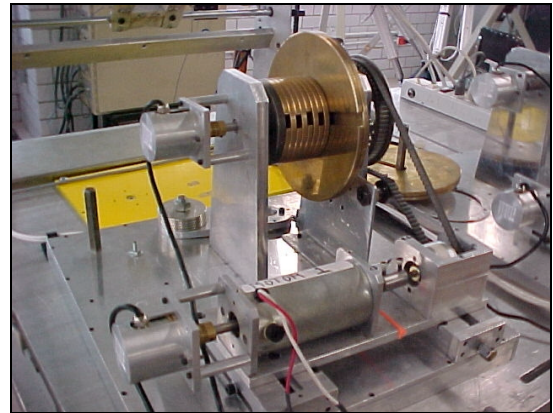


Fig. 1. Sistema electromecánico

El problema de detección de fallas consiste en detectar el rompimiento de la banda, esto ocurre desde el punto de vista de los parámetros del modelo, cuando el coeficiente de elasticidad de la banda ρ es igual a cero, entonces, el sistema (1) se convierte en:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + f_1 \dot{\theta}_1 &= \tau \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + f_2 \dot{\theta}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando el siguiente cambio de variable:

$$\begin{aligned} x_1 &= \dot{\theta}_1 \\ x_2 &= \dot{\theta}_2 \\ \dot{x}_1 &= \ddot{\theta}_1 \\ \dot{x}_2 &= \ddot{\theta}_2 \\ \dot{x}_3 &= r_1 \dot{\theta}_1 - r_2 \dot{\theta}_2 \\ u &= \tau \end{aligned}$$

se puede escribir el sistema (1) como ($\rho \neq 0$):

$$\begin{aligned} J_1 \dot{x}_1 + f_1 x_1 + 2\rho r_1 x_3 &= u \\ J_2 \dot{x}_2 + f_2 x_2 - 2\rho r_2 x_3 &= 0 \\ \dot{x}_3 &= r_1 x_1 - r_2 x_2 \end{aligned} \quad (3)$$

y el sistema con falla (2):

$$\begin{aligned} J_1 \dot{x}_1 + f_1 x_1 &= u \\ J_2 \dot{x}_2 + f_2 x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Llevando (3) a su representación en variables de estado se tiene:

$$\dot{x}_1 = -\frac{f_1}{J_1} x_1 - 2\frac{\rho r_1}{J_1} x_3 + \frac{u}{J_1} \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{f_2}{J_2} x_2 + 2\frac{\rho r_2}{J_2} x_3 \quad (6)$$

$$\dot{x}_3 = r_1 x_1 - r_2 x_2 \quad (7)$$

$$y = x_1 \quad (8)$$

Considerando el sistema dado en (5) - (8) donde $x \in R^3$ es el vector de estados, $u(t) \in R$ y $y(t) \in R$ son la entrada y salida del sistema, respectivamente, puede verse como una dinámica representada por la extensión diferencial algebraica $R\langle u, y \rangle / R\langle u \rangle$ (definición 2).

La variable x_1 representa la velocidad en el motor; x_2 la velocidad en la carga y x_3 muestra la diferencia entre las posiciones entre el ángulo del motor y la carga, por lo que, el análisis del comportamiento de x_3 permitirá la detección de la ruptura de la banda. Así, el problema de detección de fallas se convierte en un problema de observabilidad.

4. Diseño del Observador

4.1 Observabilidad Algebraica

Sea el modelo dinámico del sistema electromecánico dado por: (5) - (8). El propósito es determinar x_3 a partir de las mediciones de entrada y salida del sistema.

De (5) y de la primera derivada de la ecuación de salida (8) se tiene que:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= -\frac{f_1}{J_1} x_1 - 2\frac{\rho r_1}{J_1} x_3 + \frac{u}{J_1} = \\ &-\frac{f_1}{J_1} y - 2\frac{\rho r_1}{J_1} x_3 + \frac{u}{J_1} \end{aligned} \quad (9)$$

despejando x_3 de (9) se obtiene:

$$x_3 = \frac{-f_1 y - J_1 \dot{y} + u}{2\rho r_1} \quad (10)$$

En la expresión anterior se puede ver que x_3 satisface una ecuación diferencial algebraica en $R\langle u, y \rangle$ (ver definición 3).

Comentario 1. Cabe señalar que de (10) x_3 pierde la propiedad de observabilidad algebraica cuando se presenta la falla, es decir, cuando el parámetro ρ es igual a cero

4.2 Observador Proporcional de Orden Reducido.

Proposición 1

$$\dot{\hat{x}}_3 = \bar{K}(x_3 - \hat{x}_3) \quad (11)$$

es un observador proporcional de orden reducido para el sistema dado en (5) - (8) donde \hat{x}_3 denota el valor estimado para x_3 y $\bar{K} \in R^+$ determina la razón de convergencia del observador. ■

Sustituyendo (10) en la ecuación del observador proporcional de orden reducido (11) se tiene que:

$$\dot{\hat{x}}_3 = \frac{\bar{K}}{2\rho r_1} (-J_1 \dot{y} + u - f_1 y) - \bar{K} \hat{x}_3 \quad (12)$$

Comentario 2. La expresión (12) que denota al observador proporcional de orden reducido queda descrito en términos de los parámetros J_1 , f_1 y ρ , que corresponden a los parámetros del sistema (5)-

(8). Para distinguirlos de los parámetros utilizados en el observador se utilizan \hat{J}_1 , \hat{f}_1 y $\hat{\rho}$ que corresponden al valor estimado de cada uno de ellos. Los experimentos se realizaron con parámetros estimados. Un punto importante que cabe resaltar es sobre el coeficiente de elasticidad ρ que al presentarse la falla éste es igual a cero en el sistema, en cambio, $\hat{\rho}$ permanece constante en el observador.

Entonces, rescribiendo (12) se tiene:

$$\dot{\hat{x}}_3 = \frac{\bar{K}}{2\hat{\rho}r_1} \left(-\hat{J}_1 \dot{y} + u - \hat{f}_1 y \right) - \bar{K} \hat{x}_3 \quad (13)$$

Pero el problema para \hat{x}_3 de esta última ecuación no se puede resolver ya que \dot{y} no se puede medir. Para superar esto se define una variable auxiliar σ de la siguiente manera:

$$\sigma \triangleq \hat{x}_3 + \bar{K} \frac{\hat{J}_1 y}{2\hat{\rho}r_1} \in C^1 \quad (14)$$

i.e. σ es una función continuamente diferenciable, esto lleva a:

$$\hat{x}_3 = \sigma - \bar{K} \frac{\hat{J}_1 y}{2\hat{\rho}r_1} \quad (15)$$

entonces:

$$\dot{\hat{x}}_3 = \dot{\sigma} - \bar{K} \frac{\hat{J}_1 \dot{y}}{2\hat{\rho}r_1} \quad (16)$$

pero de (13) y (16) se puede escribir:

$$\frac{\bar{K}}{2\hat{\rho}r_1} \left(-\hat{J}_1 \dot{y} + u - \hat{f}_1 y \right) - \bar{K} \hat{x}_3 = \dot{\sigma} - \bar{K} \frac{\hat{J}_1 \dot{y}}{2\hat{\rho}r_1} \quad (17)$$

entonces:

$$\dot{\sigma} = \frac{\bar{K}}{2\hat{\rho}r_1} \left(u - \hat{f}_1 y \right) - \bar{K} \hat{x}_3 \quad (18)$$

sustituyendo (15) en la ecuación anterior se tiene:

$$\dot{\sigma} = \frac{\bar{K}}{2\hat{\rho}r_1} \left(u - \hat{f}_1 y \right) - \bar{K} \sigma + \bar{K}^2 \frac{\hat{J}_1 y}{2\hat{\rho}r_1} \quad (19)$$

Al resolver (19) para σ y sustituyendo en (15), se obtiene el valor estimado para x_3 .

■

4.3 Metodología para Establecer la Detección de la falla .

Para calcular el valor en estado estacionario del estimado \hat{x}_3 se hacen las derivadas igual a cero, entonces, de (18):

$$0 = \frac{\bar{K}}{2\hat{\rho}r_1} \left(u_s - \hat{f}_1 y_s \right) - \bar{K} \hat{x}_{3s} \quad (20)$$

despejando \hat{x}_{3s} de la expresión anterior se tiene:

$$\hat{x}_{3s} = \frac{1}{2\hat{\rho}r_1} \left(u_s - \hat{f}_1 y_s \right) \quad (21)$$

donde \hat{x}_{3s} es el valor estimado de x_3 en estado estacionario. La expresión (21) queda escrita en función de los parámetros estimados y las variables u_s e y_s , en estado estacionario, así que a través de esta expresión se establece el siguiente método para determinar la detección de la ruptura de la banda.

Paso 1.

Identificar los parámetros f_1 y ρ o dar un valor estimado conocido *a priori*.

Paso 2.

Desconectar la banda del sistema, es decir, dejar al motor sin carga.

Paso 3.

Realizar mediciones de u_s e y_s y realizar las operaciones dadas en (21) para obtener \hat{x}_{3s} .

Paso 4.

Determinar los valores nominales para \hat{x}_{3s} en función de u_s e y_s .

Paso 5.

Conectar la banda al sistema, es decir, poner carga la motor y realizar las correspondientes

mediciones de \hat{x}_3 , dado en (21) en función de u_s e y_s .

Paso 6.

Implementar el observador dado en (15) para obtener \hat{x}_3 .

Paso 7.

Definir un rango de operación alrededor de los valores nominales sin carga y con carga mismos que se utilizarán para determinar si se presenta la ruptura de la banda.

Al presentarse la ruptura de la banda, el valor de \hat{x}_3 tendrá valores cercanos o iguales a los determinados en el Paso 4.

6. Resultados Experimentales

Para aplicar el método propuesto en la sección 4, se emplea un prototipo de laboratorio que consiste en un motor de CD que transmite el movimiento a una carga a través de una banda (ver fig. 1). El rompimiento de la banda es simulado a través de un embrague electrónico conectado directamente a la flecha del motor. Al energizar el embrague, este permite la transmisión de potencia a la carga; al des-energizar el embrague, este, desacopla mecánicamente la carga del motor simulando así el rompimiento de la banda. La velocidad angular del motor es medida por un decodificador óptico de 2500 pulsos por revolución. El decodificador se encuentra conectado directamente a la flecha del motor y el tren de pulsos generado por este se alimenta a un convertidor de frecuencia a voltaje. El motor es controlado por un amplificador de potencia (Copley Controls, modelo 413) configurado en modo voltaje. La adquisición de los datos se realiza a través de la tarjeta MultiQ 3 de Quanser Consulting. Esta tarjeta cuenta con un convertidor digital-analógico con un rango de voltaje de salida de ± 5 volts. El observador proporcional de orden reducido es implementado utilizando el programa MatLab-Simulink, el ambiente para desarrollar esta aplicación es el programa WINCON alojado en el servidor a una velocidad de 200 MHz, éste se encarga de compilar y bajar el código del algoritmo de control en tiempo real a otra computadora denominada como cliente con velocidad de 350 MHz, una vez que el código ha sido descargado es posible iniciar el experimento. La interconexión entre el servidor y el cliente es realizada a través de

una red ethernet, con una frecuencia de muestreo de 1 KHz.

El observador es implementado con los siguientes valores. $\bar{K} = 12$, $\hat{f}_1 = 0.147$ Nms/rad, $J_1 = 0.0001$ Nm²/rad, $\hat{p} = 1$ Nm/rad, $r_1 = 0.013$ m. La condición inicial para el observador $\hat{x}_3(0) = -10$ rad. El primer experimento se realizó usando un voltaje aplicado $u_s = 2$ volts. La figura 2 muestra la velocidad angular del motor y la figura 3 muestra el comportamiento de \hat{x}_3 . Para el segundo experimento se aplica un voltaje $u_s = 1.7$ volt. Las figuras 4 y 5 muestran la velocidad angular del motor y el estimado \hat{x}_3 respectivamente. De los resultados obtenidos se puede apreciar que existe un cambio en el valor de \hat{x}_3 cuando se presenta la falla.

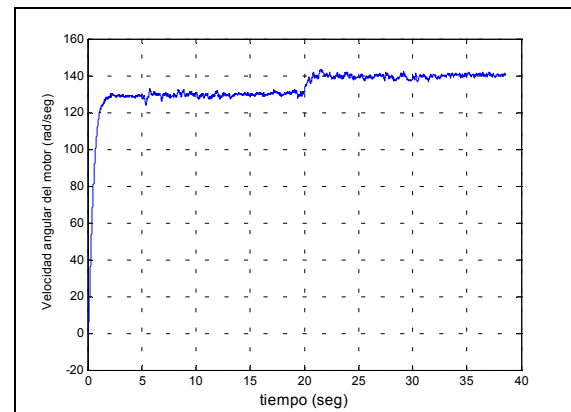


Fig. 2. Velocidad angular del motor con falla en $t=20$ seg y $u_s=2$ volts

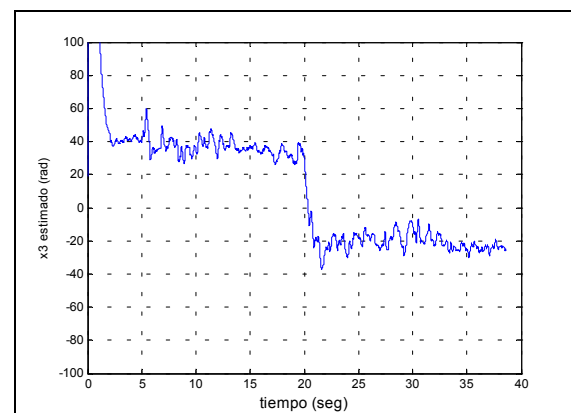


Fig. 3. Salida del observador con falla en $t=20$ seg y $u_s=2$ volts

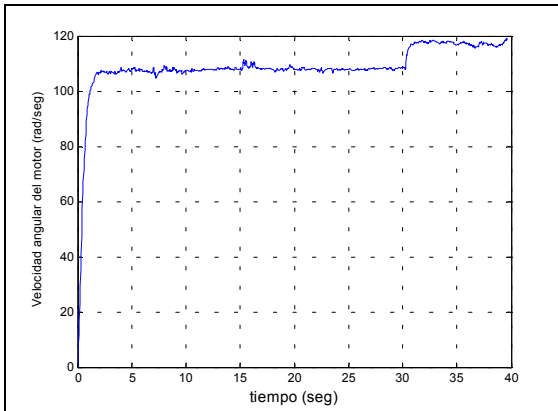


Fig.4. Velocidad angular del motor con falla en $t=30$ seg y $u_s=1.7$ volts

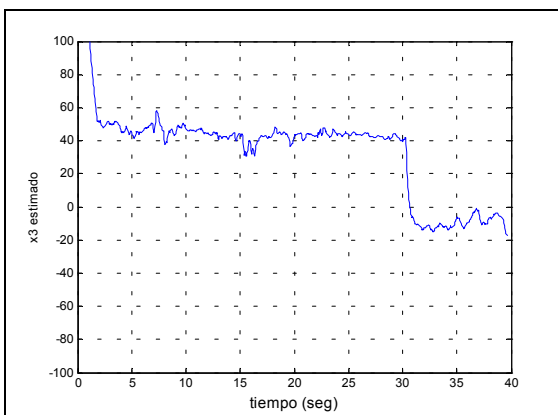


Fig. 5. Salida del observador con falla en $t=30$ seg y $u_s=2$ volts

7. Conclusiones

El problema de detección de fallas es tratado como un problema de observación desde el punto de vista algebro-diferencial; en este trabajo se sugiere el uso de un observador proporcional de orden reducido para la estimación de un estado del sistema electromecánico que contiene información sobre el comportamiento del sistema a nivel carga y motor. La pérdida de observabilidad en el sistema al presentarse el rompimiento de la banda origina que el valor estimado \hat{x}_3 diverja. Los resultados experimentales muestran que, efectivamente, el observador diseñado detecta el rompimiento de la banda sin necesidad de conocer exactamente los parámetros del sistema. Para trabajos futuros se pretende aplicar el enfoque propuesto en motores controlados en lazo cerrado, así como también, a otro tipo de máquinas eléctricas.

Referencias

- [1] Isermann R. "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing—Tutorial paper", Automatica, Volume 29, Issue 4, 815-835, 1993.
- [2] Diop S. Martínez-Guerra R. "An algebraic and data derivative information approach to nonlinear system diagnosis", European Control Conference, 2334-2339, 2001.
- [3] Chávez I. Martínez-Guerra R. Osorio-Cordero A. "Parametric identification of linear time varying systems using a proportional reduced order observer", American Control Conference, ACC, Anchorage, Alaska, USA, 3236-3241, 2002.
- [4] Martínez-Guerra R. Garrido-Moctezuma R. Osorio-Mirón A. "The Fault detection problem in nonlinear systems using residual generators", Sometido IMA Journal Mathematical Control and Information, 2003.