

Estimación del dominio que contiene todos los conjuntos compactos invariantes de un Motor de Inducción

Ramon Ramirez-Villalobos
Instituto Tecnológico de Tijuana
Tijuana, Baja California, México
ramon.rmzv@gmail.com

Luis N. Coria
Instituto Tecnológico de Tijuana
Tijuana, Baja California, México
luis.coria@gmail.com

Luis T. Aguilar
Instituto Politécnico Nacional
Tijuana, Baja California, México
laguilarb@ipn.mx

Resumen—En este artículo se presenta un dominio que contiene todos los conjuntos compactos invariantes del modelo matemático de un motor de inducción en el marco de referencia dq . Se establece que los conjuntos compactos invariantes están contenidos en un conjunto de localización elipsoidal dependiente de los parámetros del motor. La información obtenida de la estimación de este dominio es aplicada al diseño de un observador de Thau para el motor de inducción.

Palabras clave: Localización de conjuntos compactos invariantes, motor de inducción, observador de Thau.

I. INTRODUCCIÓN

Para entender el comportamiento de la dinámica global de un sistema, es importante definir el dominio que contiene todas las trayectorias que el sistema eventualmente puede presentar. En este artículo a tal dominio se le define *Localización de Conjuntos Compactos Invariantes (LCCI)*. En los últimos años, se han propuesto métodos analíticos para encontrar una LCCI. Algunos de estos métodos están basados en el uso de funciones de Lyapunov (Li, Lu, Wu y Chen, 2005), (Suzuki, Sakamoto y Yasukochi, 2008) y otros métodos están basados en las condiciones de extrema de primer orden (Krishchenko y Starkov, 2006).

En la literatura se puede encontrar diversos estudios para encontrar una LCCI de sistemas no lineales. Principalmente, estos estudios han sido enfocados a sistemas que presentan un comportamiento caótico o hiper-caótico. Por ejemplo el sistema de Lorenz es uno de los sistemas examinados con mayor frecuencia en (Li, Lu, Wu y Chen, 2005), (Suzuki, Sakamoto y Yasukochi, 2008) definen dominios elipsoidales. En el caso de los sistemas hiper-caóticos se han estudiado sistemas tipo Lorenz, en (Barboza, 2007) definen una cilindro como dominio para el sistema que los autores estudian, en (Li, Wu y Lu, 2009) y (Wang, Li y Hu, 2010) definen una elipsoide para los respectivos sistemas.

Actualmente, el estudio de LCCI se enfocó a analizar sistemas biológicos y sistemas electromecánicos. En (Starkov y Coria, 2012) los autores establecen un politopo invariante para el modelo de Kirschner-Panetta, que describe la inmunoterapia tumoral. Y los autores en (Coria

y Starkov, 2009) establecen los conjuntos compactos invariantes de un motor de imán permanente están contenidos en la intersección de una elipsoide, un cilindro parabólico, un paraboloides elíptico y un cilindro hiperbólico.

La solución del problema de estimación del dominio que contiene todos los conjuntos compactos invariantes es un tema importante para resolver diferentes problemas de control, tales como el problema de diseño de controladores, observadores y sincronización. Por ejemplo en (Mahboobi, Shahrokhi y Pishkenari, 2006) los autores presentan el diseño de un observador de Thau y controladores utilizando las cotas de un análisis de LCCI para tres sistemas caóticos (Lorenz, Chen y Lu) y en (Yu y Liao, 2004) los autores presentan un controlador para el sistema de Lorenz basado en la información de un conjunto invariante. En el caso de sistemas electromecánicos, se presentan en (Coria, 2012) el diseño de un observador de Thau para el motor síncrono de imán permanente en régimen caótico para estimar la velocidad angular, utilizan los límites obtenidos del análisis de LCCI descritas en (Coria y Starkov, 2009).

En este artículo se utiliza el método basado en el uso de condiciones de extrema presentado en (Krishchenko y Starkov, 2006), para definir el espacio de LCCI para el modelo del motor de inducción basado en las ecuaciones del motor en los ejes de rotación dq , el cual está definido por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= abx_3 + bpx_4x_5 - \gamma x_1 + \omega_s x_2 + m_1 v_{ds}; \\ \dot{x}_2 &= abx_2 + bpx_3x_5 - \gamma x_2 - \omega_s x_1 + m_1 v_{qs}; \\ \dot{x}_3 &= -ax_3 + (\omega_s + px_5)x_4 + aM_{sr}x_1; \\ \dot{x}_4 &= -ax_4 + (\omega_s + px_5)x_3 + aM_{sr}x_2; \\ \dot{x}_5 &= m(x_2x_3 - x_1x_4) - cx_5 - d;\end{aligned}\quad (1)$$

donde $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, v_{ds}, v_{qs}, T_l$ y ω_s representan las corrientes de estator, flujo magnético de rotor, velocidad angular, entradas de voltaje del estator, par de carga y frecuencia de la tensión de estator, respectivamente. Los parámetros del sistema (1) están definidos como $a = \frac{R_r}{L_r}$, $b = \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r}$, $c = \frac{f_v}{J}$, $d = \frac{T_l}{J}$, $\gamma = \frac{L_r^2 R_s + M_{sr}^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}$,

$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$, $m = \frac{p M_{sr}}{J L_r}$ y $m_1 = \frac{1}{\sigma L_s}$. Los subíndices r y s se refieren al rotor y estator. Las constantes R_r y R_s denotan las resistencias, L_r y L_s son las auto-inductancias y M_{sr} es la inductancia mutua entre los devanados del estator y el rotor. El número de pares de polos está definido por p . J es la inercia del sistema (motor y carga) y f_v es el coeficiente de amortiguación viscosa.

La solución del problema de estimación del dominio de LCCI del modelo del motor de inducción permite resolver el problema de diseño de observadores, en los cuales se requiere conocer la constante de Lipschitz. A partir de la información obtenida de los límites del dominio se puede determinar el valor de la constante.

La estructura de este artículo se describe a continuación. En la Sección II se muestra la teoría necesaria para el desarrollo de esta investigación. En la Sección III se define una localización elipsoidal para el sistema (1). A partir de la información del análisis de LCCI para determinar la constante de Lipschitz se presenta el diseño de un observador de Thau en la Sección IV. Las conclusiones se presentan en la Sección V.

II. PRELIMINARES MATEMÁTICOS

Considerando un sistema no lineal expresado por:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados y $f(x) \in C^\infty$ es una función continuamente diferenciable.

Sea $h(x)$ una función continuamente diferenciable tal que h no es la primera integral del sistema (2). La función h es utilizada en la solución del problema de LCCI y es llamada "función localizadora". Se toma por $h|_B$ la restricción de h en el conjunto $B \subset \mathbb{R}^n$. Mediante $S(h)$ se designa el conjunto:

$$S(h) = \{x \in \mathbb{R}^n : L_f h = 0\} \quad (3)$$

donde $L_f h$ es la Derivada Lie con respecto al campo vectorial f correspondiente al sistema (2). En el trabajo de (Krishchenko y Starkov, 2006) se propone aplicar:

$$h_{\inf} := \inf\{h(x)|x \in S(h)\}; \quad (4)$$

$$h_{\sup} := \sup\{h(x)|x \in S(h)\}; \quad (5)$$

para resolver el problema de LCCI de sistemas dados por (2).

Teorema 1: Cada conjunto compacto invariante Γ de (2) esta contenido en el conjunto:

$$K(h) := \{h_{\inf} \leq h(x) \leq h_{\sup}\}. \quad (6)$$

Cualquier conjunto $K(h)$ será llamado conjunto de localización.

Teorema 2: Cualquier forma cuadrática de la forma $x^T A x + B x + f = 0$, donde $x \in \mathbb{R}^n$ y $A = A^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$, es equivalente mediante una matriz ortogonal P a una forma cuadrática de la forma:

$$x'^T \Lambda x' + B V x' + f = 0; \quad (7)$$

donde $x' \in \mathbb{R}^n$ son los nuevos ejes coordenados en los cuales los ejes principales de la forma cuadrática están contenidos, $\Lambda = \text{diag}(\text{eig}(A)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal de los eigenvalores de A y $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de vectores propios ortonormales de A .

III. LOCALIZACIÓN DE CONJUNTOS COMPACTOS INVARIANTES PARA EL MODELO MATEMÁTICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

De acuerdo con (Krishchenko y Starkov, 2006), un polinomio de segundo grado de la forma:

$$h(x) = x^T P_1 x + P_2 x; \quad (8)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ y $P_1; P_2$ son matrices de dimensiones apropiadas. Si se cumplen las siguientes condiciones:

- Los términos de segundo grado de la función $h(x)$ definen una forma cuadrática definida positiva;
- El grado relativo de $L_f h(x)$ es 2;
- Los términos de segundo grado de la función $L_f h(x)$ definen una forma cuadrática definida negativa;

entonces el conjunto $K(h)$ está acotado por una elipsoide.

Para el análisis de LCCI para el sistema (1), se considera $|v_{ds}| \leq V_d$, $|v_{qs}| \leq V_q$ y $d \leq D$.

Se propone el siguiente polinomio de segundo grado como función localizadora para el sistema (1):

$$h(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{b} (x_1^2 + x_2^2) + \frac{1}{M_{sr}} (x_3^2 + x_4^2) + \frac{p}{m} x_5^2 \right); \quad (9)$$

la cual es definida positiva si $\sigma > 0$.

Considerando $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \in \mathbb{R}^5$, la Derivada Lie de (9) está expresada por:

$$L_f h(x) = -x^T Q_1 x + Q_2 x; \quad (10)$$

con:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \frac{\gamma}{b} & 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\gamma}{b} & 0 & -a & 0 \\ -a & 0 & \frac{a}{M_{sr}} & 0 & 0 \\ 0 & -a & \frac{a}{M_{sr}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{cp}{m} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \frac{m_1 v_{ds}}{b} & \frac{m_1 v_{qs}}{b} & 0 & 0 & -\frac{dp}{m} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

donde los términos de segundo grado definen una forma cuadrática definida negativa si $\sigma > 0$.

Como (10) tiene términos cruzados $x_1 x_3$ y $x_2 x_4$, se realiza una rotación de los ejes coordenados mediante una transformación lineal ortogonal utilizando el Teorema 2, de modo que la ecuación resultante ya no tenga dichos términos. Con $x' = [x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, x'_5]^T$ la ecuación (10) es equivalente a:

$$L_f h_2(x'_2) = -x'^T \Lambda x' + Q_4 V x' \quad (13)$$

donde:

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_i(Q_3)); \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (14)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{M_{sr}} + \frac{\gamma}{b} - \sqrt{\left(\frac{a}{M_{sr}} - \frac{\gamma}{b} \right)^2 + 4a^2} \right); \quad (15)$$

$$\lambda_{3,4} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{M_{sr}} + \frac{\gamma}{b} + \sqrt{\left(\frac{a}{M_{sr}} - \frac{\gamma}{b} \right)^2 + 4a^2} \right); \quad (16)$$

$$\lambda_5 = \frac{cp}{m}; \quad (17)$$

$$V = \left[\frac{1}{\|v_1\|}v_1, \frac{1}{\|v_2\|}v_2, \frac{1}{\|v_3\|}v_3, \frac{1}{\|v_4\|}v_4, \frac{1}{\|v_5\|}v_5 \right]^T \quad (18)$$

$$v_1 = \left[\frac{1}{M_{sr}} - \frac{\lambda_1}{a}, 0, 1, 0, 0 \right]^T; \quad (19)$$

$$v_2 = \left[0, \frac{1}{M_{sr}} - \frac{\lambda_2}{a}, 0, 1, 0 \right]^T; \quad (20)$$

$$v_3 = \left[\frac{1}{M_{sr}} - \frac{\lambda_3}{a}, 0, 1, 0, 0 \right]^T; \quad (21)$$

$$v_4 = \left[0, \frac{1}{M_{sr}} - \frac{\lambda_4}{a}, 0, 1, 0 \right]^T; \quad (22)$$

$$v_5 = [0, 0, 0, 0, 1]^T. \quad (23)$$

Completando cuadrados en (13), el conjunto $S(h)$ está definido por:

$$S(h) = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \left(x'_1 - \frac{\varphi_1 m_1 v_{ds}}{2b\lambda_1} \right)^2 + \\ \dots + \lambda_2 \left(x'_2 - \frac{\varphi_2 m_1 v_{qs}}{2b\lambda_2} \right)^2 \\ \dots + \lambda_3 \left(x'_3 - \frac{\varphi_3 m_1 v_{ds}}{2b\lambda_3} \right)^2 \\ \dots + \lambda_4 \left(x'_4 - \frac{\varphi_4 m_1 v_{qs}}{2b\lambda_4} \right)^2 \\ \dots + \lambda_5 \left(x'_5 + \frac{dp}{2m\lambda_5} \right)^2 = \rho \end{array} \right\} \quad (24)$$

con:

$$\rho := \frac{m_1^2}{4b^2} \left(\frac{\varphi_1^2}{\lambda_1} + \frac{\varphi_3^2}{\lambda_3} \right) v_{ds}^2 + \left(\frac{\varphi_2^2}{\lambda_2} + \frac{m_1^2 \varphi_4^2}{4b^2 \lambda_4} \right) v_{qs}^2 + \frac{d^2 p^2}{4m^2 \lambda_5}; \quad (25)$$

$$\varphi_i = \frac{1}{\|v_i\|} \left(\frac{1}{M_{sr}} - \frac{\lambda_i}{a} \right); \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (26)$$

A partir del conjunto (24) se puede determinar las cotas de cada variables de estado de (1) igualando cada término a ρ . Considerando $|v_{ds}| \leq V_d$, $|v_{qs}| \leq V_q$ y $d \leq D$ las cotas

TABLA I
VALORES DE PARÁMETROS

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------|---------|-----------------|
| R_s | 12 | Ω |
| R_r | 29 | Ω |
| L_s | 660 | mH |
| L_r | 660 | mH |
| M_{sr} | 620 | mH |
| f_v | 0.0018 | $N \cdot s/rad$ |
| J | 0.00035 | $Kg \cdot m_2$ |
| p | 1 | pares de polos |

de cada variable de estado están expresadas por:

$$|x_1| \leq \sqrt{\frac{|\rho|}{\lambda_1} + \frac{\varphi_1 m_1 V_d}{2b\lambda_1}}; \quad (27)$$

$$|x_2| \leq \sqrt{\frac{|\rho|}{\lambda_2} + \frac{\varphi_2 m_1 V_q}{2b\lambda_2}}; \quad (28)$$

$$|x_3| \leq \sqrt{\frac{|\rho|}{\lambda_3} + \frac{\varphi_3 m_1 V_d}{2b\lambda_3}}; \quad (29)$$

$$|x_4| \leq \sqrt{\frac{|\rho|}{\lambda_4} + \frac{\varphi_4 m_1 V_q}{2b\lambda_4}}; \quad (30)$$

$$|x_5| \leq \sqrt{\frac{|\rho|}{\lambda_5} + \frac{Dp}{2m\lambda_5}}; \quad (31)$$

Sustituyendo las cotas (27)–(31) en (9) se obtiene el valor h_{sup} , el cual esta dado por:

$$h_{sup} \leq \text{máx } h(|x_1|, |x_2|, |x_3|, |x_4|, |x_5|). \quad (32)$$

Por lo tanto, todos los conjunto compactos invariantes del sistema (1) están contenidos en el conjunto de localización elipsoidal:

$$K(h) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2b}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{1}{2M_{sr}}(x_3^2 + x_4^2) \\ + \frac{p}{2m}x_5^2 \leq h_{sup} \end{array} \right\}; \quad (33)$$

si se cumple $\sigma > 0$.

Para corroborar los resultados obtenidos se realiza una simulación numérica tomando los valores de parámetros considerados en (Jamoussi, Chadli, Hajjaji y Ouali, 2010), y que se muestran en la Tabla I. Además, se considera $v_{ds} = 3$, $v_{qs} = 1$ y $d = 0.1$.

En la Figura 1 se muestra que el sistema (1) contenido en la localización elipsoidal (33). En la Figura 1(a) se muestra la proyección $(x_1; x_2; x_5)$ en el espacio de fases y la Figura 1(b) la proyección $(x_3; x_4; x_5)$ en el espacio de fases.

En ambas Figuras se puede observar que las proyecciones del sistema (1) están contenidas en la localización elipsoidal 33.

El conjunto de localización elipsoidal (33) es valido si $\sigma > 0$, para cumplir esta condición es necesario que $L_s L_r > M_{sr}^2$. Cuando el flujo magnético de un inductor alcanza a otro, se dice que ambos inductores están acoplados magnéticamente. En inductores acoplados, existen dos tipos

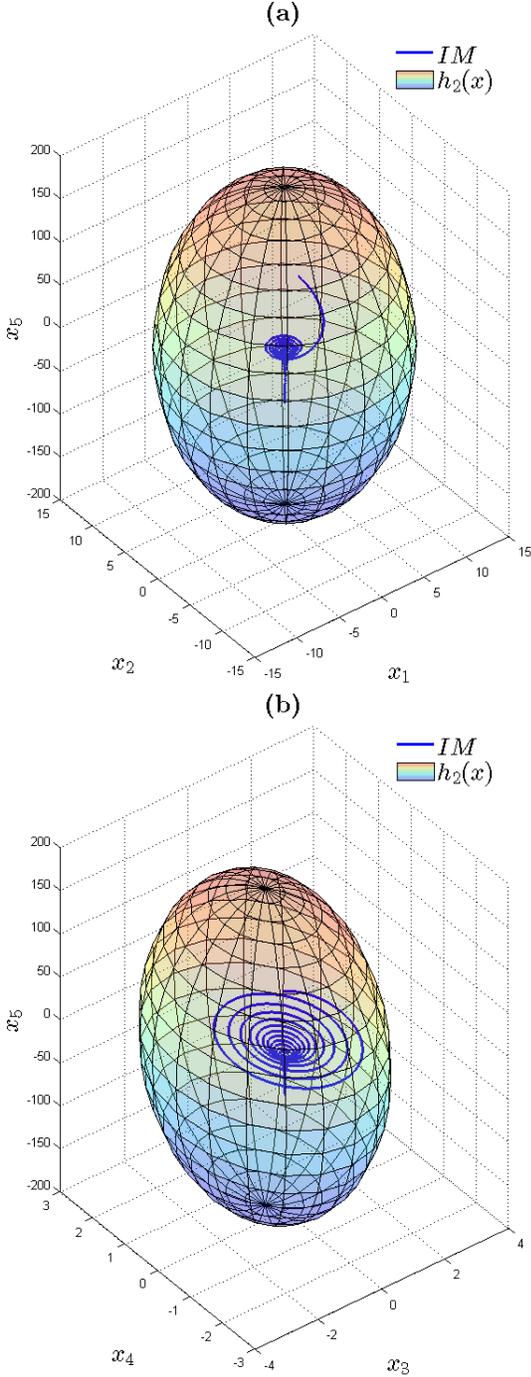


Figura 1. Localización elipsoidal.

de inductancia: la debida al propio flujo (auto-inductancia) y la debida al flujo de un inductor sobre otro (inductancia mutua), y dependen de la geometría de los inductores. La inductancia mutua M_{sr} es directamente proporcional a un coeficiente de acoplamiento k y a la raíz cuadrada de las auto-inductancias L_s y L_r :

$$M_{sr} = k\sqrt{L_s L_r}; \quad (34)$$

donde $0 < k < 1$. Al sustituir (34) en el parámetro σ , la condición $\sigma > 0$ se cumple para cualquier caso y el conjunto de localización elipsoidal (33) es valido para toda x y no impone alguna restricción.

IV. OBSERVADOR DE THAU

El observador de Thau (Thau, 1973), está construido para relacionar la parte lineal y la parte no lineal de un sistema dinámico y con ello realizar la estimación de estados de sistema no lineales representados de la siguiente forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu + f(x); \quad (35)$$

$$y = Cx; \quad (36)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ son las variables de estados, $u \in \mathbb{R}^m$ son las entradas de control, $y \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salida y $f(x)$ es el vector de términos no lineales. Las matrices A, B, C tiene dimensiones apropiadas. Se asume que $f(0) = 0$.

El observador de Thau está dado por:

$$\dot{\hat{x}} = A_0 x + Bu + f(\hat{x}) + Ky; \quad (37)$$

donde $A_0 = A - KC$.

El error de la observación está definido como $\tilde{x} = \hat{x} - x$. Por lo tanto, la dinámica del error está descrita por:

$$\dot{\tilde{x}} = A_0 \tilde{x} + f(\hat{x}) - f(x). \quad (38)$$

De acuerdo con el Teorema (9) en (Starkov, Coria y Aguilar, 2012), si se puede elegir una matriz de retroalimentación K tal que se cumplan las siguientes condiciones:

$$A_0 = A_0^T; \quad (39)$$

$$\Re(\lambda_i(A_0)) < 0; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (40)$$

$$\frac{\|A_0\|^{n-1}}{|\det(A_0)|} \leq \frac{2}{\ell}; \quad (41)$$

donde ℓ es la constante de Lipschitz. El observador de Thau (37) es asintóticamente estable.

Antes de iniciar el diseño del observador de Thau, es necesario realizar un cambio de variable en (1) para mover el punto de equilibrio al origen y satisfacer $f(0) = 0$. Con $\bar{x}_5 = x_5 - d$ el sistema (1) se escribe de la forma (35), donde:

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & \omega_s & ab & 0 & 0 \\ -\omega_s & -\gamma & 0 & ab & 0 \\ aM_{sr} & 0 & -a & \omega_s & 0 \\ 0 & aM_{sr} & -\omega_s & -a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c \end{bmatrix}; \quad (42)$$

$$B = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T; \quad (43)$$

$$u = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}; \quad (44)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} bpx_4x_5 \\ -bpx_3x_5 \\ -px_4x_5 \\ px_3x_5 \\ m(x_2x_3 - x_1x_4) \end{bmatrix}. \quad (45)$$

La constante de Lipschitz está definida por (Abbaszadeh y Marquez, 2010):

$$\ell = \limsup \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x} \right). \quad (46)$$

A partir del análisis de de LCCI se puede obtener el valor de la constante de Lipschitz. Considerando los parámetros de la Tabla I y las magnitudes (27)–(31) la constante de Lipschitz está definida como $\ell = 1788.259$.

Se elige el vector de salida $y = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$. Para este caso la matriz A_0 del observador de Thau está dada por:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\gamma - k_1 & \omega_s - k_6 & ab - k_{11} & -k_{16} & 0 \\ -\omega_s - k_2 & -\gamma - k_7 & -k_{12} & ab - k_{17} & 0 \\ aM_{sr} - k_3 & -k_8 & -a - k_{13} & \omega_s - k_{18} & 0 \\ -k_4 & aM_{sr} - k_9 & -\omega_s - k_{14} & -a - k_{19} & 0 \\ -k_5 & -k_{10} & -k_{15} & -k_{20} & -c \end{bmatrix}. \quad (47)$$

Asignando los parámetros de la matriz de retroalimentación como $k_4 = k_5 = k_8 = k_{10} = k_{12} = k_{15} = k_{16} = k_{20}$, $k_2 = k_{14} = -\omega_s$, $k_3 = k_9 = aM_{sr}$, $k_6 = k_{18} = \omega_s$, $k_{11} = k_{17} = ab$ se cumplen las condiciones (39) y (40). Eligiendo $k_1 = 10$, $k_7 = 5$, $k_{13} = 5$, $k_{19} = 5$ y utilizando la constante de Lipschitz $\ell = 1788.26$ se cumple la desigualdad (41). Por lo tanto el observador que esta de la forma (37) converge de manera asintótica a las trayectorias del sistema (1).

Se realizaron simulaciones numéricas para mostrar que la dinámica del error converge a cero, observe la Figura 2. Las condiciones iniciales para el sistema (1) son $x(0) = [0.7, 0.7, 0.5, 0.5, 0.5]$ y las condiciones iniciales del observador de Thau son $\hat{x}(0) = 5 \in \mathbb{R}^5$.

Se puede observar en la Figura 2 que el error converge a cero. Por lo tanto, el observador de Thau converge a las trayectorias (1).

V. CONCLUSIONES

En este artículo se resuelve el problema de estimación de dominio de conjuntos compactos invariantes del modelo matemático de un motor de inducción en el marco de referencia dq . Se establece una localización elipsoidal que contiene todos los conjuntos compactos invariantes, la cual es valida para toda x y no presenta alguna restricción.

Del análisis de localización se obtuvieron las cotas de las corrientes de estator, flujo de rotor y velocidad angular dependientes de los parámetros del motor de inducción. Además, los resultados de localización de conjuntos compactos invariantes para el motor de inducción son aplicados en el diseño de un observador de Thau, utilizando las cotas de cada variable de estado para determinar la constante de Lipschitz. Debido a que la construcción del observador de Thau requiere de la elección de una matriz apropiada de retroalimentación K tal que la matriz A_0 sea simétrica y que sus eigenvalores tengan parte real negativa, el observador requiere la medición del vector de corrientes de estator y el vector de flujo de rotor para la estimación de la velocidad angular. Un observador que estime la velocidad angular del rotor y que requiera de la medición del vector de flujo

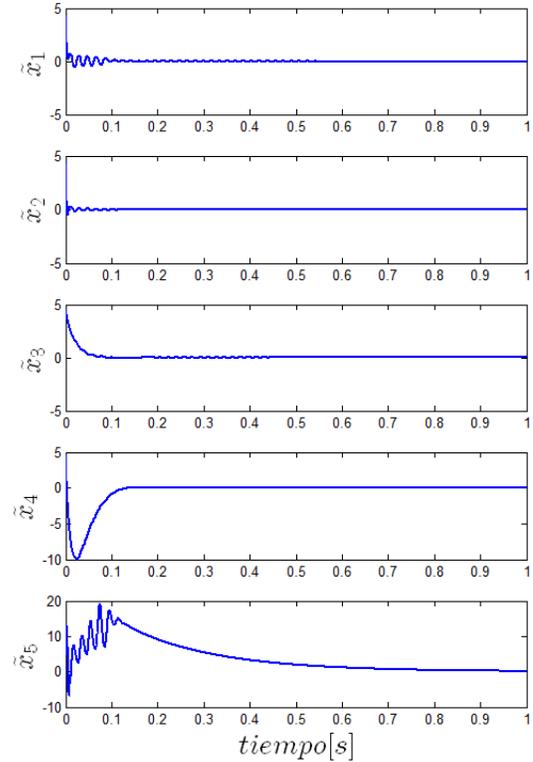


Figura 2. Dinámica del error del observador.

de rotor carece de utilidad práctica. Este observador se presenta con la finalidad de demostrar la convergencia del observador utilizando la información obtenida de los límites del dominio de LCCI.

Se considera como trabajo futuro reducir el conjunto de localización elipsoidal, por medio de intersecciones con otros conjuntos de localización y/o teoremas auxiliares. Reduciendo el espacio de localización es posible también reducir la constante de Lipschitz, lo cual permitiría diseñar observadores con mayor robustez. Además, se considera como trabajo futuro diseñar observadores en el cual se pueda utilizar información del análisis de localización, considerando solo la medición de las corrientes de estator.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece CONACYT y DGEST por el apoyo económico y patrocinio. Esta investigación se realiza en el marco de proyecto “Diseño de controladores y observadores para sistemas electromecánicos” clave: TIJ-ING-2012-109.

REFERENCIAS

- Abbaszadeh, M. y H.J. Marquez (2010). Nonlinear Observer Design for One-Sided Lipschitz Systems. *2010 American Control Conference*. **1**(1), 5284–5289.
- Barboza, R. (2007). Dynamics of a Hyperchaotic Lorenz System. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. **17**(12), 4285–4294.
- Coria, L.N. (2012). Velocity estimation via thau observer for a pmsm in chaotic regime and its physical validation. *Proceedings of the third IFAC CHAOS Conference*. **1**(1), 123–127.

- Coria, L.N. y K.E. Starkov (2009). Bounding a domain containing all compact invariant sets of the permanent magnet motor system. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. **14**(11), 3879–3888.
- Jamousmi K. y M. Chadli and A.E. Hajjaji and M. Ouali (2010). Robust fuzzy sliding mode observer for an induction motor. *Journal of Electrical Engineering: Theory and Applications*. **1**(1), 42–51.
- Krishchenko, A.P. y K.E Starkov (2006). Localization of compact invariant sets of the Lorenz system. *Physics Letters A*. **353**(5), 383–388.
- Krishchenko, A.P. y K.E Starkov (2008). Localization of compact invariant sets of nonlinear time-varying systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. **18**(5), 1599–1604.
- Li, D., J.A. Lu, X. Wu y G. Chen (2005). Estimating the bounds for the Lorenz family of chaotic systems. *Chaos, Solitons and Fractals*. **23**(2), 529–534.
- Li, D., X. Wu y J.A. Lu (2009). Estimating the ultimate bound and positively invariant set for the hyperchaotic Lorenz–Haken system. *Chaos, Solitons and Fractals*. **39**(3), 1290–1296.
- Mahboobi, S.H., M. Shahrokhi y H.N. Pishkenari (2006). Observer-based control design for three well-known chaotic systems. *Chaos, Solitons and Fractals*. **29**(2), 381–392.
- Starkov, K.E., L.N. Coria, L.T. Aguilar (2012). On synchronization of chaotic systems based on the Thau observer design. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. **17**(1), 17–25.
- Starkov, K.E. y L.N. Coria (2012). Global dynamics of the Kirschner–Panetta model for the tumor immunotherapy. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. **14**(3), 1425–1433.
- Suzuki, M., N. Sakamoto y T. Yasukochi (2008). A butterfly-shaped localization set for the Lorenz attractor. *Physics Letters A*. **372**(15), 2614–2617.
- Thau, F.E. (1973). Observing the states of nonlinear dynamic system. *International Journal of Control*. **17**(1), 471–479.
- Wang, P., D. Li y Q. Hu (2010). Bounds of the hyper-chaotic Lorenz–Stenflo system. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. **15**(9), 2514–2520.
- Yu, P. y X. Liao (2004). Globally attractive and positive invariant set of the Lorenz system. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. **16**(3), 757–764.