

Análisis de Observabilidad para el Motor de Reluctancia Conmutada

A. De La Guerra, P. Maya–Ortiz, G. Espinosa–Pérez
Facultad de Ingeniería-UNAM
Coyoacán DF 04510, México
paulm@dctrl.fi-b.unam.mx
Teléfono: (52)-55-56223125

Resumen—El desarrollo de observadores de estados para conocer las variables mecánicas de motores eléctricos es un tema de particular importancia en nuestros días porque permite desarrollar sistemas de control más económicos y fiables.

Para desarrollar un observador es necesario conocer las propiedades de observabilidad del sistema. En este artículo se presenta un análisis geométrico que permite demostrar la observabilidad local del Motor de Reluctancia Conmutada. El método usado se basa en la obtención de la matriz jacobiana del mapeo de observabilidad del modelo de la máquina.

Con este método se obtienen condiciones suficientes de observabilidad para la operación con velocidad diferente de cero, éstas imponen un comportamiento a las salidas y entradas del sistema. También se justifica el uso de una rutina de arranque.

Palabras clave: Observabilidad, Motor de Reluctancia Conmutada, Análisis Geométrico

I. INTRODUCCIÓN

El Motor de Reluctancia Conmutada (MRC) es más simple en construcción que el motor de inducción y la máquina síncrona, y su combinación con controladores basados en electrónica de potencia conduce a una solución más económica que éstos. Sin embargo, a pesar de esta construcción sencilla, su representación matemática es complicada debido a su comportamiento predominantemente no lineal. A cambio el MRC presenta características que lo hacen adecuado para aplicaciones que requieren par constante a bajas velocidades.

Para realizar un adecuado control de velocidad de esta máquina es necesario conocer la posición angular del rotor, sin embargo, un sensor de posición como el codificador incremental óptico es un parte delicada que puede afectar la confiabilidad del sistema. Además la instalación de un sensor es limitante en aplicaciones de bajo costo. Adicionalmente en algunos entornos de operación el uso de un sensor mecánico puede ser inadecuado ya sea porque se trate de un ambiente hostil o porque sea parte de un sistema donde el tamaño y el peso sean muy importantes. Asimismo en algunas ocasiones el costo de implantación se puede disminuir significativamente al no usar un sensor de posición.

En respuesta a estas necesidades en la literatura de la última década se han presentado diversos esquemas de

control sin sensores para el MRC, muchos de los cuales se basan en la estimación de las variables mecánicas mediante el uso de observadores de estados, como los presentados en (Lumsdaine y Lang, 1990) donde se desarrollan varias versiones de un observador tipo Luenberger; en (Khalil, 2007) donde se diseña un observador basado en modos deslizantes. En (Ehsani y Fahimi, 2002) y (Krishnan1, 2001) se presentan varias técnicas de estimación entre ellas observadores de estados.

A pesar de los múltiples esquemas que se pueden encontrar en la literatura reportando observadores de estados para el MRC, no se ha presentado, hasta el conocimiento de los autores, un análisis de observabilidad (local o global) que muestre las propiedades de observabilidad y detectabilidad, y permita justificar de una manera clara y formal, además de la simulación numérica, el funcionamiento de los observadores reportados.

Para contribuir al respecto, en este artículo se realiza el análisis de observabilidad del modelo de señal pequeña, ver (Espinosa-Perez, 2004), considerando velocidad variable. La metodología para este análisis se basa en los resultados presentados (Hermann y Krener, 1977) que se han empleado en el caso de otras máquinas eléctricas como el motor de Inducción (De Wit, 2000), y el motor síncrono de imán permanente (Zaltni, 2010). En ésta se calculan las derivadas de las salidas a lo largo de las trayectorias del sistema con el fin de construir un mapeo de observabilidad. Posteriormente, debe demostrarse que este mapeo es biyectivo con el fin de demostrar la observabilidad del par entrada-salida.

El artículo se organiza como sigue: en la segunda sección se presenta el modelo del motor y sus particularidades, la tercera sección introduce la definición de observabilidad. El análisis de observabilidad se detalla en la cuarta sección. Finalmente se presentan las conclusiones en la última sección.

II. MODELO DEL MOTOR DE RELUCTANCIA CONMUTADA

Esta máquina tiene un rotor sin devanados que está hecho de laminaciones de hierro de alta permeabilidad. El estator, cuando es de polos salientes, presenta devanados concentrados como se muestra en la Figura 1.

Las fases se forman con la conexión en serie de dos o más devanados.

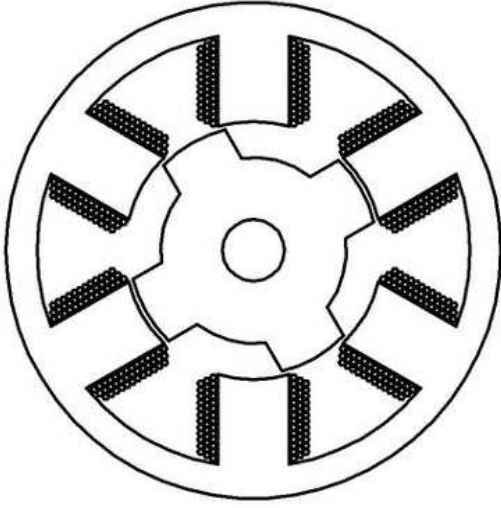


Figura 1. Estator y rotor de un MRC

El MRC presenta un comportamiento altamente no lineal, que ha sido motivo de estudio a lo largo de la última década. En este artículo se analiza un modelo de la máquina que es muy usado en la literatura y que se obtiene haciendo las siguientes consideraciones, ver (Miller, 2001):

- Se desprecian las inductancias mutuas entre los devanados del estator, ya que este tiene devanados concentrados lo que supone mínima interacción entre fases. Las fases están desacopladas magnéticamente.
- Se asume que el flujo magnético cruza el entrehierro únicamente en la dirección radial.
- Se considera que las inductancias dependen sólo de la posición θ , no de la corriente, esto es, no se considera la operación en la región de saturación magnética.
- Los flujos magnéticos dependen linealmente de las corrientes del estator y son producto de la inductancia,

$$\lambda_j = L_j(\theta)i_j$$

- En esta máquina las inductancias tienen un comportamiento trapezoidal como se muestra en la Figura 2. Una aproximación válida es la de representarlas como los dos primeros términos impares de su serie de Fourier:

$$L_j(\theta) = l_0 - l_1 \cos\left(N_r\theta - (j-1)\frac{2\pi}{3}\right)$$

N_r es el número de polos del rotor y l_0 , l_1 son constantes positivas obtenidas de forma experimental.

- Debido a la construcción de la máquina las inductancias son funciones periódicas de θ con periodo

$$T = 2\pi/N_r$$

- El par de entrada se considera constante y conocido.
- Las entradas del modelo son los voltajes de alimentación de cada fase de estator.
- Las salidas del modelo son las corrientes en los devanados de cada fase.

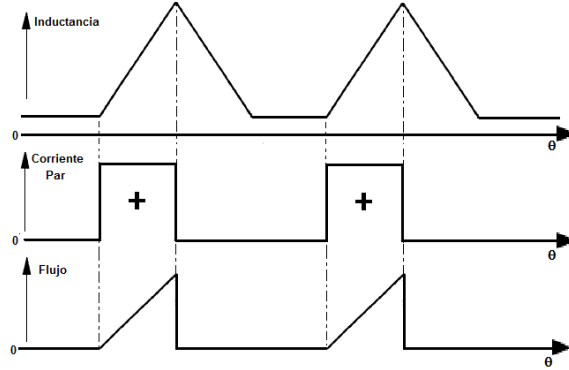


Figura 2. Comportamiento de las inductancias, corrientes y flujos

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores el modelo trifásico del MRC es:

$$u = D(\theta)\frac{di}{dt} + \omega C(\theta)i + Ri \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}i^T C(\theta)i - \frac{1}{J}T_L(\dot{\theta}, \theta)$$

donde:

$$i = [i_1, i_2, i_3]^T$$

son las corrientes en cada fase,

$$u = [u_1, u_2, u_3]^T$$

son los voltajes de entrada,

$$R = \text{diag}\{R, R, R\}$$

es la matriz de resistencias,

$$D(\theta) = \text{diag}\{L_1(\theta), L_2(\theta), L_3(\theta)\}$$

es la matriz de inductancias y

$$C(\theta) = \text{diag}\{k_1(\theta), k_2(\theta), k_3(\theta)\}$$

es la matriz de las derivadas parciales de las inductancias con respecto a la posición.

Es de importancia enfatizar que una particularidad derivada del funcionamiento de la máquina es que no se puede eliminar la dependencia con respecto a la posición de las ecuaciones del modelo por medio de la transformación de Blondel-Park.

Para determinar las condiciones bajo las cuales es posible obtener la información de la posición y la velocidad del rotor a partir de mediciones de las salidas se considerará el vector de estados $\mathbf{x} = [\mathbf{i}, \theta, \omega] = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ y el vector de salidas es $\mathbf{y} = [i_1, i_2, i_3] = [x_1, x_2, x_3]^T$.

III. OBSERVABILIDAD NO LINEAL

El método para analizar la observabilidad que se emplea en este trabajo, usado en (De Wit, 2000) para la máquina de inducción y en (Zaltni, 2010) para el motor síncrono de imán permanente, se basa en la siguiente definición.

Definición 1: (Hermann y Krener, 1977) Considere el sistema n -dimensional con p entradas y q salidas, que tiene la siguiente representación

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} &= h(\mathbf{x})\end{aligned}$$

con $f(\cdot)$ y $h(\cdot)$ suficientemente suaves.

Una condición de observabilidad local débil para el sistema es que el mapeo de observabilidad

$$\mathbf{o} = \begin{bmatrix} dh \\ dL_f h \\ dL_f^2 h \\ \vdots \end{bmatrix}$$

sea biyectivo.

Lo anterior es equivalente a pedir que la matriz de Observabilidad definida como

$$\mathbf{J} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{o})$$

sea de rango n .

Aquí $dL_f^i h(\mathbf{x})$ es la derivada de Lie de h a lo largo de $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$

Esta definición permite obtener condiciones suficientes de observabilidad local una vez que se demuestra que no hay pérdida de rango en el jacobiano.

◇◇◇

IV. ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD

Al aplicar la metodología que se deriva de la definición de observabilidad presentada en la sección anterior al modelo

se obtiene el siguiente mapeo de observabilidad para una derivada de Lie de las salidas:

$$\mathbf{o} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}) \\ h_2(\mathbf{x}) \\ h_3(\mathbf{x}) \\ dL_f h_1(\mathbf{x}) \\ dL_f h_2(\mathbf{x}) \\ dL_f h_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ dL_f x_1 \\ dL_f x_2 \\ dL_f x_3 \end{bmatrix}$$

La matriz de Observabilidad que se obtiene al calcular el jacobiano del mapeo de Observabilidad está dada por:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_5} \\ 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_5} \\ 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_3} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_5} \end{bmatrix}$$

Esta matriz es de dimensión 6×6 , ya que el modelo trifásico tiene 3 salidas, mientras que el modelo de la máquina es de quinto orden por lo que para determinar el rango se usa el siguiente teorema:

Teorema 1: (Kreyszig, 1999) Una matriz $\mathbf{A} = [a_{jk}]$ de $m \times n$ tiene rango $r \geq 1$, si y sólo si, \mathbf{A} tiene una submatriz $r \times r$ con determinante distinto de cero, aunque exista alguna submatriz de \mathbf{A} con más de r renglones que tenga determinante igual a cero. En particular, si \mathbf{A} es cuadrada, $n \times n$, tiene rango n si y sólo si

$$\det \mathbf{A} \neq 0$$

◇◇◇

Se escogen cinco términos del mapeo de observabilidad para obtener matrices cuadradas de 5×5 que son submatrices de \mathbf{J} . Se tienen seis posibles combinaciones, pero se prefieren aquellas que contienen los gradientes de la primeras derivadas de Lie de las salidas, sólo por comodidad y sin afectar el resultado del análisis.

$$\mathbf{J}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_5} \\ 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_5} \\ 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_3} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_5} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_5} \\ 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_5} \\ 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_3} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_5} \end{bmatrix}$$

$$J_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_5} \\ 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_5} \\ 0 & 0 & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_3} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_4} & \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_5} \end{bmatrix}$$

De estos jacobianos se obtienen tres determinantes, Δ_{12} , Δ_{13} , Δ_{23} , que están dados por

$$\Delta_{12} = \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_3} \left(\frac{\partial L_f x_1}{\partial x_4} \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_5} - \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_5} \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_4} \right)$$

$$\Delta_{13} = \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_2} \left(\frac{\partial L_f x_1}{\partial x_4} \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_5} - \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_5} \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_4} \right)$$

$$\Delta_{23} = \frac{\partial L_f x_1}{\partial x_1} \left(\frac{\partial L_f x_2}{\partial x_4} \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_5} - \frac{\partial L_f x_2}{\partial x_5} \frac{\partial L_f x_3}{\partial x_4} \right)$$

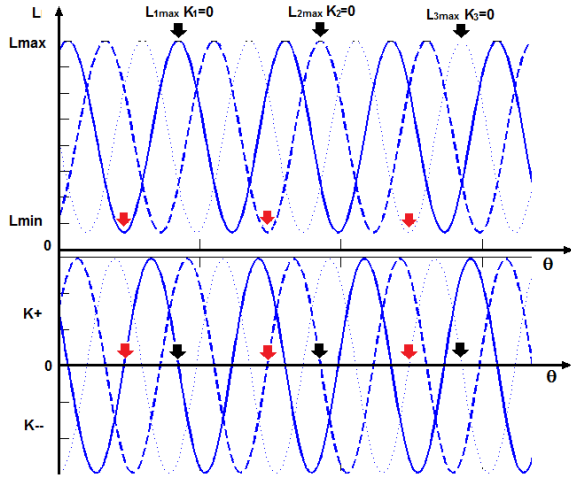


Figura 3. Inductancias y sus derivadas

Velocidad diferente de cero

Si se considera en el análisis que $\omega = x_5$ es diferente de cero, los determinantes desarrollados de los jacobianos J_{12} , J_{13} y J_{23} :

$$\Delta_{12} = \delta_1 k_1 L_1 \left(-k_2 \dot{\lambda}_2 x_1 + x_5 x_1 x_2 f_2 \right) + \delta_1 k_2 L_2 \left(-k_1 \dot{\lambda}_1 x_2 + x_5 x_1 x_2 f_1 \right) \quad (2)$$

$$\Delta_{13} = \delta_2 k_1 L_1 \left(-k_3 \dot{\lambda}_3 x_1 + x_5 x_1 x_3 f_3 \right) + \delta_2 k_3 L_3 \left(-k_1 \dot{\lambda}_1 x_3 + x_5 x_1 x_3 f_1 \right) \quad (3)$$

$$\Delta_{23} = \delta_3 k_2 L_2 \left(-k_3 \dot{\lambda}_3 x_2 + x_5 x_2 x_3 f_2 \right) + \delta_3 k_3 L_3 \left(-k_2 \dot{\lambda}_2 x_3 + x_5 x_2 x_3 f_3 \right) \quad (4)$$

Donde:

$$\dot{\lambda}_j = u_j - R i_j$$

$$f_1 = -k_1^2 + N_r^2 L_1 (L_1 - l_0)$$

$$f_2 = k_2^2 + N_r^2 L_2 (-L_2 + l_0)$$

$$f_3 = -k_3^2 + N_r^2 L_3 (-L_3 + l_0)$$

$$\delta_1 = -\frac{R+x_5 K_3}{L_1^2 L_2^2 L_3}$$

$$\delta_2 = -\frac{R+x_5 K_2}{L_1^2 L_3^2 L_2}$$

$$\delta_3 = -\frac{R+x_5 K_1}{L_3^2 L_2^2 L_1}$$

El denominador de los términos δ_j siempre es diferente de cero porque las funciones L_j son siempre positivas, por esta razón, y porque dependen de la resistencia, estos términos siempre son diferentes de cero.

Por otra parte las funciones f_j sólo dependen de la fase j -ésima al igual que la derivadas de los enlaces de flujo $\dot{\lambda}_j$.

Por lo tanto las expresiones que merecen un análisis detallado en (2), (3) y (4) son las que se encuentran entre paréntesis ya que incluyen términos cruzados.

Se sabe que para tener movimiento continuo del rotor se alterna la operación de las fases, por lo que en algunos intervalos una o más corrientes de fase son iguales a cero.

Cuando un polo del rotor está completamente alineado con una fase del estator, la inductancia correspondiente se encuentra en un máximo. Y la derivada parcial de la inductancia con respecto a la posición, $k_j(x_4)$, en esos puntos se hace cero, Figura 3.

Cómo se mencionó en la sección II las funciones L_j y k_j son periódicas en la posición, x_4 , por lo que el análisis de un período para las tres fases se extiende a todo el recorrido de las funciones a lo largo del tiempo.

Con $x_5 \neq 0$ y suponiendo, sin pérdida de generalidad, que el rotor se mueve en sentido positivo. Se toma un periodo cuando $k_1 \geq 0$, Figura 4, lo que implica que $x_1 \neq 0$ y $\dot{\lambda}_1 \neq 0$.

Tomando el determinante Δ_{12} :

$$\Delta_{12} = \delta_1 k_1 L_1 \left(-k_2 \dot{\lambda}_2 x_1 + x_5 x_1 x_2 f_2 \right) + \delta_1 k_2 L_2 \left(-k_1 \dot{\lambda}_1 x_2 + x_5 x_1 x_2 f_1 \right)$$

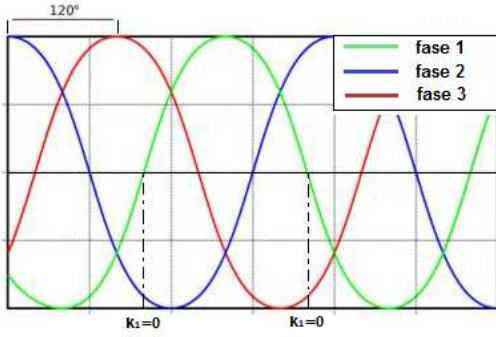


Figura 4. Derivadas de las inductancias

Si la inductancia de la fase 1 es mínima entonces $k_1 = 0$ y de la Figura 4 $x_2 = 0$, porque $k_2 < 0$, y $\Delta_{12} = 0$; esta situación se presenta mientras L_1 es mínima, o sea, cuando esta fase esta completamente desalineada.

Una vez que se mueve el rotor y la fase desalineada es la fase 3, $k_3 = 0$, la corriente $x_2 = 0$ y $\Delta_{12} = 0$. Se sigue moviendo el rotor y ahora la fase desalineada es la fase 2, $k_2 = 0$, y el determinante ahora es:

$$\Delta_{12} = \delta_1 k_1 L_1 (x_5 x_1 x_2 N_r^2 L_2 (l_0 - L_2))$$

Sí a partir de este punto se enciende la fase 2, $x_2 \neq 0$ y $x_1 \neq 0$ y el determinante $\Delta_{12} \neq 0$.

Si se toma ahora el determinante Δ_{13} , que contiene información de la primera y tercera fase:

$$\Delta_{13} = \delta_2 k_1 L_1 (-k_3 \dot{\lambda}_3 x_1 + x_5 x_1 x_3 f_2) + \delta_2 k_3 L_3 (-k_1 \dot{\lambda}_1 x_3 + x_5 x_1 x_3 f_1)$$

De la Figura 4, $x_1 \neq 0$ y $x_3 \neq 0$ por lo tanto el determinante $\Delta_{13} = 0$.

De la Figura 4, $x_1 \neq 0$ y $x_3 \neq 0$ por lo tanto el determinante $\Delta_{13} \neq 0$.

Una vez que se mueve el rotor y la fase desalineada es la fase 3, $k_3 = 0$, la corriente $x_1 \neq 0$ y sólo si $x_3 \neq 0$, esto implica que la fase se apaga despues de que k_3 cambia de signo, entonces $\Delta_{13} \neq 0$.

La siguiente fase desalineada es la fase 2, $k_2 = 0$, pero a partir de este punto la fase 3 debe estar apagada para no producir movimiento en sentido contrario, $x_3 = 0$ y el determinante $\Delta_{13} = 0$.

Comparando la información que proporcionan los determinantes Δ_{12} y Δ_{13} , en el mismo ciclo de operación, podemos decir que nunca son nulos al mismo tiempo, ver la Tabla 1. Por lo tanto durante el intervalo analizado la matriz J es de rango 5.

TABLA I
DETERMINANTES

| k_j | Δ_{12} | Δ_{13} |
|-----------|---------------|---------------|
| $k_1 = 0$ | $= 0$ | $\neq 0$ |
| $k_2 = 0$ | $= 0$ | $\neq 0$ |
| $k_3 = 0$ | $\neq 0$ | $= 0$ |

Por lo tanto tomando en consideración que en el momento cuando las derivadas de las inductancias son nulas se debe encender la fase correspondiente y que esta se debe apagar hasta que cambia de signo, operación que coincide con el uso de las funciones de par compartido ver (Miller, 2001) y (Krishnan, 2001), se puede decir que las matrices J_{12} y J_{13} no pierden rango y por lo tanto el sistema es observable.

Velocidad cero

Otra trayectoria que es importante analizar es al arranque, ya que se parte de un punto de operación que proporciona poca información debido a que las fases están apagadas.

Para revisar este modo de operación se supone que se parte de rotor parado, $x_5 = 0$, y se conmutan las fases para generar movimiento en sentido positivo. Por lo tanto los determinantes de los jacobianos Δ_{12} , Δ_{13} , Δ_{23} son:

$$\Delta_{12} = \delta_1 (k_1 L_1 k_2 \dot{\lambda}_2 x_1 + k_2 L_2 k_1 \dot{\lambda}_1 x_2)$$

$$\Delta_{13} = \delta_2 (k_1 L_1 k_3 \dot{\lambda}_3 x_1 + k_3 L_3 k_1 \dot{\lambda}_1 x_3)$$

$$\Delta_{23} = \delta_3 (k_2 L_2 k_3 \dot{\lambda}_3 x_2 + k_3 L_3 k_2 \dot{\lambda}_2 x_3)$$

Donde:

$$\delta_1 = \frac{R}{L_1^2 L_2^2 L_3}$$

$$\delta_2 = \frac{R}{L_1^2 L_3^2 L_2}$$

$$\delta_3 = \frac{R}{L_3^2 L_2^2 L_1}$$

Por construcción en un MRC las inductancias siempre son positivas, $L_j \geq 0$, por lo tanto el termino δ_j siempre es diferente de cero.

De la Figura 4 en el momento que $x_1 \neq 0$ si $k_1 = 0$ los determinantes $\Delta_{12} = 0$ y $\Delta_{13} = 0$ y $x_2 = 0$ por lo tanto

$$\Delta_{23} = 0.$$

Cuando el rotor gira y $k_3 = 0$, con los determinantes $\Delta_{13} = 0$ y $\Delta_{23} = 0$, y la fase 2 sigue apagada, con $x_2 = 0$, por lo tanto $\Delta_{12} = 0$.

El rotor sigue moviéndose hasta que $k_2 = 0$ lo que implica los determinantes $\Delta_{12} = 0$ y $\Delta_{23} = 0$ y la fase 3 se apaga, con $x_3 = 0$, por lo tanto $\Delta_{13} = 0$.

De lo anterior se concluye que las tres matrices J_{12} , J_{13} y J_{23} pierden rango en todo el ciclo en que x_1 está encendida con velocidad igual a cero, es decir, en estas condiciones el sistema es no observable, lo que explica porque se requiere una rutina de arranque para iniciar la operación del motor, ver (Ahmed, 2009) donde se detalla está problemática y se hace un resumen de varias soluciones para ella.

V. CONCLUSIONES

Se presentó el análisis de observabilidad del modelo de pequeña señal del Motor de Reluctancia Conmutada obteniendo condiciones suficientes que aseguran la observabilidad local del sistema bajo condiciones de operación reales. Igualmente este análisis explica por qué existen problemas de observabilidad al arranque. Cabe señalar que el comportamiento de las salidas que se piden está relacionado con la técnica de par compartido que se utiliza en varias aplicaciones para eliminar el rizo en la velocidad de la flecha del motor y en el par de salida.

Como trabajo futuro se propone analizar un modelo que considere la operación en saturación y una definición más cercana al comportamiento real de las inductancias.

REFERENCIAS

- Espinosa-Pérez G. R., Maya-Ortiz P., Velasco-Villa M., Sira-Ramírez H. (2000). On the Control of Switched Reluctance Motors *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000.* **2**, 413–418.
- Espinosa-Pérez G. R., Maya-Ortiz P., Velasco-Villa M., Sira-Ramírez H. (2004). Passivity-based control of switched reluctance motors with nonlinear magnetic circuits. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **3**, 439–448.
- Lumsdaine A. y J. H. Lang (1990). State Observers for Variable-Reluctance Motors *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **37**, 133–142.
- Khalil A., Underwood S., Husain I., Klode H., Lequesne B., Gopalakrishnan S., Omekanda A. M., (2007). Four-quadrant pulse injection and sliding-mode-observer-based sensorless operation of a switched reluctance machine over entire speed range including zero speed *IEEE Transactions on Industrial Applications* **43**, 714.
- Ehsani M. y B. Fahimi (2002). Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: State of the art and future trends *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **49**, 40.
- Krishnan R. (2001). Sensorless Operation of SRM Drives: R and D Status *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECONOL*. 1498 – 1503.
- Kreyszig E. (1999). Advanced engineering mathematics. Wiley India. 8th ed. New Delhi.
- Hermann R. y A. J. Krener (1977). Nonlinear Controllability and Observability *IEEE Transactions on Automatic Control* **AC-22**, 728–740.
- De Wit C., Youssef A., Barbot J.P., Martini Ph. Malrait F. (2000). Observability Conditions of Induction Motors at Low Frequencies *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control* **3**, 2044–2049.

- Zaltni D., Naceur M., Ghanes M., Barbot J.P. (2010). Observability analysis of PMSM *3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS)* **6-8 Nov. 2009**, 1.
- Ahmed O., Ohyama K., Narumoto Y., Fujii H., Uehara H. (2009). Sensorless operation of SRM drives from starting to steady state *IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2009.* 1269–1274.
- Miller J. T. E. (2001). *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Newnes Power Engineering. Inglaterra.
- Krishnan R. (2001). *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC Press. Estados Unidos.