

Análisis Estructural para Diagnóstico de Fallas en un Sistema de Inversores en Paralelo

Víctor E. Espinoza Nancy Visairo Víctor Cárdenas *

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UASLP,
Dr. Manuel Nava 8, 78290, San Luis Potosí, S.L.P.
Teléfono-fax: (52)444-817-3381
victorlopeze@gmail.com, {nvisairoc, vcardena}@uaslp.mx

Resumen. Este artículo presenta el análisis estructural aplicado a un sistema de dos inversores conectados en paralelo. El objetivo de este artículo es mostrar las ventajas que presenta el análisis estructural para determinar la detectabilidad y aislabilidad de un conjunto de fallas en un sistema dinámico. Para esto, se construye el modelo estructural basado en el modelo de espacio de estado de los inversores. A través de la descomposición canónica Dulmage-Mendelsohn de la matriz de incidencia del modelo estructural es posible determinar si existen relaciones redundantes que permitan el diagnóstico de fallas. En este trabajo se consideran fallas en los interruptores y sensores para determinar la posibilidad de reconfiguración. El resultado de este análisis muestra que es posible el aislamiento de todas las fallas consideradas agregando un sensor más a los ya considerados para propósitos de control.

Palabras clave: análisis estructural, sistema de inversores, diagnóstico de fallas.

1. Introducción

Una aplicación de los convertidores de potencia llamados inversores donde se puede requerir una gran cantidad de potencia es en un sistema de Alimentación de Potencia Ininterrumpible (UPS por sus siglas en inglés). Estos equipos han tenido una gran demanda en los últimos años para alimentar cargas críticas (llamadas así por la función que realizan), ya que son capaces de proporcionar una alimentación de muy alta calidad y además, ofrecen respaldos ante cortes en la red eléctrica. Las UPS's están formadas por tres etapas: rectificación, almacenamiento e inversión. Una desventaja que puede presentar la UPS es que cuando la corriente de carga que demanda el sistema crece, la UPS quizás debe ser reemplazada por otra de mayor capacidad. Una solución al problema anterior es conectar varias UPS's en paralelo para satisfacer los requerimientos de la carga [1]. El nuevo sistema de inversores debe ser seguro y confiable. Los principales

* Los autores agradecen al proyecto P/CA-78-SEP que financió parte de esta investigación.

componentes que afectan la confiabilidad son los interruptores y los sensores. Los interruptores son los componentes básicos de un inversor y por lo tanto, son los que afectan en mayor grado la confiabilidad del sistema. También, los sensores son necesarios para realizar un proceso de control satisfactorio ya que una falla en ellos puede provocar que el punto de operación no sea el correcto, en nuestro caso de estudio se desea una senoidal libre de armónicos

En [2], [3] y [5] se presentan esquemas de reconfiguración de inversores considerando sólo fallas en los interruptores. En [2] el diagnóstico de fallas en los interruptores se realiza a través de las señales propias de los dispositivos. En [4] se fija un motor de CA como carga del inversor y el diagnóstico de fallas en sensores se logra analizando el vector de corriente del motor y la frecuencia instantánea.

Así, la falta de un estudio que muestre las propiedades de detectabilidad y aislabilidad necesarias para el desarrollo de algoritmos de diagnóstico de fallas para una posible reconfiguración de un sistema de inversores en paralelo con fallas en los dispositivos críticos (interruptores y sensores) motivó el desarrollo de este trabajo. Para esto, se realiza un análisis estructural considerando el modelo en espacio de estado del sistema de dos inversores sin fijar el tipo de carga.

El principio general de todo esquema de detección y aislamiento de fallas (FDI por sus siglas en inglés) basado en modelos es comparar el comportamiento actual del sistema con su comportamiento en condiciones normales. De aquí, el análisis estructural es un método sencillo pero eficiente que muestra si el sistema tiene suficiente información para hacer un efectivo diagnóstico de fallas. De esta forma, una vez obtenidas las propiedades de FDI del sistema se desarrolla el esquema de diagnóstico de fallas.

El análisis estructural permite evaluar el modelo del sistema con respecto a propiedades de detectabilidad y aislabilidad basándose en herramientas de teoría de grafos. El análisis estructural ha sido también utilizado en algoritmos de reconfigurabilidad para un control tolerante a fallas.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan las bases del análisis estructural. Posteriormente, se explica cómo se utiliza la información estructural para el problema de aislabilidad. En la sección 3 se presenta una breve explicación del sistema de inversores conectados en paralelo controlados con la técnica Maestro-Esclavo. El análisis de aislabilidad para el conjunto de fallas bajo estudio basado en el análisis estructural se presenta en la sección 4. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo en la sección 5.

2. Conceptos básicos del análisis estructural

Un estudio del modelo del sistema a través del análisis estructural permite extraer la información redundante existente en el sistema. El principal objetivo de aplicar un procedimiento estructural es identificar los subsistemas con información redundante para el diagnóstico de fallas.

El modelo estructural de un sistema se representa por un conjunto de restricciones $C = \{c_1, \dots, c_n\}$ y un conjunto de variables $Z = K \cup X = \{z_1, \dots, z_n\}$ donde X es el conjunto de variables desconocidas (variables de estado, parámetros desconocidos) y K es el conjunto de variables conocidas (mediciones, señales de control, parámetros constantes). El modelo estructural de un sistema se representa mediante un grafo o matriz de incidencia [6].

Considere el modelo,

$$\dot{x}(t) = g(x(t), u(t), \theta) . \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t), \theta) . \quad (2)$$

donde:

$$\begin{aligned} x(t) &\in R^n: \text{ estado del sistema} \\ u(t) &\in R^m: \text{ entradas del sistema} \\ y(t) &\in R^p: \text{ salidas del sistema} \\ \theta &\in R^q: \text{ parámetros del sistema} \end{aligned}$$

Por tanto, en (1-2) el conjunto de variables y restricciones está dado respectivamente por:

$$Z = x \cup u \cup y . \quad (3)$$

$$C = g \cup h . \quad (4)$$

donde g representa el conjunto de restricciones diferenciales:

$$\dot{x}(t) - g_i(x(t), u(t), \theta) = 0 \quad i = 1, \dots, n . \quad (5)$$

y h representa el conjunto de restricciones de medición:

$$y_j(t) - h_j(x(t), u(t), \theta) = 0 \quad j = 1, \dots, p . \quad (6)$$

Definición 1 El grafo bipartita asociado con el sistema (3-4) es un grafo con dos conjuntos de nodos C y Z , y aristas entre un vértice $c_i \in C$ y un nodo $z_j \in Z$ si y sólo si la variable z_j aparece en la restricción c_i sin importar si es una restricción diferencial o de medición.

Un grafo bipartita, puede ser interpretado de la siguiente manera: todas las variables y parámetros conectados con cierto vértice de restricción tiene que satisfacer la representación de la definición de una arista.

Definición 2 El modelo estructural (o estructura) del sistema (C, Z) es un grafo bipartita (C, Z, ϵ) donde $\epsilon \subset C \times Z$ es un conjunto de aristas definido por:

$$\blacksquare (c_i, z_j) \in \epsilon \text{ si la variable } z_j \text{ aparece en la restricción } c_i.$$

Definición 3 La matriz de incidencia M de un grafo bipartita es una matriz booleana donde las filas corresponden a las restricciones y las columnas a las variables, esto es, $M = \{m_{i,j} | m_{i,j} = 1 \text{ si } (c_i, z_j) \in \epsilon \text{ y } m_{i,j} = 0 \text{ si } (c_i, z_j) \notin \epsilon\}$.

La herramienta básica para el análisis estructural es el concepto de apareamiento en un grafo bipartita. De manera sencilla, un apareamiento es una asignación causal que asocia algunas variables del sistema con las restricciones del sistema a partir de las cuales pueden ser calculadas. Las variables que no pueden ser apareadas no se pueden calcular. Las variables que pueden ser apareadas de diferentes formas pueden ser calculadas de diferentes formas (relaciones redundantes ARR's), por tanto, existe la posibilidad del diagnóstico de fallas y la reconfiguración del sistema.

Definición 4 Un apareamiento L es un subconjunto de aristas M tal que dos aristas cualesquiera no tienen un nodo (o vértice) en común.

Teorema 1 (Descomposición Dulmage-Mendelsohn) Cualquier matriz de incidencia perteneciente a un modelo estructural se descompone en tres partes:

1. Sobre-restringido: $S^+ = (C^+, Z^+)$ tal que existe un apareamiento completo en Z^+ pero no en C^+ , lo que implica la existencia de información redundante en el modelo estructural.
2. Justamente-restringido: $S^0 = (C^0, Z^0)$ tal que existe un apareamiento completo en Z^0 y en C^0 .
3. Sub-restringido: $S^- = (C^-, Z^-)$ tal que existe un apareamiento completo en C^- pero no en Z^- .

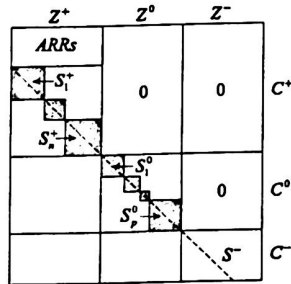


Figura 1. Descomposición canónica Dulmage-Mendelsohn.

Teorema 2 (Observabilidad estructural) Para que el sistema dado por (3-4) sea estructuralmente observable son suficientes y necesarias las siguientes condiciones:

1. Todos los elementos de X son calculables a partir de las variables conocidas.
2. Los subconjuntos sobre-restringido y justamente-restringido son causales.
3. El subconjunto sub-restringido es vacío.

2.1. Metodología a seguir para FDI

- Para la aplicación del análisis es tener un modelo del sistema que defina el comportamiento dinámico, así como definir las variables que serán medidas a través de sensores. La selección de dichas mediciones afecta la aislabilidad del sistema.
- Se obtiene el modelo estructural del sistema, para el caso de los inversores se utiliza la matriz de incidencia.
- Posteriormente, con ayuda de los teoremas de Dulmage-Mendelsohn y Observabilidad estructural se realiza la descomposición canónica del sistema y se determina si el sistema es observable estructuralmente, es decir, si se pueden calcular todas las variables desconocidas X a partir de las conocidas K .
- Finalmente, se aplica el concepto de apareamiento para tener un conjunto de ARRr que permitan evaluar la detectabilidad y aislabilidad de las fallas a través de la firma de fallas de cada una de ellas.

Con lo anterior, el análisis estructural no permite la generación de residuos debido a que no existe un modelo explícito del modelo. Sin embargo, determina el conjunto de restricciones a partir de las cuales se pueden generar los residuos y también provee la secuencia de cálculo.

3. Modelo del sistema de 2 inversores en paralelo

En este trabajo se considera el sistema de 2 inversores conectados en paralelo en configuración Maestro-Eslavo como se muestra en la Figura 2. El inversor Maestro regula el voltaje de salida de tal manera que sea una señal senoidal libre de componentes armónicas para cualquier tipo de carga, otro objetivo del inversor Maestro es proporcionar una parte de la corriente demandada por la carga. Por otro lado, el objetivo del inversor Esclavo se encarga de proporcionar el complemento de la corriente de la carga.

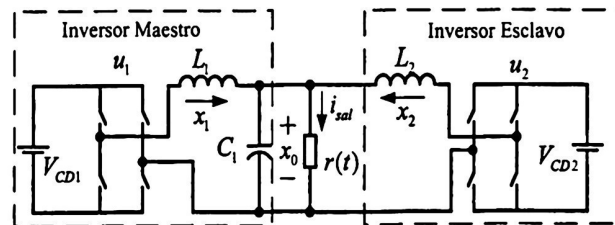


Figura 2. Esquema de la conexión en paralelo de los inversores.

La técnica de control Maestro-Esclavo permite al inversor Esclavo tomar el lugar del Maestro cuando ocurre una falla en dicho inversor y así poder seguir alimentando la carga del sistema de inversores.

Las restricciones que definen el comportamiento dinámico del sistema de 2 inversores están dadas por:

$$-u_1 V_{CD_1} + L_1 \dot{x}_1 + x_0 = 0 . \quad (c_1)$$

$$-u_2 V_{CD_2} + L_2 \dot{x}_2 + x_0 = 0 . \quad (c_2)$$

$$L_1 \dot{x}_1 - L_2 \dot{x}_2 = u_1 V_{CD_1} - u_2 V_{CD_2} . \quad (c_3)$$

$$C_0 \dot{x}_0 + \frac{x_0}{r(t)} = x_1 + x_2 . \quad (c_4)$$

donde:

x_0 :	Tensión de voltaje en el capacitor
x_1 :	Corriente en el inductor L_1
x_2 :	Corriente en el inductor L_2
V_{CD_1}, V_{CD_2} :	Tensiones de voltaje de entrada de los inversores
$r(t)$:	Representa una carga dinámica
u_1, u_2 :	Señales de control de los inversores
L_1, L_2 :	Valores de los inductores
C_0 :	Valor del capacitor de salida

4. Análisis estructural del sistema de 2 inversores en paralelo

Para el modelo estructural completo del sistema se definen las restricciones que describen el comportamiento dinámico y los sensores del sistema. Por lo tanto, se agregan las nuevas restricciones:

$$\dot{x}_0 = dx_0 . \quad (c_5)$$

$$\dot{x}_1 = dx_1 . \quad (c_6)$$

$$\dot{x}_2 = dx_2 . \quad (c_7)$$

$$y_0 = x_0 . \quad (c_8)$$

$$y_1 = x_1 . \quad (c_9)$$

$$y_2 = x_2 . \quad (c_{10})$$

$$y_{sal} = \frac{x_0}{r(t)} . \quad (c_{11})$$

donde:

y_0 :	Sensor de la tensión de salida
y_1 :	Sensor de la corriente en el inductor L_1
y_2 :	Sensor de la corriente en el inductor L_2
y_{sal} :	Sensor de la corriente de la carga

El modelo estructural está definido por el conjunto de restricciones

$$C = \{c_1, \dots, c_{11}\} .$$

el conjunto de variables conocidas

$$K = \{u_1, u_2, y_0, y_1, y_2, y_{sal}\} .$$

el conjunto de variables desconocidas

$$X = \{x_0, x_1, x_2, \dot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2, r(t)\} .$$

En la Tabla 1 se muestra la matriz de incidencia del sistema después de haber

Tabla 1. Matriz de incidencia

\	x_0	x_1	x_2	$\dot{x}_0$	$\dot{x}_1$	$\dot{x}_2$	$r(t)$
c_8	(1)						
c_9		(1)					
c_{10}			(1)				
c_5	1			(1)			
c_6		1			(1)		
c_7			1			(1)	
c_{11}	1						(1)
c_1	1				1		
c_2	1					1	
c_3					1	1	
c_4	1	1	1	1			1

aplicado la descomposición canónica de Dulmage-Mendelsohn; se puede observar que existen más restricciones que variables, y por lo tanto, es posible aplicar los conceptos de FDI. En particular, se muestra un apareamiento de tal manera que las restricciones (c_1 - c_4) sean las que se utilizan para la generación de las ARR. Los (1) representan las variables apareadas, las variables que se calculan a través de las restricciones en las cuales son apareadas.

La descomposición canónica del modelo estructural de los inversores muestra que los subconjuntos S^0 y S^- son vacíos, por lo tanto, el sistema completo pertenece al subconjunto sobre-restringido S^+ , es decir, se pueden calcular todas las variables desconocidas a partir de las conocidas, por lo tanto, el sistema es estructuralmente observable de acuerdo al Teorema 2.

En este trabajo se estudia el siguiente conjunto de fallas:

- f_{u_1} : Fallas en los impulsores e interruptores del Inversor Maestro.
- f_{u_2} : Fallas en los impulsores e interruptores del Inversor Esclavo.
- f_{y_0} : Falla en el sensor de la tensión de salida.
- f_{y_1} : Falla en el sensor de corriente del inductor L_1 .
- f_{y_2} : Falla en el sensor de corriente del inductor L_2 .
- $f_{y_{sal}}$: Falla en el sensor de corriente de la carga.

4.1. Comentarios acerca de la reconfiguración del sistema

1. Cuando se presentan fallas en impulsores o interruptores el proceso de reconfiguración es sacar de operación al inversor. Por tanto es necesario saber qué inversor presenta la falla y seguir alimentando la carga del sistema.
2. Cuando se presentan fallas en los sensores, el proceso de reconfiguración es no sacar de operación al inversor, se sigue operando al sistema con ayuda de las ARRs.

A continuación se muestran las ARRs que permiten evaluar la detectabilidad y aislabilidad del conjunto de fallas para los casos de reconfiguración mencionados anteriormente.

$$c_1(u_1, c_8(y_0), c_6(c_9(y_1))) \cdot \quad (arr_1)$$

$$c_2(u_2, c_8(y_0), c_7(c_{10}(y_2))) \cdot \quad (arr_2)$$

$$c_3(u_1, u_2, c_6(c_9(y_{12})), c_7(c_{10}(y_2))) \cdot \quad (arr_3)$$

$$c_4(c_8(y_0), c_9(y_1), c_{10}(y_2), c_5(c_8(y_0)), c_{11}(y_3, c_8(y_0))) \cdot \quad (arr_4)$$

En la Tabla 2 se muestra la matriz de firma de fallas con el conjunto de ARRs; se puede observar que la firma de fallas (columnas) son diferentes, es decir, se puede tener detectabilidad y aislabilidad completa con el conjunto de ARRs.

Tabla 2. Matriz de firma de fallas con 4 sensores.

$\backslash$	f_{u_1}	f_{u_2}	f_{y_0}	f_{y_1}	f_{y_2}	$f_{y_{sal}}$
arr_1	1		1	1		
arr_2		1	1		1	
arr_3	1	1		1	1	
arr_4			1	1	1	1

El resultado anterior es cuando se tienen las 4 mediciones disponibles. A continuación se realiza el mismo análisis para cuando la medición del sensor de corriente no se utiliza. Cuando se quita dicho sensor de corriente la confiabilidad del sistema aumenta. Otra característica es conocer la capacidad de reconfiguración del sistema cuando se pierde el sensor, es decir, analizar si el sistema resultante aún tiene la capacidad de diagnóstico y aislamiento; por lo tanto, el conjunto de fallas se reduce a las primeras 5 ($f_{u_1}, f_{u_2}, f_{y_0}, f_{y_1}, f_{y_2}$), en la Tabla 3 se muestra la nueva matriz de firma de fallas. Se observa que la detectabilidad no se ve afectada, pero es fácil observar que la aislabilidad del sistema sí. Se pueden notar sólo 3 firmas de fallas, y por lo tanto, es posible aislar los 3 conjuntos de fallas: $s_1 = \{f_{u_1}, f_{y_1}\}$, $s_2 = \{f_{u_2}, f_{y_2}\}$ y $s_3 = \{f_{y_0}\}$.

Sin embargo, a pesar de la no aislabilidad de cada falla del sistema cuando se utilizan únicamente 3 sensores es posible determinar qué inversor falla ya que el conjunto $s_1 = \{f_{u_1}, f_{y_1}\}$ corresponde al inversor Maestro y el conjunto

Tabla 3. Matriz de firma de fallas con 3 sensores.

$\backslash$	f_{u1}	f_{u2}	f_{y0}	f_{y1}	f_{y2}
arr_1	1		1	1	
arr_2		1	1		1
arr_3	1	1		1	1

$s_2 = \{f_{u2}, f_{y2}\}$ pertenece al inversor Esclavo. Por tanto, es posible diseñar un control tolerante a fallas, a fin de seguir alimentando la carga del sistema, a un porcentaje menor de la potencia nominal.

5. Conclusiones

Se presentó de manera detallada un estudio de detectabilidad y aislabilidad de fallas basado en el análisis estructural. Las fallas consideradas son en sensores e interruptores basandose en el modelo de espacio de estado, sin limitar el tipo de carga del sistema. Se muestra que el análisis estructural es una herramienta sencilla pero eficiente para conocer si el sistema presenta redundancias analíticas que sirvan para resolver el problema FDI. Con respecto a las fallas del sistema de Inversores se verifica que se tiene información redundante que ayuda aumentar la confiabilidad del sistema ante presencia de fallas. En el caso de 4 sensores se muestra que existe aislabilidad del conjunto de 6 fallas bajo estudio.

Referencias

1. Pérez, Gustavo: Estudio de Inversores en Conexión Paralela. Tesis de Maestria, UASLP, México (2006)
2. Wu, T.-F., Hsieh, H.-M., Wu, Y.-E., Chen, Y.-K.: Parallel-Inverter System with Failure Isolation and Hot-Swap Features. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 5, pp. 1329-1340 (September/October 2007)
3. Mingyao, M., F., Hu, L., Chen, A., He, X.: Reconfiguration of Carrier-Based Modulation Strategy for Fault Tolerant Multilevel Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 5, pp. 2050-2060 (September 2007)
4. Peugeot, R., Courtine, S., Rognon, J.-P.: Fault Detection and Isolation on a PWM Inverter by Knowledge-Based Model. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1318-1326 (November/December 1998)
5. Li, S., Xu, L.: Strategies of Fault Tolerant Operation for Three-Level PWM Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 4, pp. 933-940 (July 2006)
6. Blanke, M., Lunze, J., *et al*: Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Springer, Berlin (2003)
7. Düstegör, D., *et al*: Structural Analysis of Fault Isolability in the DAMADICS Benchmark. Control Engineering Practice, 14(6), pp. 597-608 (2006)
8. Rattfält, L.: A Comparative Study of Two Structural Methods for Fault Isolability. Master's Thesis, Department of Electrical Engineering at Linköpings Universitet, Germany (2004)

9. Cassar, J. P., Staroswiecki, M.: A structural Approach for the Design of Failure Detection and Identification Systems. Proc. of the IFAC Symposium on Control of Industrial Systems, Belfort (1997)
10. Rashid, M.: Power Electronics Handbook. Academic Press, USA (2001)