

Diagnóstico de Fallas de Circuito Abierto Mediante Observadores PI en Inversores Multinivel NPC Interconectados con la Red

J. A. Pecina-Sánchez¹, D. U. Campos-Delgado¹, D. R. Espinoza-Trejo²,
A. A. Valdez-Fernández¹, C. H. De Angelo³

¹Facultad de Ciencias, UASLP, S.L.P., México

²Coordinación Académica Región Altiplano, UASLP, S.L.P., México

³Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina

Email: angel.pecina@alumnos.uaslp.edu.mx

Resumen—Este artículo presenta una metodología para la detección y aislamiento de fallas en el convertidor de potencia inversor multinivel de diodo enclavado de un sistema fotovoltaico interconectado con la red eléctrica. El método propuesto aborda la problemática de diagnóstico desde una perspectiva basada en modelos, para lo cual, las fallas son modeladas empleando estructuras aditivas en la señal de actuación del sistema. Además, los perfiles de falla de actuador son caracterizados a partir de un término en CD más componentes oscilatorias, y mediante estas componentes en CD de los perfiles de falla, y una caracterización direccional de los residuos generados, se logra detectar e identificar condiciones de falla sencillas y simultáneas en los interruptores de potencia del inversor multinivel. Para este fin, se construye un banco de observadores PI, los cuales permiten estimar la componente en CD de los perfiles de fallas en el actuador. Por último, las ideas expuestas en este trabajo son validadas mediante la simulación del sistema bajo una condición de fallas simultáneas.

Palabras clave: Diagnóstico de fallas, sistemas fotovoltaicos, inversores multinivel.

I. INTRODUCCIÓN

Recientemente, se ha incrementado el interés por el uso de fuentes alternas de energía, esto debido sobre todo a la disminución en los recursos naturales disponibles y los altos niveles de contaminación provocados por el uso de las diferentes fuentes de energía fósiles. En este contexto, la tecnología solar fotovoltaica (FV) ha tenido un importante rol en el escenario global de energía durante los últimos años, y ha crecido su uso principalmente en los países desarrollados y en vías de desarrollo. De hecho, las tendencias mundiales en la aplicación de tecnologías FV apuntan hacia la implementación de sistemas de generación distribuidos interconectados al sistema eléctrico, lo que impondrá un mayor compromiso entre confiabilidad, seguridad, costos, y eficiencia en la conversión de energía (Spagnuolo et al., 2010).

Dentro de un sistema fotovoltaico (SFV), una de las unidades principales es la etapa de acondicionamiento de potencia. En esta etapa, es imprescindible el uso de un

inversor de potencia para convertir la señal en corriente directa proveniente del generador fotovoltaico a corriente alterna, lo que se realiza a través de un control adecuado de los estados de encendido y apagado de los interruptores del inversor, permitiendo de esta manera regular el flujo de potencia y obtener un voltaje simétrico de corriente alterna (CA) con magnitud y frecuencia deseadas. De las diferentes topologías de convertidores de potencia que han sido reportadas en los últimos años, los inversores multinivel (IM) han tenido un gran auge en numerosas aplicaciones (Zambre et al., 2010). Entre las diferentes topologías de IM (J. Rodríguez et al., 2002), el inversor de diodo enclavado (NPC, por sus siglas en inglés) de tres niveles es considerado como uno de los más populares. Este inversor es ampliamente utilizado en diferentes procesos industriales (J. Rodríguez et al., 2010), y recientemente está siendo empleado para SFV interconectados con la red eléctrica (Lin Ma et al., 2009).

Por otro lado, un aspecto muy importante en cualquier aplicación es la confiabilidad del sistema, sobre todo en aquellas donde la seguridad es crítica y la continua operación del proceso es una de las principales prioridades. En este ámbito, y para el caso concreto de SFV, diversas investigaciones han demostrado que el inversor es el componente más susceptible a fallas (Petroni et al., 2008). Para el caso del IM NPC, se pueden caracterizar diferentes tipos de falla, tales como fallas en el sistema de control, fallas en los sensores de voltaje y corriente, fallas en el enlace de corriente directa (CD), y fallas en los dispositivos semiconductores de potencia. De hecho, dado que la topología del IM NPC está constituida por una mayor cantidad de dispositivos de potencia que la topología convencional de puente completo, la posibilidad de que ocurra una falla en los interruptores del IM NPC es también mucho mayor que en los inversores convencionales (Li et al., 2012). Siguiendo este contexto, se distinguen dos tipos de fallas en los interruptores de potencia: fallas de cortocircuito y fallas de circuito abierto (FCA). En el caso de una falla de cortocircuito, la unión de las terminales positiva y negativa del bus de CD dispararían

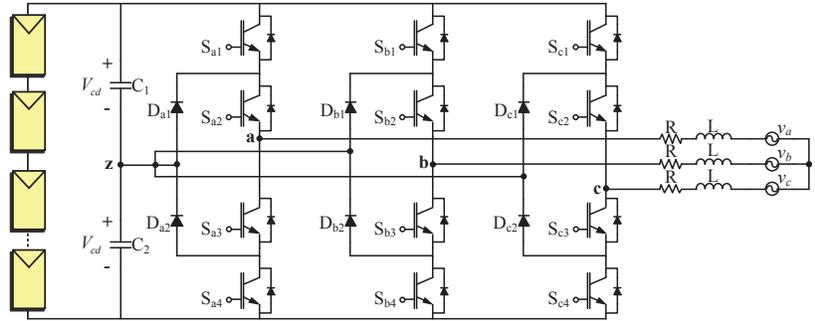


Figura 1. Inversor trifásico NPC de tres niveles alimentado por un generador fotovoltaico e interconectado a la red eléctrica.

instantáneamente las protecciones del sistema, por lo que la planta detendría su operación, y en el peor de los casos, quedaría inservible. Por otra parte, al ocurrir una FCA, el inversor ya no será capaz de entregar los voltajes y corrientes esperados; no obstante, aunque el desempeño y eficiencia del sistema se verán seriamente deteriorados, es posible que el sistema siga operando a través de una estrategia de control tolerante a fallas (Lezana et al., 2010). En cuanto al diagnóstico de FCA en actuadores de potencia, existen una gran variedad de algoritmos presentados en la literatura, donde tres principales vertientes se pueden identificar (Campos Delgado et al., 2008): el enfoque basado en mediciones (Kim et al., 2009; Abadi et al., 2012; Choi et al., 2012); el enfoque basado en inteligencia artificial (Patton et al., 2000); y el enfoque basado en modelos (Campos-Delgado y Espinoza-Trejo, 2010). Siguiendo este ámbito, en la literatura la mayoría de los algoritmos para diagnóstico de FCA en actuadores de potencia se pueden clasificar como basados en mediciones (Lu y Sharma, 2009). Sin embargo, generalmente este enfoque presenta la desventaja de que se requiere por lo menos un ciclo de la frecuencia fundamental de excitación del sistema para llevar a cabo el diagnóstico de la falla. Mientras tanto, para el enfoque basado en inteligencia artificial se requiere de una base de datos de entrenamiento, además de que el esfuerzo computacional para implementar los algoritmos es realmente significativo. En cuanto al enfoque basado en modelos, puede ser necesario un proceso previo para la identificación de los parámetros del sistema. No obstante, este enfoque suele ser muy eficiente frente a perturbaciones externas, y sobre todo, ante condiciones de fallas intermitentes en el sistema. Por lo tanto, en este trabajo se aborda el enfoque basado en modelos para la detección y aislamiento de FCA en los interruptores de potencia del IM NPC, y de esta manera atacar las deficiencias que se presentan en los enfoques de diagnóstico basados en mediciones e inteligencia artificial. De manera concreta, se propone un banco de observadores PI para la estimación de estados y perfiles de falla en el actuador, aplicados al diagnóstico de FCA sencillas y simultáneas en los interruptores de potencia del IM NPC para SFV, siguiendo la línea de nuestra aportación anterior enfocada a inversores trifásicos básicos (Espinoza-Trejo et

al., 2012).

II. TOPOLOGÍA DEL CONVERTIDOR

En la Fig. 1 se muestra el circuito de potencia para un inversor trifásico de tres niveles NPC con diodos de enclavamiento (Nabae et al., 1981). En el circuito, se pueden observar los capacitores C_1 y C_2 , a través de los cuales son generados 3 niveles de voltaje a partir del bus de CD. El punto medio de conexión entre los dos capacitores se define como el punto neutro z . Los dispositivos S_{l1} y S_{l4} ($l = a, b, c$), son los interruptores principales del inversor NPC. Mientras tanto, S_{l2} y S_{l3} fungen como interruptores auxiliares para generar el nivel cero junto con los diodos de enclavamiento D_{l1} y D_{l2} , los cuales, proveen la conexión con el punto neutro z .

II-A. Modelo del Sistema

El modelo matemático del IM NPC, se obtiene a partir del circuito equivalente que se muestra en la Fig. 2. Para llevar a cabo la tarea de modelado del sistema, se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Los interruptores de potencia son ideales, por lo que no se consideran pérdidas por conmutación.
2. La carga para el convertidor (el filtro de salida en este caso) se considera simétrica y balanceada.
3. Los condensadores eléctricos del bus de CD son de la misma capacitancia ($C_1 = C_2$).
4. La red de suministro se asume trifásica, simétrica y balanceada.

Así, el modelo se obtiene a partir del análisis de la malla que se presenta en la Fig. 2, con lo que se llega finalmente

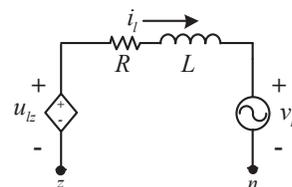


Figura 2. Circuito equivalente por fase del IM NPC.

al siguiente modelo en el espacio de estados descrito en forma compacta por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{d} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\quad (1)$$

donde

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{az} \\ u_{bz} \\ u_{cz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} v_{an} + v_{nz} \\ v_{bn} + v_{nz} \\ v_{cn} + v_{nz} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix},$$

R y L son la resistencia e inductancia del filtro de salida; i_a, i_b, i_c son las corrientes inyectadas a la red; u_{az}, u_{bz}, u_{cz} son los voltajes de salida del inversor; v_{an}, v_{bn}, v_{cn} son las tensiones de la red eléctrica; y v_{nz} es el voltaje entre el punto neutro de la red y el punto z del inversor NPC. Del modelo anterior, se asume que las mediciones para el vector de perturbaciones \mathbf{d} están disponibles, lo que implicará el monitoreo de los voltajes de red y la tensión entre el punto neutro de la red y el punto z del inversor. Estas mediciones aportarán información clave para la construcción de observadores desacoplados entre sí, con los cuales se generan residuos para el diagnóstico de las FCA por cada rama en el inversor NPC.

III. DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN MODELOS

III-A. Fallas de Actuador en el SFV

En general, las FCA en el IM NPC conducen a un deterioro en la eficiencia y desempeño del sistema, por lo que este tipo de fallas en el actuador de potencia suelen ser representadas como una reducción en la ganancia del inversor. En consecuencia, se sugiere modelar este tipo de fallas usando una estructura aditiva (Campos Delgado et al., 2008). Como resultado, se obtienen las siguientes relaciones para modelar las fallas de actuador en el inversor trifásico NPC:

$$\begin{aligned}u_{az}^f(t) &= u_{az}(t) + f_a(t) \\ u_{bz}^f(t) &= u_{bz}(t) + f_b(t) \\ u_{cz}^f(t) &= u_{cz}(t) + f_c(t)\end{aligned}\quad (2)$$

donde $(u_{az}^f, u_{bz}^f, u_{cz}^f)$ representa los voltajes de actuador con falla; (u_{az}, u_{bz}, u_{cz}) los voltajes de control nominal; y (f_a, f_b, f_c) las fallas inducidas en los voltajes de salida del inversor, donde $f_a = 0, f_b = 0$ y $f_c = 0$ en una condición libre de falla.

Con el fin de ilustrar el proceso expuesto anteriormente, en la Fig. 3 (abajo) se muestra el perfil resultante para una falla en los interruptores inferiores (S_{l3} y/o S_{l4}) de la fase l ($l = a, b, c$) del IM NPC. Como resultado, al ocurrir la falla en los interruptores inferiores de la fase l , el inversor ya no será capaz de alimentar la carga de la fase l durante el

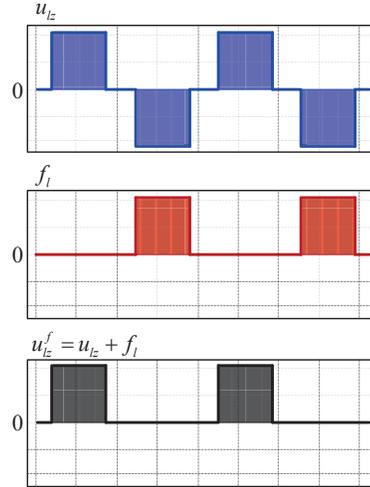


Figura 3. Perfil de una FCA en los interruptores S_{l3} y/o S_{l4} .

estado negativo del voltaje de salida u_{lz} , por lo que la falla inducida f_l tendrá un perfil positivo (ver Fig. 3 en medio), i.e. $f_l \geq 0$ después de que se dispara la falla. Mientras tanto, al presentarse una FCA en los interruptores superiores de la fase l , el estado positivo no estará disponible, por lo que la falla inducida f_l describirá un perfil negativo después de que se dispare la falla, lo que implicará finalmente que $f_l \leq 0$. En consecuencia, se obtienen seis posibles direcciones en los perfiles de falla, los cuales son relacionados con seis subconjuntos de escenarios de falla en los interruptores del inversor, tal y como se muestra en la Tabla I. También del resultado anterior, y a partir de la información que aportan las direcciones para los perfiles de falla en los interruptores del IM NPC, se derivan los criterios para llevar a cabo la etapa de aislamiento en el proceso de diagnóstico, lo cual se realizará a partir de la Tabla I.

Por otra parte, al aplicar el análisis de Fourier a la trayectoria de las corrientes de línea en un escenario de FCA, se encontró que el patrón de corriente con falla presenta un valor en CD característico más armónicos de la frecuencia fundamental y de conmutación del sistema. De hecho, dado que el perfil de falla f_l que se muestra en la Fig. 3 presenta un comportamiento periódico, los fundamentos expuestos anteriormente se pueden aplicar para el caso de los voltajes de actuador con falla. En consecuencia, los perfiles de falla

TABLA I
DIRECCIONES PARA LOS PERFILES DE FALLA EN LOS INTERRUPTORES DEL IM NPC

Interruptor Dañado	f_a	f_b	f_c
S_{a1} y/o S_{a2}	≤ 0		
S_{a3} y/o S_{a4}	≥ 0		
S_{b1} y/o S_{b2}		≤ 0	
S_{b3} y/o S_{b4}		≥ 0	
S_{c1} y/o S_{c2}			≤ 0
S_{c3} y/o S_{c4}			≥ 0

inducidos en los voltajes de suministro se modelan con un término en CD más componentes oscilatorias, tal y como se describe a continuación:

$$\begin{aligned} f_a(t) &= f_{ao} + \Delta f_a(t) \\ f_b(t) &= f_{bo} + \Delta f_b(t) \\ f_c(t) &= f_{co} + \Delta f_b(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde (f_{ao}, f_{bo}, f_{co}) son los términos en CD, y $(\Delta f_a(t), \Delta f_b(t), \Delta f_c(t))$ denotan las componentes oscilatorias en los perfiles de falla. Siguiendo este planteamiento, una observación importante del análisis de Fourier realizado para las corrientes con falla por (Campos-Delgado et al., 2013), es que la componente en CD presenta la magnitud con el valor más grande, aproximadamente 32% del valor pico de corriente, por lo que al aplicar la misma filosofía a las voltajes de actuador con falla, es de esperarse un resultado similar. En consecuencia, de acuerdo al análisis anterior, se asume que las componentes oscilatorias se encuentran acotadas, i.e. $\exists \Gamma_l > 0$ ($l = a, b, c$) tal que $|\Delta f_l(t)| \leq \Gamma_l < \infty \forall t$. Además, se considera que en la práctica los patrones de falla tienen tasas de cambio finitas, es decir $|d\Delta f_l(t)/dt| < \infty \forall t$. Así, a partir del modelo en espacio de estados (1) y de las estructuras (2) y (3), se plantea a continuación un esquema para la generación de residuos, los cuales se emplean para propósitos de diagnóstico de FCA en el inversor.

III-B. Estructura de los Observadores PI

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se emplea un enfoque basado en modelos para la detección y aislamiento de las fallas (FDI, por sus siglas en inglés) en los interruptores de potencia del IM NPC. Con este propósito, se propone emplear un banco de observadores PI para la estimación de los estados y perfiles de falla del sistema, lo que permitirá construir posteriormente un generador de residuos para el diagnóstico de las FCA en el inversor. Para este caso en específico, se considera que la componente en CD f_{lo} del perfil de falla proveerá de la información necesaria para llevar a cabo las tareas de detección y aislamiento en el proceso de diagnóstico, por lo que los observadores propuestos serán los encargados de estimar la componente en CD de los perfiles.

En primera instancia, a partir de (1) se obtienen 3 sistemas escalares desacoplados entre sí con la siguiente dinámica ante una falla (al asumir que v_{nz} es medible):

$$\begin{aligned} \dot{x}_l &= Ax_l + B(u_{lz} + f_l) + Dd_l \quad l = a, b, c \\ \dot{i}_l &= x_l \end{aligned} \quad (4)$$

donde $A \triangleq -R/L$, $B \triangleq 1/L$, $D \triangleq -1/L$ y $d_l \triangleq v_{ln} + v_{nz}$. Enseguida se construye un banco de l observadores dedicados para la estimación de los estados y perfiles de falla del sistema (4). Para este propósito, se considera la siguiente estructura dinámica del observador PI:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_l &= A\hat{x}_l + B u_{lz} + Dd_l + G(i_l - \hat{i}_l) + B\hat{f}_l \\ \dot{\hat{f}}_l &= K(i_l - \hat{i}_l) \\ \dot{\hat{i}}_l &= \hat{x}_l \end{aligned} \quad (5)$$

Del sistema (5), se puede observar que la estructura contiene una copia de la dinámica original más un factor de corrección $G(i_l - \hat{i}_l)$, además de un término \hat{f}_l que permitirá estimar la componente en CD del perfil de falla f_{lo} .

Por lo tanto, el objetivo es encontrar los valores de G y K , tal que $\hat{x}_l \rightarrow x_l$ y $\hat{f}_l \rightarrow f_{lo}$ conforme $t \rightarrow \infty$. Enseguida se deriva un criterio de diseño para el par (G, K) que garantice la convergencia del observador. Para esto, se definen los errores de estimación $e_x = x_l - \hat{x}_l$ y $e_f = f_{lo} - \hat{f}_l$. Ahora, se obtiene la dinámica del error de estimación mediante los sistemas (4) y (5), con lo que se llega al siguiente modelo de error:

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= A_o e_x + B e_f + B \Delta f_l \\ \dot{e}_f &= -K e_x \end{aligned} \quad (6)$$

donde $A_o = (A - G)$ es un valor negativo. Notar que las ecuaciones de error en (6) se pueden escribir como un único sistema dinámico con vector de estados $e = [e_x \ e_f]^T$, y matriz de estados

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A - G & B \\ -K & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

donde al elegir de manera adecuada los valores de G y K , se pueden colocar los eigenvalores de la matriz \hat{A} donde sea deseado. Sin embargo, como se demuestra más adelante, la componente oscilatoria del perfil de falla Δf_l no permite la convergencia asintótica de los errores de estimación del estado y de la componente en CD f_{lo} correspondiente al perfil de falla f_l . No obstante, se puede garantizar que los errores de estimación convergen a una vecindad cercana al origen, como se demostrará en el siguiente desarrollo.

Primero se define la siguiente función cuadrática de Lyapunov para probar estabilidad del error:

$$V = P e_x^2 + e_f^2 \quad (8)$$

donde $P > 0$. Posteriormente se calcula la derivada de V con respecto al tiempo, con lo que se obtiene

$$\dot{V} = 2PA_o e_x^2 + 2e_f(BP - K)e_x + 2\Delta f_l B P e_x, \quad (9)$$

donde al asumir que $K = BP$, y que P satisface la siguiente ecuación escalar de Lyapunov $2PA_o = -Q$ para $Q > 0$ dado que A_o es un valor negativo, se llega a

$$\dot{V} = -Q e_x^2 + 2\Delta f_l K e_x. \quad (10)$$

donde $Q > 0$. Enseguida, se considera la cota de la componente oscilatoria $|\Delta f_l(t)| \leq \Gamma_l < \infty$, con lo que se tiene que:

$$\Delta f_l K e_x \leq \Gamma_l |K| |e_x| \quad \forall t. \quad (11)$$

Como resultado, al utilizar la desigualdad en (11) se llega a la siguiente expresión para la derivada de la función de Lyapunov:

$$\dot{V} \leq -|e_x| (Q|e_x| - 2\Gamma_l |K|). \quad (12)$$

Por lo tanto, se satisface que $\dot{V} < 0$ si

$$|e_x| > \frac{2\Gamma_l|K|}{Q}. \quad (13)$$

Del resultado anterior, se puede concluir que el error convergerá a una vecindad cercana al origen, donde el radio de esta bola dependerá del valor de la cota Γ_l y del valor de Q . Además, a partir de (12), se puede concluir que la estimación de la componente en CD \hat{f}_l convergerá al valor verdadero f_{l0} conforme $t \rightarrow \infty$, en ausencia del componente oscilatorio $\Delta f_l(t) = 0$ ($\Gamma_l = 0$) al aplicar el lema de Barbalat. Finalmente de (6) y (12), se puede deducir que ante una condición libre de falla ($f_l = 0$), el error de estimación e_x convergerá asintóticamente al origen.

IV. ESQUEMA DE DIAGNÓSTICO PROPUESTO

Para el proceso de diagnóstico, las señales de residuos son generadas a partir de las componentes en CD de los perfiles de falla estimadas a partir de (5):

$$r_l(t) = \hat{f}_l \quad l = a, b, c. \quad (14)$$

Por lo tanto, los residuos generados a partir de (14) serán cercanos a cero si el sistema está libre de fallas; en caso contrario, la señal de residuo indicará la presencia de una falla. A continuación, se describen los esquemas propuestos para la detección y aislamiento de FCA en el inversor NPC.

IV-A. Esquema para la Detección de Fallas

El primer paso en el proceso de diagnóstico es la detección de la falla. Éste se realiza evaluando directamente los residuos generados mediante (14). No obstante, es necesario considerar un umbral J_{TH} con el fin de tomar en cuenta el posible ruido introducido en las mediciones, y los múltiples armónicos de las frecuencias fundamental y de conmutación que son inducidos por los voltajes PWM del inversor. En consecuencia, el umbral J_{TH} no será cero aún cuando no se presenten fallas en el IM NPC, por lo que éste debe ser cuidadosamente seleccionado de manera que se eviten falsas alarmas en el sistema de detección de fallas. Por lo tanto, se sugiere seleccionar el umbral en un escenario libre de falla a partir de

$$J_{TH} = \max_{\text{no falla } \forall t, l} |r_l(t)|. \quad (15)$$

De esta manera, una vez seleccionado el umbral, se procede a realizar la detección de la falla mediante el siguiente criterio:

$$\text{Decisión} = \begin{cases} \text{Falla} & \text{si } |r_l(t)| > J_{TH} \\ \text{No Falla} & \text{si } |r_l(t)| \leq J_{TH} \end{cases} \quad l = a, b, c. \quad (16)$$

IV-B. Metodología para el Aislamiento de Fallas

Inmediatamente después de que se detecta la falla en el sistema, se lleva a cabo el aislamiento de la misma como segundo paso en el proceso FDI. Para este propósito, se considera la información que proporciona la dirección de la

TABLA II

FIRMAS RESULTANTES PARA EL AISLAMIENTO DE FALLAS EN EL IM

Interruptor Dañado	F_a	F_b	F_c
S_{a1} y/o S_{a2}	N	Z	Z
S_{a3} y/o S_{a4}	P	Z	Z
S_{b1} y/o S_{b2}	Z	N	Z
S_{b3} y/o S_{b4}	Z	P	Z
S_{c1} y/o S_{c2}	Z	Z	N
S_{c3} y/o S_{c4}	Z	Z	P

componente en CD estimada \hat{f}_l , y tomando en cuenta esto, se definen un conjunto de firmas de falla para identificar en el proceso de clasificación el o los interruptores dañados. Para lograr esto, primero se definen los siguientes índices para asignar la dirección de los perfiles de falla:

$$F_l \triangleq \begin{cases} N & \text{si } r_l(t) < -J_{TH} \\ Z & \text{si } -J_{TH} \leq r_l(t) \leq J_{TH} \\ P & \text{si } r_l(t) > J_{TH} \end{cases} \quad (17)$$

donde $l = a, b, c$. Así, los índices generados a partir de (17) permitirán construir distintas firmas de falla, las cuales corresponderán a un escenario de falla en específico, tal y como se muestra en la Tabla II.

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de validar las ideas presentadas en este trabajo, se llevó a cabo la simulación del SFV bajo condiciones de falla en el inversor NPC empleando una configuración de control en lazo abierto. Para la evaluación, se utilizó el software PSIM de Powersim, en conjunto con el ambiente SIMULINK de MATLAB. Los parámetros que se consideraron para la simulación son los siguientes: voltaje de red línea-línea $v_{ll} = 220 V_{rms}$ con frecuencia fundamental de 60 Hz; filtro de salida con valores $R = 0.1 \Omega$ y $L = 10$ mH; en el bus de CD $V_{cd} = 300$ V; las ganancias de los tres observadores son comunes $G = 1,500$ y $K = 100$. Además, se considera que solamente se inyecta potencia activa a la red ($P = 3$ kW), por lo que las corrientes de salida estarán en fase con las tensiones de red, y de esta manera, obtener un factor de potencia unitario.

Para el experimento, se considera el siguiente escenario: fallas simultáneas ocurren en el interruptor superior de la fase a S_{a1} , y en el interruptor superior de la fase b S_{b1} . El umbral para evaluar los criterios de detección y aislamiento de la falla se seleccionó con un valor $J_{TH} = 0.15$. Los resultados se muestran en la Fig. 4. Al dispararse la falla en $t = 0.8$ seg, ya no estará disponible la conexión positiva del bus de CD en las fases a y b , lo anterior debido a que los interruptores de las fases con falla están en circuito abierto. Como consecuencia, las corrientes en las fases a y b sólo fluyen en el sentido negativo, y además, debido a la condición de equilibrio que establece la ley de corrientes de Kirchhoff ($i_a + i_b + i_c = 0$), se visualiza un perfil positivo en el flujo de la corriente de la fase c (ver Fig. 4 arriba). Inmediatamente después de que ocurren las fallas, los residuos f_{a0} y f_{b0} indican la presencia de

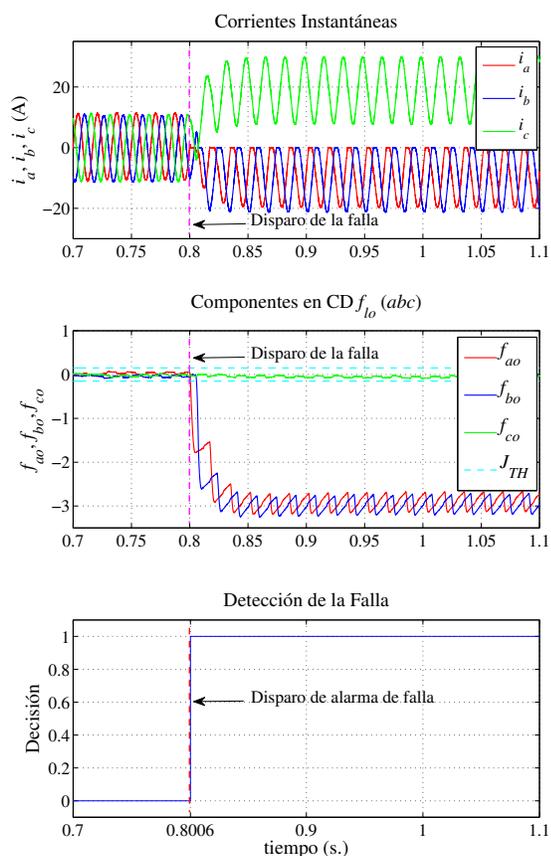


Figura 4. Mediciones y generación de señales de residuo.

fallas en el inversor (ver Fig. 4 en medio), y al evaluar los residuos mediante (16), se dispara la alarma para detectar la condición de falla en $t = 0.8006$ seg. Finalmente, al analizar la dirección de los residuos generados, y a partir de la Tabla II, se concluye la condición de fallas simultáneas en los interruptores superiores de las fases a y b , que para este caso, corresponden a los dispositivos (S_{a1} y/o S_{a2}), y (S_{b1} y/o S_{b2}).

VI. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se abordó la problemática del diagnóstico de FCA en el inversor de un SFV interconectado con la red eléctrica, donde se considera una topología multinivel NPC. Para el sistema FDI, se planteó un enfoque basado en modelos, para lo cual, se construyó un banco de observadores PI dedicados para la estimación de los estados y perfiles de falla del sistema. Posteriormente, se propuso un sistema FDI donde a través del análisis de las términos en CD de los perfiles de falla estimados, se lograron identificar condiciones de fallas sencillas y simultáneas en el inversor. Como trabajo futuro, se propone evaluar el esquema de diagnóstico y generación de residuos empleando una

configuración en lazo cerrado, además de considerar fallas y perturbaciones en la red de distribución eléctrica. Así mismo se buscará eliminar la necesidad de medir el voltaje v_{zn} (ver Fig. 2) al implementar los observadores PI, lo cual establecerá un reto más fuerte en la etapa de diseño y el análisis posterior de los residuos.

REFERENCIAS

- M. B. Abadi, A. M. S. Mendes, and S. M. A. Cruz (2012). Three-Level NPC Inverter Fault Diagnosis by the Average Current Park's Vector Approach. *20th Int. Conf. on Electrical Machines*, pp. 1893-1898.
- D.U. Campos Delgado, D.R. Espinoza-Trejo and E. Palacios (2008). Fault-Tolerant Control in Variable Speed Drives: a Survey. *IET Electric Power Appl.*, 2(2), pp. 121-134.
- D.U. Campos Delgado and D.R. Espinoza Trejo (2010). An Observed-Based Diagnosis Scheme for Single and Simultaneous Open-Switch Faults in Induction Motor Drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(2), pp. 671-679.
- D. U. Campos-Delgado, J. A. Pecina-Sánchez, D. R. Espinoza-Trejo and E. R. Arce-Santana (2013). Diagnosis of Open Switch Faults in Variable Speed Drives by Stator Current Analysis and Pattern Recognition. *IET Electric Power Appl.*, 7(6), pp. 509-522.
- U. M. Choi, H. G. Jeong, K. B. Lee, and F. Blaabjerg (2012). Method for Detecting an Open-Switch Fault in a Grid-Connected NPC Inverter System. *IEEE Trans. Power Electron.*, 27(6), pp. 2726-2739.
- D. R. Espinoza-Trejo, D. U. Campos-Delgado, E. Bárcenas, and F. J. Martínez-López (2012). Robust Fault Diagnosis Scheme for Open-Circuit Faults in Voltage Source Inverters Feeding Induction Motors by Using Non-Linear Proportional-Integral Observers. *IET Power Electron.*, 5(7), pp. 1204-1216.
- T. J. Kim, W. C. Lee, and D. S. Hyun (2009). Detection Method for Open-Circuit Fault in Neutral-Point-Clamped Inverter Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(7), pp. 2754-2763.
- P. Lezana, J. Pou, T. A. Meynard, J. Rodríguez, S. Ceballos and F. Richardeau (2010). Survey on Fault Operation on Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7), pp. 2207-2218.
- J. Li, A. Q. Huang, Z. Liang, and S. Bhattacharya (2012). Analysis and Design of Active NPC (ANPC) Inverters for Fault Tolerant Operation of High-Power Electrical Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2), pp. 519-533.
- B. Lu and S. K. Sharma (2009). A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(5), pp. 1770-1777.
- L. Ma, T. Kerekes, R. Teodorescu, X. Jin, D. Florica and M. Liserre (2009). The High Efficiency Transformer-less PV Inverter Topologies Derived From NPC Topology. *In Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*
- A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi (1981). A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1A-17(5), pp. 518-523.
- R.J. Patton, F.J. Uppal and J. Lopez-Toribio (2000). Soft Computing Approaches to Fault Diagnosis for Dynamic System: A Survey. *4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SafeProcess 2000*.
- G. Petrone, R. Teodorescu, M. Veerachary, and M. Vitelli (2008). Reliability Issues in Photovoltaic Power Processing Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), pp. 2569-2580.
- J. Rodríguez, J. S. Lai and F. Z. Peng (2002). Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4), pp. 724-738.
- J. Rodríguez, S. Bernet, P. K. Steimer and I. E. Lizama (2010). A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7), pp. 2219-2230.
- G. Spagnuolo, G. Petrone, S. Vasconcelos *et al.* (2010). Renewable Energy Operation and Conversion Schemes. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, March, pp. 38-51.
- D. A. B. Zambre, C. Rech and J. R. Pinheiro (2010). Comparison of Neutral-Point-Clamped, Symmetrical, and Hybrid Asymmetrical Multilevel Inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57(7), pp. 2297-2306.