

Diagnóstico de Fallas en Inversores Multinivel NPC Empleando un Enfoque Basado en Reconocimiento de Patrones

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 trabajo aborda la problemática del diagnóstico de fallas de interruptor abierto en inversores multinivel de diodo enclavado (NPC, por sus siglas en inglés) para aplicaciones fotovoltaicas. Primero, el comportamiento de las corrientes de línea en condiciones de falla es expuesto, para posteriormente presentar un análisis de la trayectoria del vector de corriente en el plano dq . De este análisis se derivan 21 clases o subconjuntos de fallas, donde a través de un enfoque basado en el reconocimiento del patrón resultante de la trayectoria de las corrientes en el plano dq , se logran identificar plenamente los diferentes escenarios de falla considerados. Como resultado, la metodología propuesta es capaz de evaluar fallas sencillas y simultáneas en los interruptores de potencia, donde únicamente se requieren las mediciones de las corrientes de línea. Además, el esquema de diagnóstico planteado es independiente de la configuración de control presente en el sistema de potencia. Finalmente, resultados de simulación validan las ideas expuestas en esta investigación.

Palabras clave: Inversores multinivel, reconocimiento de patrones, diagnóstico de fallas.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha incrementado el uso de los inversores multinivel (IM) sobre todo en aplicaciones industriales en alta tensión y manejo importante de potencia (Zambre et al., 2010). Dentro de los IM, han sido propuestas básicamente tres topologías: IM con diodos de enclavamiento o NPC (Neutral Point Clamped); IM con capacitores flotantes; e IM con celdas en cascada (J. Rodríguez et al., 2002). Entre las diferentes topologías de IM, el inversor NPC se utiliza ampliamente en aplicaciones industriales (J. Rodríguez et al., 2010), y recientemente está siendo empleado por diferentes compañías en sistemas fotovoltaicos (SFV) interconectados con la red (Lin Ma et al., 2009).

La topología NPC fue introducida por Nabae et al. en 1981, y puede ser empleada tanto en sistemas monofásicos como trifásicos (Nabae et al., 1981). En comparación con las topologías convencionales de puente completo, el inversor NPC presenta las siguientes ventajas (Cheng et

al., 2006):

- I) Reducción ante cambios abruptos de voltaje (dv/dt).
- II) Posibilidad de disminuir las pérdidas por conmutación.
- III) Menor distorsión armónica y una alta eficiencia.
- IV) Uso de dispositivos con menores esfuerzos en voltaje de bloqueo.

Como resultado, las propiedades mencionadas anteriormente hacen a esta topología muy atractiva, de manera particular en aplicaciones fotovoltaicas donde la calidad de la energía inyectada hacia la red es un parámetro crítico.

Por otra parte, hoy en día la confiabilidad es también un parámetro de suma importancia en los sistemas de potencia, ya que se busca mantener la operación continua del sistema aún cuando se presenten escenarios de falla, sobre todo en aplicaciones donde la seguridad es crítica. En general, existen diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir en el SFV: fallas en los módulos fotovoltaicos; fallas en el bus de CD; fallas de circuito abierto (FCA) y cortocircuito en los interruptores de potencia del inversor; fallas en los sensores y en el controlador; y fallas en la red de distribución eléctrica. En este contexto, se han publicado estudios en la literatura donde se evidencia que el componente más vulnerable en un SFV es el inversor o convertidor CD/CA (Petroni et al., 2008). En el caso del IM NPC, la probabilidad de que ocurra alguna falla es mucho mayor que en la topología convencional de puente completo, esto debido a que la topología multinivel está compuesta por más dispositivos semiconductores (Li et al., 2012). De manera particular, en este trabajo se aborda la problemática del diagnóstico de FCA en los interruptores de potencia del IM NPC, solamente a partir de las mediciones de corriente que entrega el inversor.

Actualmente existen una gran variedad de algoritmos para el diagnóstico de fallas en actuadores de potencia. De las diversas metodologías presentadas en la literatura, la mayoría emplean un enfoque basado en mediciones (Lu y Sharma, 2009). Con respecto al diagnóstico de FCA en inversores NPC, recientemente se han presentado algunas

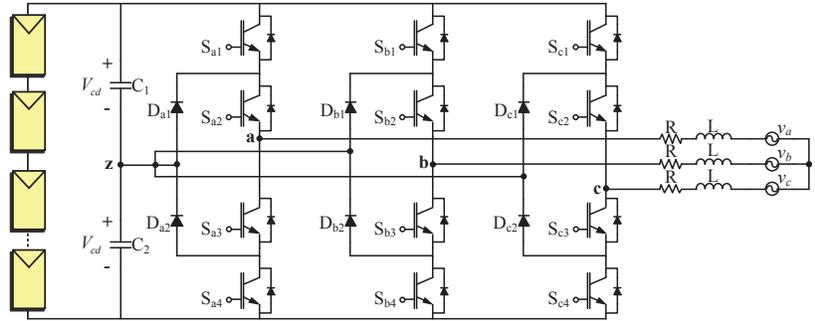


Figura 1. Inversor trifásico NPC de tres niveles alimentado por un generador fotovoltaico e interconectado a la red eléctrica.

propuestas en las cuales se realiza el proceso de detección y aislamiento a través de las mediciones de corrientes y voltajes de salida del inversor (Kim et al., 2009; Abadi et al., 2012; Choi et al., 2012). En (Kim et al., 2009), se presenta un método de detección basado en el análisis de los voltajes PWM de salida del inversor, donde a través de la implementación de un circuito analógico los autores identifican rápidamente la falla; sin embargo, esta metodología no puede llevar a cabo el aislamiento de la falla, además de que es necesario añadir componentes de medición al sistema. En (Abadi et al., 2012; Choi et al., 2012), se reportan metodologías basadas en el análisis de la trayectoria del vector de corriente empleando la transformación de Park en un marco de referencial fijo; no obstante, estos enfoques no son capaces de evaluar condiciones de fallas simultáneas en el inversor. Así, la contribución de este trabajo consiste en plantear un esquema de detección y aislamiento de fallas (FDI por sus siglas en inglés), el cual solamente requiere de las mediciones de las corrientes de línea, tal que, no es necesario considerar las mediciones de las señales que llegan a los interruptores, ni la información de voltajes de salida del inversor, lo cual, incrementaría el costo de la aplicación. Además, la metodología propuesta es capaz de evaluar FCA sencillas y simultáneas en los dispositivos semiconductores del IM NPC.

II. INVERSOR MULTINIVEL NPC

En la Fig. 1 se muestra el circuito de potencia para un inversor trifásico NPC de tres niveles interconectado con la red eléctrica, el cual se alimenta por un generador fotovoltaico. En el voltaje de salida fase-neutro u_{l_z} ($l = a, b, c$) se tienen tres posibles estados: 1) un voltaje de CD positivo V_{cd} , el cual se genera encendiendo los interruptores S_{l1} y S_{l2} ; 2) un voltaje de nivel 0, el cual se genera encendiendo S_{l2} y S_{l3} ; y finalmente, 3) un voltaje de CD negativo $-V_{cd}$, para lo cual es necesario encender los interruptores S_{l3} y S_{l4} (Nabae et al., 1981).

II-A. Condiciones de Falla en IM NPC

En general, al ocurrir alguna condición de falla en los interruptores de potencia se presentan comportamientos característicos que se buscan identificar de forma precisa

en el menor tiempo posible. En el caso de una falla de cortocircuito, la unión de las terminales positiva y negativa del bus de CD disparan instantáneamente las protecciones del sistema, por lo que se detendría la operación de la planta, y en el peor de los casos, dejaría inservible a ésta. Por otra parte, al ocurrir una FCA, el inversor ya no será capaz de entregar los voltajes y corrientes esperados, por lo que el desempeño y eficiencia del sistema se verán deteriorados seriamente (Campos Delgado et al., 2008). En consecuencia, el efecto de la falla se verá directamente reflejado en las variables eléctricas del SFV. Siguiendo este ámbito, un comportamiento y característica en específico se presenta en las corrientes que son inyectadas hacia la red, ya que éstas presentarán únicamente un valor positivo,

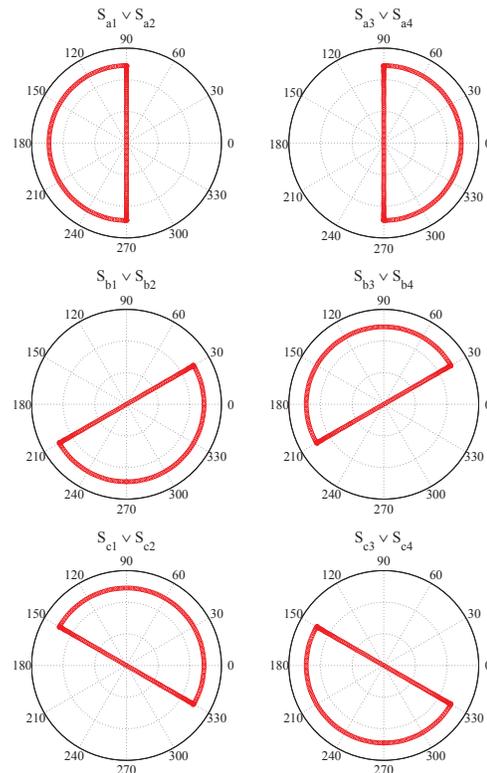


Figura 2. Trayectorias del vector de corriente i_{dq} ante FCA.

negativo, o cero, lo anterior dependiendo del interruptor o interruptores dañados. Por ejemplo, al ocurrir una FCA en alguno de los interruptores inferiores de la fase a (S_{a3} o/y S_{a4}), el inversor solamente será capaz de alimentar la carga de la fase a durante el estado positivo del voltaje de salida del inversor u_{az} , y en consecuencia, la corriente en esta fase presentará de igual manera un perfil positivo en su forma de onda. Además, la asimetría inducida en la corriente de línea ocasionará un desbalance en la tensión de los capacitores. Como resultado, este desbalance en el bus de CD podría estresar significativamente a los dispositivos que estén operando en condiciones normales, hasta el punto de llegar a dañarlos (Park et al., 2008).

En relación a las diferentes metodologías que se emplean para el diagnóstico de FCA, una de las herramientas matemáticas más utilizadas para detectar algún cambio o modificación en las mediciones del sistema es la transformación de Park. Para este caso, se mapean las mediciones de corriente al plano dq aplicando la transformación de Park en un marco de referencia fijo:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c \quad (1)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c \quad (2)$$

donde i_a , i_b e i_c denotan el valor instantáneo de las tres corrientes de línea. En una condición libre de fallas las corrientes son sinusoidales, y en consecuencia al aplicar la transformación de Park, el vector de corriente $\mathbf{i}_{dq} = [i_d \ i_q]^\top$ describiría una trayectoria circular. Por el contrario, ante un escenario de falla, la asimetría que se presente en las mediciones inducirá un cambio en la trayectoria del vector de corriente \mathbf{i}_{dq} . Como resultado, la trayectoria del vector \mathbf{i}_{dq} de cada una de las fallas consideradas se comportará de una manera muy particular, de tal manera que el patrón en la trayectoria de \mathbf{i}_{dq} que se describirá en cada caso ayudará a distinguir cada clase de falla.

En la Fig. 2 se muestran las trayectorias esperadas del vector \mathbf{i}_{dq} en el plano polar dq ante fallas sencillas en el inversor NPC. De igual manera, para fallas simultáneas en S_{11} y S_{12} , se presentará la misma trayectoria que para el caso de fallas simples en S_{11} o S_{12} , lo anterior debido a que las corrientes de línea presentarán el mismo perfil negativo en todos los casos; lo mismo ocurrirá para el conjunto de fallas que involucren a S_{13} y S_{14} (Choi et al., 2012). Este comportamiento se debe a que en SFV, las corrientes de línea (i_a, i_b, i_c) se encontrarán en fase con los voltajes de la red (v_a, v_b, v_c) con el objetivo de suministrar potencia activa al sistema de suministro eléctrico. Sin embargo, como se muestra en (Choi et al., 2012), en caso de tener una carga resistiva-inductiva, los trayectorias resultantes en el plano dq si permitirían distinguir fallas en los 4 interruptores de potencia de cada rama, pues existen instantes en que los diodos de liberación por semiconductor de potencia entran en conducción.

Por otra parte, las trayectorias para FCA simultáneas se pueden obtener a través de la intersección de los patrones para cada interruptor involucrado en el escenario de falla. Por ejemplo, si ocurren fallas simultáneas en los interruptores S_{a2} y S_{c3} , el patrón resultante se reducirá a la intersección de la trayectoria de los semicírculos para cada falla en S_{a2} y S_{c3} , es decir, la trayectoria resultante sólo evolucionará a lo largo del intervalo de 150° a 270° en el plano polar dq (ver Fig. 2). Por lo tanto, tomando en cuenta los comportamientos descritos anteriormente, se lleva a cabo el diagnóstico de condiciones de fallas sencillas y simultáneas analizando solamente el vector \mathbf{i}_{dq} . De este análisis, se deriva la metodología que se emplea para realizar el diagnóstico de FCA en el inversor, la cual es capaz de evaluar 21 clases o subconjuntos de FCA (ver Tabla I), tal y como se presenta a continuación.

III. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO PROPUESTO

En el esquema de diagnóstico propuesto se realiza primero una etapa de detección, y al dispararse el aviso de falla en el sistema, se realiza enseguida el proceso de aislamiento. Ambas metodologías se detallan a continuación.

III-A. Esquema de Detección

En primer lugar, las corrientes de línea son normalizadas con el fin de obtener una variable de diagnóstico independiente del punto de operación del sistema. Para la normalización de las corrientes, se considera una ventana deslizante para la recopilación de las mediciones

$$W_l[k] = [i_l[k - N + 1], \dots, i_l[k]]^\top \quad l = a, b, c \quad (3)$$

donde $i_l[k]$ representa la k -ésima muestra recopilada durante la ventana de tiempo, y N el número de muestras por periodo fundamental. Así, después de transcurrido un tiempo de $k = N$ y haber recopilado un conjunto de N datos, se obtiene la corriente normalizada mediante

$$I_l[k] = \frac{W_l[k]}{\|W_l[k]\|_\infty} \quad l = a, b, c. \quad (4)$$

donde $\|\cdot\|_\infty$ representa la norma infinito para vectores, e $I_a[k]$, $I_b[k]$ e $I_c[k]$ denotan la corriente de la respectiva fase normalizada en el instante k . Después, a partir de (5) se calcula el valor medio de cada corriente de línea sobre la ventana de tiempo de un periodo fundamental, para posteriormente aplicar la transformación de Park en un marco de referencia fijo, y así, construir el vector de corriente mediante (6) y (7) $\bar{\mathbf{I}}_{dq}[k] = [\bar{I}_d[k] \ \bar{I}_q[k]]^\top$:

$$\bar{I}_l[k] = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k I_l[m] \quad l = a, b, c \quad (5)$$

$$\bar{I}_d[k] = \sqrt{\frac{2}{3}}\bar{I}_a[k] - \frac{1}{\sqrt{6}}\bar{I}_b[k] - \frac{1}{\sqrt{6}}\bar{I}_c[k] \quad (6)$$

$$\bar{I}_q[k] = \frac{1}{\sqrt{2}}\bar{I}_b[k] - \frac{1}{\sqrt{2}}\bar{I}_c[k]. \quad (7)$$

Por lo tanto, al ocurrir una falla de interruptor abierto, el efecto inducido en la asimetría de las corrientes puede ser inmediatamente detectado a través de la magnitud del vector de Park $\|\bar{\mathbf{I}}_{dq}[k]\|$ ya que incrementará su valor al momento que se dispare la falla, por lo que se propone un residuo a partir de

$$r_s[k] = \|\bar{\mathbf{I}}_{dq}[k]\| = \sqrt{\bar{I}_d[k]^2 + \bar{I}_q[k]^2} \quad (8)$$

Además, es considerado un umbral J_{TH} con el fin de tomar en cuenta el ruido introducido en las mediciones de corriente, por lo que éste debe ser cuidadosamente seleccionado de manera que se prevengan falsas alarmas. En este contexto, cabe mencionar que ante un cambio de carga abrupto en el sistema, el residuo generado por la magnitud del vector de Park $\|\bar{\mathbf{I}}_{dq}[k]\|$ sólo presentaría un ligero transitorio en el comportamiento de su señal debido al aumento en la magnitud de las corrientes. Sin embargo, luego del transitorio este residuo se restablecería a su comportamiento previo debido al proceso de normalización de corrientes que se realiza en (3) y (4). De hecho, como se menciona más adelante, la trayectoria del vector de corriente \mathbf{i}_{dq} es insensible ante un cambio en la magnitud de las corrientes. Por lo tanto, se sugiere seleccionar el umbral en un escenario libre de falla y ante variaciones de carga a partir de

$$J_{TH} = \max_{\text{no falla } \forall k} r_s[k]. \quad (9)$$

III-B. Esquema de Aislamiento

La tarea de aislamiento se realizará por medio del análisis de la fase del vector de corriente \mathbf{i}_{dq} , el cual será construido a partir de la transformación de Park del valor instantáneo de las corrientes en el referencial fijo. Para este propósito y según el comportamiento mostrado en el conjunto de fallas estudiadas, el plano dq se divide en 24 sectores igualmente distribuidos, i.e., 15° separados un sector de otro, de tal manera que se construye una firma de la falla a partir de los sectores que cruza la trayectoria durante cada ciclo (periodo fundamental). Partiendo de esta noción, la idea es acumular las observaciones del vector de corriente durante un periodo N , y construir a partir de un histograma la firma correspondiente a cada escenario de falla, para posteriormente agrupar las diferentes categorías o clases. Para esto, la partición se denota como

$$\theta_i \subset [0, 2\pi) \quad i \in [1, 24]$$

para el i -ésimo sector en el plano dq . Además, los 24 sectores se encuentran igualmente distribuidos, por lo que se satisface que

$$\theta_i \cap \theta_j = \emptyset \quad \text{y} \quad \bigcup_{i=1}^{24} \theta_i = [0, 2\pi).$$

Por otra parte, debido a que la estrategia depende únicamente del ángulo de fase del vector de corriente, el esquema de aislamiento es insensible a la magnitud de la corriente. Además, es posible operar la etapa de diagnóstico bajo

esquemas de control en lazo abierto y lazo cerrado, puesto que la trayectoria del vector de corriente siempre será la misma, aun cuando la ley de control esté modificando constantemente las variables eléctricas. Como resultado, se plantea un esquema de aislamiento de fallas robusto ante cambios en el punto de operación de la planta e independiente de la estructura de control presente en el sistema.

Ahora, las observaciones se obtienen de la siguiente manera. En primer lugar son muestreadas las corrientes de línea $(i_a[k], i_q[k])$ cada T_s segundos (periodo de muestreo), para así obtener posteriormente el ángulo de fase $\theta_{dq}[k]$ asociado a la k -ésima muestra mediante $\theta_{dq}[k] = \tan^{-1} i_q[k]/i_d[k]$. Una vez que es detectada la falla, se lleva a cabo el conteo y acomodo de cada observación en contenedores, donde la k -ésima muestra $\theta_{dq}[k]$ pertenecerá al i -ésimo contenedor m_i

$$\text{Si } \theta_{dq}[k] \in \theta_i \Rightarrow m_i = m_i + 1 \quad i \in [1, 24]. \quad (10)$$

Así, a partir de (10), se va acumulando cada muestra k que se encuentre en el sector i en el contenedor m_i . En consecuencia, una vez que se realiza el acomodo de las observaciones adquiridas durante un periodo de la frecuencia de excitación, se obtiene el histograma $\mathbf{M} = [m_1, \dots, m_{24}]^T$ con el cual se construirá la firma de la falla $\hat{\mathbf{f}} = [\hat{f}_1, \dots, \hat{f}_{24}]^T$. Además, es necesario considerar un umbral η para tomar en cuenta el ruido en las mediciones así como la presencia de datos atípicos en las observaciones. Por lo que, considerando el umbral $\eta > 0$, se calcula cada componente en $\hat{\mathbf{f}}$ a partir de

$$\hat{f}_i = \begin{cases} 1 & m_i > \eta \\ -1 & m_i < \eta \end{cases} \quad i \in [1, 24]. \quad (11)$$

De (11) se derivan las firmas para cada clase de falla, las cuales son obtenidas a partir de las trayectorias del vector \mathbf{i}_{dq} para cada escenario de falla (ver Fig. 2 y Tabla I), y considerando los sectores radiales que cruza en su recorrido. Como resultado, se obtienen los vectores para la firma de cada uno de las 21 clases de falla consideradas $(\hat{\mathbf{f}}_1, \dots, \hat{\mathbf{f}}_{21})$, tal y como se muestra en la Tabla I, la cual se emplea posteriormente como base de datos en la etapa de clasificación y aislamiento de las fallas de interruptor abierto. Para cada firma se añaden las componentes correspondientes a los sectores radiales adyacentes a la trayectoria original, lo anterior con la finalidad de tomar en cuenta ruido o alguna perturbación en el perfil del ángulo θ_{dq} .

Por otra parte, el umbral η puede ser inicialmente estimado a partir de las siguientes consideraciones. Primeramente, sea f_o la frecuencia fundamental de las corrientes de línea, y además, suponga que la frecuencia de muestreo f_s es lo suficientemente alta para garantizar una buena caracterización de la trayectoria del vector de corriente en el plano dq . Ahora, se define a η_m como el número de muestras por contenedor esperadas después de un periodo fundamental

TABLA I
FIRMAS RESULTANTES PARA LAS 21 CLASES DE FALLAS A ESTUDIAR.

Clase de Falla	Interruptor Dañado	Componentes del Vector $\hat{\mathbf{f}}$ para la Firma en cada Clase de Falla																							
		\hat{f}_1	\hat{f}_2	\hat{f}_3	\hat{f}_4	\hat{f}_5	\hat{f}_6	\hat{f}_7	\hat{f}_8	\hat{f}_9	\hat{f}_{10}	\hat{f}_{11}	\hat{f}_{12}	\hat{f}_{13}	\hat{f}_{14}	\hat{f}_{15}	\hat{f}_{16}	\hat{f}_{17}	\hat{f}_{18}	\hat{f}_{19}	\hat{f}_{20}	\hat{f}_{21}	\hat{f}_{22}	\hat{f}_{23}	\hat{f}_{24}
1	(S_{a1} y/o S_{a2})	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
2	(S_{c3} y/o S_{c4})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	(S_{b1} y/o S_{b2})	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	(S_{a3} y/o S_{a4})	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
5	(S_{c1} y/o S_{c2})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
6	(S_{b3} y/o S_{b4})	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
7	(S_{a1} y/o S_{a2}) & (S_{b1} y/o S_{b2})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
8	(S_{a1} y/o S_{a2}) & (S_{b3} y/o S_{b4})	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	(S_{a1} y/o S_{a2}) & (S_{c1} y/o S_{c2})	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
10	(S_{a1} y/o S_{a2}) & (S_{c3} y/o S_{c4})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
11	(S_{a1} y/o S_{a2}) & (S_{a3} y/o S_{a4})	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
12	(S_{c3} y/o S_{c4}) & (S_{a3} y/o S_{a4})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1
13	(S_{c3} y/o S_{c4}) & (S_{b1} y/o S_{b2})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
14	(S_{c3} y/o S_{c4}) & (S_{b3} y/o S_{b4})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
15	(S_{c3} y/o S_{c4}) & (S_{c1} y/o S_{c2})	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
16	(S_{b1} y/o S_{b2}) & (S_{a3} y/o S_{a4})	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
17	(S_{b1} y/o S_{b2}) & (S_{c1} y/o S_{c2})	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
18	(S_{b1} y/o S_{b2}) & (S_{b3} y/o S_{b4})	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	(S_{a3} y/o S_{a4}) & (S_{b3} y/o S_{b4})	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
20	(S_{a3} y/o S_{a4}) & (S_{c1} y/o S_{c2})	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
21	(S_{c1} y/o S_{c2}) & (S_{b3} y/o S_{b4})	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

de la frecuencia f_o , cuyo valor puede ser estimado a partir de

$$\eta_m = \left\lfloor \frac{f_s}{24f_o} \right\rfloor \quad (12)$$

donde $\lfloor \cdot \rfloor$ denota la *función piso*. Por lo tanto, η_m proveerá de un parámetro inicial para la selección del umbral η . Sin embargo, se sugiere partir de un valor inicial de $\eta = \eta_m/2$, ya que el valor de η_m podría coincidir con el número de muestras acumuladas en el contenedor m_i , y en consecuencia, al evaluar (11), la firma resultante $\hat{\mathbf{f}}$ no corresponderá al verdadero perfil de la falla que se esté evaluando en ese momento, lo que puede conducir a una clasificación errónea de la falla.

Como siguiente paso, se propone normalizar los vectores $\hat{\mathbf{f}}_j$, para así obtener el conjunto de firmas asociado a cada falla ($\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_{21}$) mediante

$$\mathbf{f}_j = \frac{1}{\sqrt{24}} \hat{\mathbf{f}}_j \quad j \in [1, 21].$$

Finalmente, a partir de la firma de falla \mathbf{f} construida por medio de las mediciones, y considerando la base de datos que contiene a \mathbf{f}_j , se lleva a cabo el aislamiento de la falla a través del siguiente criterio de correlación:

$$\text{Clase de Falla} = \arg \max_{j \in [1, 21]} \langle \mathbf{f}, \mathbf{f}_j \rangle \quad (13)$$

donde $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denota el producto interno entre vectores.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de validar el esquema de diagnóstico presentado en este trabajo, se muestran resultados de simulación del SFV bajo condiciones de falla en el IM NPC. Para la evaluación, se utilizó el software de simulación PSIM junto con 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

$f_o = 60$ Hz; filtro de salida con valores $R = 0.1 \Omega$ y $L = 10$ mH; en el bus de CD $V_{cd} = 300$ V. 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. 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 la detección de la falla se seleccionó con un valor $J_{TH} = 0.1$, y el umbral para la reconstrucción de la firma de falla se establece en $\eta = 8$ muestras.

Los resultados se muestran en la Figs. 3-5. Como se puede observar, al dispararse la falla en $t = 0.4$ seg, las corrientes en las fases a y b sólo fluyen en el sentido negativo, y además, se visualiza un perfil positivo en el flujo de la corriente de la fase c . La asimetría inducida en las corrientes de línea, se refleja inmediatamente en la magnitud del vector de Park $\|\bar{\mathbf{I}}_{dq}\|$ (ver Fig. 3 inferior), y en el ángulo θ_{dq} . Como resultado, el esquema de diagnóstico

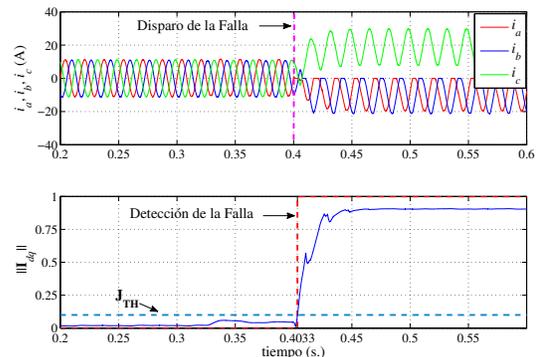


Figura 3. Corrientes de línea y etapa de detección de la falla.

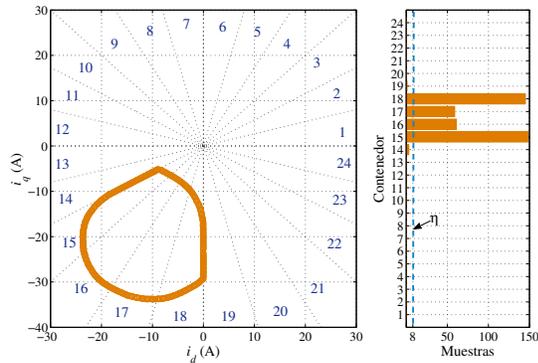


Figura 4. Trayectoria del vector i_{dq} e histograma.

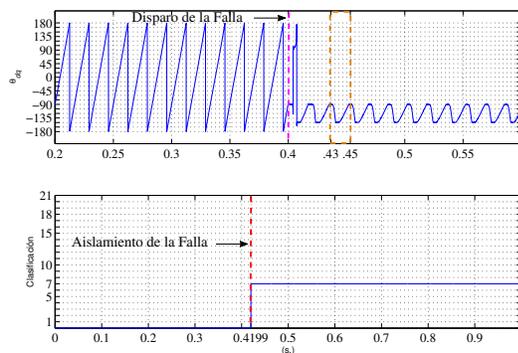


Figura 5. Etapa de clasificación de la falla.

logra detectar rápidamente la falla en $t = 0.4033$ seg (detección en 3.3 ms), y una vez que se detecta la falla, se procede a construir el histograma y firma de la falla a partir de las muestras observadas durante la ventana de evaluación (ver Fig. 4). Finalmente en la Fig. 5, al emplear el criterio de correlación, se logra aislar la falla como de clase 7, la cual de acuerdo a la Tabla I, está asociada a fallas simultáneas en los interruptores superiores (S_{a1} y/o S_{a2}), y (S_{b1} y/o S_{b2}).

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo se abordó la problemática del diagnóstico de FCA en los interruptores del convertidor de potencia de un SFV interconectado con la red eléctrica. Para esto, se presentó un enfoque basado en procesamiento y clasificación de datos, donde únicamente fueron empleadas las mediciones de las corrientes para la generación de residuos. La etapa de detección se llevó a cabo utilizando la magnitud del vector de Park construido a partir de los valores medios de las corrientes. Con respecto a la etapa de aislamiento, se planteó un esquema independiente de la estructura de control que se presente en el sistema de potencia y con base a la trayectoria del vector instantáneo de corriente en el plano dq . No obstante, una posible desventaja de esta

metodología es que se requiere información de por lo menos un periodo de la frecuencia fundamental de las corrientes de línea para poder reconstruir la firma de la falla. Como trabajo futuro se propone evaluar la metodología en una plataforma experimental, así como abordar la problemática a partir de un enfoque basado en modelos y realizar una comparación entre ambas estrategias.

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 Application*, 2(2), pp. 121-134.
- Y. Cheng, C. Qian, M. L. Crow, S. Pekarek, and S. Atcitty. A Comparison of Diode-Clamped and Cascaded Multilevel Converters for a STATCOM with Energy Storage, (2006). *IEEE Trans. Ind. Electron*, 53(5), pp. 1512-1521.
- 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 Transactions on Power Electronics*, 27(6), pp. 2726-2739.
- 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.
- 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 (2012). 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. *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.
- J. J. Park, T. J. Kim, and D. S. Hyun (2008). Study of Neutral Point Potential Variation for Three-Level NPC Inverter under Fault Condition, *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*.
- 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.
- D. A. B. Zambre, C. Rech and J. R. Pinheiro (2010). Comparison of Neutral-Point-Clamped, Symmetrical, and Hybrid Asymmetrical Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, pp. 2297-2306.