

Adjustments for an HVDC link fault detector: practical considerations

Claudia A. Pérez-Pinacho* Cristina Verde*

* *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. (e-mail: CPerezP@iingen.unam.mx, Cverde@unam.mx).*

Resumen In this work, practical considerations regarding the use of a fault diagnosis scheme based on a distributed adaptive estimator for the high-voltage direct current (HVDC) transmission line within a simplified model of the DC link are presented. Due to transients and steady-state ripple caused by unmodeled nonlinearities in the HVDC system's conversion part, parameter adjustments of the distributed estimator, including gains and thresholds, are performed to successfully determine the fault magnitude and position within the line through simulation studies. To validate the proposed scheme, numerical simulations of the diagnostic scheme are compared with two HVDC links: a simplified one and the CIGRE (International Council on Large Electric Systems).

Keywords: transmission line, adaptive estimator, distributed parameters, simplified model, activation signals

1. INTRODUCCIÓN

El principal problema para la detección de fallas en líneas de transmisión sea corriente alterna (CA) o corriente directa (CD) es el tiempo requerido para la localización. Según Mohammadi et al. (2021), las fallas en CD deben detectarse en menos de 20 [ms], a diferencia de las fallas en CA que deben detectarse alrededor de los 80 [ms]. Este trabajo se enfoca a la localización de una falla en derivación en la línea de transmisión de CD en un enlace HVDC monopolar. En la literatura se encuentran reportadas diferentes técnicas para el diagnóstico e aislamiento de fallas en líneas CD para enlaces HVDC, estas técnicas pueden ser clasificadas brevemente en ondas viajeras, métodos basados en datos y métodos basados en modelos (Muniappan, 2021). Siendo de particular interés para este trabajo los métodos basados en modelos, los cuales son abordados por ecuaciones de paridad, identificación de parámetros y estimadores de estado (Blanke et al., 2006). En Wang et al. (2020), se considera un modelo de línea CD discretizada en el espacio, con el cual se diseña un banco de observadores para abordar el problema de identificación de fallas, con un tiempo de estimación de alrededor de 0.50 [ms], diseño que solo se realiza en líneas CD de bajo voltaje y de corta distancia. En Verrax et al. (2020) se desarrollan las ecuaciones del telegrafista en el dominio de Laplace con base en las mediciones de voltaje y corriente para estudiar el comportamiento transitorio de la línea y explotar la información contenida en las ondas viajeras. Este método se basa en la estimación de máxima verosimilitud con un tiempo de identificación entre 2 y 3 [ms]; sin embargo, el error promedio en los parámetros de

falla estimados es mayor al 12%. El diagnóstico de fallas en redes eléctricas ha encontrado su solución utilizando observadores de entradas desconocidas al considerar un modelo lineal eléctrico aproximado de parámetros concentrados en Aldeen and Crusca (2006). Incluso cuando los parámetros de falla se estiman aproximadamente en menos de 1 [ms], el enfoque requiere técnicas adicionales de procesamiento de señales para determinar la ubicación, teniendo aun así un error mayor al 10%.

Recientemente, mediante un estimador adaptable distribuido, en Pérez-Pinacho and Verde (2022) se presenta un esquema de diagnóstico para la estimación y localización de una falla en derivación (shunt fault estimator scheme (SFES), por sus siglas en inglés), dentro de una línea de transmisión de CD. Este esquema SFES tiene como ventaja que identifica los parámetros de falla bajo condiciones ideales con un error de 0.05% y en un tiempo de 3 a 4 [ms]. Basados en el conocimiento de un modelo distribuido por unidad de la línea de transmisión de CD con falla, los autores muestran que la construcción de dicho localizador es posible si se cuenta con:

- un modelo del enlace HVDC con las condiciones de frontera en cada extremo,
- un algoritmo de detección de fallas formado por dos estimadores adaptables acoplados por un bloque de activación.

Particularmente, se representa el enlace HVDC de manera simplificada por la conexión entre una fuente de voltaje en serie con una resistencia interna en un extremo, una línea de CD, y una carga resistiva en el otro. Además, para el algoritmo, al tratarse de un modelo simplificado,

la elección de los umbrales del bloque de activación resulta ser simple. Sin embargo, en la práctica, el enlace HVDC está conformado por dos circuitos de potencia que corresponden al rectificador y al inversor, y que se representan con circuitos no lineales. Este escenario indica que el procedimiento reportado en Pérez-Pinacho and Verde (2022) debe contemplar al menos la parte de rectificación y de inversión en el enlace HVDC, debido a que el uso de convertidores (no ideales) produce un rizo en el voltaje medido que modifica directamente los valores usados en el bloque de activación del algoritmo de diagnóstico. En este trabajo se exponen los problemas no abordados en Pérez-Pinacho and Verde (2022) asociados al uso de simplificaciones en la parte de potencia para diagnóstico de fallas en la línea de transmisión de CD y los ajustes necesarios a realizar para que el esquema pueda utilizarse en la práctica. Para evaluar la efectividad del esquema de diagnóstico, los datos sintéticos de la línea en un caso práctico se obtienen a partir del enlace CIGRE HVDC (Meah and Ula, 2009).

El trabajo está ordenado de la siguiente forma. La Sección 2 muestra la simplificación utilizada respecto al enlace CIGRE HVDC, la Sección 3 resume el estimador adaptable del esquema SFES para obtener los parámetros de falla de una línea de transmisión de CD, la Sección 4 presenta las simulaciones donde se explican los problemas asociados al uso de las simplificaciones en relación con un circuito simplificado del enlace HVDC y el enlace CIGRE HVDC, además se propone un reajuste de ganancias y umbrales del esquema SFES para su uso en la práctica. Finalmente, la Sección 5 expone las conclusiones del trabajo.

2. MODELO DEL ENLACE HVDC

En esta sección se presenta el circuito del enlace CIGRE HVDC monopolar, con una línea de CD de 500 [kV] de 1000 [MW], que emplea un convertidor de 12 pulsos en el rectificador e inversor (Atighechi et al., 2014), la tecnología de conversión es la convencional (convertidor conmutado por línea (LCC)). La Figura 1 muestra a un sistema eléctrico de potencia con un enlace HVDC.

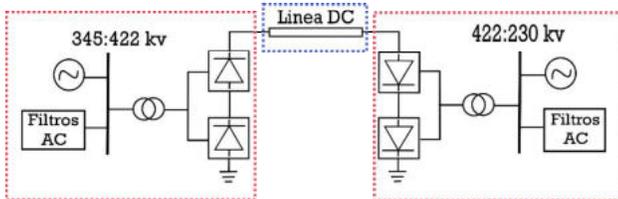


Figura 1. Enlace CIGRE HVDC monopolar

De acuerdo con Arifoglu (1999), la línea de CD, el rectificador y el inversor dentro del enlace CIGRE HVDC pueden ser representados por un circuito simplificado del enlace HVDC mostrado en la Figura 2, formado por las siguientes relaciones de resistencias y fuentes de voltaje

$$R_g = \frac{3 X_{C_R} \eta_{B_R}}{\pi}, \quad R_l = \frac{3 X_{C_I} \eta_{B_I}}{\pi} \quad (1)$$

$$E_g = \frac{3\sqrt{2} a_R U_R \eta_{B_R} \cos\theta_R}{\pi}, \quad E_l = \frac{3\sqrt{2} a_I U_I \eta_{B_I} \cos\theta_I}{\pi} \quad (2)$$

donde E_g y R_g son correspondientes al voltaje y la resistencia del generador, y E_l y R_l corresponden al voltaje y la resistencia de carga, respectivamente. Y los índices R e I indican que las siguientes variables están referidas al rectificador y al inversor, respectivamente,

- a es el valor de la relación del convertidor,
- X_C es la reactancia de fuga referida al lado secundario del convertidor,
- θ es el ángulo de control del convertidor,
- η_B es el número de puentes conectados en serie por polo,
- U es el voltaje línea a línea del lado primario del convertidor.

Es decir, las terminales de los convertidores de la Figura 1 pueden ser representadas por un circuito de Thevenin con una fuente de voltaje en serie con una resistencia como se muestra en la Figura 2.

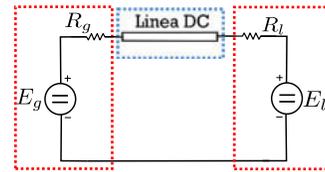


Figura 2. Circuito simplificado de un enlace HVDC monopolar

De esta forma, la línea de CD dentro del enlace CIGRE HVDC se puede representar por el siguiente conjunto infinito de circuitos infinitesimales RLC conectados en cascada conocido como el modelo del telegrafista en condición de una falla en derivación (Pérez-Pinacho and Verde, 2022)

$$\begin{aligned} i_t(x, t) + \frac{1}{L} v_x(x, t) + \frac{R}{L} i(x, t) &= 0 \\ v_t(x, t) + \frac{1}{C} i_x(x, t) + \frac{1}{C} i_f(t) \delta(x) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

donde los subíndices x y t para las funciones de doble argumento corresponden a la derivada parcial respecto a la variable de distancia [m] y tiempo [s], respectivamente, con los siguientes parámetros distribuidos de la línea: la inductancia L en [H/m], la capacitancia C en [F/m] y la resistencia R en [Ω /m]. $v(x, t)$ e $i(x, t)$ corresponden al voltaje y la corriente de la línea, respectivamente. El parámetro $i_f(t)$ corresponde a la magnitud de la corriente de falla, la cual se asume que es constante, y $\delta(x)$ está asociada a la posición de falla ℓ_f a través de una función delta de Dirac. Asumiendo que las mediciones de las corrientes y voltajes en los extremos de la línea están disponibles, considere las condiciones de frontera,

$$\begin{aligned} v(0, t) &= E_g(t) - R_g i(0, t) \\ v(\ell, t) &= E_l(t) - R_l i(\ell, t) \end{aligned} \quad (4)$$

El modelo en (3) y (4) obtenido a través del circuito simplificado de un enlace HVDC permite construir un

estimador de parámetros distribuidos para estimar los parámetros de falla i_f y ℓ_f del enlace CIGRE siguiendo la filosofía del trabajo de Aamo (2015) y que se introduce en la sección siguiente. Este trabajo se restringe al enlace de DC y se desprecia el fenómeno asociado a una condición de resonancia debida a la presencia de la falla. El análisis de esta queda fuera del alcance de este trabajo.

3. ESTIMADOR ADAPTABLE DISTRIBUIDO

Partiendo de que las condiciones de frontera $i(0, t)$, $i(\ell, t)$, $v(0, t)$ y $v(\ell, t)$ del sistema (3) pueden medirse. En esta sección se resume la construcción del estimador adaptable de parámetros distribuidos que permite identificar los parámetros \hat{i}_f y ℓ_f asociados a la falla para el modelo simplificado del enlace HVDC. La Figura 3 describe los elementos del esquema del estimador de fallas en derivación SFES. El primer bloque transforma la Ec. (3) a un

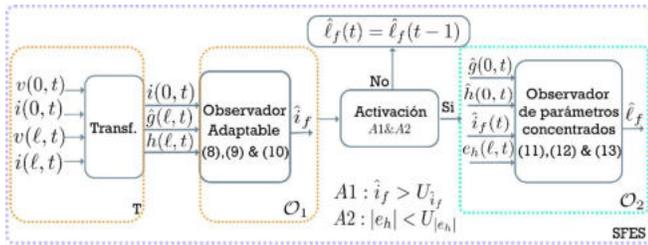


Figura 3. Diagrama del SFES para la detección de fallas en derivación

sistema con estados canónicos $h(x, t)$ y $g(x, t)$, los cuales están en función de la corriente de la línea en [A], de tal forma que el modelo no dependa de los parámetros de falla i_f y ℓ_f , y solo el parámetro de falla i_f aparece en la condición de frontera del sistema transformado. Se puede observar en el segundo y tercer bloque dos estimadores exponenciales conectados en cascada a través de un bloque de activación. Así, el primer observador **O1** estima la corriente de la derivación \hat{i}_f y el segundo observador **O2** identifica la posición de la falla en derivación $\hat{\ell}_f$. Aquí es importante notar que el bloque de activación condiciona el funcionamiento del estimador **O2**, el cual no puede ser activado mientras el estimador **O1** sea diferente de cero.

Los pasos para el diseño del estimador se presentan de manera resumida a continuación (cf. Pérez-Pinacho and Verde (2022) para mayor detalle):

1. Transformar el sistema (3) en un sistema en donde los estados no dependan de los parámetros de falla

$$\begin{aligned} h_t(x, t) &= -\theta_2 h_x(x, t) - \theta_3 m_{t1}^2(x) g(x, t) \\ g_t(x, t) &= \theta_2 g_x(x, t) - \theta_3 m_{t2}^2(x) h(x, t), \end{aligned} \quad (5)$$

donde $\theta_2 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\theta_3 = \frac{R}{2L}$, $m_{t1}(x) = \frac{1}{2} \exp(\frac{R}{2}\theta_1 x)$ y con $m_{t2}(x) = \frac{1}{2} \exp(-\frac{R}{2}\theta_1 x)$. Con condiciones de frontera

$$h(0, t) = -g(0, t) + i(0, t) - i_f \quad (6)$$

$$g(\ell, t) = (i(\ell, t) - \theta_1 v(\ell, t)) m_{t2}(\ell) \quad (7)$$

donde $\theta_1 = \sqrt{\frac{C}{L}}$

2. Diseñar la estructura del observador adaptable para la estimación de la corriente de fuga como una copia del sistema (5)

$$\mathbf{O}_1 : \begin{cases} \hat{h}_t(x, t) = -\theta_2 \hat{h}_x(x, t) + \theta_3 m_{t1}(x) \hat{g}(x, t) + \dots \\ \quad \quad \quad + p_1(x, K) e_h(\ell, t) \\ \hat{g}_t(x, t) = \theta_2 \hat{g}_x(x, t) + \theta_3 m_{t2}(x) \hat{h}(x, t) + \dots \\ \quad \quad \quad + p_2(x, K) e_h(\ell, t) \\ \dot{\hat{i}}_f(t) = K e_h(\ell, t) \end{cases} \quad (8)$$

donde $K < 0$ representa la ganancia de observación y el término correctivo esta dado por

$$e_h(\ell, t) = h(\ell, t) - \hat{h}(\ell, t) \quad (9)$$

donde

$$h(\ell, t) = (i(\ell, t) + \theta_1 v(\ell, t)) m_{t1}(\ell), \quad (10)$$

En términos generales, el observador **O1** estima la corriente de falla \hat{i}_f utilizando el término correctivo $e_h(\ell, t)$ en el estado transformado $h(x, t)$ como se puede ver en (9). Una ventaja de este estimador **O1** es la independencia de la posición desconocida $\hat{\ell}_f$. El valor absoluto del término correctivo $|e_h|$ junto con la corriente de falla \hat{i}_f son señales de activación, para los cuales se tiene que elegir valores límites de cada señal, también conocidos como umbrales. Entonces, cuando \hat{i}_f rebese un valor límite U_{i_f} se considera que el sistema está en presencia de una falla, de lo contrario, se asume que el sistema está en ausencia de falla, es decir, $\hat{i}_f = 0$. Siempre y cuando el error de convergencia $|e_h(\ell, t)|$ sea menor a un valor $U_{|e_h|}$, podremos decir que el observador **O1** ha convergido. Así el estimador **O2** puede ser activado y es capaz de obtener la posición de la falla, en caso contrario, el estimador **O2** se mantiene desactivado.

3. Elegir el valor mínimo U_{i_f} de condición de falla, determinar el valor $U_{|e_h|}$ que indica que el error de estimación es cercano a cero.
4. Diseñar el observador **O2** para la posición $\hat{\ell}_f(t)$ de la siguiente forma

$$\mathbf{O}_2 = \hat{\ell}_f(t) := \begin{cases} \beta e_v(0, t) & \text{si } \hat{i}_f(t) > U_{i_f} \text{ y } |e_h(t)| \leq U_{e_h} \\ 0 & \text{de otra forma,} \end{cases} \quad (11)$$

donde $\beta > 0$ corresponde a la ganancia del observador y

$$e_v(0, t) = v(0, t) - \hat{v}(0, t) \quad (12)$$

donde

$$\hat{v}(0, t) = \theta_1 \left(\hat{h}(0, t) - \hat{g}(0, t) + R \hat{\ell}_f(t) \hat{i}_f(t) \right), \quad (13)$$

La siguiente sección se concentra en discutir el paso 3 referente a la elección y ajuste de los umbrales de U_{i_f} y $U_{|e_h|}$ para la activación del estimador **O2**.

3.1 Ajuste de los umbrales a partir del modelo CIGRE

Considere la línea de transmisión HVDC con parámetros distribuidos reportada en Sarcinelli (2006). Y dos simuladores de la línea de transmisión, el primer simulador, implementado a través del método de las características en MATLAB comprende el circuito simplificado del enlace HVDC, el cual desprecia la contribución del acoplamiento de la parte de CA, y el segundo simulador, implementado a través del software ATPDraw como el circuito del enlace CIGRE HVDC, en donde se consideran los comportamientos no lineales asociados al rectificador e inversor. La Tabla 1 contiene los parámetros y datos de ambas líneas. La implementación del observador se realizó para ambos circuitos mediante el método diferencias finitas en MATLAB bajo condiciones iniciales nulas.

Parámetro	Valor
Resistencia R	5×10^{-5} [Ω/m]
Capacitancia C	26×10^{-11} [F/m]
Inductancia L	1×10^{-6} [H/m]
Longitud de la línea ℓ	100 [km]
Voltaje Nominal	500 [kV]
Corriente Nominal	2 [kA]
Longitud	100 [km]

Cuadro 1. Parámetros de la línea

3.2 Ajuste del Observador **O1** en condición normal

Para monitorear los estados de la línea es necesario utilizar el estimador **O1** en condiciones normales, es decir, en ausencia de falla, el cual permite conocer el comportamiento normal de las señales de activación $\hat{i}_f(t)$ y $|e_h(\ell, t)|$. En la Figura 4 se observa el valor de las señales de activación $\hat{i}_f(t)$ y $|e_h(\ell, t)|$ para dos diferentes valores de ganancia $K = -0.5$ y $K = -2$ para **O1**. En el circuito simplificado, se puede observar en la Figura 4a que las señales de activación en estado estacionario son cero. En cambio en el circuito CIGRE HVDC, las señales de activación representadas en la Figura 4b, son perturbadas por el rizo producido en la conversión de CA a CD. Por lo tanto, para distinguir la condición normal de la anormal y activar **O2**, con el circuito CIGRE HVDC es necesario ajustar los umbrales de las señales de activación.

De la Figura 4 es posible determinar los valores adecuados de umbrales $U_{\hat{i}_f}$ y $U_{|e_h|}$. Primero es posible intentar disminuir el valor máximo de las señales de activación a partir de la sintonización de la ganancia K del estimador **O1**. Note que el aumento en la ganancia del estimador disminuye el valor máximo de la señal $|e_h(\ell, t)|$ y aumenta el valor máximo de la señal \hat{i}_f en estado estacionario para el circuito CIGRE; en el circuito simplificado HVDC el cambio de ganancias no afecta la evolución de la corriente \hat{i}_f y ni el error $|e_h|$ para los dos circuitos. Por tanto para el circuito CIGRE, a partir de los valores máximos de las oscilaciones en las señales de activación, se pueden ajustar los umbrales en condición normal, e.g. $U_{\hat{i}_f} = 1$ [A] y $U_{|e_h|} = 3$ [A] con una ganancia $K = -2$. Se dice que

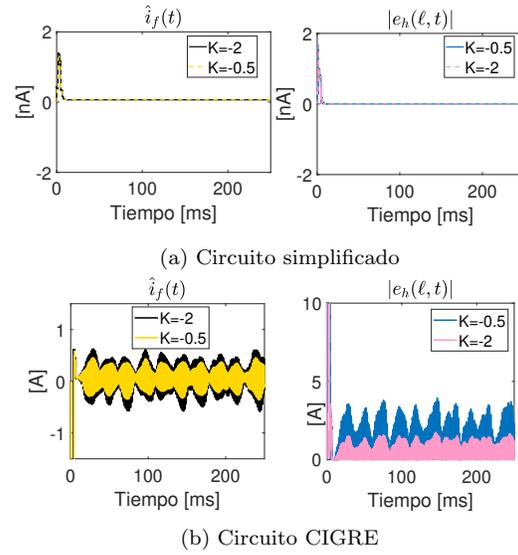


Figura 4. Señales de activación \hat{i}_f y $|e_h|$ en ausencia de falla

el observador distribuido estima correctamente el estado de la línea de transmisión de CD en condiciones normales si los valores de las señales de activación se encuentran por debajo de los umbrales propuestos. Esta elección en el circuito simplificado se puede elegir muy cercano a cero. Debido a que el estimador se construyó a través del circuito simplificado, es necesario elegir los valores de $U_{\hat{i}_f}$, $U_{|e_h|}$ y las ganancias tomando en cuenta el comportamiento de las señales \hat{i}_f y $|e_h|$ para el circuito CIGRE. Por tanto, es necesario hacer un estudio más detallado sobre la elección de los umbrales ante la presencia de falla en el caso de los dos circuitos.

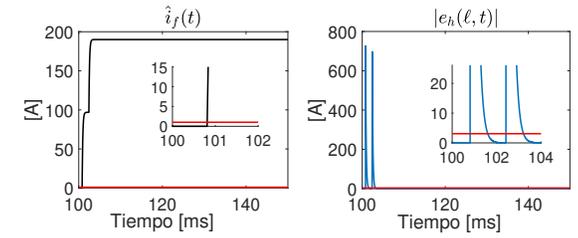
4. AJUSTE DE **O1** Y **O2** ANTE FALLA

Considere ahora la línea de transmisión de CD con falla, los parámetros de falla se muestran en la Tabla 2. A partir de la elección de los valores $U_{\hat{i}_f}$ y $U_{|e_h|}$ como los obtenidos en la sección anterior, la Figura 5 muestra el comportamiento de las señales de activación \hat{i}_f y $|e_h|$ ante un escenario con falla, específicamente 5a para el circuito simplificado y 5b para el circuito CIGRE.

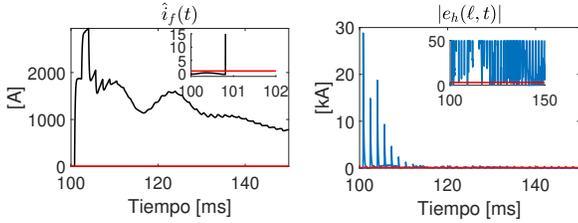
Posición de la falla ℓ_f	50 [km]
Corriente de Falla i_f	190 [A]
Tiempo de aparición de la falla t_f	100 [ms]

Cuadro 2. Parámetros de falla en la línea CD

En el circuito simplificado se puede observar que la convergencia a los parámetros de falla es rápida y tiende a los valores correctos, véase las Figuras 6a y 6b. En cambio, en el circuito CIGRE, mientras se observa una buena convergencia para la estimación de corriente de fuga (vea Figura 6c), la estimación de la posición es incorrecta. La posición estimada converge a un valor por debajo del correcto, aproximadamente de $\hat{\ell}_f = 41$ [km], véase



(a) Circuito simplificado HVDC



(b) Circuito CIGRE HVDC

Figura 5. Señales de activación \hat{i}_f y $|e_h|$ en ambos simuladores. Las asíntotas horizontales representan los umbrales $U_{\hat{i}_f} = 1$ [A] y $U_{|e_h|} = 3$ [A]

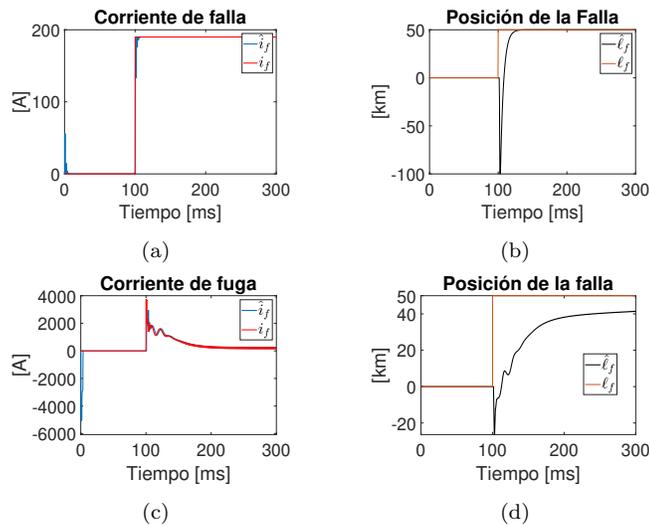


Figura 6. Estimación de los parámetros de falla para el circuito simplificado y CIGRE

Figura 6d. Entonces, tomando en cuenta que la condición para efectuar la localización de la falla sucede cuando las señales de activación cumplen $\hat{i}_f > U_{\hat{i}_f}$ y $|e_h| \leq U_{|e_h|}$, la elección de los valores de $U_{\hat{i}_f}$ y $U_{|e_h|}$ en el caso sin falla es suficiente para detectar la presencia de la falla pero no para localizarla.

Esto quiere decir, que mientras que la detección puede hacerse aproximadamente al mismo tiempo en el circuito CIGRE y el simplificado, la condición de localización no se cumple, véase Figura 6d. En particular, note que la señal $|e_h|$ oscila con alta frecuencia alrededor del umbral $U_{|e_h|}$.

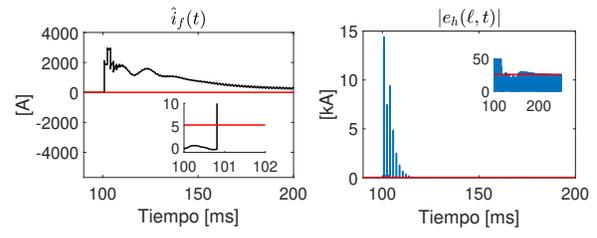


Figura 7. Ajuste de umbrales \hat{i}_f y $|e_h|$ para el circuito CIGRE

Estos resultados que aparentemente apuntan a un desempeño poco satisfactorio del SFES son consecuencia de la elección de los valores de $U_{\hat{i}_f}$ y $U_{|e_h|}$. Lo intuitivo sería pensar que con la elección de los umbrales en condiciones normales sería suficiente, sin embargo, note que el comportamiento de las señales ante la presencia de una falla se ven afectadas por dos características importantes:

- **Transitorio:** Las diferencias entre el circuito simplificado y el CIGRE impactan en el comportamiento transitorio. Comparando ambos casos se puede observar que el transitorio de las fallas no es captado por la simplificación del enlace (3), por ello, la diferencia entre ambas Figuras 6a y 6c se refleja en las diferentes duraciones de los transitorios.
- **Rizo:** Debido a que la etapa de rectificación no es ideal, se pueden ver las formaciones de rizados en las señales de activación en estado estacionario. La amplitud del rizo debe estar contenida dentro del umbral una vez que transcurra el transitorio. Como consecuencia, las señales de medición de la línea son señales ruidosas.

Esto genera problemas en la lectura de las señales de activación con respecto a los umbrales elegidos para activar **O2**, los cuales son capaces de corregirse cambiando dos parámetros del estimador, las ganancias y los umbrales, uno para reducir el efecto del transitorio y disminuir la amplitud del rizo, y el otro para incluir el efecto del rizo, respectivamente.

Este ajuste en el esquema SFES disminuye los errores e_h y e_v de estimación usados en ambos estimadores en (8) y (11), y contrarresta el efecto del uso de un circuito simplificado en la construcción del SFES. Considere entonces los valores de ganancias $K = -2$ y $\beta = 10$, con los umbrales como $U_{\hat{i}_f} = 5$ y $U_{e_h} = 25$. Note que tomar U_{e_h} como el valor máximo del rizo de e_h después del transitorio mejora la precisión del estimador **O2**. La Figura 7 muestra de nuevo las señales de alerta con la nueva configuración de ganancias y umbrales, aquí se puede observar que las señales de activación están dentro de los valores de umbrales elegidos. Finalmente, la Figura 8 muestra las estimaciones satisfactorias en ambos parámetros de falla con la elección de los nuevos umbrales, específicamente la posición de $\hat{l}_f = 49.89$ [km]. Las simulaciones del circuito simplificado se omiten, los resultados de las señales de activación y las estimaciones son satisfactorios con la

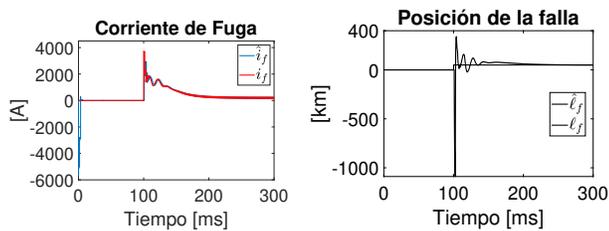


Figura 8. Estimación de los parámetros de falla: circuito CIGRE con ajustes

nueva configuración de ganancias y umbrales tomando en cuenta el circuito CIGRE.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo aborda los problemas prácticos del esquema SFES y su ajuste para el diagnóstico de fallas en la línea de transmisión de CD en un enlace CIGRE HVDC monopolar. Para analizar dichos problemas, se realizó una comparación numérica entre el uso de los dos circuitos de enlace: el circuito simplificado en Matlab y el circuito CIGRE en ATPDRAW mediante la observación del comportamiento de las señales de activación del esquema. En el circuito simplificado, se asume que la línea de transmisión conecta dos circuitos de potencia de la parte de CA. En el modelo CIGRE, se tiene en cuenta los efectos no lineales de los dispositivos de potencia de la parte de CA que conecta la línea en sus extremos. La comparación entre el circuito simplificado y CIGRE revela que, en ausencia de falla, las señales de activación, que son nulas en el circuito simplificado, muestran un rizo de amplitud constante en el circuito CIGRE en estado estacionario. Este rizo se atribuye a la conversión de CA a CD y viceversa. Además, en presencia de una falla, las señales de activación son menos sensibles en el circuito CIGRE con transitorios más lentos en comparación con el simplificado.

Por otro lado, se demostró que los problemas prácticos mencionados anteriormente pueden ser abordados a través de ajustes en el esquema SFES. Específicamente, al realizar ajustes en las ganancias del esquema, se logra reducir tanto la amplitud del rizo como el transitorio en las señales de activación. Esto, a su vez, permite seleccionar valores adecuados para los umbrales de las señales de activación, lo que mejora la precisión en la detección de una falla. El esquema SFES es capaz de obtener los parámetros de falla del circuito CIGRE de manera satisfactoria. Note que los tiempos de estimación para el circuito CIGRE oscilan entre los 4 y 5 [ms] para la corriente y alrededor de 15 [ms] para la localización lo cual indica una estimación más lenta en comparación con el circuito simplificado, esta respuesta más lenta es atribuida a las aproximaciones de los circuitos convertidores. Además, el error de estimación es del 0.11 % para la magnitud y 0.22 % para la localización de la falla.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del programa Posdoctoral de Conacyt 2022-2023 y a DGAPA-UNAM IT100122.

REFERENCIAS

- Aamo, O.M. (2015). Leak detection, size estimation and localization in pipe flows. volume 61, 246–251. IEEE.
- Aldeen, M. and Crusca, F. (2006). Observer-based fault detection and identification scheme for power systems. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 153(1), 71–79.
- Arifoglu, U. (1999). Load flow based on newton's method using norton equivalent circuit for ac-dc multiterminal systems. *European transactions on electrical power*, 9(3), 167–174.
- Atighechi, H., Chiniforoosh, S., Jatskevich, J., Davoudi, A., Martinez, J., Faruque, M., Sood, V., Saeedifard, M., Cano, J., Mahseredjian, J., et al. (2014). Dynamic average-value modeling of cigre hvdc benchmark system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(5), 2046–2054.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., and Schröder, J. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer.
- Meah, K. and Ula, A.S. (2009). Simulation study of the cigre hvdc benchmark model with the wsc9 nine-bus power system network. In *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 1–5. IEEE.
- Mohammadi, F., Rouzbehi, K., Hajian, M., Niayesh, K., Gharehpetian, G.B., Saad, H., Ali, M.H., and Sood, V.K. (2021). HvdC circuit breakers: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(12), 13726–13739.
- Muniappan, M. (2021). A comprehensive review of dc fault protection methods in hvdc transmission systems. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(1).
- Pérez-Pinacho, C.A. and Verde, C. (2022). Location of sequential shunt faults in hvdc lines. *IFAC-PapersOnLine*, 55(6), 102–107.
- Sarcinelli, L.G. (2006). First benchmark model for hvdc controls in atp program. In *Proc. Xth Symposium of specialists in electric operational and expansion planning, Florianopolis (SC), Brasil, May. 2006*.
- Verrax, P., Bertinato, A., Kieffer, M., and Raison, B. (2020). Transient-based fault identification algorithm using parametric models for meshed hvdc grids. *Electric Power Systems Research*, 185, 106387.
- Wang, T., Liang, L., Gurumurthy, S.K., Ponci, F., Monti, A., Yang, Z., and De Doncker, R.W. (2020). Model-based fault detection and isolation in dc microgrids using optimal observers. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(5), 5613–5630.