

Impact of TCSC on Directionality of Traveling Waves to Locate Faults in Transmission Lines

Enrique Reyes-Archundia, *Senior Member, IEEE*, José A. Gutiérrez-Gnecchi, *Senior Member, IEEE*, Nestor F. Guerrero-Rodríguez, Adriana C. Téllez, *Senior Member, IEEE*, Arturo Méndez-Patiño and Juan A. Salazar

Abstract— The use of devices based on power electronics has been widely spread to improve the transmission lines performance. However, the inclusion of these compensators, named Flexible AC Transmission Systems, produces adverse effects on conventional protection schemes. For instance, it modifies the apparent impedance of transmission lines. This condition produces malfunction in conventional distance protection. This paper presents an algorithm protection for power transmission lines, compensated with a Thyristor-Controlled Series Capacitor. The proposed algorithm is capable of discriminating the directionality of traveling waves as well as detecting and locating eleven types of faults. The impact of the Thyristor-Controlled Series Capacitor device in the directionality of traveling waves is analyzed and separated for developing the protection. The obtained results show that the directionality of the algorithm is not affected by the presence of Thyristor-Controlled Series Capacitor. In order to validate the algorithm, several study cases are considered. The error calculating distance to fault is smaller than 1.25%.

Index Terms— *fault location, discrete wavelet transform, directionality, TCSC, travelling waves.*

I. INTRODUCCIÓN

La introducción de los dispositivos basados en Electrónica de Potencia a las redes eléctricas de distribución, ha incrementado su eficiencia. Derivado del uso de estos componentes, se han diseñado convertidores tales como los FACTS (Flexible AC Transmission Systems), para compensar las líneas de transmisión. Éstos han sido ampliamente usados para: mejorar la estabilidad del sistema de potencia [1-3]; disminuir la resonancia subsíncrona [4-6], mejorar la calidad de la energía [7-9], entre otros.

En contraste, el uso de estos compensadores dinámicos produce efectos adversos en los esquemas convencionales de protección. Por ejemplo, en [10]- [11], se muestra que el Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) afecta la impedancia equivalente medida por el relé de protección, dependiendo del grado de compensación del FACTS y la

localización del mismo. Debe tomarse en cuenta este efecto para modificar la protección convencional y evitar errores en el disparo del relé. Adicionalmente, la presencia de un compensador puede afectar a las protecciones direccionales por la inversión del voltaje medido [12].

Existen pocos trabajos en los que se hayan desarrollado algoritmos de protección para líneas de transmisión con compensadores basados en electrónica de potencia. En [13] Dash et. al. propusieron un algoritmo basado en la 3ª y 5ª armónicas debidas a un TCSC y la técnica de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM, por sus siglas en inglés) para localizar y clasificar fallas en líneas compensadas. En [14] El-Zonkoly y Desouky utilizaron las técnicas de entropía de la wavelet y optimización para detectar y localizar la sección de línea con falla. Ambos métodos localizan la sección de línea fallada, pero no calculan la distancia a la falla.

En [15], Nobakhti y Akhbari propusieron un algoritmo para localización de fallas en líneas compensadas con TCSC. El algoritmo determina en principio la sección de la línea fallada, es decir, antes o después del TCSC y después localiza la falla. Este esquema requiere de un ciclo completo para obtener variaciones significativas. En 2015 Swetapadma y Yadav propusieron un algoritmo para multi-localización de fallas en una línea compensada con TCSC [16]. Este algoritmo tiene el inconveniente de requerir el cálculo de coeficientes de detalle de nivel 3, lo que implica un mayor esfuerzo computacional. Adicionalmente, los autores aseguran que el algoritmo trabaja adecuadamente con resistencias de falla, sin embargo, solo proponen valores pequeños para fallas no aterrizadas.

El presente trabajo propone un algoritmo basado en la onda viajera, producida por las fallas de línea, para realizar la detección y localización de la falla en una línea compensada con un TCSC. A diferencia de otros trabajos, el algoritmo propuesto aísla la onda viajera de los efectos producidos por el TCSC, de esta manera puede determinar la direccionalidad de la onda viajera, así como detectar y localizar con exactitud la falla a lo

Este trabajo fue realizado con el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México a través del proyecto 6760.18-P

E. Reyes-Archundia está con Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México (email: reyes_archundia@ieee.org)

J.A.G. Gnecchi, está con Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México (email: agnecchi@itmorelia.edu.mx)

N.F. Guerrero-Rodríguez está con Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, República Dominicana (email: nf.guerrero@ce.pucmm.edu.do)

A.C.T. Anguiano está con Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México (email: adrianat@itmorelia.edu.mx)

A.M. Patiño está con Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México (email: ampatino@itmorelia.edu.mx)

J.A. Salazar está con Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México (email: jasalazarto@conacyt.mx)

Corresponding author: E. Reyes-Archundia (reyes_archundia@ieee.org)

largo de la línea de transmisión.

La organización del trabajo es la siguiente: la Sección II resume la técnica de transformada wavelet. En la Sección III se analizan los efectos causados por el TCSC en la direccionalidad de las ondas viajeras generadas por la inclusión de una falla. La sección IV presenta el algoritmo desarrollado para detectar y localizar una falla de línea. La sección V muestra los casos de estudio desarrollados para validar el algoritmo. Finalmente, las conclusiones se presentan en la Sección VI.

II. TRANSFORMADA WAVELET

La transformada wavelet, WT , es una herramienta muy útil para analizar señales transitorias que se obtienen de la convolución de la señal bajo estudio, $f(t)$, con una wavelet Ψ , dando como resultado los coeficientes C , tal como se muestra en (1) [17]

$$C(scale, position) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi(scale, position, t)dt \quad (1)$$

donde Ψ es la wavelet “madre”, la cual pertenece a una familia de wavelets especiales, que se utilizan para compararse con $f(t)$. De hecho, el análisis wavelet puede considerarse como una descomposición de la señal de interés en versiones escaladas o desplazadas de una wavelet de referencia, es decir, de la wavelet madre. Algunos ejemplos de las familias de wavelets son: *Haar*, *Daubechies*, *Symlets*, *Mexican Hat*.

La Ψ se selecciona para analizar una porción desconocida de la señal $f(t)$, usando la convolución, es decir, la WT analiza el grado de correlación de $f(t)$ con Ψ . Al aplicar la WT se produce un espacio tiempo-escala. Este espacio tiene la característica de que la señal puede ser analizada variando la escala (asociada a un ensanchamiento o estrechamiento de la Ψ) y para una posición de Ψ (asociada a un tiempo de retardo o adelanto con respecto a la señal a analizar). El espacio tiempo-escala permite un mapeo multiresolución, es decir, se pueden elegir la posición (tiempo) y la escala de la Ψ para analizar la $f(t)$ en un intervalo de tiempo determinado y para un rango de frecuencias específico.

Normalmente se eligen escalas y posiciones basado en potencia de 2 (conocidas como diádicas). El análisis desarrollado de esta manera se conoce como transformada wavelet discreta (DWT , por sus siglas en inglés), ya que está relacionado con valores discretos.

En el proceso de DWT , la señal de entrada $f(t)$ es filtrada por medio de un filtro pasa-altas y uno pasa-bajas. Al implementarse este procedimiento, se obtienen dos secuencias de datos: coeficientes de aproximación (cA_n) y coeficientes de detalle (cD_n). Tal como se muestra en (2) [17]

$$\begin{aligned} cA_1(t) &= \sum_k f(t)L_d(k - 2t) \\ cD_1(t) &= \sum_k f(t)H_d(k - 2t) \end{aligned} \quad (2)$$

donde

cA_1 , es el coeficiente de aproximación de nivel 1,

cD_1 es el coeficiente de detalle de nivel 1.

L_d es un filtro pasa bajas

H_d es un filtro pasa altas

Los coeficientes de los filtros empleados en la DWT (H_d y L_d) se ajustan de acuerdo a la wavelet “madre” ψ . A manera de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra la forma de la wavelet conocida como *Daubechies 4* ($db4$).

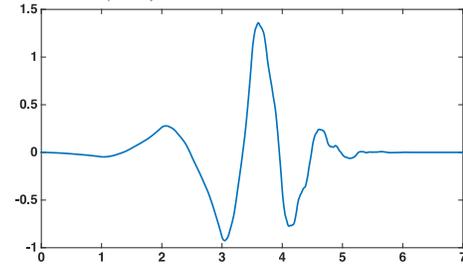


Fig. 1. Forma de onda de la wavelet Daubechies 4 ($db4$).

Este proceso puede ser repetido para obtener coeficientes de nivel mayor, para lo cual se utiliza el coeficiente de Aproximación cA_1 en lugar de $f(t)$ para obtener cA_2 y cD_2 y así sucesivamente. Cada nivel de coeficiente está asociado con un rango de frecuencias, tal como se muestra en la Tabla I. La frecuencia de muestreo considerada es de 50 kHz, la wavelet madre utilizada en este trabajo es la $db4$, debido al éxito que se ha demostrado en su uso para análisis de señales eléctricas transitorias, en particular fallas en sistemas de potencia [16].

TABLA I
RELACIÓN DE cD_n CON LOS RANGOS DE FRECUENCIA

cD_n	Rango de frecuencia
cD_1	12.5 – 25.0 kHz
cD_2	6.25 – 12.5 kHz
cD_3	3.12 – 6.25 kHz
cD_4	1.56 – 3.12 kHz
cD_5	0.78 – 1.62 kHz
cD_6	390 – 781 Hz
cD_7	195 – 390 Hz

III. EFECTO DEL TCSC EN LA DIRECCIONALIDAD DE LA ONDA VIAJERA

El TCSC es un arreglo de un capacitor serie (C_{TCSC}) conectado en paralelo con un módulo de un Rectificador Controlado de Silicio (SCR, por sus siglas en inglés) en serie con un inductor (L_{TCSC}). En algunas instalaciones se agrega un capacitor fijo externo en serie.

La estructura mostrada en la Fig. 2 se comporta como una impedancia variable que depende completamente del ángulo de disparo de los tiristores, el cual se ubica en un rango de 180 a 90 grados.

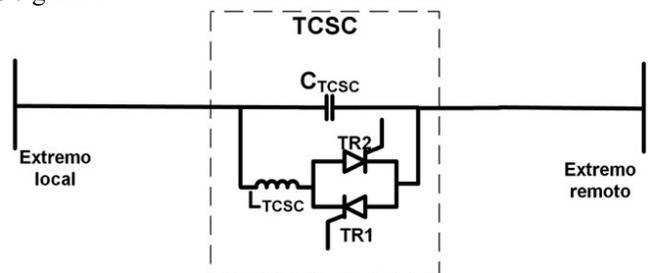


Fig. 2. Estructura del TCSC.

Normalmente el TCSC opera como un capacitor variable, si

se dispara el tiristor en valores que van desde 180 a 150 grados aproximadamente. La impedancia de estado estable del TCSC (X_{TCSC}) está dada por (3) [18]

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_{CTCSC}X_{LTCSC}(\alpha)}{X_{LTCSC}(\alpha) - X_{CTCSC}} \quad (3)$$

donde

$$X_{LTCSC}(\alpha) = X_{LTCSC} \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}, X_{LTCSC} < X_{LTCSC}(\alpha) \leq \infty$$

y α es el ángulo de disparo del tiristor

La Fig. 3 muestra la curva de impedancia del TCSC.

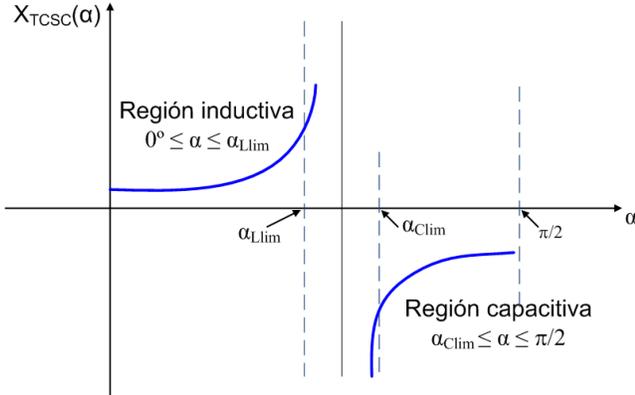


Fig. 3. Curva de impedancia del TCSC.

La reactancia capacitiva que el TCSC aporta a la línea de transmisión, es utilizada para compensar dinámicamente a la línea lo que permite, entre otras aplicaciones, incrementar el transporte de la energía.

Está demostrado que la incorporación de compensadores en la línea de transmisión puede producir efectos no deseados en esquemas de protección convencionales, tales como la protección de distancia, por la modificación de la impedancia aparente vista por el relé de protección [10-11] y en los relés de direccionalidad ya que la compensación puede producir una inversión del voltaje medido que afecta la discriminación direccional [12].

Existen en la literatura diversos relés basados en ondas viajeras [19-20], en algunos de ellos, la polaridad de los frentes de onda de voltaje y corriente son utilizados para determinar la direccionalidad de la falla y a su vez proteger una línea en particular [21]. En el caso de líneas compensadas con FACTS es necesario asegurar que la presencia del compensador no afecte la direccionalidad de la onda viajera.

Cuando se genera una falla, en la línea de transmisión, se producen ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de la línea (Fig. 4). La falla es detectada cuando las ondas viajeras llegan a la posición del relé (extremo local), para lo cual tienen que pasar a través del TCSC.

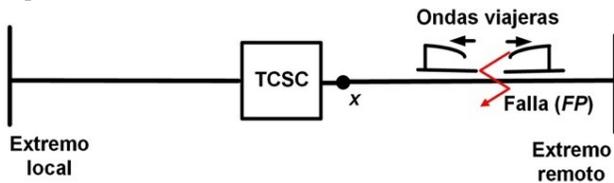


Fig. 4. Línea de transmisión compensada con TCSC.

Para determinar el efecto del TCSC en la onda viajera, se

utiliza el coeficiente de reflexión cuando dicha onda llega a la ubicación del compensador (punto x de la Fig. 4).

Al llegar al punto x , las ondas, tanto de voltaje como de corriente, encuentran una discontinuidad que podría producir una reflexión y por tanto modificar la direccionalidad de la onda viajera.

El coeficiente de reflexión de voltaje (ρ_v) está dado por la ecuación (4)

$$\rho_v = \frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0} \quad (4)$$

El coeficiente de reflexión de corriente (ρ_i) está dado por la ecuación (5)

$$\rho_i = \frac{Z_0 - Z_x}{Z_x + Z_0} \quad (5)$$

donde Z_0 es la impedancia característica de la Línea de Transmisión y Z_x es la impedancia que encuentra la onda viajera en el punto x .

Considerando que el TCSC se comporta como un capacitor serie bajo condiciones normales de operación, la Z_x vista por la onda viajera está dada por (6)

$$Z_x = Z_0 - jX_{TCSC} \quad (6)$$

donde X_{TCSC} , representa la reactancia entregada por el TCSC en condiciones normales de operación

Sustituyendo (6) en (5) y (4) los coeficientes de reflexión quedan:

$$\rho_v = \frac{-jX_{TCSC}}{2Z_0 - jX_{TCSC}} = \frac{-j}{2Z_0\omega C_E - j} \quad (7)$$

$$\rho_i = \frac{jX_{TCSC}}{2Z_0 - jX_{TCSC}} = \frac{j}{2Z_0\omega C_E - j} \quad (8)$$

Nótese en (7) y (8) que $X_{TCSC} = 1/(\omega C_E)$, donde C_E es la capacitancia equivalente del TCSC.

De las ecuaciones (7) y (8) se puede observar que, independientemente del valor de C_{TCSC} , cuando la frecuencia ω se incrementa los coeficientes de reflexión tienden a cero. De esta manera, y considerando que las ondas viajeras se hacen presentes en altas frecuencias, puede asegurarse que tanto la onda viajera de voltaje como la de corriente no se ven afectadas por el TCSC.

A manera de ejemplo, considérese una línea de transmisión de 230 kV y una longitud de 300 km, con los parámetros mostrados en [22]. La inductancia y capacitancia en secuencia positiva, así como la impedancia característica son:

$$L_l = 0.0008 \text{ H/km}$$

$$C_l = 1.402 \cdot 10^{-8} \text{ F/km}$$

$$Z_0 = 553 \Omega$$

La reactancia inductiva de la línea de transmisión se obtiene sustituyendo L_l en (9)

$$X_L = \omega L_l T_{Xlength} \quad (9)$$

donde $T_{Xlength}$ es la longitud de la línea de transmisión. Así:

$$X_L = 2\pi(60 \text{ Hz})(0.0008 \text{ H/km})(300 \text{ km}) = 90.48 \Omega$$

Considerando una compensación del 50%, se requiere que el TCSC aporte una reactancia capacitiva de $X_{TCSC} = 45.24 \Omega$, de esta manera el capacitor equivalente del TCSC queda a 60 Hz:

$$C_E = \frac{1}{\omega X_{TCSC}} = \frac{1}{2\pi(60 \text{ Hz})(45.24 \Omega)} = 58.63 \mu\text{F}$$

Con el valor obtenido de C_E , se evalúan los coeficientes de

reflexión de voltaje y corriente mostrados en (7) y (8). En la Fig. 5 se muestra la respuesta a la frecuencia de dichos coeficientes. Puede apreciarse que, a frecuencias mayores a 60 Hz, los coeficientes de reflexión tienden a cero, por lo cual no afectan a la direccionalidad de la onda viajera.

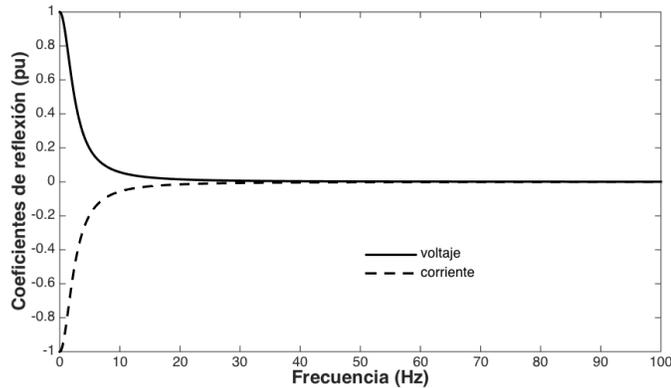


Fig. 5. Coeficientes de reflexión de voltaje y corriente.

La ventaja de usar *WT* para analizar las señales, consiste en poder seleccionar el rango de frecuencias de interés (en que las ondas viajeras son visibles) y con ello aislar el efecto del TCSC. Si se utiliza el coeficiente de detalle de nivel 1 (cD_1), el rango de frecuencia analizado se encuentra entre 12.5 a 25 kHz, por lo que se asegura que los datos obtenidos no involucren problemas en la direccionalidad de la onda.

IV. ALGORITMO PARA LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Una vez determinado el coeficiente de detalle adecuado (cD_1), las ondas viajeras de voltaje y corriente pueden analizarse por medio de la transformada wavelet para detectar y localizar fallas a lo largo de la línea de transmisión sin importar la presencia o ausencia del TCSC.

En la Fig. 6 se muestra el algoritmo propuesto para la detección y localización de fallas.

Antes de obtener el coeficiente de detalle de voltaje (cD_{1V}) y el coeficiente de detalle de corriente (cD_{1C}), se aplica a las señales una transformación modal para eliminar el acoplamiento mutuo entre las fases. En el presente trabajo se utilizó la transformación de Clarke.

Los tres principales procesos que se ilustran en la Fig. 6 son los de discriminación, detección y localización que pueden resumirse en:

1. Si $cD_{1V} * cD_{1C} > 0$ la falla no se encuentra en la línea protegida y se termina el proceso, de otra manera se accede al paso 2.
2. Si $cD_1 > cD_{1TH}$ entonces la falla es detectada. La magnitud de la onda viajera (incorporada en cD_1) se compara continuamente con un valor de umbral (cD_{1TH}) para detectar la presencia de una falla de línea. Se utiliza el coeficiente de voltaje.
3. Si la falla fue detectada y $cD_1 > cD_{1TH}$ por segunda ocasión, entonces la falla es localizada usando (10) u (11) [21]

$$FL = k_v(t_2 - t_1) / 2 \quad (10)$$

$$FL = T_{xlength} - k_v(t_2 - t_1) / 2 \quad (11)$$

donde FL = distancia a la que ocurre la falla (km), k_v =

2.976×10^5 km/s (velocidad de la onda viajera en el aire), t_2 = tiempo en que llega la segunda onda viajera del modo aéreo a la posición del punto de medición (R en la Fig. 7, dado en segundos), t_1 = tiempo en que llega la primera onda viajera del modo aéreo a la posición de R (en segundos), $T_{xlength}$ = longitud de la línea de transmisión (km).

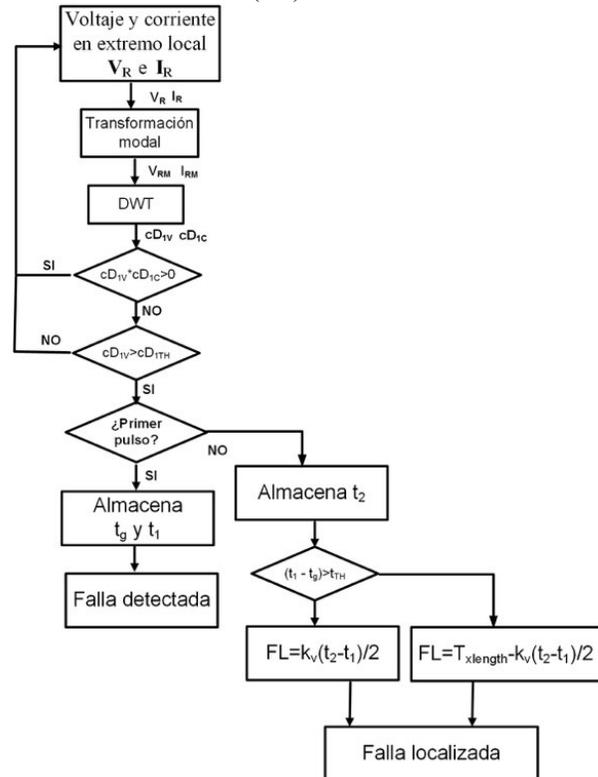


Fig. 6. Algoritmo para detectar y localizar la falla.

Para elegir entre (10) o (11), se considera (12), la cual valida el tiempo transcurrido entre la llegada del primer pulso del modo aéreo y el modo de tierra [23]

$$\text{Si } (t_g - t_1 > t_{TH}) \text{ y } (FL < T_{xlength} / 2) \text{ entonces (11)} \quad (12)$$

donde t_g = tiempo en que llega la componente de tierra de la onda viajera a R . t_{TH} es un tiempo de umbral que se ajusta a la diferencia de tiempo entre t_g y t_1 cuando la falla ocurre a la mitad de la línea de transmisión.

V. RESULTADOS

La red eléctrica considerada para los casos de estudio es una red de 12 barras, Fig. 7. Se tienen 6 buses de 230 kV, 2 de 345 kV y 4 de 22 kV. Los parámetros de la red se pueden consultar en [22]. El compensador TCSC se considera ubicado a la mitad de la línea 1-6 que tiene una extensión de 300 km.

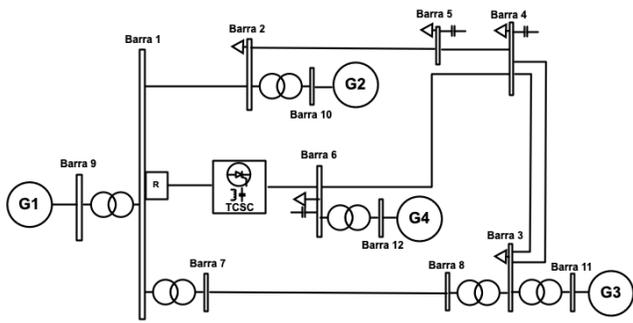


Fig. 7. Red eléctrica de 12 barras.

A. Caso de Estudio I. Localización de la Falla

En la Fig. 8a se muestran las señales de voltaje y corriente de la fase A observadas durante la simulación de una falla que ocurre en la línea 1-6 a 180 km del punto del relé (R). En la Fig. 8b se muestran los coeficientes de detalles de voltaje y corriente de nivel 1 (cD_1) correspondientes, mientras que en la Fig. 8c se muestran los coeficientes de detalle obtenidos de una falla en la línea 1-2 a 180 km de R. Se puede observar que las polaridades de los coeficientes de detalle de voltaje y corriente son iguales para fallas fuera de la línea de protección y son opuestas en polaridad para la línea protegida. El algoritmo valida la polaridad de las señales y calcula correctamente la posición de la falla.

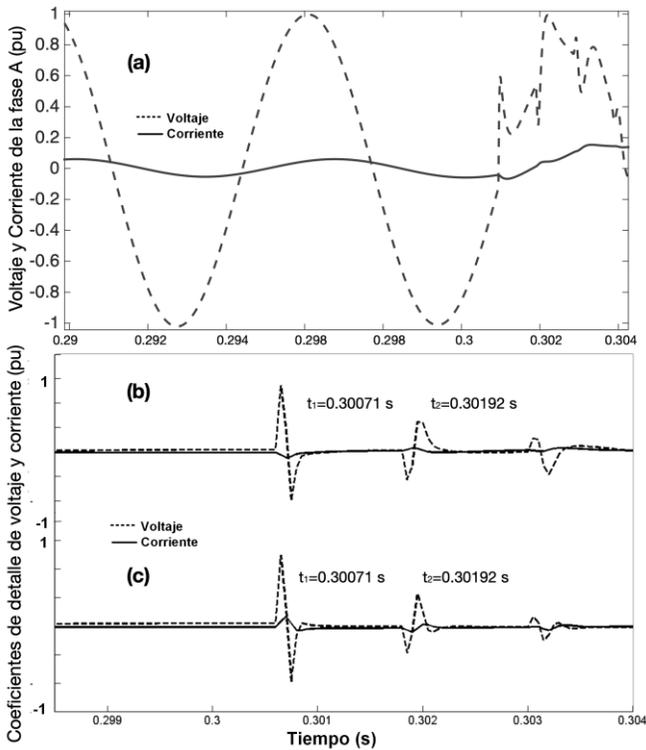


Fig. 8. Coeficientes de detalle de fallas simuladas: a) en la línea protegida; b) fuera de la línea protegida.

Para validar el funcionamiento del algoritmo para la localización de fallas, se simularon diferentes tipos de fallas a lo largo de la línea de transmisión. En la Tabla II se muestran

los resultados obtenidos. Los tipos de falla considerados son:

- A-G. Cortocircuito monofásico, fase A a tierra.
- B-G. Cortocircuito monofásico, fase B a tierra.
- C-G. Cortocircuito monofásico, fase C a tierra.
- AB-G. Cortocircuito bifásico, fases A y B a tierra.
- AC-G. Cortocircuito bifásico, fases A y C a tierra.
- BC-G. Cortocircuito bifásico, fases B y C a tierra.
- ABC-G. Cortocircuito trifásico, fases A, B y C a tierra.
- AB. Cortocircuito bifásico, fases A y B.
- AC. Cortocircuito bifásico, fases A y C.
- BC. Cortocircuito bifásico, fases B y C.
- ABC. Cortocircuito trifásico, fases A, B y C.

Puede observarse de la Tabla II que, sin importar el tipo de falla, el algoritmo calcula correctamente la distancia a la que ocurre la falla, por ejemplo, para una falla AB-G simulada a 150 km de la barra 1, el algoritmo calcula que la distancia es de 153.75 km, es decir la desviación es de 3.75 km., que equivale a un error de 1.25% considerando (13) [15]

$$error = (valor\ calculado - valor\ real) / 300\ km \quad (13)$$

El error promedio obtenido en las pruebas mostradas en la Tabla II es de 0.5%, lo que da evidencia del buen desempeño del algoritmo de localización.

TABLA II
DISTANCIAS CALCULADAS A LO LARGO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Tipo de Falla	Falla Aplicada a (km)					
	60	120	150	180	240	300
A-G	60.01	120.03	153.75	183.75	243.72	300.01
B-G	60.01	123.74	153.75	183.75	243.72	300.01
C-G	60.01	123.74	153.75	183.75	243.72	303.75
AB-G	60.01	120.03	153.75	180.04	240.06	300.01
AC-G	60.01	120.03	153.75	176.26	243.72	303.75
BC-G	60.01	120.03	149.30	183.75	236.30	303.75
ABC-G	60.01	120.03	150.73	180.04	243.72	300.01
AB	60.01	120.03	153.75	180.04	240.06	300.01
AC	60.01	120.03	150.77	180.04	240.06	300.01
BC	60.01	120.03	150.77	180.04	236.30	296.31
ABC	60.01	120.03	150.73	180.04	243.72	300.01

B. Caso de Estudio II. Efecto de la Variación de Compensación del TCSC

El grado de compensación del TCSC, está determinado por los valores del capacitor y del inductor que forman parte del arreglo, así como del ángulo de disparo de los tiristores. Con el objetivo de examinar el efecto que tiene la variación de estos parámetros y, por consecuencia, el grado de compensación del TCSC en la localización de la falla, se analizaron 3 diferentes valores de compensación, tal como se muestra en la TABLA III.

TABLA III
EFECTO DE VARIACIÓN DE COMPENSACIÓN DEL TCSC

Tipo de falla	Compensación del TCSC (%)	Distancia a la falla (km)				Error Máximo (%)
		60	120	240	300	
A-G	50	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
	55	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
	60	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
AB-G	50	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
	55	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
	60	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
ABC-G	50	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
	55	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
	60	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
AB	50	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
	55	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
	60	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02

Los resultados obtenidos en la TABLA III, muestran que, al utilizar ondas viajeras, el TCSC tiene un efecto nulo en la localización de la falla.

C. Caso de Estudio III. Efecto de la Resistencia de Falla

Un parámetro que influye en el cálculo de distancias de la falla en esquemas convencionales de protección es la resistencia de falla. Para validar su impacto en el presente trabajo se consideraron cuatro valores de resistencia de falla y se muestran los resultados en la Tabla IV. Puede observarse que el efecto de la resistencia de falla es menor al 1.5% en todos los tipos de falla y para fallas a lo largo de la línea de transmisión. Es importante señalar que se consideraron distancias a la falla cada 30 km y los resultados son similares, sin embargo, por cuestiones de espacio sólo se presentan las más representativas.

TABLA IV
EFECTO DE LA RESISTENCIA DE FALLA

Tipo de falla	Resistencia de falla (Ω)	Distancia a la falla (km)				Error Máximo (%)
		60	120	240	300	
A-G	0	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
	25	60.01	120.03	243.72	303.74	1.25
	50	63.74	120.03	243.72	303.74	1.25
	100	63.74	120.03	243.72	303.74	1.25
AB-G	0	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
	25	60.01	120.03	240.73	303.72	1.24
	50	60.01	120.03	240.73	303.72	1.24
	100	63.74	120.03	240.73	303.72	1.25
ABC-G	0	60.01	120.03	243.72	300.01	1.24
	25	60.01	120.03	243.72	303.74	1.25
	50	60.01	123.75	240.73	303.74	1.25
	100	63.74	123.75	243.72	303.74	1.25
AB	0	60.01	120.03	240.06	300.01	0.02
	25	60.01	123.75	240.73	303.74	1.25
	50	60.01	120.03	243.72	303.74	1.25
	100	63.74	120.03	243.72	303.74	1.25

El error en el cálculo de la distancia depende de la frecuencia de muestreo, para frecuencias mayores se obtienen errores menores, por ejemplo, para una frecuencia de muestreo de 100 kHz, el error máximo es menor al 1%.

VI. CASO DE ESTUDIO IV. EFECTO DEL ÁNGULO DE INSERCIÓN DE LA FALLA

Para investigar el efecto del ángulo de inserción de la falla, se

tomaron en cuenta diferentes valores de ángulo tal como se muestra en la Tabla V.

TABLA V
EFECTO DEL ÁNGULO DE INSERCIÓN DE LA FALLA

Tipo de falla	Ángulo Inserción falla (radianes)	Distancia a la falla (km)			
		60	120	240	300
A-G	$\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
	$2\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
	$3\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
	$4\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
AB-G	$\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
	$2\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
	$3\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
	$4\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
ABC-G	$\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
	$2\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
	$3\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
	$4\pi/5$	60.01	120.03	243.72	300.01
AB	$\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
	$2\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
	$3\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01
	$4\pi/5$	60.01	120.03	240.06	300.01

De la Tabla V se observa que el ángulo de inserción de falla no presenta impacto en el cálculo de la distancia en la que ocurre la falla. Esto obedece al hecho de que sólo es necesario un valor mínimo en la magnitud de la onda viajera para poder detectar y localizar la falla. Este valor mínimo se obtiene con ángulos de inserción de la falla mayores a $\pi/20$ radianes, para valores menores se puede utilizar la técnica descrita en [24].

VII. CONCLUSIONES

Los efectos que producen los FACTS-serie en las ondas viajeras son imperceptibles, siempre y cuando sean analizadas en rangos de frecuencias adecuados. En este caso, el rango de frecuencia utilizada con la transformada wavelet corresponde al intervalo de 12.5 a 25 kHz. Los efectos que puede causar el TCSC a la onda viajera, en particular a la direccionalidad, quedan fuera de este rango por lo que puede utilizarse este nivel de detalle para detectar y localizar fallas.

El algoritmo presentado continuamente está detectando la ocurrencia de fallas de línea y localiza la falla a lo largo de la línea de transmisión aún en presencia del TCSC. Los errores en la localización de la falla son menores al 1.5%, lo cual depende principalmente de la frecuencia de muestreo en lugar de la variación de parámetros tales como la resistencia de falla o el ángulo de inserción de la falla.

REFERENCIAS

- [1] B.V. Kumar and N.V. Srikanth, "A hybrid approach for optimal location and capacity of UPFC to improve the dynamic stability of the power system," *Applied Soft Computing*, vol. 52, pp. 974–986, Mar. 2017, DOI. 10.1016/j.asoc.2016.09.031.
- [2] O. Ziaee and F.F. Choobineh, "Optimal Location-Allocation of TCSC Devices on a Transmission Network," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 94 - 102, Jan. 2017, DOI. 10.1109/TPWRS.2016.2556424
- [3] B. Singh, R.P. Payasi and V. Shukla, "A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems," *Energy Reports*, vol. 3, no. 1, pp. 94–108, Nov. 2017, DOI. 10.1016/j.egyr.2017.07.001.

- [4] D.K. Raju, B.S. Umre, A.S. Junghare and B.C. Babu, "Mitigation of Subsynchronous Resonance with Fractional-order PI based UPFC controller", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 85, no. 1, pp. 698–715, Feb. 2017, DOI. 10.1016/j.ymssp.2016.09.012
- [5] R.K. Varma and R. Salehi, "SSR Mitigation with a New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM)", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1473 - 1483, Oct. 2017. DOI. 10.1109/TSTE.2017.2691279
- [6] H.A. Mohammadpour, M. Moinul, E. Santi, and Y.J. Shin, "SSR Damping in Fixed-Speed Wind Farms Using Series FACTS Controllers," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 1, pp. 76-86, Feb. 2016, DOI. 10.1109/TPWRD.2015.2464323.
- [7] H. Liao and J. V. Milanović, "On capability of different FACTS devices to mitigate a range of power quality phenomena," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 5, pp. 1202 - 1211, May 2017, DOI. 10.1049/iet-gtd.2016.1017.
- [8] B. Singh, V. Mukherjee and P. Tiwari, "A survey on impact assessment of DG and FACTS controllers in power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, no 1, pp. 846–882, Feb. 2015, DOI. 10.1016/j.rser.2014.10.057
- [9] H. Liao, S. Abdelrahman and J.V. Milanović, "Zonal Mitigation of Power Quality Using FACTS Devices for Provision of Differentiated Quality of Electricity Supply in Networks with Renewable Generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 1975 - 1985, Aug. 2017, DOI. 10.1109/TPWRD.2016.2585882.
- [10] M.K. Jena, B.K. Panigrahi, S. Das and S.R. Samantaray, "Exposing Zone-2 and Zone-3 Mal-operations in Thyristor-Controlled Series Capacitor Compensated Transmission System," in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, Bhubaneswar, India, 2016, pp. 1 – 6.
- [11] Z. Moravej, M. Pazoki, and M. Khederzadeh, "Impact of UPFC on Power Swing Characteristic and Distance Relay Behavior," *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 261–268, Feb. 2014, DOI. 10.1109/TPWRD.2013.2270408
- [12] H.J. Altuve, J.B. Mooney and G.E. Alexander, "Advances in Series-Compensated Line Protection", in *62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, Atlanta, Georgia, 2009, pp. 1-13.
- [13] P.K. Dash, S.R. Samantaray and G. Panda, "Fault Classification and Section Identification of an Advanced Series-Compensated Transmission Line Using Support Vector Machine", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 67-73, Jan. 2007, DOI. 10.1109/TPWRD.2006.876695.
- [14] A.M. El-Zonkoly and H. Desouki, "Wavelet entropy based algorithm for fault detection and classification in FACTS compensated transmission line", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no.8, pp. 1368–1374, Oct. 2011, DOI. 10.1016/j.ijepes.2011.06.014.
- [15] S.M. Nobakhti, M. Akhbari, "A new algorithm for fault location in series compensated transmission lines with TCSC," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, pp. 79-89, May. 2014, DOI. 10.1016/j.ijepes.2013.11.052.
- [16] A. Swetapadma and A. Yadav, "Improved fault location algorithm for multi- location faults, transforming faults and shunt faults in thyristor controlled series capacitor compensated transmission line", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 13, pp. 1597–1607, Sep. 2015, DOI. 10.1049/iet-gtd.2014.0981.
- [17] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. M. Poggi, "Discrete Wavelet Analysis," in *Wavelet Toolbox Users Guide*, R2019a, Natick, MA, USA: The MathWorks Inc., 2019, pp. 3.1-3.20.
- [18] N. Hingorani and L. Gyugyi, "Static Series Compensators: GCSC, TSSC, TCSC, and SSSC" in *Understanding FACTS*, New York, USA: IEEE PRESS, 2000, pp. 225-236.
- [19] F.V. Lopes, B.F. Küsel and K.M. Silva., "Traveling Wave-Based Fault Location on Half- Wavelength Transmission Lines," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 248-253, Jan. 2016, DOI. 10.1109/TLA.2016.7430086.
- [20] L. Andrade and T.P. Leão, "Fault Location for Transmission Lines Using Wavelet," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 6, pp. 1043-1048, Sep. 2014, DOI. 10.1109/TLA.2014.6893998.
- [21] C. Aguilera, E. Orduña and G. Rattá, "Directional Traveling-Wave Protection Based on Slope Change Analysis", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2025-2033, Oct. 2007, DOI. 10.1109/TPWRD.2007.899519.
- [22] S. Jiang, U.D. Annakkage and A.M. Gole, "A Platform for Validation of FACTS Models", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 484-491, Jan. 2006. DOI. 10.1109/TPWRD.2005.852301.

- [23] A. Abur and F.H. Magnago, "Use of time delays between modal components in wavelet based fault location", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 397-403, Aug. 2000, DOI. 10.1016/S0142-0615(00)00010-7.

- [24] M. Garcia-Gracia, A. Montañés, N. El Halabi and M.P. Comech, "High resistive zero-crossing instant faults detection and location scheme based on wavelet analysis", *Electric Power Systems Research*, vol. 92, pp. 138-144, Nov. 2012, DOI. 10.1016/j.epsr.2012.06.005.



Enrique Reyes-Archundia recibió el grado de M.C. en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en Cuernavaca, Morelos, en 1998 y el Doctorado en Ciencias en Ing. Eléctrica por el Instituto Tecnológico de Morelia en 2014. Actualmente es profesor investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia. Sus áreas de interés son Procesamiento de Señales y Protección de Líneas de Transmisión.



José A. Gutiérrez-Gnecchi recibió el grado de Doctorado en Ciencias por la Universidad de Manchester en Reino Unido, en 1997. Actualmente es profesor investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia. Su área de interés es el Desarrollo de Hardware y Software para aplicaciones de Instrumentación y Procesamiento de Señales.



Nestor F. Guerrero-Rodríguez recibió el grado de MC. En Ingeniería Electromecánica en la Universidad Central del Este (UCE) en República Dominicana y el Doctorado en Energías renovables en la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) en España. Actualmente es profesor de tiempo completo en la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM), en República Dominicana. Sus áreas de interés son los algoritmos de control vectorial para inversores.



Adriana C. Téllez en 1998, recibió el grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el CENIDET en Cuernavaca, Morelos y en 2010 el Doctorado en Ciencias Ingeniería Mecatrónica en el CENIDET. Actualmente es profesora investigadora en el Instituto Tecnológico de Morelia. Sus intereses de investigación incluyen sistemas digitales, mecatrónica, instrumentación y procesos de control.



Arturo Méndez-Patiño recibió el grado de M.C. en Ingeniería Electrónica en el CENIDET en Cuernavaca, Morelos y el Doctorado en Ciencias en Ing. Electrónica en la Universidad Politécnica de Valencia, en España. Actualmente es profesor investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia. Sus áreas de interés son el procesamiento avanzado de señales y su aplicación a sistemas de potencia.



Juan A. Salazar recibió el grado de ingeniero y Doctor en ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico de Toluca, en 2003 y 2014, respectivamente. Actualmente es profesor cátedra CONACyT adscrito al Instituto Tecnológico de Morelia. Sus líneas de investigación están enfocadas en la instrumentación, automatización y control de procesos.