

Protección de onda viajera utilizando el segundo momento central

^AKarina Lizbeth Escobar Sánchez, ^AErnesto Vázquez Martínez,
^BJuan Segundo Ramírez

^AUniversidad Autónoma de Nuevo León, FIME,
Doctorado en Ingeniería Eléctrica

^BPosgrado en Ingeniería Eléctrica, UASLP
karina.escobarsan@uanl.edu.mx

RESUMEN

Se describe un algoritmo de ultra-alta-velocidad para la protección de líneas de transmisión basado en el principio de propagación de ondas viajeras. El algoritmo utiliza el primer frente de onda generado en el punto de la falla y aplicando el segundo momento central caracteriza la distorsión de los frentes de onda al atravesar el cambio de impedancia entre líneas adyacentes, para determinar si ha ocurrido una falla interna o externa, independientemente de la configuración de la red eléctrica. Se analizó el desempeño del algoritmo mediante simulaciones en el programa de transitorios electromagnéticos PSCAD considerando fallas monofásicas y trifásicas, con distintos ángulos de inserción y resistencias de falla, mostrando una discriminación correcta entre fallas internas y externas.

PALABRAS CLAVE

Protección de línea de transmisión, ondas viajeras, momentos centrales, reconocimiento de patrones.

ABSTRACT

A ultra-high speed protection algorithm for transmission lines based on the principle of traveling-wave propagation is described. It uses the first wavefront generated at the point of the fault and applying the second central moment characterizes the distortion of the wave fronts when they cross the impedance change between adjacent lines, to determine if an internal or external fault has occurred, regardless of the configuration of the electrical network. The performance of the algorithm was analyzed through simulations in the PSCAD electromagnetic transient program considering single and three phases faults, with different fault insertion angles and fault resistance, showing a correct discrimination between internal and external faults.

KEYWORDS

Protection of transmission line, traveling waves, central moments, pattern recognition.

INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en la complejidad de los sistemas eléctricos de potencia es de gran importancia la detección de fallas en líneas aéreas de transmisión que son vulnerables a diversas contingencias como descargas atmosféricas, contacto de conductores con árboles o estructuras y caída de estructuras, entre otros, lo cual puede provocar cortocircuitos entre fases, arqueo en los aisladores, conductores caídos a tierra, u otro tipo de fallas. Cuando una falla de este tipo aparece en una línea es necesario desconectarla del resto del sistema, de no hacerlo implicaría un esfuerzo considerable sobre los elementos adyacentes, como transformadores y generadores, provocando una reducción considerable en su vida útil, además, se pone en peligro la integridad del sistema debido a una eventual pérdida de sincronismo entre generadores.

Cualquier falla que aparezca en una línea de transmisión debe ser desconectada lo más rápido posible, con el propósito de reducir los efectos provocados por el disturbio, y evitar grandes disturbios.¹ La necesidad de detectar la ubicación de la falla en la línea de transmisión de la manera más rápida y precisa posible ha sido cada vez más demandada. El uso de la tecnología de localización de fallas basadas en ondas viajeras se está implementando rápidamente a fin de minimizar el tiempo de inactividad del sistema eléctrico.

La determinación rápida de una falla con una precisión aceptable facilita la restauración oportuna del suministro eléctrico, dando como resultado mejoras en la confiabilidad y seguridad del sistema de potencia. Las protecciones de ondas viajeras de líneas de transmisión utilizan las señales de alta frecuencia generadas en el punto de aparición de la falla; los primeros métodos de protección basados en ondas viajeras se propusieron a inicios de 1970, sin embargo, su implementación práctica estaba limitada por la capacidad de los procesadores y el ancho de banda de los transductores de corriente y potencial. A través de los años se han propuesto una gran diversidad de métodos de ondas viajeras basados en la transformada Wavelet, distancia de Manhattan, técnica de doble correlación, entre otros.

Uno de los primeros métodos fue propuesto por Peter McLaren,² la técnica de correlación mide el grado de similitud entre variables e implica la correlación de una sección almacenada de la componente de onda inicial con las secciones de la componente de onda inversa. En³ se propone como detectar la falla mediante la comparación de las amplitudes de los módulos máximos de la transformación Wavelet en diferentes escalas. En⁴ utilizaron la distancia de Manhattan para encontrar las combinaciones exactas de medición de las ondas viajeras, mediante las cuales se calculan el tiempo en que ocurre la falla. Una de las técnicas más recientes es la Morfología Matemática,⁵ se basa en las formas y el tamaño de las señales que está en función de la polaridad y el tiempo de llegada de las ondas viajeras iniciales, el método es independiente del tipo de falla, impedancia de falla, ángulo y ubicación de falla.

En el esquema de protección diferencial⁶ las ondas viajeras llegan a las terminales de la línea y se refractan y reflejan en función de los valores relativos de las impedancias características de la línea y los componentes de red adyacentes, los tiempos de llegada se basan en la diferencia de tiempo entre el arribo de la primera onda viajera y las reflexiones posteriores.

Por su naturaleza transitoria, las ondas viajeras de voltaje y corriente en la línea de transmisión se pueden considerar como variables aleatorias, y es posible caracterizar su comportamiento mediante los momentos centrales (media, varianza, simetría y curtosis). En este caso se propone utilizar el segundo momento central para identificar las características de la onda viajera, y determinar si existe o no una falla en la línea de transmisión.

En este artículo, se propone un nuevo algoritmo para la protección de ultra-alta-velocidad en líneas de transmisión en sistemas eléctricos de potencia utilizando el primer frente de onda generado en el punto de falla lo que permite un menor tiempo de detección del disturbio. El algoritmo aplica el análisis del segundo momento central a las mediciones de voltaje y corriente de las ondas viajeras producidas por la falla y es capaz de discriminar entre fallas internas y externas, independientemente de la topología del sistema.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL ESQUEMA DE PROTECCIÓN DE ONDA VIAJERA

Cualquier falla que ocurre en una línea de transmisión, genera ondas viajeras de alta frecuencia. Esas ondas se propagan a través de la línea siendo continuamente atenuadas y distorsionadas. Al encontrar una discontinuidad parte de la onda pasará a otras secciones del sistema y el resto será reflejada al punto de falla donde, debido a su impedancia, se reflejará una onda de voltaje de polaridad opuesta y una onda de corriente de igual polaridad a las ondas de voltaje y corriente incidentes respectivos.⁷

El diagrama de *Lattice* de la figura 1 ilustra los frentes de ondas generados en el punto de falla. Una fuente inductiva refleja ondas de voltaje del mismo signo y una onda de corriente de signo opuesto a la respectiva onda incidente. Además, la dependencia en frecuencia de la fuente provoca un efecto exponencial en la señal reflejada.

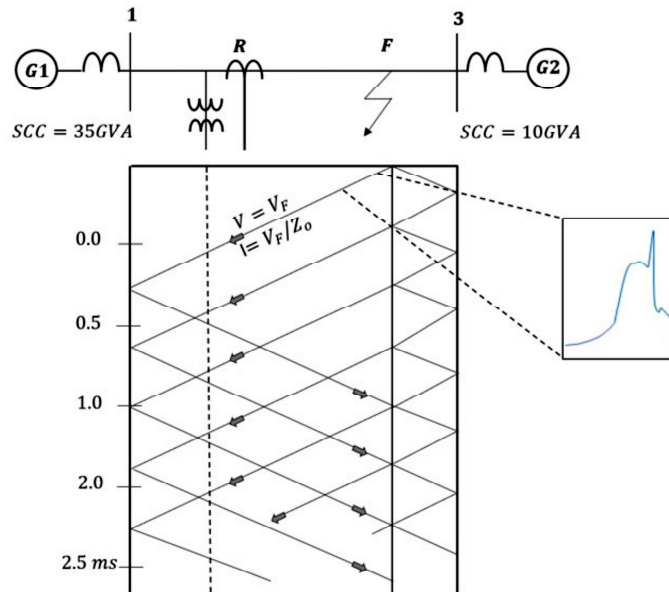


Fig.1. Diagrama de *lattice* de los frentes de onda generados por una falla.

La solución de D'Alembert de las ecuaciones de onda de voltaje, $v(x, t)$ y de corriente $i(x, t)$, en una línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos y sin pérdidas, está expresada como:⁸

$$\begin{aligned} v(x, t) &= F_1(x - ut) + F_2(x + ut) \\ i(x, t) &= [F_1(x - ut) + F_2(x + ut)] / Z_0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde x es la posición a lo largo de la línea, t es el tiempo, u es la velocidad de propagación y Z_0 es la impedancia característica de la línea. Si L y C representan la inductancia serie y la capacitancia paralelo por unidad de longitud respectivamente, entonces:

$$u = \frac{1}{\sqrt{LC}}; Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Las funciones F_1 y F_2 dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando. En general F_1 representa una onda que se desplaza en la dirección positiva de x a una velocidad u (onda directa), mientras que F_2 es una onda que se desplaza en la dirección negativa de x a una velocidad u (onda inversa); la relación entre el voltaje y la corriente en F_1 es Z_0 y en F_2 es $-Z_0$. Esta caracterización corresponde a una corriente positiva, representada como una carga positiva, circulando en la dirección positiva de x . Si el voltaje y la corriente son medidos en una localización x , es posible identificar la onda directa F_1 e inversa F_2 , tomando las señales denominadas S_1 y S_2 :

$$\begin{aligned} S_1 &= v(x, t) + Z_0 i(x, t) = 2F_1(x - ut) \\ S_2 &= v(x, t) - Z_0 i(x, t) = 2F_2(x + ut) \end{aligned} \quad (3)$$

Si la medición del voltaje y la corriente se realizan en la ubicación del relevador ($x=0$), entonces las señales S_1 y S_2 son:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2F_1(-ut) = v(0, t) + Z_0 i(0, t) \\ S_2 &= 2F_2(ut) = v(0, t) - Z_0 i(0, t) \end{aligned} \quad (4)$$

donde S_1 representa el cambio de señal en la ubicación del relevador debido a la onda directa y S_2 representa el cambio de señal en la ubicación del relevador debido a la onda inversa. Así, las señales S_1 y S_2 muestran en forma clara la diferencia entre las ondas viajeras directas (dirección positiva de x) e inversa (dirección negativa de x) en la ubicación del relevador.

El análisis anterior es válido para un sistema de potencia monofásico. En líneas de transmisión trifásicas los acoplamientos mutuos entre conductores dificultan el análisis del fenómeno de onda viajera en el dominio de fases. Para simplificar los cálculos es necesario descomponer las señales de fase en sus correspondientes modos de propagación, obteniéndose 2 modos aéreos y uno de tierra, cada uno con su propia atenuación y velocidad de propagación.⁹ En el caso de línea transpuestas los modos aéreos tienen la misma impedancia característica y velocidad de propagación. La transformación modal puede expresarse por:

$$\begin{aligned} \Delta v_m(t) &= S^{-1} \Delta v_f(t) \\ \Delta i_m(t) &= Q^{-1} \Delta i_f(t) \end{aligned} \quad (5)$$

donde $\Delta v_f(t)$, $\Delta i_f(t)$, son los voltajes y corrientes incrementales de fase y $\Delta v_m(t)$, $\Delta i_m(t)$, son sus correspondientes voltajes y corrientes modales, S y Q son las matrices de transformación. La descomposición modal permite analizar un sistema trifásico en función de tres modos de propagación tratándolos como 3 sistemas monofásicos.

EFFECTO DE COEFICIENTES DE REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN EN LOS FRENTE DE ONDAS VIAJERAS

Las ondas viajeras que se generan ante la aparición de un disturbio en la línea de transmisión se propagan por las líneas hasta que llegan a una discontinuidad; en este punto las ondas se dividen en una onda reflejada y una onda transmitida (figura 2), donde la magnitud de cada una de esas ondas está dada por los coeficientes de reflexión (k_R) y de refracción (k_T) los cuales son de la forma:

$$k_R = \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} \tag{6}$$

$$k_T = \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b}$$

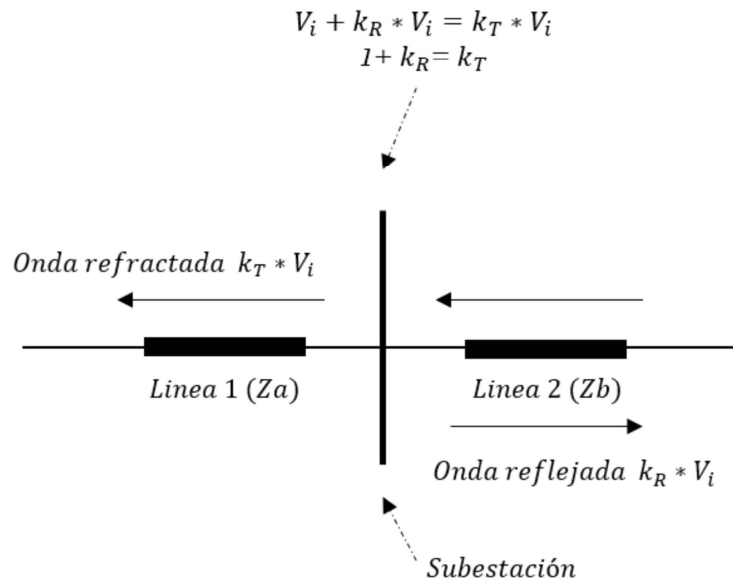


Fig.2. Comportamiento de la onda viajera al alcanzar una discontinuidad en una red eléctrica.

siendo Z_a y Z_b las impedancias características de cada una de las líneas respectivamente.

Los frentes de ondas viajeras propagándose por una línea de transmisión experimentan una modificación en su contorno al atravesar una discontinuidad provocada por un cambio de impedancia. En el caso de que ambas líneas sean idénticas, el contorno de la onda viajera no se ve afectado, y no existe onda reflejada. Esta situación es difícil que se presente en sistemas eléctricos de potencia reales. Así mismo las ondas viajeras que se propagan a través de una línea de transmisión homogénea se ven mínimamente afectadas en su contorno aun considerando pérdidas por atenuación.¹⁰

SEGUNDO MOMENTO CENTRAL

Por su naturaleza transitoria, las ondas viajeras de voltaje y corriente en la línea de transmisión se pueden considerar como variables aleatorias, y es posible caracterizar su comportamiento mediante los momentos centrales (media, varianza, simetría y curtosis).¹¹

El k -th momento central m_k de una variable aleatoria X es definido como:

$$m_k = E[(x - E[x])^k] \quad (7)$$

donde E es el valor esperado para una señal entre $[m, M]$, el momento central m se determina como:

$$m_k = \int_m^M (x - u)^k f(x) dx \quad (8)$$

Por lo tanto, el segundo momento central (SMC) para una señal se define como:

$$m_k = \int_0^T (x - u)^2 dx = E[(x - u)]^2 \quad (9)$$

El objetivo de utilizar el SMC es clasificar los agrupamientos formados por las clases de fallas internas y externas de la línea de transmisión a través de las mediciones de las ondas viajeras de voltaje y corriente. Se determina el segundo momento central de cada señal de onda viajera y se compara con un umbral previamente definido, si la magnitud supera el umbral, el evento se identifica como falla interna.

El SMC se puede implementar con diferentes tipos de señales; se pueden utilizar las señales Δi en el modo aéreo 1 o se pueden utilizar las señales ΔS_1 , en el modo aéreo 1 o en el modo de tierra 0; esta segunda opción permite no utilizar las señales transitorias de voltaje, lo cual es una ventaja debido al ancho de banda reducido que tienen los divisores capacitivos de potencial que se utilizan para la medición de voltaje en sistemas de alta tensión.¹²

PRE-PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Los frentes de ondas viajeras generados por una falla contienen información sobre la naturaleza de las discontinuidades por las que han sido modificadas, esta información se encuentra en los frentes de onda de corrientes y voltajes que llegan a la ubicación del relevador. El algoritmo utiliza el primer frente de la señal originado por el colapso de voltaje en el punto de falla. Se realiza un pre-procesamiento de las señales de corriente y voltaje, el cual consiste en la aplicación de un filtro delta con el objetivo de remover el estado estable de la señal original.¹³ Las señales incrementales son usadas por las protecciones de alta velocidad ya que contienen la información de las ondas viajeras inyectadas por la falla; para obtener las señales incrementales las señales de pre-falla de estado estable se restan a las señales de post-falla:

$$\begin{aligned} \Delta v(t) &= v(t) - v(t - nT) \\ \Delta i(t) &= i(t) - i(t - nT) \end{aligned} \quad (10)$$

donde n es el número de ciclos y T corresponde a un período de la señal a frecuencia fundamental (60 Hz), de esta forma es posible obtener las señales incrementales para la señal en cada modo de propagación:

$$\Delta S_1^m = Z_0^m \cdot \Delta i^m - \Delta v^m \quad (11)$$

La longitud de la ventana de datos es de gran importancia para la implementación del algoritmo, si el número de datos por ventana es muy pequeño, el algoritmo no tendrá suficiente información para identificar correctamente la ubicación de la falla, la cual se basa en el cambio de impedancia que experimenta los frentes de onda para una falla externa, y el cual no existe para una falla interna. La selección de la ventana se hizo en forma empírica siendo de 25 μs , de esta forma se logra una

buena caracterización del frente de onda originado por el cortocircuito. Ventanas de datos sucesivas se forman con 25 muestras de la señal ΔS_1 con un intervalo de 1 μs entre muestras, lo que representa una frecuencia de 1 MHz.

Con el propósito de que el algoritmo funcione en cualquier sistema de potencia, independientemente de su configuración y voltaje de operación, se normalizan las señales ΔS_1 para que estén entre 0 y 1; con el propósito de no modificar el contorno de los frentes de onda, estos se escalan de la forma:

$$t_n = \begin{cases} \frac{\Delta S_1}{\max(\Delta S_1)} & \text{si } |\max(\Delta S_1)| > |\min(\Delta S_1)| \\ \frac{\Delta S_1}{\min(\Delta S_1)} & \text{si } |\max(\Delta S_1)| < |\min(\Delta S_1)| \end{cases} \quad (12)$$

Los vectores t_n corresponden a las versiones normalizadas de los frentes de onda de cada ventana de muestreo.

UMBRALES

Los frentes de ondas son almacenados en una ventana de datos (25 μs) para calcular el SMC. El valor del segundo momento central se compara con un umbral, con el propósito de establecer si el frente de onda corresponde o no a una falla interna. Así, cuando tres instantes consecutivos cumplen la condición de falla interna se manda el disparo; cuando se trata de una falla externa o cuando hay falla el contador se reinicializa.

El algoritmo propuesto utiliza dos umbrales, el primero determina si la señal de onda viajera pertenece a una falla y el segundo identifica si la falla es externa o interna aplicando el segundo momento central.

UMBRAL ϵ_f

El umbral denominado ϵ_f se utiliza para la detección de fallas. En condiciones de estado estable las señales incrementales son prácticamente cero, sin embargo, cuando ocurre una falla la señal incremental ΔS_1 (o ΔI_0 , ΔI_1) se manifiesta,

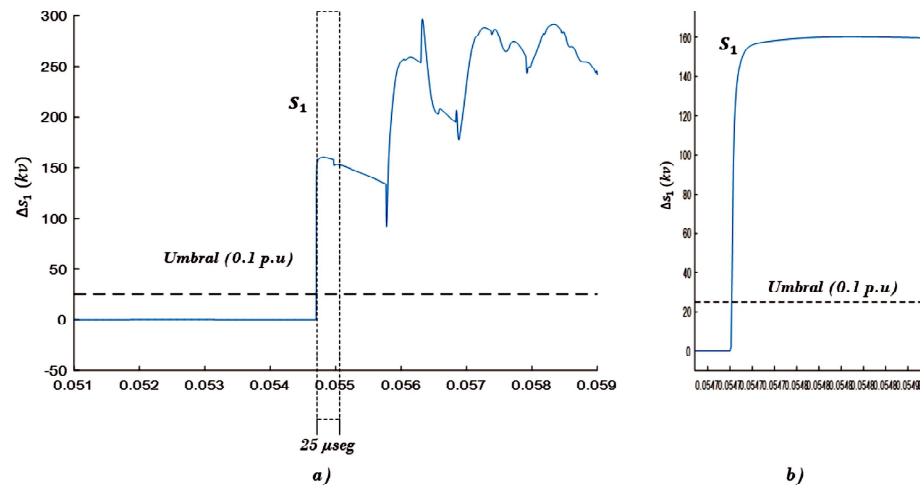


Fig.3. Forma de onda de la señal ΔS_1 .
a) señal de entrada. b) Acercamiento de la forma de onda (25 muestras).

indicando la aparición de un evento (que puede ser un cortocircuito o un transitorio) en la línea de transmisión, de tal forma que:

$$\begin{aligned} \Delta S_1 = 0 & \quad \text{Estado estable} \\ \Delta S_1 > \varepsilon_f & \quad \text{Cortocircuito} \end{aligned} \tag{13}$$

El valor seleccionado para ε_f es de 0.1 pu, tomando como base el voltaje de operación de la línea de transmisión. La figura 3 muestra una ventana de datos usada por el algoritmo, donde la línea horizontal corresponde al umbral ε_f .

UMBRAL ε_{smc}

Se estableció un criterio para la identificación de fallas internas y externas aplicando el algoritmo del segundo momento central. Este criterio fue determinado de forma heurística a partir de las 200 pruebas realizadas; así, si el valor del SMC de la ventana de datos es mayor que el umbral (ε_{smc}) se determina que la falla está en la línea protegida, en caso contrario, la falla ocurre en la línea adyacente.

El valor de este umbral depende de las características de la señal de entrada y de la frecuencia de muestreo que se utilice en el proceso.

En la tabla I se muestran los valores del umbral para las cuatro combinaciones analizadas en esta investigación. En el caso de una frecuencia de muestreo de 100 kHz, este corresponde a la evaluación de escenarios utilizando el simulador en tiempo real RTDS, siendo ésta la máxima frecuencia de muestreo que permite el equipo. El objetivo de la evaluación del algoritmo con esta frecuencia de muestreo menor es analizar la factibilidad de implementación en equipos con este tipo de restricción.

Tabla. I. Valores del umbral.

Señal de entrada	Frecuencia de muestreo	Valor ε_{smc}
ΔS_1	1 MHz	0.2
ΔI_0	1 MHz	0.1
ΔI_1	1 MHz	0.126
ΔS_1	100 kHz	0.112

SISTEMA DE PRUEBA

Para el estudio de sistemas eléctricos se requiere el modelado de sus diferentes elementos utilizando modelos matemáticos que reflejan de forma aproximada la realidad de los fenómenos físicos que ocurren en el sistema, tanto en estado transitorio como estacionario. Por tal motivo, la utilización de un modelo dado depende del tipo de problema a analizar. El estudio del comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos de potencia y sus diferentes componentes se ha realizado tradicionalmente utilizando simuladores, ya que otros métodos más directos de estudio como realizar pruebas en el sistema real, implican aplicar intencionalmente un disturbio en el sistema y presenta el riesgo de ocasionar problemas de interrupción del servicio eléctrico con sus consecuencias técnicas, económicas y sociales.

El simulador de transitorios electromagnéticos PSCAD incluye modelos matemáticos de los distintos elementos de una red eléctrica, que han sido

validados en pruebas experimentales, donde se realiza una comparación entre el comportamiento de las variables eléctricas que son medidas físicamente y las mismas variables que son calculadas. El PSCAD incluye una biblioteca de modelos de simulación, que introduce el modelado de la máquina síncrona (polos salientes y polos lisos), el modelado de sus controles de tensión y frecuencia, el modelado de la línea de transmisión (C.A. y C.D.), el modelado del transformador, el modelado de los elementos de compensación y el modelado de las cargas (estáticas y dinámicas), entre otros. Este tipo de simuladores se utilizan en la industria eléctrica para desarrollar sistemas de control y para analizar el comportamiento dinámico de sistemas multi-máquinas.

Las simulaciones de los distintos escenarios de falla se realizaron en un sistema de potencia de 230 kV, con dos generadores (con capacidades de cortocircuito de 35 y 10 GVA respectivamente) conectados a través de dos líneas de transmisión con diferente geometría de conductores e impedancia característica. El sistema se muestra en la figura 4, y los parámetros se muestran en la tabla II.

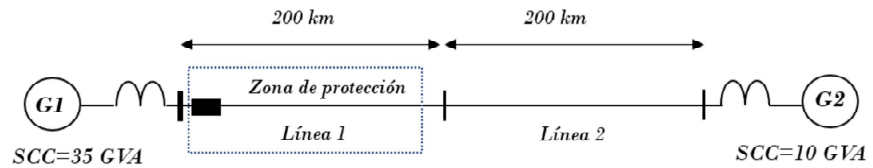


Fig.4. Sistema de prueba.

Tabla. II. Datos de las líneas de transmisión en el sistema de prueba.

Línea	$Z_0(\Omega)$	Longitud (km)	Conductores por fase
1	394.65	200	1
2	318.75	200	2

Para las pruebas de desempeño no se requiere simular un sistema de mayor tamaño, ya que el algoritmo utiliza las primeras ondas incidentes producidas por un cortocircuito.

RESULTADOS

Se analizaron 200 casos de simulaciones con el objetivo de demostrar el desempeño del algoritmo. Los escenarios de simulación en PSCAD son fallas trifásicas (ABC) y monofásicas (A-G) con diferentes ángulos de inserción de falla y diferentes valores de resistencia de falla, utilizando una frecuencia de muestreo de 1 MHz. Se analizó para distintos porcentajes de línea, tal como se muestra en la tabla III.

Tabla. III. Escenarios de simulación.

Tipo de falla	Ángulo de inserción de falla	Resistencia de falla (Ω)	Fallas en L1 (%)	Fallas en L2 (%)
A-G	4°, 30°, 45° y 90°	0 y 50	1, 10, 20, 30, 50, 70, 90 y 99	1, 5, 10, 30, 50, 70 y 90
ABC	4°, 30°, 45° y 90°	0 y 50	1, 10, 20, 30, 50, 70, 90 y 99	1, 5, 10, 30, 50, 70 y 90

Para los casos de simulación en tiempo real, se realizaron 70 casos de simulación en RTDS de fallas trifásicas (ABC) sólidas y monofásicas (A-G) con resistencia de falla de 0 y 50 Ω, con ángulo de inserción de falla de 90° y simuladas en distintas ubicaciones en las líneas 1 y 2 (tabla IV).

Tabla.IV. Escenarios de simulación en tiempo real (RTDS).

Tipo de falla	Fallas en L1 (%)	Fallas en L2 (%)
A-G	1, 10, 20, 30, 50, 70 y 90	5, 10, 30, 50, 70 y 90
ABC	1, 10, 20, 30, 50, 70 y 90	5, 10, 30, 50, 70 y 90

Fallas cercanas al nodo local

Una onda viajera generada por una falla cerca del punto donde está instalada la protección puede ser difícil de detectar, debido a que las ondas viajeras llegan rápidamente a la ubicación del relevador, reflejándose continuamente y ocasionando distorsión en el frente de onda originado por la falla (falla kilométrica).⁷ En la figura 5 (a) se muestra la primera ventana de datos producida por una falla ABC y una falla A-G sólida simulada al 1% de L1; en la figura 5(b) se indica el cálculo del SMC para la secuencia de ventanas después de la falla; una vez que el valor del SMC determinado para tres ventanas consecutivas es mayor que el umbral, se determina que se trata de una falla en L1.

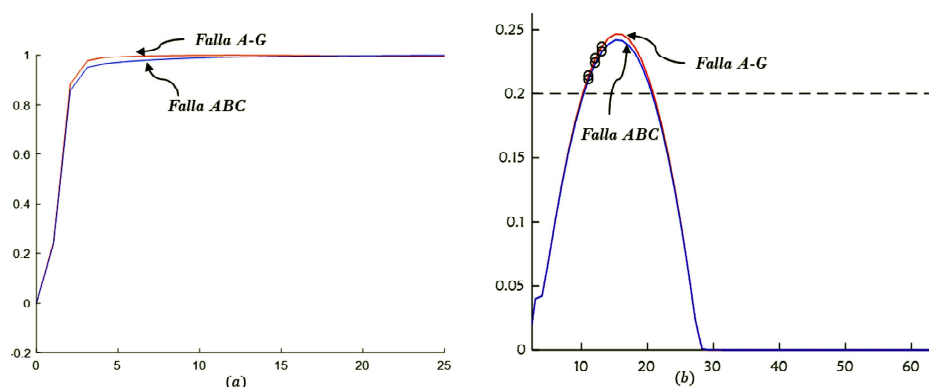


Fig.5. Falla ABC y A-G sólida al 1% de L1. a) Ventana de datos. b) SMC.

Fallas cercanas a la subestación remota

Se evaluó la respuesta del algoritmo para una falla A-G sólida con ángulo de inserción de 90° al 99% de la línea 1 y al 1% de la línea 2. Estas pruebas tienen el objetivo de verificar la selectividad del algoritmo, debido a que las ventanas de datos para fallas internas y externas son similares. En la figura 6(a) se muestran las primeras ventanas (primer frente de onda) debido a la falla y en la figura 6(b) se indica el cálculo del SMC para las ventanas de datos que se forman después de la falla. Se puede apreciar que el algoritmo identifica correctamente la falla interna.

Pruebas con señales de corriente

El algoritmo de protección propuesto se puede implementar con señales de corriente incremental en modo tierra (ΔI_0) o aéreo uno (ΔI_1); en este caso se simuló fallas ABC con resistencia de falla de 50 Ω y ángulo de inserción de falla de 45° y fallas monofásicas A-G sólidas con un ángulo de inserción de falla

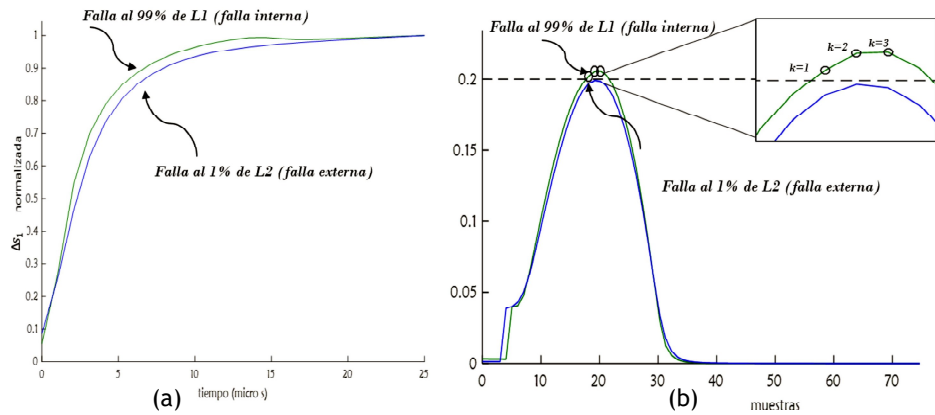


Fig. 6. Identificación de una falla A-G sólida con ángulo de inserción de falla de 90° . a) Ventana de datos. b) SMC.

de 45° ; ambos tipos de fallas se simularon en L1 al 20, 30, 50, 70 y 90% y en L2 al 5, 30, 50, 70 y 90%. En la figura 7 se muestran los resultados utilizando ΔI_0 como señal de entrada y en la figura 8 se muestran los resultados utilizando ΔI_1 . En todos los casos, el valor del SMC supera el umbral (ϵ_{smc}) solo cuando se trata de una falla interna (tres valores consecutivos).

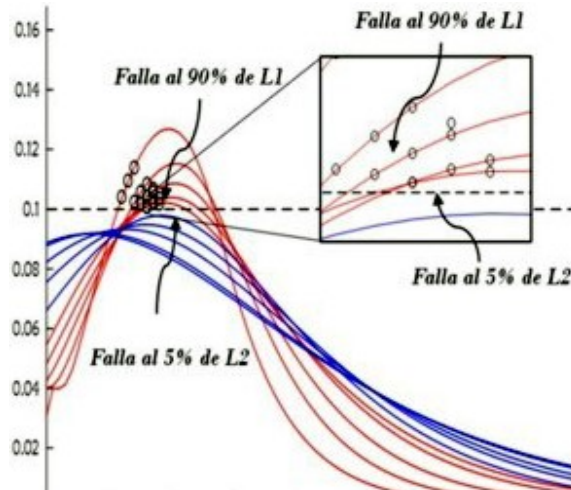


Fig. 7. Identificación de fallas monofásicas utilizando ΔI_0 .

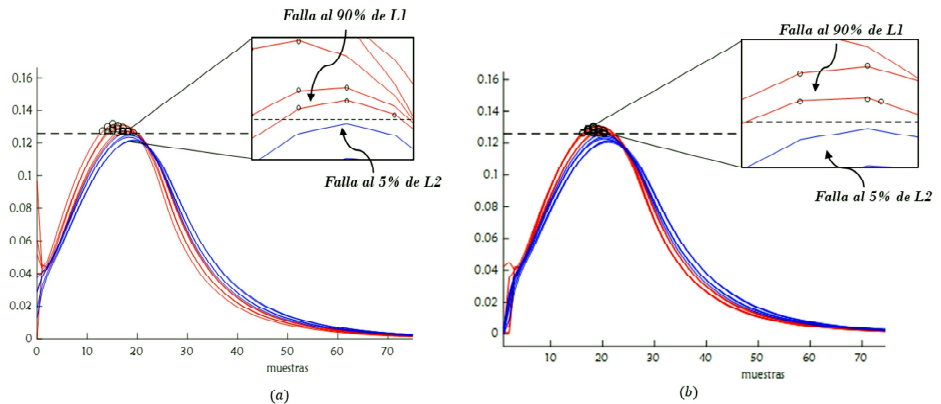


Fig. 8. Identificación de fallas utilizando ΔI_1 . a) Fallas monofásicas. b) Fallas trifásicas.

Pruebas en RTDS

En esta sección se describen los resultados de las simulaciones en tiempo real, utilizando una frecuencia de muestreo de 100 kHz. En las figuras 9 y 10 se muestran las ventanas de datos (la primera después de ocurrida la falla) y el cálculo del SMC para las ventanas de datos formadas a partir del instante de falla, para fallas monofásicas A-G y fallas trifásicas con un ángulo de inserción de falla de 90°. Las fallas en L1 se simularon al 20, 30, 50, 70 y 90% y las fallas en L2 se simularon al 5, 30, 50, 70 y 90%. En todos los casos el algoritmo determina como fallas internas (en L1) todos los casos donde el valor del SMC (tres valores consecutivos) es mayor que el umbral de 0.112.

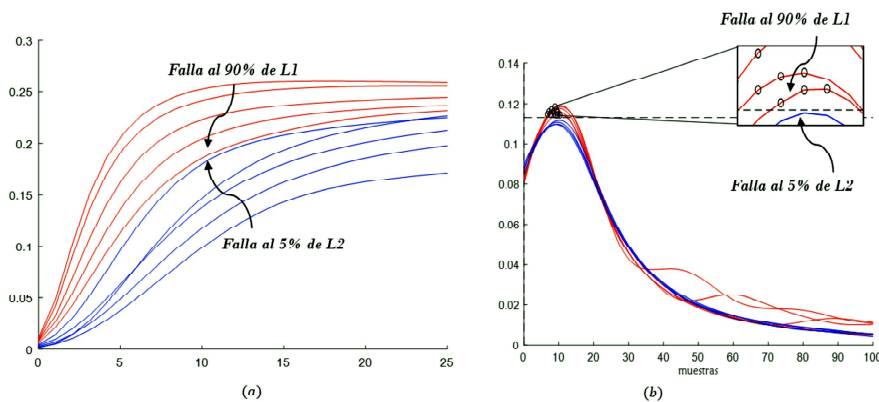


Fig.9. Identificación de fallas monofásicas utilizando simulaciones en tiempo real. a) Ventana de datos. b) SMC.

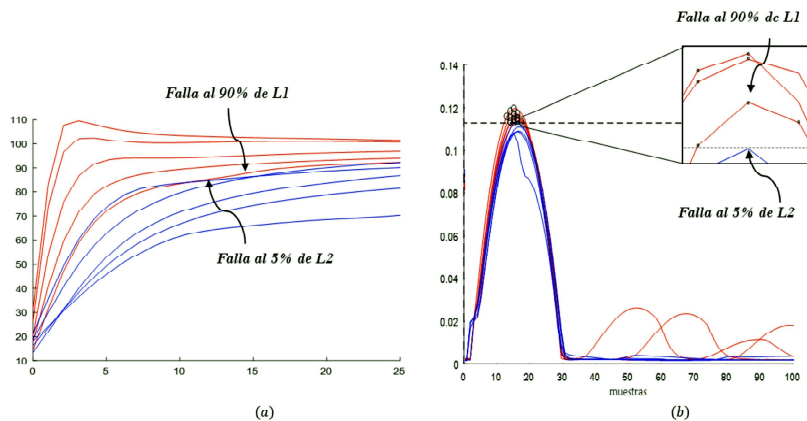


Fig.10. Identificación de fallas trifásicas utilizando simulaciones en tiempo real. a) Ventana de datos. b) SMC.

CONCLUSIÓN

El algoritmo es capaz de clasificar fallas internas y externas utilizando el SMC que permite la agrupación de las señales de acuerdo con el primer frente de onda generado por una falla; el SMC realiza patrones de comportamiento en un tiempo de respuesta rápido debido al poco procesamiento computacional que requiere.

Este algoritmo puede ser aplicado a cualquier sistema de potencia independientemente de los parámetros del mismo. La normalización permite un

reconocimiento de los patrones con mayor facilidad y limita los valores de las señales de entrada en un rango de $[-1,+1]$. El tiempo de operación del algoritmo es de $25 \mu\text{s}$ que corresponde a la longitud de la ventana de datos. A diferencia de los esquemas diferenciales de onda viajera, este algoritmo no requiere un canal de comunicación para proteger el 100% de la línea.

Los umbrales utilizados para la identificación de fallas se determinaron en forma heurística a partir de 200 casos de simulación, de esta forma se determinó el valor de 0.2 para las señales ΔS_1 . Se realizó un estudio para evaluar los umbrales de las señales de corrientes, obteniendo el valor de 0.1 para ΔI_0 y 0.126 para ΔI_1 . El umbral para las pruebas simuladas en tiempo real con el software RTDS es de 0.112, este se determinó de forma heurística de acuerdo con los resultados de las 70 pruebas realizadas.

El algoritmo tiene la capacidad de identificar el tipo de falla (interna/externa) para ángulos de inserción de falla (4° - 90°). Las pruebas incluyeron fallas críticas que pueden presentarse en las líneas de transmisión, que son fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje, bajo estas condiciones el algoritmo tiene un buen desempeño, teniendo problemas únicamente para fallas que ocurren exactamente en el cruce por cero de la onda de voltaje.

REFERENCIAS

1. D. N. Voropai, N. I. y Efimov, Analysis of blackout development mechanisms in electric power systems, in 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, no. May 2005. IEEE, jul 2008, pp. 1-7.
2. P. A. Crossley and P. G. McLaren, Distance protection bases on traveling waves, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, pp. 2971-2983, 1983.
3. D. X. y. Z. B. F. Su Qianli, New approach of fault detection and fault phase selection based on initial current traveling waves, IEEE, vol. 1, pp. 393-397, 2002.
4. G. R. Liang, Wang Fei, A general fault location method in complex power grid based on wire-area traveling wave data acquisition, Electrical Power and Energy Systems, vol. 1, pp. 213-218, 2016.
5. M. S. F. Namdari, High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, pp. 246-253, 2017.
6. T.-d. L. Protection, "SEL-T400L," 2015.
7. J. Castruita. y. Ernesto Vázquez. M. Jorge, Nuevo algoritmo de protección de distancia basado en el reconocimiento de patrones de onda viajera, p. 124, 2004.
8. O. L. Chacón, Ernesto Vázquez, Héctor J. Altuve, Protección de onda viajera de líneas de transmisión, no. 1, 1978.
9. N. V. y. K. S. y. P. J. Carvalho, C. G. y Souza, Representation of transmission lines in modal domain using analytical transformation matrices, in 2010 IEEE-PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), no. 1. IEEE, nov 2010, pp. 50-56.

10. Z. Q. Bo and Su Qianli. New approach of fault detection and fault phase selection based on initial current traveling waves, Department of Electrical Engineering, Tshinghua University, Beijing, 100084, China. 2002.
11. A. y. S. R. y. K. G. Sharma, R. y Sharma, Means Moments and Newton's Inequalities, 2017.
12. C. i. Chien, Y.-c. Wang, K.-h. Chien, and H.-k. Chiou, A Low Power, Wide Bandwidth K-band Transformer Feedback Low Noise Amplifier with Current Reused Topology, proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2014, pp. 417-419, 2014.
13. S. R. AP Apostolov, D Tholomier, superimposed components based sub-cycle protection of transmission lines, IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 592-597, 2004.

