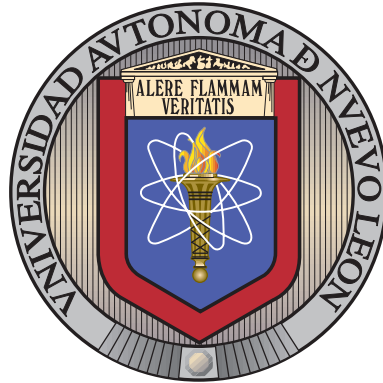


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**PROTECCIÓN DE ONDA VIAJERA
UTILIZANDO EL SEGUNDO MOMENTO
CENTRAL**

POR

ING. KARINA LIZBETH ESCOBAR SÁNCHEZ

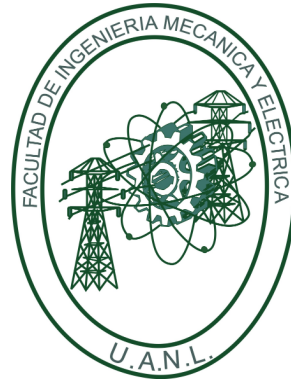
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

JULIO 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**PROTECCIÓN DE ONDA VIAJERA
UTILIZANDO EL SEGUNDO MOMENTO
CENTRAL**

POR

ING. KARINA LIZBETH ESCOBAR SÁNCHEZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

JULIO 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

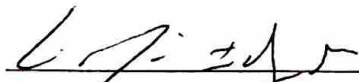
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «**PROTECCIÓN DE ONDA VIAJERA UTILIZANDO EL SEGUNDO MOMENTO CENTRAL**», realizada por el alumno Ing. Karina Lizbeth Escobar Sánchez, con número de matrícula 1880623, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica .

El Comité de Tesis



Dr. Ernesto Vázquez Martínez

Asesor



Dra. Gina Idárraga Ospina


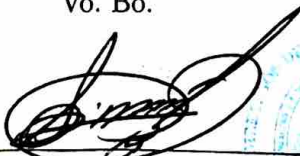
Revisor



Dr. Juan Segundo Ramírez

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, julio 2018

RESUMEN

Publicación No. _____

Karina Lizbeth Escobar Sánchez, M.C. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018

Profesor asesor: Dr. Ernesto Vázquez Martínez

El objetivo central de la tesis consiste en desarrollar un nuevo algoritmo de protección de líneas de transmisión basado en ondas viajeras con capacidad de detectar fallas dentro de la línea protegida de manera rápida y selectiva. El algoritmo propuesto tiene como objetivo proteger el 100% de la línea, pero a diferencia de la protección diferencial, solo utiliza la información de un extremo de la línea.

Debido al incremento en la complejidad de los sistemas eléctricos de potencia es de gran importancia la detección de fallas en todos los elementos que componen el sistema, aún más en las líneas aéreas de transmisión ya que por ocupar un área geográfica muy extensa, se vuelven vulnerables a diferentes fallas y eventos transitorios como descargas atmosféricas, caída de ramas de árboles, choque entre líneas, cortocircuitos, etc.

La información de entrada al algoritmo son las señales de onda viajera generadas en el punto de aparición de la falla. Estas señales contienen información sobre el tipo de falla y su localización. El principio de operación se basa en la distorsión que sufre el primer frente de onda originado por un cortocircuito. En el caso de una falla externa a la línea protegida, el frente de onda alcanza la ubicación de la protección a través de la discontinuidad que representa el cambio de la impedancia característica entre la línea propia y la adyacente. Esta discontinuidad modifica el contorno del frente de onda. Sin embargo en el caso de fallas internas, los frentes de onda solo son

afectados por la atenuación de la propia línea.

Los actuales algoritmos de protección de líneas de transmisión han mostrado que pueden detectar y localizar fallas usando el principio de onda viajera, estos algoritmos comparan el contorno de las ondas incidentes y reflejadas entre la ubicación de la protección y el punto de falla para determinar la ubicación de un cortocircuito, sin embargo, estos algoritmos tienen problemas de confiabilidad ante fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje.

El algoritmo propuesto discrimina entre una falla interna o externa a partir del reconocimiento del contorno del frente de onda que arriva a la ubicación de la protección. El segundo momento central realza patrones de comportamiento y de esta forma clasifica las fallas internas y externas a través de un umbral establecido de forma heurística. Si el segundo momento central supera este umbral se determina como falla interna, por el contrario si no supera el umbral se establece que es una falla externa.

Se analizó el desempeño del algoritmo propuesto mediante casos de simulación considerando fallas más comunes y las más críticas de detectar, como es el caso de cortocircuitos cercanos a la ubicación de la protección, cortocircuitos en el extremo de la línea protegida y los que ocurren cerca del cruce por cero. Los diferentes escenarios se simularon en el programa de transitorios electromagnéticos PSCAD y en un simulador de tiempo real (RSCAD).

Los resultados muestran que el algoritmo satisface los requerimientos de confiabilidad, selectividad, sensibilidad y tiempo de operación impuestos para la protección de línea de transmisión de alto voltaje, y representa la base para implementar un esquema de protección de líneas de transmisión de alta velocidad basado en ondas viajeras.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

1.1 MOTIVACIÓN

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 y/o estructuras, y caída de estructuras, entre otros.

En una línea de transmisión se pueden presentar diversas condiciones transitorios y los relés de protección debe tener la capacidad de determinar la localización donde se presenta el evento, independientemente del origen del evento, de la condición de operación en la red eléctrica y de la topología de a red. Por ejemplo, en el caso de líneas paralelas, la determinación del punto de falla no es precisa, debido al efecto de acoplamiento mutuo.

Debido a que la línea de transmisión es un elemento de gran longitud generalmente se ve sometido a condiciones adversas, como viento, lluvia, nieve, accidentes, descargas atmosféricas o contaminación en aisladores, 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, pues 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]. En los últimos años se ha incrementado el número de disturbios en el mundo, tal es el caso del apagón de la Costa Oriental en el año 2003, debido a un colapso de voltaje tres líneas de transmisión se desconectaron casi al mismo tiempo por la operación incorrecta de protecciones; otro caso es el de Irlanda del Norte en el 2010, el disturbio se produjo por acumulación de nieve en conductores que alcanzaron hasta los 150 *mm*, afectando a 138 mil usuarios por 6 días.

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 mejorar la eficiencia para minimizar el tiempo de inactividad del sistema eléctrico.

Con base a lo anterior, la motivación central del tema de tesis consiste en el desarrollo de un algoritmo de protección de líneas de transmisión, basado en las ondas de alta frecuencia generadas en el punto de ubicación de la falla, que son las primeras en manifestarse ante un disturbio, las cuales contienen información sobre el tipo de falla y su localización.

Por su naturaleza transitoria, las ondas viajeras de voltaje y corriente en la línea de transmisión se puede 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.

1.2 ANTECEDENTES

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.

La ubicación de una falla en una línea aérea de transmisión utilizando ondas viajeras, utiliza 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. El incremento en la complejidad de las redes eléctricas y la necesidad de recuperar rápidamente el sistema, impulsaron la investigación con respecto a los métodos de localización de fallas basado en el estudio de las ondas viajeras.

Los algoritmos basados en impedancia también se han utilizado en protección de líneas de transmisión, sin embargo, estos se ven afectadas por las condiciones de carga, la resistencia de falla y por la presencia de capacitores [2].

Las técnicas de ondas viajera son generalmente más precisas que los métodos basados en impedancia, ya que el fenómeno de propagación es inmune a las variaciones de las componentes de 60 Hz del voltaje y la corriente.

Uno de los primeros métodos fue propuesto por Peter Mc Lauren [3], la técnica de correlación mide el grado de relación entre variables, es decir, el criterio de la función de correlación cruzada implica la correlación de una sección almacenada de la componente de onda inicial con las secciones de la componente de onda inversa.

La amplitud de las ondas que provienen de los cambios de impedancia entre líneas es de mayor magnitud a las ondas de desplazamiento inversas que se reflejan en la falla o en el punto de salida. El tiempo utilizado para analizar las ondas reflejadas depende del punto de falla en la línea de transmisión.

En 2002, Su Qianli y Z. Q. Bo, [4] propusieron un algoritmo para detección de fallas y selección de fase fallada en base al primer frente de onda de corriente, básicamente el algoritmo descompone el primer frente de onda de corriente y la detección de la falla se lleva a cabo en base a la forma en que esta dispersa la energía en el espectro de frecuencia. Se puede detectar la falla mediante la comparación de las amplitudes de los módulos máximos de la transformación Wavelet en diferentes escalas. El método de selección de fase fallada tiene una respuesta rápida, es inmune a la saturación de TC y no es afectada por la resistencia de falla y la configuración del sistema.

En 2016, R. Liang, Wang y Fu Guoqing, [5] utilizaron la técnica del registro de onda viajera (TWR) para detectar con precisión el tiempo de llegada de la onda inicial originada por el punto de falla, esta utiliza la distancia de Manhattan para encontrar las combinaciones exactas de medición, mediante las cuales se calcula el tiempo en que ocurre la falla. Tiene como ventaja la alta precisión y robustez, sin embargo, cuando una TWR se rompe, se registra un tiempo incorrecto de llegada de la onda inicial, por lo que la precisión de la localización no puede garantizarse

Más recientemente se han estudiado técnicas como la Morfología Matemática (MM), en 2017, F. Namdari y M. Salehi [6], trabajaron con esta técnica no lineal de alta precisión y bajo volumen de cálculo, que se puede usar para extraer la información de señales de alta frecuencia relacionado con las ondas viajeras. El método 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.

Recientemente en [7] se ha propuesto un algoritmo de ultra alta velocidad que

usa cantidades incrementales de onda viajera con un algoritmo de localización de fallas. El algoritmo utiliza información de las ondas viajeras incidentes en terminales de la línea. A partir de esta información, que esta sincronizada en tiempo, y considerando la longitud de la línea y la velocidad de propagación de las ondas viajeras, se estima el punto de falla. El subsistema de localización de fallas basado en onda viajera utiliza convertidores analógico a digital de alta velocidad que muestrean las corrientes de fase a 1,56 MHz, proporcionando una respuesta robusta con mejor precisión bajo diferentes condiciones de falla.

El esquema de protección diferencial de onda viajera propuesto en [8] utiliza ondas viajeras de corriente para detectar fallas con tiempos de funcionamiento de 1 a 5 ms, en función de la longitud de la línea. 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 de las ondas viajeras se miden con una referencia de tiempo para calcular la ubicación de la falla, basándose en la diferencia de tiempo entre el arribo de la primera onda viajera y reflexiones posteriores.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo de la tesis consiste en desarrollar 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 la falla lo que permite un menor tiempo de detección del disturbio. El algoritmo propuesto aprovecha el cambio que sufre el primer frente de onda al pasar por una discontinuidad en el sistema eléctrico de potencia (SEP), representado por el cambio de impedancia en la línea, es decir, el cambio que es causado por la dependencia frecuencial en los coeficientes de reflexión y refracción de la línea.

El uso del primer frente de onda permite reducir el tiempo de detección de

la falla y tiene la ventaja de poseer poca contaminación provocada por sucesivas reflexiones de la onda de la línea.

El algoritmo propuesto aplica el análisis del segundo momento central a las muestras de voltaje y corriente de las ondas viajeras producidas por la falla. El algoritmo es capaz de discriminar entre fallas internas en la línea protegida y fallas externas, independientemente de la topología del sistema. La evaluación del desempeño del algoritmo se realizará la comparación con otros métodos reportados en la literatura.

Para evaluar la respuesta del algoritmo, se verificará su comportamiento bajo condiciones de fallas más comunes y bajo condiciones críticas, es decir, se realizan pruebas monofásicas y trifásicas con distintos ángulos de inserción de fallas y resistencias de fallas, se realizan pruebas con distintas impedancias características entre líneas con la intención de evaluar la sensibilidad del algoritmo, aún cuando las diferencias entre impedancias características es casi nula. Así mismo se hace una evaluación de las ventajas y desventajas del algoritmo con respecto a los reportados en la literatura.

1.4 ALCANCES

El alcance de este proyecto es desarrollar un nuevo algoritmo de protección de distancia basado en el comportamiento de las ondas viajeras que se generan en la línea de transmisión, con el objetivo de tener una correcta clasificación de fallas internas y externas utilizando el método de segundo momento central, utilizando una ventana de muestreo de $25 \mu s$ para una frecuencia de muestreo de 1 MHz.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el capítulo 1 se presenta una introducción de la aplicación de la onda viajera en la protección de los sistemas eléctricos de potencia, se describe el objetivo, limitaciones y las características principales de la detección de fallas de ultra-alta velocidad en líneas de transmisión. Además se describe algunos de los algoritmos de protección basados en onda viajera.

En el capítulo 2 explica el fenómeno de propagación de ondas viajeras, se describen las principales características y la importancia del análisis modal en líneas de transmisión.

En el capítulo 3 se explica el funcionamiento de los algoritmos actuales basados en ondas viajeras. Se describe las características principales y los problemas de aplicación en la protección de líneas de transmisión.

El capítulo 4 explica la estructura del algoritmo propuesto, que hace uso de la técnica del segundo momento central para discriminar entre fallas internas y externas utilizando el primer frente de onda originado por la falla. Se describe en detalle cada una de las etapas del algoritmo.

En el capítulo 5 se muestran los resultado del algoritmo propuesto, a través de las simulaciones realizadas en PSCAD y simulaciones en tiempo real en RSCAD.

En el capítulo 6 se establecen las conclusiones y aportaciones fundamentales obtenidas a partir de este trabajo de investigación, así como también, las recomendaciones para trabajos futuros en esta área.

CAPÍTULO 2

ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La aparición de una falla en la línea de transmisión provoca intercambios instantáneos de energía entre los campos electromagnéticos generando señales transitorias de alta frecuencia, esas señales se propagan por las líneas en forma de ondas viajeras hasta que se atenúan.

El fenómeno de propagación de ondas viajeras se utiliza cuando se requiere una representación muy detallada del comportamiento transitorio de la línea en un amplio rango de frecuencia, para analizar las características de esas señales en las líneas de transmisión es necesario usar modelos de línea con parámetros distribuidos, los cuales representan los parámetros de la línea (R , L , C , G) de manera distribuida en toda la longitud de la línea.

Los modelos de línea con parámetros distribuidos tiene en cuenta que la línea no necesariamente tiene los mismos valores de voltaje y corriente en toda su longitud a determinado instante de tiempo, además que incluye efectos de atenuación, desfaseamiento y velocidad de propagación de cualquier onda viajando a través de la

línea.

El interés del presente trabajo consiste en analizar las señales de alta frecuencia generadas por alguna perturbación en la línea y que indiquen una condición no tolerable por el sistema, por lo tanto es necesario el uso de un modelo de línea con parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia.

2.2 PROPAGACIÓN DE ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS CON CONDUCTORES MUTUAMENTE ACOPLADOS

Las ecuaciones generales de una línea de transmisión fueron inicialmente formulados por Oliver Heaviside [9]. La representación de la línea con conductores mutuamente acoplados se hace presentando sus parámetros de manera distribuida de la forma $R\Delta x$, $L\Delta x$, $C\Delta x$ y $G\Delta x$.

El decremento en el voltaje en un segmento Δx de la línea de dos conductores mutuamente acoplados (Fig. 2.1) puede obtenerse aplicando la ley de voltajes de Kirchoff de la forma:

$$-\Delta v = v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = (R + L\frac{\partial}{\partial t})i(x, t)\Delta x \quad (2.1)$$

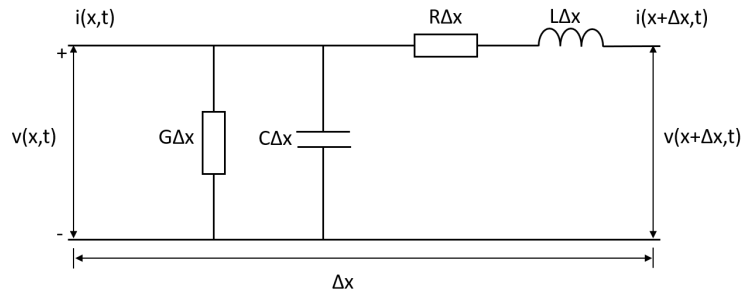


Fig. 2.1. Equivalente de un segmento Δx de una línea de transmisión de dos conductores.

Aplicando el limite $\Delta x \rightarrow 0$, (2.1) se convierte en (2.2):

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - Ri(x, t) \quad (2.2)$$

La corriente fluyendo por G y C puede obtenerse aplicando la ley de corriente de Krichoff de la forma:

$$-\Delta i = i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = (G + C \frac{\partial}{\partial t})v(x, t)\Delta x \quad (2.3)$$

Aplicando el limite $\Delta x \rightarrow 0$, (2.3) se convierte en (2.4):

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} - Gv(x, t) \quad (2.4)$$

Las ecuaciones 2.2 y 2.4 pueden extenderse a una línea de n conductores quedando de la forma:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = -\mathbf{Z}\mathbf{i} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{i}}{\partial x} = -\mathbf{Y}\mathbf{v} \quad (2.6)$$

donde \mathbf{v} , \mathbf{i} son matrices columna de los voltajes de fase a tierra y corriente en los n conductores y \mathbf{Y} y \mathbf{Z} son las matrices de admitancia e impedancia respectivamente, las cuales son de orden n y tienen la forma:

$$Z_{ij} = \begin{cases} L_{ij} \frac{\partial}{\partial t}, & i \neq j \\ R_{ij} + L_{ij} \frac{\partial}{\partial t}, & i = j \end{cases} \quad (2.7)$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} C_{ij} \frac{\partial}{\partial t}, & i \neq j \\ G_{ij} + C_{ij} \frac{\partial}{\partial t}, & i = j \end{cases} \quad (2.8)$$

Las ecuaciones 2.5 y 2.6 pueden combinarse y se obtienen (2.9) y (2.10):

$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} = \mathbf{P}\mathbf{V} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{i}}{\partial x^2} = P^T \mathbf{i} \quad (2.10)$$

donde $\mathbf{P}=\mathbf{ZY}$, la cual es simétrica solo para líneas transpuestas. La ventaja de 2.9 y 2.10 es que solo están en función de voltajes y corrientes respectivamente.

Las ecuaciones 2.9 y 2.10 pueden simplificarse eliminando la variable del tiempo al transformarlas al dominio de la frecuencia utilizando la transformada modificada de Fourier quedando de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\bar{v}}{dx^2} = \bar{P}\bar{v} \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2} = \bar{P}^T\bar{i} \quad (2.12)$$

donde \bar{v} es el vector de los voltajes de fase a tierra de Fourier, \bar{i} es el vector columna de las corrientes de Fourier en cada conducto y $\bar{P} = \overline{\mathbf{ZY}}$ se obtiene a partir de \mathbf{Z} y \mathbf{Y} transformadas al dominio de Fourier.

La solución de las ecuaciones (2.11) y (2.12) en sistemas polifásicos es complicada debido al acoplamiento que existe entre fases. En (2.11) el voltaje de cada fase está en función de los voltajes de las otras fases y en (2.12) la corriente en cada fase está en función de las corrientes de las otras fases.

En sistemas polifásicos es posible encontrar una solución desacoplando (2.11) y (2.12) por medio de análisis modal, posteriormente encontrar una solución general en el dominio de la frecuencia y finalmente transformarlas al dominio del tiempo usando la transformada inversa de Fourier.

2.2.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS EN SISTEMAS MONOFÁSICOS

En una línea de transmisión monofásica con retorno por tierra, las ecuaciones (2.11) y (2.12) se reduce a:

$$\frac{d^2\bar{v}}{dx^2} = k^2\bar{v} \quad (2.13)$$

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2} = k^2\bar{i} \quad (2.14)$$

donde $k^2 = (pL + R)(pC + G)$ y p representa el operador de transformación al dominio de la frecuencia.

La solución de (2.13) y (2.14) fue inicialmente planteada por D'Alembert, las cuales en el dominio del tiempo son de la forma:

$$v(x, t) = [F_1 e^{kx} + F_2(x) e^{-kx}] \quad (2.15)$$

$$i(x, t) = -\frac{1}{Z_0} [F_1 e^{kx} - F_2(x) e^{-kx}] \quad (2.16)$$

donde F_1 y F_2 están determinadas por las condiciones de frontera y k puede representarse por:

$$k = \sqrt{(RG + (RC + GL)p) + L Cp^2} = \frac{1}{c} \sqrt{(p + \alpha)^2 - \beta^2} \quad (2.17)$$

donde:

$c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ velocidad de propagación de la onda

$\alpha = \frac{1}{2}[(\frac{R}{L}) + \frac{G}{C}]$ constante de atenuación

$\beta = \frac{1}{2}[(\frac{R}{L}) - \frac{G}{C}]$ constante de fase

$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ impedancia característica

Para una línea sin pérdidas ($\alpha = \beta = 0$) las ecuaciones (2.15) y (2.16) se pueden representar de la forma:

$$v(x, t) = F_1(x - ct) + F_2(x + ct) \quad (2.18)$$

$$i(x, t) = [F_1(x - ct) - F_2(x + ct)]/Z_0 \quad (2.19)$$

donde el término $[F_1(x - ct)]$ en 2.18 y 2.19 describe una onda viajando en el sentido $+x$ (ver Fig. 2.2a), y el término $[F_2(x + ct)]$ describe una onda viajando en el sentido $-x$ (ver Fig. 2.2b), con velocidad de propagación c y sin distorsión.

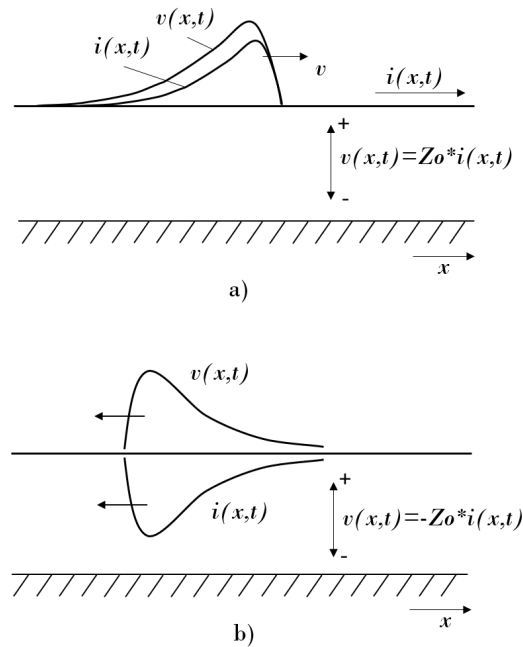


Fig. 2.2. Desplazamiento de ondas de voltaje y corriente: a) hacia adelante, b) hacia atrás

2.2.2 PROPAGACIÓN DE ONDAS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS

El propósito del análisis de propagación es determinar las corrientes y voltajes en diferentes puntos a lo largo de la línea de transmisión relacionados con la generación de corona en los conductores.

Es posible obtener los parámetros modales de la línea por métodos análogos a los desarrollados para líneas aéreas no balanceadas. El número de modos dependerá del número de conductores que se hayan modelado.

2.2.3 ANÁLISIS MODAL

Las fases de una línea de transmisión están estrechamente unidas debido a las impedancias mutuas de la línea. Una forma de realizar los cálculos de corrientes y voltajes en líneas multifase consiste en representarlos en un dominio modal, donde

sus n fases acopladas están representadas por sus n modos de propagación [10].

La línea de separación en sus modos de propagación es a través del uso de una matriz de transformación modal cuyas columnas son vectores propios asociados con los parámetros de la línea.

Usualmente, esta matriz se logra a través de métodos numéricos que no permiten determinar un modelo analítico para una línea desarrollada directamente en el dominio de las fases. En la Fig 2.3 se muestra esta representación.

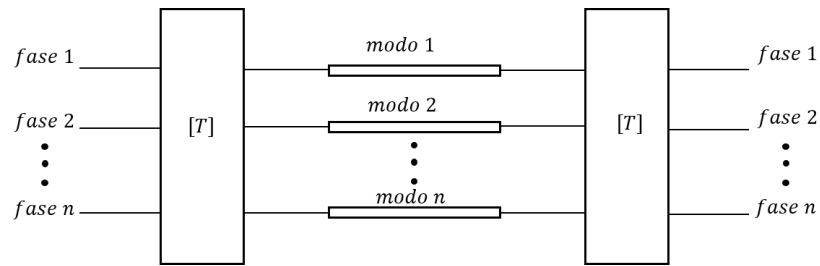


Fig. 2.3. Representación modal de una línea multifásica

El objetivo del análisis modal es diagonalizar (2.11) y (2.12), es necesario re-presentar el vector columna \bar{v} de la forma [11]:

$$\bar{v} = S\bar{v} = S\bar{v}_m \quad (2.20)$$

donde S es una matriz no singular de orden 3, y $\bar{v} = S\bar{v}_m$ es una matriz columna de 3x1; sustituyendo (2.11) en (2.12) se obtiene:

$$\frac{d^2\bar{v}_m}{dx^2} = \bar{S}^{-1}\bar{P}S\bar{v}_m \quad (2.21)$$

Es necesario escoger S tal que $[\bar{S}^{-1}\bar{P}S]$ sea diagonal; para ello es necesario encontrar los tres eigenvectores:

$$S = [X_0, X_1, X_2] \quad (2.22)$$

asociado a los tres eigenvalores:

$$D_v = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2] \quad (2.23)$$

de la matriz \bar{P} que satisfagan:

$$(\bar{P} - \lambda\bar{U})\bar{X} = 0 \quad (2.24)$$

donde \bar{U} es la matriz unitaria de orden 3. Usando (2.24) se puede demostrar que:

$$SD_v = [\lambda_0 X_0, \lambda_1 X_1, \lambda_2 X_2] = [\bar{P}X_0, \bar{P}X_1, \bar{P}X_2] = \bar{P}S \quad (2.25)$$

de tal forma que:

$$D_v = S^{-1}\bar{P}S \quad (2.26)$$

Así, la ecuación (2.21) se reduce a:

$$\frac{d^2\bar{V}_m}{dx^2} = D_v\bar{v}_m \quad (2.27)$$

en donde $\bar{v}_m = [\bar{v}_0, \bar{v}_1, \bar{v}_2]$ representan los voltajes modales. La ecuación (2.21) representa 3 ecuaciones diferenciales escalares desacopladas de la forma:

$$\frac{d^2\bar{v}_0}{dx^2} = \lambda_0\bar{v}_0 \quad (2.28)$$

$$\frac{d^2\bar{v}_1}{dx^2} = \lambda_1\bar{v}_1 \quad (2.29)$$

$$\frac{d^2\bar{v}_2}{dx^2} = \lambda_2\bar{v}_2 \quad (2.30)$$

El mismo procedimiento se aplica a (2.12). Para líneas transpuestas $\bar{P}^T = \bar{P}$, por lo tanto (2.12) se puede representar por:

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2} = \bar{P} \cdot \bar{i} \quad (2.31)$$

Siguiendo el mismo procedimiento se llega a:

$$\frac{d^2\bar{i}_m}{dx^2} = \bar{D} \cdot \bar{i}_m \quad (2.32)$$

donde $\bar{i} = Q\bar{i}_m$ representa 3 ecuaciones diferenciales escalares desacopladas, donde $\bar{i}_m = [\bar{i}_0, \bar{i}_1, \bar{i}_2]$ representa las corrientes modales.

La solución general de cada una de las ecuaciones independientes que forman (2.27) y (2.32) es de la forma:

$$F_1 e^{(\alpha+j\beta)x} + F_2 e^{-(\alpha+j\beta)x} \quad (2.33)$$

La interpretación de (2.33) es la misma que para líneas de transmisión monofásicas con retorno por tierra.

Para líneas trifásicas transpuestas las matrices \mathbf{S} y \mathbf{Q} son iguales y los eigenvectores solución de \mathbf{P} tienen las siguientes características:

- a) En uno de los eigenvectores todos sus componentes son iguales.
- b) En los otros dos eigenvectores la suma de sus componentes es cero.
- c) Todos los eigenvectores son linealmente independientes.

En la práctica es común el uso de las siguientes matrices de transformación:

Transformación de componentes simétricas:

$$S = Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Transformación de Karrenbauer:

$$S = Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Transformación de Wedephol:

$$S = Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

La transformación de Wedephol es una de las transformaciones modales más ampliamente usada en aplicaciones de protecciones, ya que solo contiene elementos reales, además de que ofrece una aproximación muy cercana a los modos de las líneas de configuración horizontal o delta.

En análisis modal cada modo puede ser tratado como un sistema monofásico. El modo 0 tiene participación cuando hay corriente retornando por tierra y su principal característica es que se propaga a baja velocidad y tiene alta atenuación. Los modos 1 y 2 tienen atenuación constante en un amplio rango de frecuencia y una mayor velocidad de propagación.

2.3 DEPENDENCIA EN FRECUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE LA LÍNEA

Las ecuaciones (2.15) y (2.16) son validas para una frecuencia específica, sin embargo en estudios transitorios electromagnéticos es necesario incluir la dependencia en frecuencia en los parámetros de la línea. Para un sistema polifásico las matrices \mathbf{Z} y \mathbf{Y} se representan en función de la frecuencia de la forma:

$$Z_{ij} = R_{ij}(jw) + jw(L_{ij}^{int}(jw) + L_{ij}^{ext}(jw)) \quad (2.37)$$

donde $R_{ij}(jw)$ incluye la resistencia del conductor y de retorno por tierra, $L_{ij}^{int}(jw)$ es la inductancia asociada al flujo del conductor y $L_{ij}^{ext}(jw)$ es la inductancia por el flujo del conductor.

La matriz de admitancia \mathbf{Y} puede representarse como:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jwC_{ij} \quad (2.38)$$

donde \mathbf{G} es la matriz de conductancias representado en los aisladores, y \mathbf{C} representa la capacitancia debido a la geometría de la línea.

En estudios de transitorios y análisis de armónicos es necesario incorporar dependencia en frecuencia en todos los parámetros de la línea. En este caso es necesario transformar las ecuaciones al dominio de la frecuencia con el propósito de solucionarlas y finalmente representarlas en el dominio del tiempo.

2.4 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

Cuando una onda llega a una discontinuidad en una línea, donde la impedancia característica de la línea cambia, las ondas de voltaje y corriente incidentes se reflejan y refractan de acuerdo con las impedancias características de los segmentos de línea conectados (ver Fig. 2.4).

Este proceso genera dos nuevos frentes de ondas. Las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas son tales que las proporciones voltaje a corriente se conservan para cada una, de acuerdo con la impedancia característica de las líneas sobre las que viaja; la corriente y los voltajes en la discontinuidad de la línea están sujetos a las leyes de Kirchoff y al principio de conservación de energía [10].

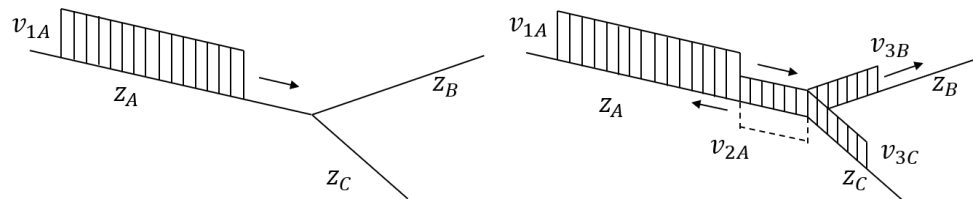


Fig. 2.4. Ondas de voltaje que pasan por un punto de unión.

Considere la unión entre dos medios conductores con impedancias características Z_A y Z_B y consideramos que $Z_A > Z_B$, que es el caso entre una línea aérea y un cable (en el cable, la impedancia característica es menor que en una línea aérea). Supongamos que una onda de voltaje V_1 se aproxima a la unión a lo largo de la línea aérea. La onda de corriente tendrá la misma forma y su amplitud es:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A} \quad (2.39)$$

Si las ondas de voltaje reflejadas y refractadas son V_1 y V_3 , respectivamente, sus corrientes son:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_A} \quad (2.40)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_B} \quad (2.41)$$

En (2.42) y (2.43), los subíndices 1, 2 y 3 indican las ondas incidentes, reflejadas y refractadas, y por definición, la dirección positiva de x es la dirección de la onda incidente, para este caso I_2 viaja en la dirección negativa x y tiene un signo opuesto a V_2 .

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (2.42)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (2.43)$$

La ecuación (2.43) puede reescribirse sustituyendo (2.40) y (2.41):

$$\frac{V_1}{Z_A} - \frac{V_2}{Z_A} = \frac{V_3}{Z_B} \quad (2.44)$$

De (2.42) y (2.44) es posible escribir expresiones para las ondas reflejadas y refractadas en términos de la onda incidente:

$$V_2 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = V_1 \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_A Z_B} \right) \quad V_2 = \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \right) V_1 \quad (2.45)$$

La cantidad $(Z_B - Z_A)/(Z_B + Z_A)$ se llama coeficiente de reflexión y se designa como a , que puede ser positivo o negativo dependiendo de los valores relativos de Z_A y Z_B , es decir $-1 \leq a \leq +1$.

La onda refractada se obtiene al eliminar V_2 :

$$V_3 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = \left(\frac{2V_1}{Z_A} \right) \quad V_3 = \left(\frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} \right) V_1 \quad (2.46)$$

Esto define el coeficiente de refracción, $b = 2Z_B/(Z_B + Z_A)$ que varía entre cero y dos dependiendo de los valores relativos de Z_A y Z_B . Lo anterior se muestra en la figura 2.5.

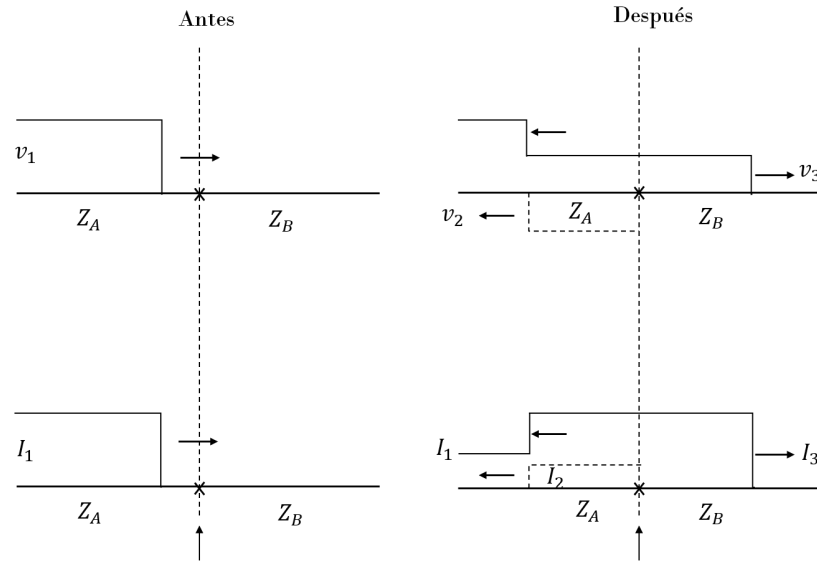


Fig. 2.5. Ondas de voltaje y corriente reflejadas y refractadas en un punto de unión entre dos impedancias Z_A y Z_B .

2.5 PROTECCIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Varios investigadores han propuestos algoritmos de detección de fallas que usan las señales de alta frecuencia generadas en el punto de aparición de las fallas, las cuales contienen abundante información sobre el tipo de falla y ubicación. A continuación se describe los principios básicos de operación de los esquemas de protección diferencial, direccional y de distancia, basados en onda viajera.

2.5.1 ALGORITMOS DE PROTECCIÓN DIRECCIONAL

El objetivo de los algoritmos de protección direccional es detectar la ocurrencia de una falla en la línea de transmisión y determinar si ésta se encuentra delante o detrás del relevador, para decidir sobre la operación de la protección [12].

2.5.1.1 ALGORITMO DE DOMMEL-MICHELS

Este algoritmo [13] basa su funcionamiento en el análisis del comportamiento de las ondas viajeras directa e inversa sobre la ubicación del relevador. Cuando ocurre una falla, el frente de onda viaja por la línea y alcanza la ubicación del relevador después de un tiempo τ . En este punto, F_2 se refleja debido a la discontinuidad que representan las impedancias de la subestación, y se origina un frente de onda F_1 , que se propaga hacia la falla; esta onda es a su vez reflejada en la falla, dando lugar a una nueva onda F_2 , que llega al relevador un tiempo 2τ después de la llegada de la primera onda F_2 .

Los cambios abruptos que experimenta F_2 en los instantes τ y 3τ , que corresponden a los cruces por el relevador de los dos primeros frentes de onda inversa (el originado por la falla y el de la primera reflexión en la falla), representan un indicativo de una falla en la línea.

Si la falla ocurriese en el instante de voltaje cero, no sería posible su detección, pues no habría onda viajera de voltaje. Para resolver este problema, se propuso una función discriminante del tipo:

$$D_2(t) = (S_2)^2 + \left[\frac{1}{w} \frac{d(S_2)}{dt} \right]^2 \quad (2.47)$$

Como S_2 es una señal sinusoidal de frecuencia T en un período de tiempo entre τ y 3τ , $D_2(t)$ es constante e independiente de la impedancia detrás de lo cual dependerá del sistema. De esta forma, $D_2(t)$ es un indicador claro de una falla delante del relevador, al menos durante el período comprendido entre τ y 3τ .

No obstante, este algoritmo puede fallar si ocurre una falla detrás del relevador; en esta situación, la falla origina un frente de onda F_1 , que después de pasar por la localización del relevador (sin afectar a $D_2(t)$), es reflejada por la discontinuidad al final de la línea y genera un nuevo frente de onda F_2 hacia el relevador, que es detectada por $D_2(t)$, ocasionando una discriminación incorrecta de la ubicación de la falla. Una solución a este problema es utilizar una segunda función discriminante

del tipo:

$$D_1(t) = (S_1)^2 + \left[\frac{1}{w} \frac{d(S_1)}{dt} \right]^2 \quad (2.48)$$

Así, para una falla detrás del relevador, $D_1(t)$ se activa primero que $D_2(t)$, y, para una falla del relevador, $D_2(t)$ se activa primero que $D_1(t)$.

2.5.1.2 ALGORITMO DE VITINS

Este algoritmo [14] se basa en una representación gráfica de las variaciones de las variables incrementales v y i en un plano $v - R_0 i$. Para una falla delante del relevador la trayectoria se desplazará desde el origen hasta el segundo o cuarto cuadrante, en dependencia del ángulo de incidencia de la falla. En el caso de una falla detrás del relevador, las trayectorias se desplazaran hacia el primer o tercer cuadrante. El comportamiento de estas variaciones una vez terminado el proceso transitorio de las onda viajeras conforma una elipse, desplazada por la componente aperiódica exponencial presente en la señal i . Así, para una falla delante del relevador, la dirección de rotación es en el sentido de las manecillas del reloj, y en sentido inverso para una falla detrás del relevador.

Este criterio es semejante al del orden en que S_1 y S_2 exceden cierto valor umbral en el algoritmo de Dommel-Michels; no obstante, el algoritmo de Vitnis asegura resultados más exactos, ya que se basa en las componentes estacionarias de las ondas viajeras v , i , a diferencia del algoritmo de Dommel-Michels, que analiza las componentes F_1 y F_2 de las ondas viajeras.

Este algoritmo ha sido mejorado utilizando una impedancia réplica S_R que ocasiona un cambio de fase igual al de la impedancia de la fuente. Esto hace que las trayectorias se conviertan en líneas rectas en un plano $v - R_0 i$.

2.5.1.3 ALGORITMO DE JONS-AGGARWAL

Este algoritmo [15] es similar al de Dommel-Michels, a excepción de que no se utilizan funciones discriminantes asociadas a las señales S_1 y S_2 ; en este caso, S_1 y S_2 se forman según [16], y se evalúa la secuencia en la cual S_1 y S_2 exceden un determinado valor umbral de operación. Así, para una falla delante del relevador, S_1 alcanzará el umbral de operación antes que S_2 y ocurrirá lo contrario para una falla detrás del relevador.

En el caso de que exista una discontinuidad en la ubicación del relevador, ambas señales alcanzará el umbral de operación en forma simultánea. Es decir, la decisión se toma en base a la magnitud de ambas señales, ya que para una falla delante del relevador es $|S_2| > |S_1|$, mientras que, para una falla detrás del relevador, es $|S_1| > |S_2|$, ya que los coeficientes de reflexión generalmente son menores que 1.

Este algoritmo ha sido implementado en la práctica utilizando las componentes estacionarias de las ondas viajeras v y i . En este caso las señales S_1 y S_2 se convierten en:

$$S_1 = R\Delta i - \Delta v \quad S_2 = R\Delta i + \Delta v \quad (2.49)$$

2.5.2 ALGORITMO DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Estos algoritmos determinan la presencia de una falla dentro o fuera de una línea de transmisión a través del análisis de la información de ondas viajeras registrada en los dos terminales de la línea protegida. El algoritmo más conocido es el de Takagi [17], que se basa en la comparación de las corrientes asociadas a los frentes de onda que arriban a ambos extremos de la línea de transmisión después de ocurrir una falla. Analizando la Fig. 2.6, se observa que las ondas de corrientes son:

$$\frac{2F_2}{Z_0} \quad , \quad \frac{2F_1}{Z_0} \quad (2.50)$$

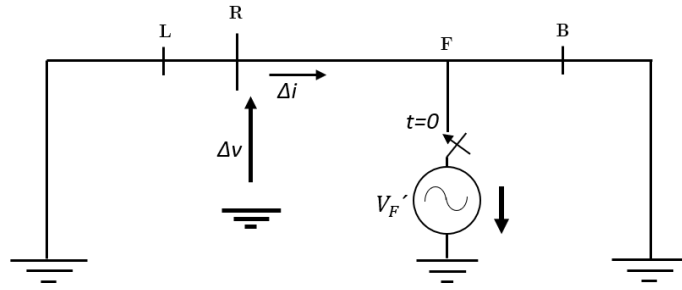


Fig. 2.6. Señales incrementales obtenidas por superposición.

las cuales se pueden formar en R partir de cantidades incrementales del tipo de:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v}{Z_0} - \Delta i &= \frac{2F_2}{Z_0} = \frac{S_2}{Z_0} \\ \frac{\Delta v}{Z_0} + \Delta i &= \frac{2F_1}{Z_0} = \frac{S_1}{Z_0} \end{aligned} \quad (2.51)$$

Si la línea es ideal, el frente de onda $\frac{S_2}{Z_0}$ alcanza el extremo B después de un tiempo τ . En base a lo anterior, es posible definir una onda F_1 (dirección positiva de x) en el extremo R que corresponde a una onda F_2 (dirección negativa de x) en el extremo B, donde la dirección positiva de i es hacia la línea, por tanto:

$$\begin{aligned} S_1(t)_R &= S_2(t - \tau)_B \\ S_1(t)_B &= S_2(t - \tau)_R \end{aligned} \quad (2.52)$$

Estas ecuaciones son válidas siempre que no exista una falla en la línea. A partir de estas expresiones se definen las siguientes funciones de error:

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= S_1(t)_R - S_2(t - \tau)_B \\ \eta(t) &= S_1(t)_B - S_2(t - \tau)_R \end{aligned} \quad (2.53)$$

Se puede demostrar que, $\epsilon(t)$ y $\eta(t)$ son cero para fallas externas, mientras que, para fallas internas, son iguales a las corrientes de falla con un retardo de tiempo correspondiente al desplazamiento de las ondas viajeras desde el punto falla hasta cada uno de los extremos de la línea.

Un inconveniente de este algoritmo de protección diferencial es la necesidad de transmitir todos los voltajes y corrientes incrementales entre los terminales de

la línea protegida. Esto impone fuertes requerimientos en el ancho de banda del canal de comunicación. Una alternativa para resolver este problema es disminuir la frecuencia de muestreo y utilizar las componentes estacionarias de las ondas viajeras ocasionadas por la falla.

2.5.3 ALGORITMO DE PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Estos algoritmos determinan la presencia de una falla dentro o fuera de la línea de transmisión a partir de la medición de la distancia eléctrica desde el relevador a la falla, utilizando la información de las ondas viajeras directas e inversas que pasan por la ubicación del relevador.

El algoritmo de Crossley-McLaren [18] se basa en la comparación de una sección del frente de onda de una señal S_2 con secciones subsecuentes del frente de onda de una señal S_1 . En la Fig. 2.7 se indican las señales S_1 y S_2 (2.49) medidas en la ubicación del relevador durante una falla en la línea. El frente de onda generado por la falla se desplaza hasta alcanzar la discontinuidad detrás del relevador, donde es reflejada nuevamente hacia el punto de falla. En este proceso, la señal S_1 toma un valor cero cuando arriba el primer frente de onda proveniente de la falla, debido a la polaridad de $v(t)$ y $R_0i(t)$, mientras que S_2 sufre una variación originada por el frente de onda reflejado hacia la falla, cuya magnitud y forma dependen del frente de onda reflejado. Cuando esta onda alcanza el punto de falla, se genera una nueva onda en dirección al relevador con polaridad inversa. Esto ocasiona que la señal S_1 sufra un cambio similar al de la señal S_2 , pero después de un tiempo 2τ , donde τ es el tiempo de propagación de las ondas entre el relevador y la falla.

Considerando que la velocidad de propagación c es constante, la distancia a la falla l_f se calcula como $l_f = 2\tau c$. En la Fig. 2.7 se muestra la sección del frente de onda de la señal S_2 que se utiliza para identificar el cambio en la señal S_1 y calcular 2τ .

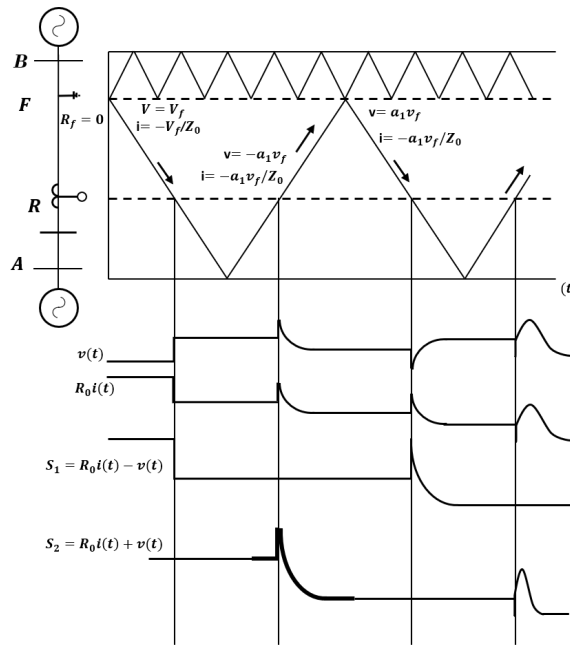


Fig. 2.7. Diagrama de Bewley de las ondas viajeras generadas por una falla en una línea de transmisión.

El análisis es representativo del caso en que la falla es sólida, lo que desacopla las ondas viajeras a ambos lados del punto de falla. Sin embargo, si la falla es a través de un cierto valor de resistencia, como normalmente ocurre, las ondas reflejadas en el extremo remoto de la línea se propagan hasta el punto del relevador a través del punto de falla, pudiendo ocasionar una falsa identificación del cambio en la señal S_1 , y por tanto, un error en el cálculo de la distancia a la falla.

En este caso, el problema de la determinación de la distancia eléctrica a la falla consiste en identificar los cambios en las señales S_1 y S_2 entre la primera onda reflejada por la discontinuidad detrás del relevador y la segunda onda incidente proviene del punto de falla. Se han estudiado diferentes alternativas de solución a este problema, dos de las cuales se describen a continuación.

2.5.3.1 DETECTOR DE CORRELACIÓN

La función de correlación \mathbf{M} se utiliza para medir la similitud entre dos secuencias de muestras. Vitnis [19] utilizó la función de correlación transversal discreta $M_{xy}(\tau)$ para medir la correlación entre secciones de una secuencia x y una secuencia y retardada un tiempo τ .

$$\Phi_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N x(k\Delta t + \tau) \cdot y(k\Delta t) \quad (2.54)$$

donde x y y representan las señales S_1 y S_2 respectivamente, descritas previamente. Una vez seleccionadas las secciones de S_1 y S_2 , se debe eliminar su valor medio, sobre el cual están superpuestas las ondas viajeras, a fin de obtener resultados confiables de la correlación de S_1 y S_2 con media cero se define como:

$$\begin{aligned} \Phi_{S_1-\bar{S}_1, S_2-\bar{S}_2}(\tau) &= \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N [S_1(k\Delta t + \tau) - \bar{S}_1] \cdot [S_2(k\Delta t + \tau) - \bar{S}_2] \\ \bar{S}_1 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [S_1(k\Delta t + \tau)] \\ \bar{S}_2 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [S_2(k\Delta t)] \end{aligned} \quad (2.55)$$

donde \bar{S}_1 y \bar{S}_2 son los valores medios de ambas secuencias. De esta forma, la correlación transversal $\Phi_{S_1-\bar{S}_1, S_2-\bar{S}_2}(\tau)$ muestra la similitud entre los frentes de onda de S_1 y S_2 como una función del retardo de tiempo entre ellas; el mayor grado de similitud entre ambas señales corresponde a la máxima salida de la función de correlación. Este detector comienza a operar cuando un detector direccional indica que existe una falla delante del relevador. En este caso, la selección de señal de S_2 que se almacena para ser correlacionada con las secciones continuas de la señal S_1 se forma con un grupo de muestras obtenidas antes y después de la operación del detector direccional.

La implementación práctica de esta alternativa debe realizarse utilizando cantidades modales, ya que de esta forma se preserva el frente de onda y se aumenta la sensibilidad del detector.

2.5.3.2 RECONOCIMIENTO DE PATRONES

El problema básico de protección de distancia por ondas viajeras es identificar un frente de onda, lo que puede ser realizado mediante una técnica de reconocimiento de patrones. Uno de los métodos más ampliamente utilizados en reconocimiento de patrones es del "vecino más cercano", en el cual la similitud entre dos patrones se determina en base a la distancia entre los vectores correspondientes a cada patrón, y donde el mayor grado de similitud corresponde a la menor distancia.

Este método es propuesto por Lang *et al* [20]; el algoritmo mide la distancia entre S_2 y las secciones sucesivas de la señal S_1 , y, cuando la forma de onda de S_1 es similar a la almacenada en S_2 , el algoritmo indica que la distancia entre los vectores es mínima.

La implementación de este método involucra dos aspectos: eliminar el valor medio de la señal como en el caso del detector de correlación, y utilizar el valor absoluto normalizado de las señales, por tanto:

$$\begin{aligned} S_1(k) &= |S_1(k) - \bar{S}_1| / \max(S_1) \\ S_2(k) &= |S_2(k) - \bar{S}_2| / \max(S_2) \end{aligned} \quad (2.56)$$

De esta forma se elimina el efecto de la resistencia de falla, lo que aumenta la exactitud en la medición de similitud entre ambos vectores con respecto al detector de correlación. Existen distintas medidas de la distancia entre vectores para reconocimiento de patrones, una es la distancia Euclidiana:

$$d_E = \sqrt{\sum_{k=1}^N [S_1(k) - S_2(k)]^2} \quad (2.57)$$

Otra alternativa es la distancia de Manhattan:

$$d_E = \sum_{k=1}^N |S_1(k) - S_2(k)| \quad (2.58)$$

2.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se describieron los temas del origen de las ecuaciones de propagación de ondas en una línea de dos conductores aéreos mutuamente acoplados y la forma en que se extienden a líneas polifásicas de n conductores, así como las ecuaciones para un sistema monofásico con retorno por tierra, en las cuales se describen las principales características y los parámetros de la misma, así como la forma de la propagación de la onda y el sentido que toma con respecto a la perturbación.

Se detalla el efecto de acoplamiento mutuo que existe entre fases en sistemas trifásicos y la solución de la misma a través de la transformación modal.

Así mismo, se describe el efecto de reflexión y refracción de las ondas viajeras, el principio y comportamiento que tienen ante la impedancia característica de la línea y la dirección que puede tomar, esto con la finalidad de entender que ocurre con la señal de voltaje y corriente durante una falla en la línea.

Por último, se describen los algoritmos más relevantes basados en ondas viajeras, tal es el caso de los esquemas de protección diferencial, direccional y de distancia. Se hizo énfasis en que estos algoritmos tienen como principal ventaja su velocidad de operación y su principal desventaja es la no operación cuando las fallas ocurren en el instante del cruce por cero de la onda de voltaje.

CAPÍTULO 3

ALGORITMOS DE PROTECCIÓN BASADOS EN ONDAS VIAJERAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión son las partes más críticas de los sistemas de potencia y deben protegerse perfectamente para mantenerlas en las mejores condiciones de servicio. La desconexión de una línea significa la pérdida de capacidad de transmisión y de alimentación de las cargas, y en consecuencia una disminución de la fiabilidad de potencia.

Para evitar las consecuencias de una falla, los sistemas de protección de las líneas de transmisión tiene que actuar de forma muy rápida y selectiva, evitando que una falla se propague al resto del sistema.

En los últimos años se ha incrementado la necesidad de reducir los tiempos de detección de fallas en líneas de transmisión, con el fin de mejorar la estabilidad transitoria del SEP y aumentar la capacidad de transferencia de potencia. Para este propósito, varios investigadores han propuesto algoritmos de detección de falla que usan las señales de alta frecuencia generadas en el punto de aparición de fallas, las cuales contienen información sobre el tipo de falla y ubicación.

En este capítulo se explica de forma breve los principio básicos de operación de los esquemas de protección basados en ondas viajeras.

3.2 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 hasta que desaparecen. 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 la impedancia la falla, 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 respectivas [11].

La aparición de una falla en una línea, es equivalente a la inyección de un voltaje en el punto de falla igual en magnitud pero de signo opuesto al de estado pre-falla. La solución a este problema transitorio puede resolverse por el principio de superposición [21]. En la Fig. 3.1 se aprecia como la señal de corriente de falla se compone por la superposición de la componente de estado estable mas la respuesta incremental. 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.

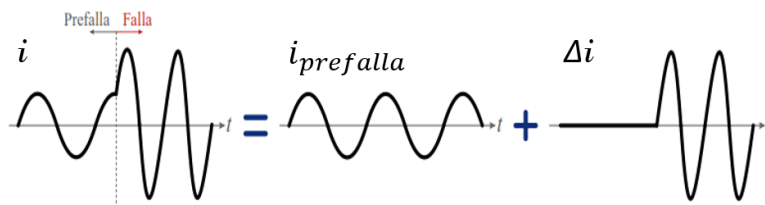


Fig. 3.1. Señal incremental.

Las señales inyectadas en el punto de falla se propagan a lo largo de la línea, al llegar a una discontinuidad, la onda reflejada pasará por la ubicación del relevador, viajando hacia el punto de falla y de regreso. El diagrama de lattice de la Fig. 3.2 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.

Una falla sólida a tierra ($R_f = 0$), reflejará una onda de voltaje de la misma magnitud pero de polaridad opuesta a la onda de voltaje incidente, y reflejará una onda de corriente de la misma magnitud y polaridad que la onda de corriente incidente.

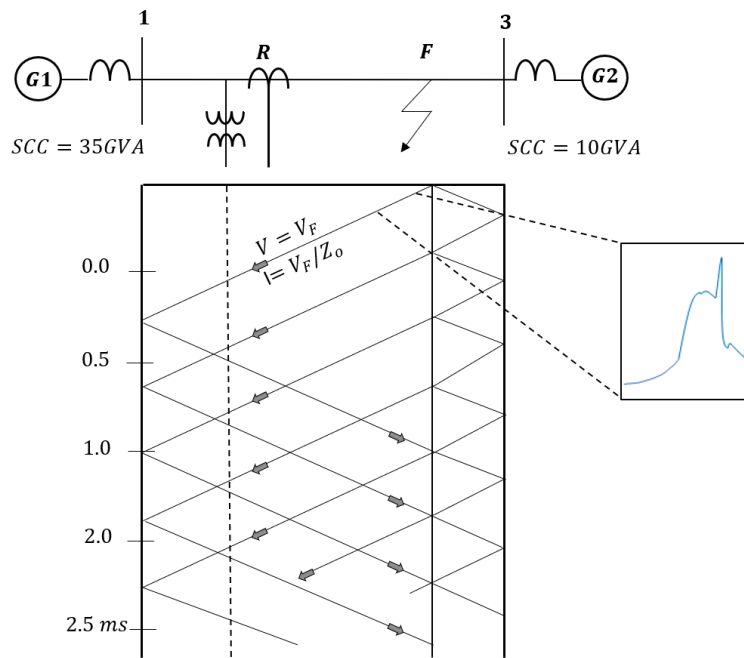


Fig. 3.2. Diagrama de lattice de los frentes de onda generados por una falla.

Las soluciones de las ecuaciones diferenciales que describen la propagación de ondas a lo largo de líneas de transmisión sin pérdidas son de la forma:

$$\begin{aligned}
 v(x, t) &= F_1(x - ut) + F_2(x + ut) \\
 i(x, t) &= [F_1(x - ut)] - F_2(x + ut)/Z_0
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Las ondas directas e inversas F_1 y F_2 pueden identificarse midiendo las señales de voltaje y corriente en la localización x de la línea; su valor es de la forma:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2F_2(x - ct) = Z_0 \cdot i(x, t) - v(x, t) \\ S_2 &= 2F_2(x + ct) = Z_0 \cdot i(x, t) + v(x, t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Las señales S_1 y S_2 medidas en la ubicación del relevador ($x = 0$) son de la forma:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2F_2(-ct) = Z_0 \cdot i(0, t) - v(0, t) \\ S_2 &= 2F_2(ct) = Z_0 \cdot i(0, t) + v(0, t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Las ecuaciones 3.3 se reducen a:

$$S_1 = R_0 \cdot i(t) - V(t) \quad (3.4)$$

$$S_2 = R_0 \cdot i(t) + V(t) \quad (3.5)$$

Las ecuaciones 3.4 y 3.5 representan los cambios en la señal de la onda que viaja de la falla a la fuente, y de la fuente a la falla respectivamente, es posible sustituir Z_0 por su parte real R_0 sin que esto provoque un error significativo debido a que la parte compleja de Z_0 es pequeña [22]. Las ecuaciones 3.4 y 3.5 son la base de casi todos los algoritmos de protección de líneas de transmisión basados en ondas viajeras. No obstante, estos algoritmos tienen problemas para detectar y localizar fallas con alta impedancia, fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje y las fallas que ocurren cerca de la ubicación del relevador; esto hace necesario desarrollar nuevos algoritmos que permitan la implementación de algoritmos de alta velocidad basados en el principio de ondas viajeras [23].

3.3 ANÁLISIS DE LA COMPONENTE PRINCIPAL

El análisis de componentes principales (PCA) es una técnica que transforma un conjunto de variables correlaciones p en un nuevo conjunto de variables no correlaciones llamadas componentes principales. Estas nuevas variables son una combinación

lineal de las variables originales y se derivan en orden decreciente de importancia, de modo que, por ejemplo, el primer componente principal representa la mayor cantidad posible de la variación en los datos originales [24].

El objetivo habitual del análisis es determinar si los primeros componentes representan la mayor parte de la varianza en los datos originales. Esto se logra analizando la estructura de la varianza-covarianza de los datos analizados y a través de combinaciones lineales de los datos originales permite expresar la información de tal forma que se acentúen las similitudes y diferencias en los datos bajo estudio.

La ventaja fundamental de ACP es que una vez que se han encontrado los patrones en los datos se puede seleccionar la información más importante reduciendo el número de dimensiones de los datos, sin que exista mucha pérdida de información.

Cuando se tiene datos que originalmente tienen p variables, generalmente su varianza puede ser explicada en términos de un pequeño número m de componentes principales, de tal forma que cuando mucha de la información total contenida en las variables originales se concentra en las primeras CP, entonces el grupo de datos que originalmente consistía de n observaciones y p variables puede ser reducido a uno conformado de n observaciones en m componentes principales.

El método de ACP extrae las características de las señales para implementar un proceso de reconocimiento de patrones en un subespacio 2-D llamado espacio de características, la representación del subespacio muestra una estructura linealmente separable, donde se realiza el reconocimiento de patrones para determinar si ha ocurrido una falla interna o externa de la línea.

Las fallas internas y externas para las cuales el algoritmo reconoce las formas de onda se basan en el cambio de la impedancia experimentada por la onda viajera que llega a la ubicación de la protección. En la Fig. 3.3 se muestra el contorno inicial de la onda viajera para un conjunto de fallas internas y externas, que corresponden a los escenarios descritos en la Tabla 3.1 para un instante de inserción de falla de 90° .

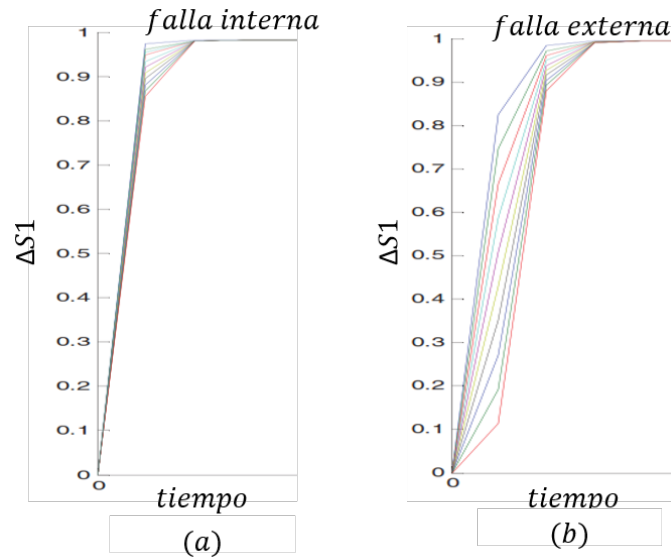


Fig. 3.3. a) Falla en la línea 1. b) Falla en la línea 2.

Tabla 3.1. Condiciones de falla.

Condición de falla	Falla en L1 (km)	Falla en L2 (km)
LG(Rf=0.001)	10,30,50,70,90,110, 130,150,170,190,199	210,230,250,270,290,310, 330,350,370,390
LLL(Rf=0.001)	10,30,50,70,90,110, 130,150,170,190,199	210,230,250,270,290,310, 330,350,370,390

En la Fig. 3.4 se muestra el subespacio 2-D de las primeras dos componentes principales, donde el semiplano izquierdo corresponde a las fallas internas y el semiplano derecho a las fallas externas. El algoritmo ACP reduce el tiempo de funcionamiento para la clasificación de fallas mediante el reconocimiento de patrones de la primera onda viajera que llega a la ubicación del relevador, lo cual tiene un impacto positivo en la estabilidad transitoria del sistema de potencia y un mejoramiento en la calidad del suministro de energía eléctrica.

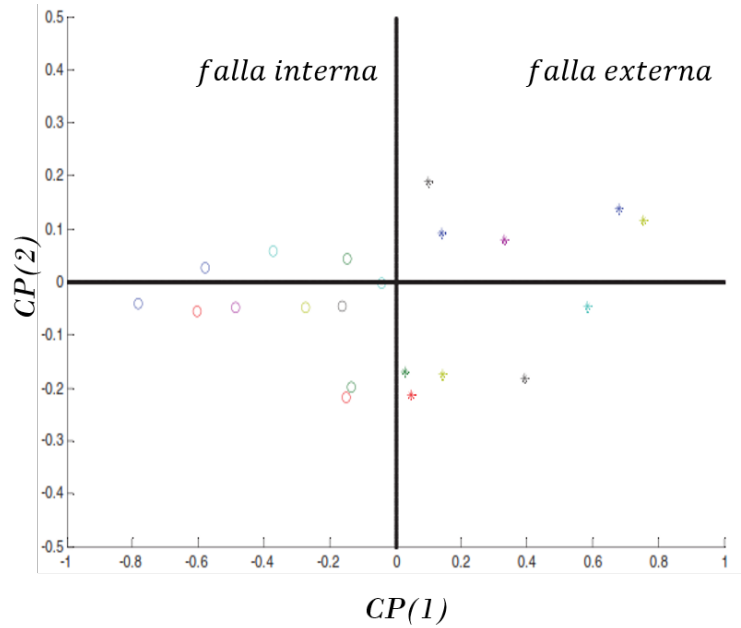


Fig. 3.4. Identificación de fallas en el subespacio de las primeras dos componentes principales.

3.4 TRANSFORMADA WAVELET

La transformada Wavelet es una herramienta para el análisis y procesamiento de señales. La teoría Wavelets fue inicialmente propuesta por Grossman y Morlet, y posteriormente desarrollada por Meyer y Daubahies [25]. Una de las principales ventajas que ofrece, es la capacidad para desarrollar un análisis local de señales no estacionarias y transitorias, proporcionando información tiempo-frecuencia más eficientemente que otras técnicas como la Transformada de Fourier.

La transformada continua de Wavelets (CWT) se define como la suma en el tiempo de multiplicar la señal analizada por versiones escaladas y trasladadas en el tiempo en función de la Wavelet madre ($\psi(t)$).

$$W_{\psi}x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.6)$$

donde:

$\psi(t)$ es la wavelet madre

$\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ son las versiones trasladadas y dilatadas de $\psi(t)$

a es la constante de escalamiento

b es la constante de traslación

La CWT proporciona información tiempo-frecuencia de la señal analizada. La Wavelet madre utilizada debe tener energía promedio cero, generalmente es asimétrica y de corta duración. Debido a que la CWT es una representación redundante de la señal, en la práctica generalmente se utiliza la transformada directa de *Wavelets* (DWT). Sus coeficientes pueden ser representados por:

$$W_{\psi}x(m, n) = \sum_k x(k)\psi_{m,n}(k) \quad (3.7)$$

donde $\psi_{m,n}(k)$ es definido por:

$$\psi_{m,n}(k) = a_0^{\frac{-m}{2}} \psi(a_0^{-m}k - nb_0) \quad (3.8)$$

Las selecciones mas frecuentes para a_0 y b_0 son $a_0 = 2$ y $b_0 = 1$.

La Transformada Wavelet es útil para el análisis de señales no estacionarias como las asociadas con fallas u operaciones de conmutación. Se ha aplicado ampliamente para protección de los sistemas de potencia, incluida la detección de fallas de alta impedancia, la identificación de fases falladas, la ubicación de fallas en líneas de transmisión y la protección diferencial del transformador.

Las técnicas basadas en transitorios se basan en la extracción de las características de los componentes transitorios generados por falla, siempre se establece una alta tasa de muestreo para capturar los frentes de onda de los transitorios. El método no es sensible a los parámetros no controlados, como ubicación de fallas, ángulo de inicio de falla y resistencia de falla.

La Transformada Wavelet tiene algunas características únicas que lo hacen más adecuado para el análisis de señales transitorias en un sistema de potencia,

tiene la propiedad de localización de tiempo-frecuencia, incluso, de una pequeña perturbación en una señal, tiene fuerte capacidad de extraer los componentes de señal bajo diferentes bandas de frecuencia mientras conserva la información de dominio de tiempo.

En general, las Wavelets consisten en pares sucesivos de filtros de paso bajo y alto [26]. Para cada par, las componentes de alta frecuencia y baja frecuencia de la señal $f(t)$ se llaman aproximaciones (CA), mientras que las componentes de baja frecuencia y alta frecuencia de la misma señal $f(t)$ se llaman detalles (CD). Después de cada etapa de filtrado, cada segundo punto de datos se descarta para evitar datos redundantes. La Wavelet elegida se sintoniza para extraer dos señales de diferentes bandas de frecuencias de la señal de la corriente transitoria. En la Fig. 3.5 se muestra una falla interna monofásica a tierra a 50 km de la línea. Se define un valor de umbral y se compara con el coeficiente $d1$ (Fig.3.5(a)) para detectar la falla interna como se muestra en Fig.3.5(b).

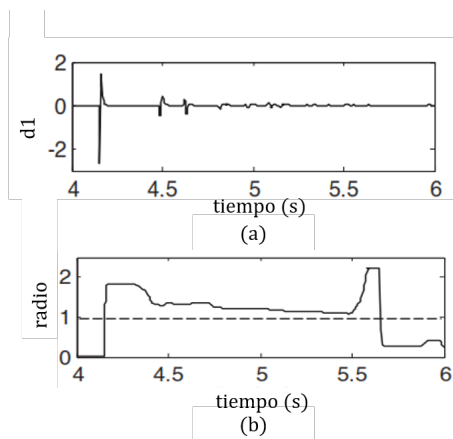


Fig. 3.5. Falla monofásica a tierra a 50 km de la línea. a) Transformada de Wavelet $d1$. b) Umbral para discriminar entre falla interna y externa.

Otro algoritmo de protección de onda viajera que utiliza la transformada Wavelets como herramienta para procesar las señales fue sugerido por Lieng y Elangovan [27]. La propuesta utiliza el principio de correlación pero en este caso las señales S_1 y S_2 se separan en tres intervalos de frecuencia, donde las escalas menores correspon-

den a las altas frecuencias de la señal y las escalas mayores a las bajas frecuencias. La correlación se realiza de manera independiente en cada sub-banda y el resultado final está formado por la suma de las tres correlaciones. Esto viene dado por:

$$\phi(\tau) = \sum_m \sum_n W_\psi f_1(m, n) W_\psi f_2(m, n, +\tau) \quad (3.9)$$

En la Fig. 3.6(a), 3.6(b) y 3.6(c) se muestran los resultados de la simulación hechas por el algoritmo para las escalas 1, 2 y 3 para una falla trifásica a 160 Km.

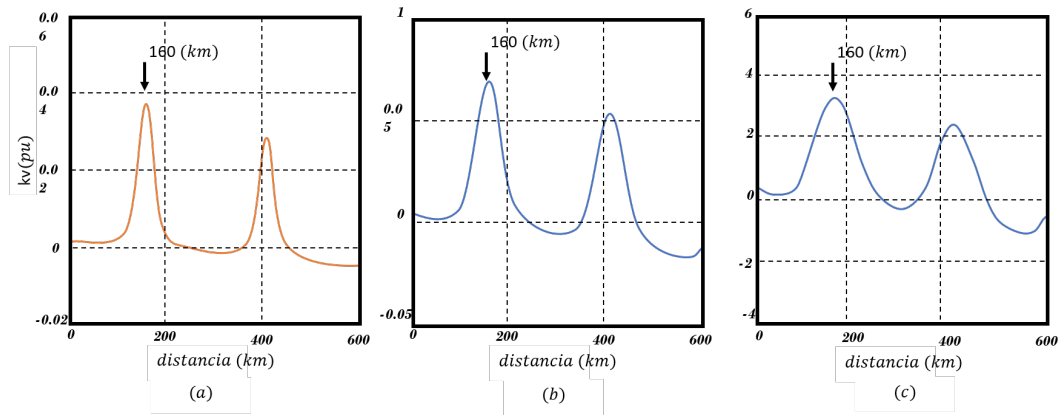


Fig. 3.6. Localización de falla trifásica a 160 km usando el algoritmo de correlación con transformada Wavelet. a) escala 1, b) escala 2 y c) escala 3.

Otra de las técnicas que utiliza la transformada Wavelet es propuesta en [28], es un método de discriminación basado en la polaridad, magnitud e intervalo de tiempo entre las ondas viajeras, para identificar el patrón dominante. La técnica se evalúa para la protección de una línea de transmisión de dos terminales y tiene la capacidad de identificar fallas internas en menos de 2 *ms*.

En la Fig. 3.7(a) se muestran las variaciones transitorias de tensión después de ocurrir una falla, que ocurre a los 200 *ms* y en la Fig. 3.7(b) se muestra la perturbación en la línea de transmisión de alta frecuencia que se propaga hacia los dos lados de la línea hasta alcanzar un punto de discontinuidad. En la Fig. 3.8 se muestran los valores absolutos de la onda viajera de voltaje producida por la falla, para los casos de una falla alejada y otra cercana al extremo de la línea de transmisión.

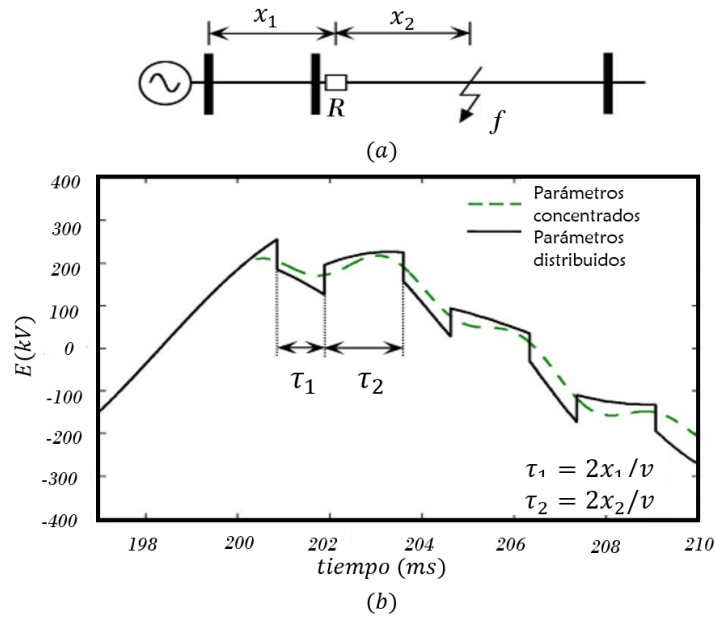


Fig. 3.7. a) Línea de transmisión de 400 kV. b) Transitorios de tensión generados después de la ocurrencia de una falla

Se puede ver que en ambos casos, las ondas se identifican utilizando los módulos máximos de la onda viajera en factores de pequeña escala y en el caso de fallas cercanas, no es posible la identificación de las siguientes ondas viajeras usando factores de gran escala, por lo tanto, la detección y discriminación de diferentes fallas requiere una técnica adecuada para la identificación de patrones ocultos de las salidas a diferentes escalas.

3.5 MORFOLOGÍA MATEMÁTICA

La morfología matemática (MM) obtenida de la teoría de conjuntos y la geometría integral se ha desarrollado como una herramienta en la descripción y análisis geométricos. La MM se ha utilizado ampliamente en el procesamiento de imágenes y señales. Dado que los únicos cálculos matemáticos en MM son la suma y la resta, esto hace que sea rápida y precisa.

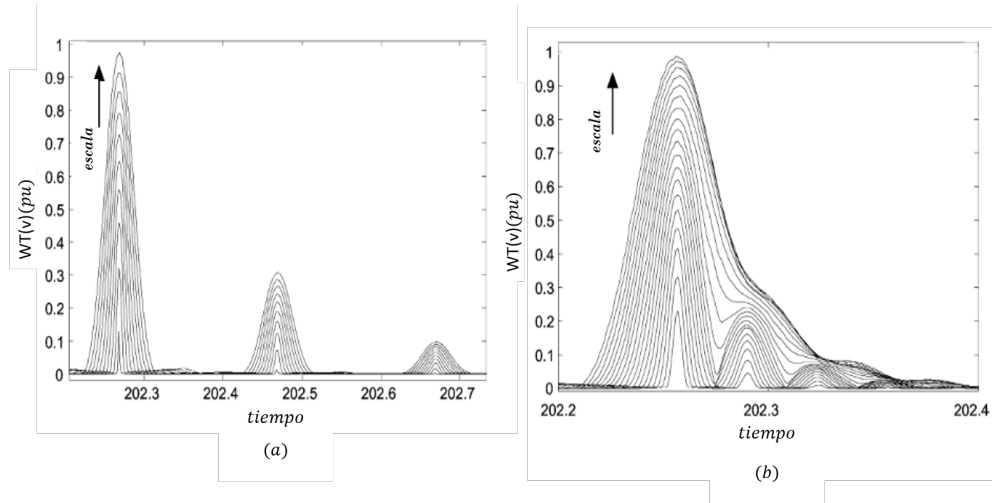


Fig. 3.8. Valores absolutos de la Transformada Wavelet de voltaje medida usando diferentes escalas. a) Para una falla distante. b) Para una falla cercana.

La MM es una técnica no lineal con alta precisión y bajo volumen de cálculo que se puede utilizar para extraer la información de las señales de alta frecuencia relacionadas con las ondas viajeras. Se centra en la forma y el tamaño de las señales en el campo de tiempo y necesita una ventana de información pequeña. En MM un elemento estructural (SE, por sus siglas en inglés) se utiliza para extraer las propiedades de señal necesarias, tiene dos operadores básicos de erosión (\ominus) y dilatación (\oplus), en función de los cuales se definen otros operadores híbridos, como la apertura y el cierre.

Suponiendo que $f(n)$ es la señal de entrada como la función discreta definida en la amplitud $D_f = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ y $g(m)$ es un SE definido en la amplitud $D_g = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, entonces la dilatación de la señal f por g se denota por $(f \oplus g)$ y la erosión del dominio f por g se denota por $(f \ominus g)$ y se define de la siguiente manera [29]:

$$f_{dil}(n) = (f \oplus g)(n) = \max \{f(n - m) + g(m)\} \quad (3.10)$$

$$f_{ero}(n) = (f \ominus g)(n) = \max \{f(n - m) - g(m)\} \quad (3.11)$$

donde $n \in D_f$ y $m \in D_g$; combinando los dos operadores anteriores, se obtienen otros dos operadores llamados apertura y cierre. La operación de apertura de la señal f

por g se denota por $f \circ g$ y se define como:

$$f_{open}(n) = (f \circ g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (3.12)$$

Además, la operación de cierre de la señal f por g se denota por $(f \bullet g)$ y se define como:

$$f_{close}(n) = (f \bullet g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (3.13)$$

donde \bullet muestra el operador de cierre y \circ muestra el operador de apertura. Los efectos de los operadores de apertura y cierre en la señal $y(t)$ se muestran en la Fig. 3.9. El operador de apertura suaviza los bordes agudos de los impulsos positivos y el de cierre llena los valles estrechos y los huecos de los impulsos negativos.

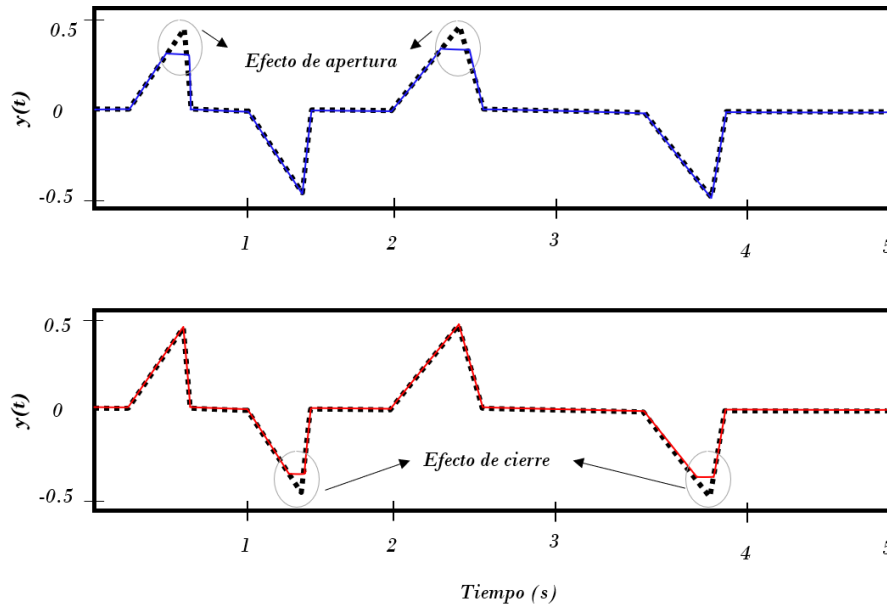
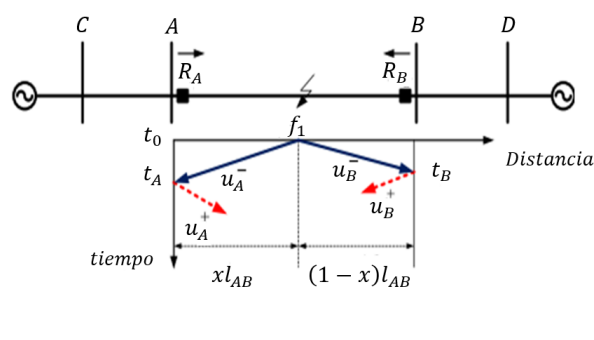


Fig. 3.9. Efectos de los operadores de apertura y cierre en la señal $y(t)$.

Aplicando el algoritmo para onda viajera, este compara la polaridad y el tiempo de llegada de la onda viajera de corriente inicial desde dos terminales de la línea protegida. Las ondas viajeras se extraen mediante filtros de morfología matemática (MMF) para extraer componentes transitorios de señales transitorias inducidas por fallas. Este filtro puede detectar de forma rápida y precisa el tiempo de llegada y la polaridad de las ondas en todas las condiciones.


 Fig. 3.10. Diagrama para la falla f_1 .

De acuerdo a la Fig. 3.10, si t_0 es el tiempo de inicio de falla, entonces el tiempo de llegada de las ondas viajeras iniciales a los relés R_A y R_B en ambos extremos de la línea se obtiene de la siguiente manera:

$$t_B = t_0 + \frac{(1-x)l_{AB}}{v} \quad (3.14)$$

$$t_A - t_B = (2x - 1) \frac{l_{AB}}{v} \quad (3.15)$$

donde t_A y t_B son el tiempo de llegada de ondas viajeras a los relevadores R_A y R_B , respectivamente, v es la velocidad de propagación de las ondas viajeras y l_{AB} es la longitud total de la línea de transmisión A-B donde $0 \leq x \leq 1$, entonces se puede concluir que:

$$|t_A - t_B| < \frac{l_{AB}}{v} \quad (3.16)$$

Esta ecuación se establece para cuando se produce una falla dentro de la línea de transmisión, sin embargo para mejorar la confiabilidad y precisión del método de protección de operación se necesita del ajuste de un umbral para que la falla dentro de la línea pueda detectarse con precisión.

3.6 ELEMENTO DIFERENCIAL BASADO EN TIEMPOS DE ONDA VIAJERA

La protección diferencial basada en fasores es ampliamente utilizada en protección de líneas de transmisión, sin embargo el mismo principio se puede aplicar utilizando ondas viajeras.

El elemento diferencial compara los tiempos, las polaridades y las magnitudes de las ondas viajeras actuales en ambas terminales de línea. Para un evento externo, la onda viajera actual ingresa en una terminal de línea y, después del tiempo de propagación de línea, sale en la otra terminal con la polaridad opuesta pero no necesariamente con la misma magnitud.

Se identifica el tiempo como un índice de muestra de la primer onda viajera en las terminales local y remoto. Para las terminales locales y remotos, se etiquetan con NL_i y NR_i , respectivamente. Conociendo el índice de la primer onda viajera en la terminal local, se establece un intervalo de tiempo para detectar la onda viajera saliendo en la terminal remoto, de la misma forma, conociendo el índice de la primera onda viajera en la terminal remota, se establece la ventana de tiempo para detectar la salida de la onda viajera en la terminal local [30].

Estas ventanas se colocan en el tiempo de propagación de línea nominal, T_L , después de la primera onda viajera, es necesario incluir un margen ΔT_L , para el error y la variabilidad en el tiempo de propagación. Se inspecciona la grabación de las ondas viajeras en el intervalo de tiempo de salida y se identifica el valor absoluto máximo en ese intervalo de tiempo, una vez identificados ese valor máximo por los relés locales y remotos se etiquetan como índice de salida NL_f y NR_f respectivamente. La Fig. 3.11 muestra la primer onda viajera en la terminal local y la salida de la onda viajera en la terminal remoto. Después de identificar los cuatros índices, se calcula las siguientes señales, usando M muestras en el orden de la mitad de la

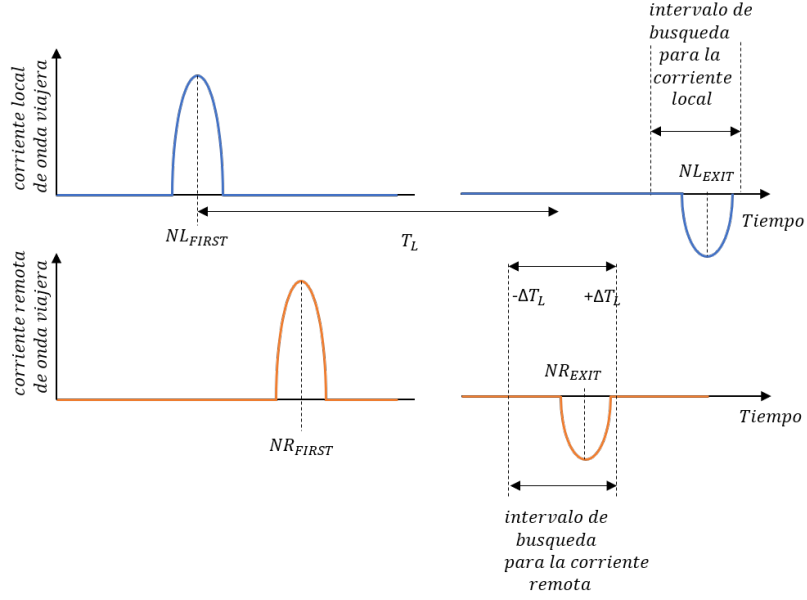


Fig. 3.11. Definición de los índices de entrada y salida del elemento diferencial.

ventana del suavizador del diferenciador ($M < 0.5 \cdot T_{DS}$).

Las magnitudes de las primeras ondas viajeras actuales son:

$$IL = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{K=M} i_{TWL(NL_i-k)} \right| \quad (3.17)$$

$$IR = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{K=M} i_{TWR(NR_i-k)} \right| \quad (3.18)$$

donde TW se refiere a las ondas viajeras (por sus siglas en inglés).

Se selecciona el factor de escala C para mantener una ganancia unitaria para un paso ideal de la onda viajera.

$$I_{DIF} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{K=M} (i_{TWL(NL_i-k)} + i_{TWR(NR_i-k)}) \right| \quad (3.19)$$

se restringe la onda viajera de corriente si $NL_i < NR_i$,

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{K=M} (i_{TWL(NL_i-k)} + i_{TWR(NR_f-k)}) \right| \quad (3.20)$$

entonces:

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{K=M} (i_{TWL(NR_i-k)} + i_{TWR(NL_f-k)}) \right| \quad (3.21)$$

la locación de falla es:

$$m_{g7} = 0.5 \left(1 + \frac{NL_i - NR_i}{TL} \right) \quad (3.22)$$

Los tiempos de operación de tiempo para el elemento diferencial es de 1 *ms*. Cualquier cambio repentino de voltaje en un punto de la línea protegida inicia la propagación de ondas viajeras (apertura/cierre de interruptores, descargas atmosféricas, etc), por lo tanto la lógica del elemento diferencial requiere condiciones de supervisión adicionales por seguridad.

3.7 DETECCIÓN DE ONDA VIAJERA UTILIZANDO EL MÉTODO DE LÁPIZ DE MATRIZ DE CORTA DURACIÓN

La estimación precisa de los tiempos de llegada de las ondas viajeras mejora la mayoría de los métodos de localización de fallas basados en ondas viajeras. Esta técnica se basa en el método del lápiz de matriz de corta duración que descompone las muestras de medición en una ventana deslizante en frecuencias complejas registrados en el tiempo. Los tiempos de llegada de la onda de desplazamiento se estiman basándose en el hecho de que los factores de amortiguamiento extraídos son cero cuando la onda de llegada se encuentra en el medio de la ventana deslizante. Esta técnica se ve menos afectada por el ruido de la medición, la frecuencia de muestreo y los parámetros de falla [31].

La ventana deslizante se mueve hacia adelante a los largo del tiempo, al usar las muestras $N - muestra$, la matriz $Y_{(N-L) \times (L+1)}$ se forma como:

$$Y = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(L+1) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(L+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-L) & x(N-L+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

donde $x(\cdot)$ denota las muestras, N indica el número de muestras en la ventan, y L se

conoce como parámetro de lápiz, que se selecciona $N/3$ a $N/2$ para el filtrado eficaz del ruido. Se aplica la descomposición de valores singulares (SVD) a los rendimientos de la matriz Y :

$$Y = u \sum V^H \quad (3.24)$$

donde $(.)^H$ denota conjugado complejo, u y V son matrices que comprenden vectores propios, \sum es una matriz diagonal que consiste en los valores singulares de Y . Como los valores propios calculados están relacionados con las frecuencias complejas, se obtienen los factores de amortiguamiento obtenidos en el tiempo.

Debido a que esta técnica utiliza álgebra matricial, la carga computacional es alta y requiere una alta capacidad de procesamiento para las aplicaciones en línea, sin embargo este método se ha propuesto para realizar la localización de la falla fuera de línea, a partir de los registros de falla.

3.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se explica la descripción de los principios de funcionamiento de las protecciones que utilizan onda viajera, utilizando ondas de desplazamiento y cantidades incrementales para proporcionar una protección de línea segura y de ultra-alta velocidad.

Se describen 5 algoritmos propuestos en la literatura (componente principal, transformada de Wavelet, morfología matemática, elemento diferencial y método del lápiz de matriz,) indicando como se realiza la discriminación entre fallas internas y externas en una línea de transmisión. Estos algoritmos tienen como ventaja principal el tiempo de operación para la detección de fallas, que pueden ser incluso menores de 1 *ms*. Esto significa que la liberación de la falla tendrá un impacto limitado en la estabilidad del sistema de potencia.

CAPÍTULO 4

ALGORITMO DE PROTECCIÓN DE ONDA VIAJERA CON SMC

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se describe el algoritmo propuesto para protección de líneas de transmisión en sistemas eléctricos de potencia, basado en el segundo momento central. El objetivo principal del algoritmo es la detección de fallas en la línea utilizando las ondas viajeras que se generan ante la aparición de una falla, señales que contienen información sobre la ubicación, instante de inserción y tipo de falla.

El algoritmo propuesto es capaz de discriminar entre cortocircuitos internos y externos utilizando la información del primer frente de onda que arriva a la ubicación del relevador. Esto tiene como consecuencia la reducción del tiempo de operación comparado al tiempo de operación de los algoritmos convencionales considerando el mismo tipo de falla y su ubicación en la línea de transmisión.

Se realiza el análisis de sensibilidad del sistema, para comprobar que el algoritmo es relativamente inmune a los procesos de reflexión que sufre las ondas viajeras en los extremos terminales de la línea de transmisión. Cuando el cortocircuito ocurre cerca del extremo remoto de la línea (con respecto a la ubicación del relevador),

estos errores pueden provocar que el cortocircuito se ubique en la línea adyacente, teniendo como consecuencia a un fallo de operación; de igual forma, un cortocircuito al inicio de la línea adyacente puede ser ubicado en la línea propia, originando así una operación incorrecta de la protección.

En las siguientes secciones se realiza una explicación a detalle del funcionamiento de cada una de las etapas del algoritmo, el procesamiento de las señales de entrada (análisis modal), la obtención del filtro delta para cada una de las señales, el proceso de normalizar los vectores de entrada y los casos de falla utilizados para probar el algoritmo propuesto.

4.2 SEGUNDO MOMENTO CENTRAL

Durante los últimos años, las estadísticas de orden superior (espectros) han comenzado a encontrar amplia aplicación en muchos campos diversos, como es el campo de biomedicina, procesamiento de datos sísmicos y filtrado adaptativo entre otros.

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) [32].

El propósito de los momentos centrales esta basado en la idea de que se tiene un gran número de datos el cual se desea analizar con el fin de encontrar relación entre los puntos individuales que conforman el grupo, para ello es necesario aplicar algunas mediciones al grupo, así como interpretar de manera correcta los resultados.

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

$$m_k = E[(x - E[x])^k] \quad (4.1)$$

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

$$m_k = \int_m^M (x - u)^k f(x) dx \quad (4.2)$$

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

$$m_2 = \int_0^T (x - u)^2 dx = E[(x - u)^2] \quad (4.3)$$

La varianza es una medida de dispersión que indica que tan lejos está cada punto de la variable de su media respectiva, y por tanto a mayor valor de medida de dispersión, mayor variabilidad. Esta medida puede ser útil como un indicador para determinar cuando ha cambiado la forma de onda de una señal sinusoidal completa en función de que el valor medio será diferente de cero.

El objetivo de utilizar el SMC es para 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, debido a que realiza patrones de comportamiento característicos de las señales.

En la Fig. 4.1(a) se observa las señales de corriente de descarga de un rayo la cual se utiliza para analizar el efecto de una descarga atmosférica sobre una línea de transmisión, cada señal tiene diferente resistencia de descarga.

En la Fig. 4.1(b) se observa la clasificación de las señales aplicando SMC, se muestran dos agrupaciones con respecto al impacto de la resistencia de descarga; los de menor resistencia presentar mayor valor de dispersión y las de mayor resistencia tiene menor valor de dispersión.

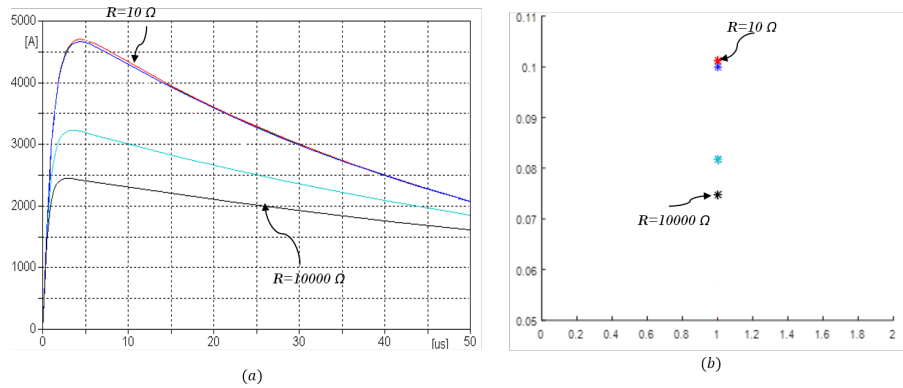


Fig. 4.1. Ejemplo de aplicación del SMC. a) Señales de corriente de descarga de un rayo con resistencia de $10\ \Omega$ (roja), $100\ \Omega$ (azul), $5000\ \Omega$ (celeste) y $10000\ \Omega$ (negra). b) Clasificación de las corrientes de descarga de un rayo aplicando SMC.

4.3 ALGORITMO PROPUESTO

Las ondas viajeras propagándose por una línea de transmisión experimentan una modificación en su contorno al atravesar por una discontinuidad que se caracteriza por un cambio de impedancia. En el caso de que ambas líneas sean idénticas ($Z_a = Z_b$), 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, debido a que cada línea de transmisión tiene diferentes impedancias características debido a la geometría de la línea. Así mismo las ondas viajeras que se propagan a través de una línea de transmisión homogénea se ven mínimamente afectadas en su contorno aún considerando pérdidas por atenuación.

Un frente de onda originado por una falla externa experimenta una modificación en su contorno al pasar por la discontinuidad que representa el cambio de la impedancia característica entre las líneas de transmisión (Z_a a Z_b). A diferencia de esto, un frente de onda originado por una falla interna solo es afectado por la atenuación propia de la línea.

En esta sección se describe un nuevo algoritmo para protección en líneas de

transmisión basado en la magnitud del segundo momento central estadístico (SMC) a partir de las ondas viajeras que arriban al relevador. El algoritmo propuesto utiliza el segundo momento central estadístico, la varianza estadística, para caracterizar la forma en onda de la señal. El objetivo es determinar el segundo momento central de cada señal de onda viajera y compararlo con un umbral previamente definido, si la magnitud de la varianza está por encima del umbral, el evento se identifica como una falla interna, de lo contrario, como una falla externa.

El algoritmo puede utilizar las señales ΔS_1 en modo 1 o solo con la señal de corriente, para este caso puede ser las señales incrementales en modo 1 o modo 0 y de esta forma se omiten las señales de voltaje reduciendo los problemas de respuesta a la frecuencia de los TP [33].

En la Fig. 4.2 se muestra la estructura general del algoritmo propuesto para realizar la identificación de fallas internas y externas; primero se obtienen las señales de corrientes y voltajes de fase por medición en un extremo de la línea protegida y se realiza el desacoplado de fases por medio de la transformación de Wedephol para obtener la señal correspondiente al modo aéreo 1; a continuación, las condiciones de estado estable son eliminadas con un filtro delta [34], dando como resultados las señales incrementales de voltaje y corriente.

Los frentes de ondas son almacenados en una ventana de datos ($25 \mu s$) para calcular el SMC. El valor del SMC se compara con un umbral predeterminado con el propósito de establecer si el frente de onda corresponde o no a una falla interna. El contador $k = 1$ se utiliza para una medida de seguridad; cuando 3 instantes consecutivos cumplen la condición de falla interna se manda el disparo, de lo contrario no actúa; cuando se trata de una falla externa o cuando no haya falla el contador se reinicializa.

En las siguientes secciones se describirá con más detalle cada una de las etapas que conforman el algoritmo propuesto.

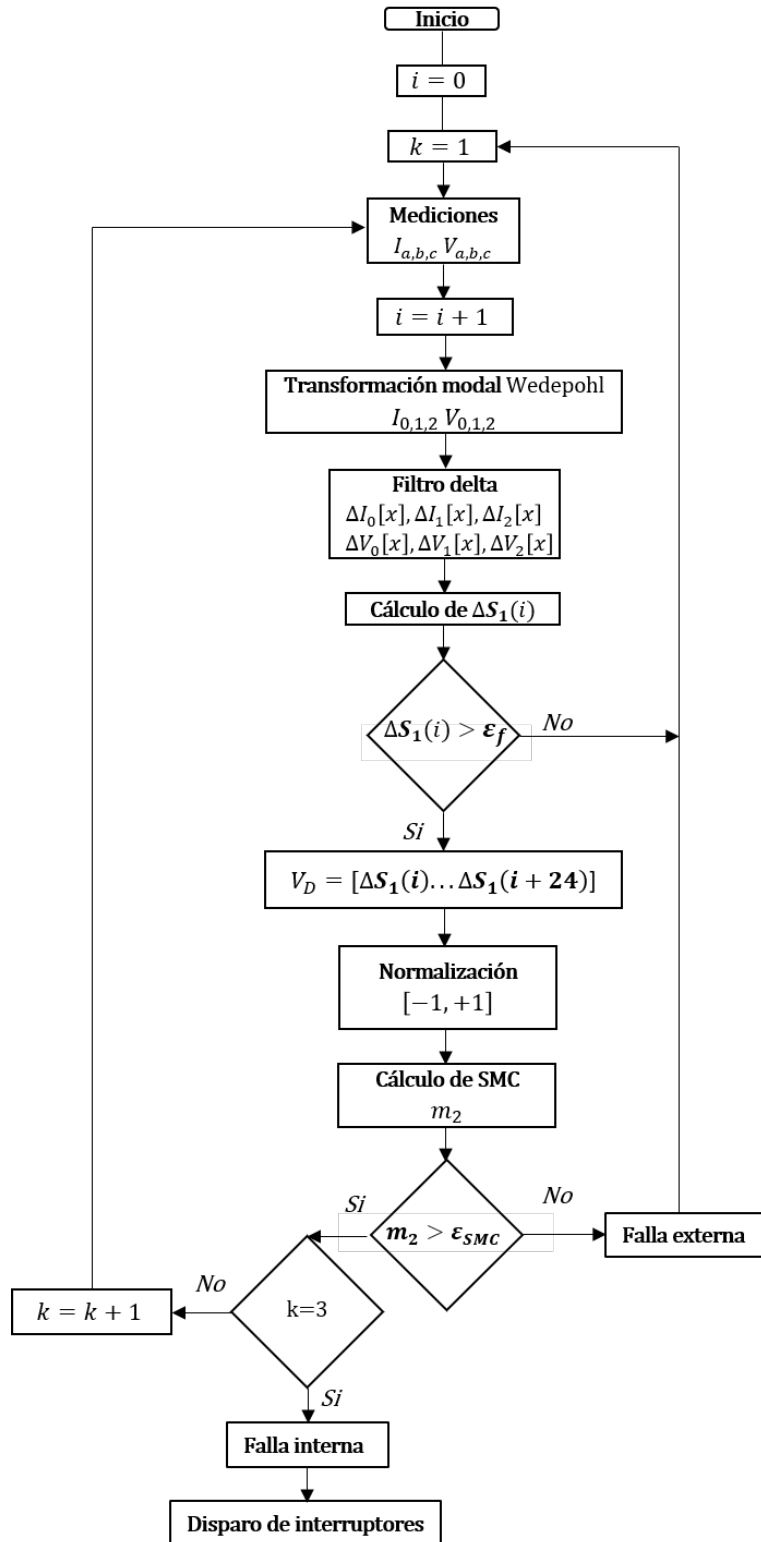


Fig. 4.2. Diagrama de flujos del algoritmo.

4.4 PREPROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE ENTRADA

Los frentes de ondas viajeras generada 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.

Las líneas trifásicas tienen un acoplamiento electromagnético significativo entre los conductores. Para implementar el método de onda viajera en sistemas trifásicos, las tensiones y corrientes acopladas se descomponen primero en sus componentes modales por medio de las matrices de transformación modal.

Se eligió la matriz de transformación de Wedephol por las ventajas analizadas en la sección 2.2.3. Este método de análisis modal aplicado permite representar un sistema trifásico en términos de 3 modos independientes de propagación, cada modo con su propia velocidad y atenuación, su inversa es de la forma:

$$S^{-1} = Q^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Esta transformación descompone las señales de fase en sus correspondientes modos de propagación, dos de los cuales son aéreos viajando prácticamente a la velocidad de la luz y un modo de tierra con velocidad de propagación dependiente de la frecuencia y con alta atenuación tal como se muestra en la Fig. 4.3.

Para desacoplar las señales incrementales de fase en sus respectivos modos de propagación se usa:

$$\Delta V_m = S^{-1}[\Delta V_f] \quad (4.5)$$

$$\Delta I_m = Q^{-1}[\Delta I_f] \quad (4.6)$$

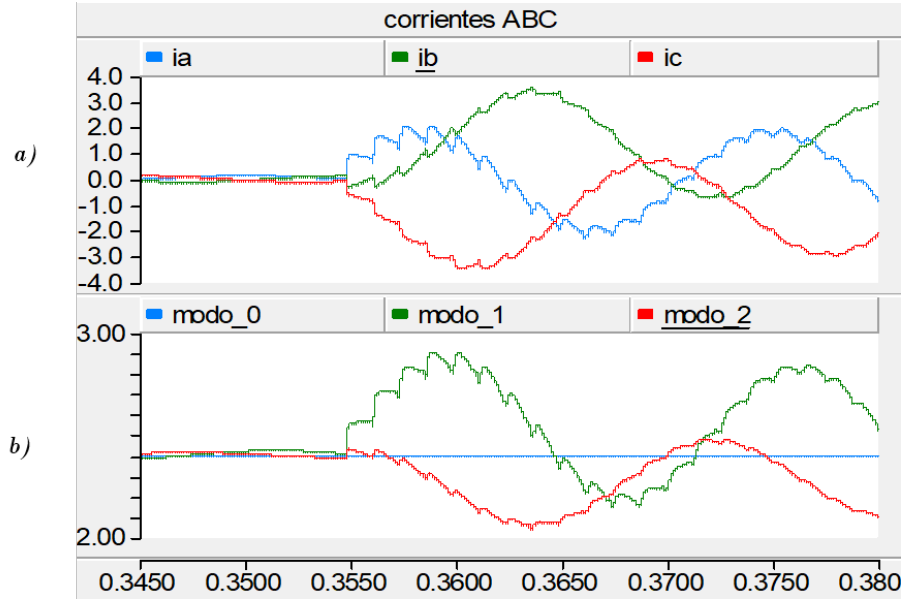


Fig. 4.3. a) señales de corrientes en componentes de fase abc. b) señales de corrientes modales 012.

donde ΔV_f y ΔI_f son las matrices columna correspondientes a las cantidades incrementales de fase y ΔV_m y ΔI_m corresponden a las matrices columna de voltaje y corrientes modales.

El algoritmo propuesto utiliza el primer frente de la señal S_1 originado por el colapso de voltaje en el punto de falla. En la sección 3.2 se mostró que el valor de S_1 (onda viajando de la falla al relevador) se puede obtener a partir de las ecuaciones (3.1). Para la ubicación del relevador ($x = 0$) de la señal ΔS_1 se pueden obtener a partir de:

$$\Delta S_1^m = Z_0^m \cdot \Delta i^m - \Delta v^m \quad (4.7)$$

Las cantidades incrementales Δi^m y Δv^m (donde m corresponde a cada modo de propagación) medidas en la ubicación del relevador pueden obtenerse substrayendo las señales de pre-falla en estado estable (1 ciclo antes de la falla) de sus correspondientes señales de postfalla de la forma:

$$\begin{aligned} \Delta v(t) &= v(t) - v(t - nT) \\ \Delta i(t) &= i(t) - i(t - nT) \end{aligned} \quad (4.8)$$

donde n es el número de ciclos y T corresponde a un período de la señal a frecuencia fundamental (60 Hz).

Un filtro delta permite determinar señales de voltaje y corriente incrementales (Fig. 4.4), para lo cual resta de una forma de onda en el tiempo la misma forma de onda retrasada por un número entero multiplicado por el período de la forma de onda [34].

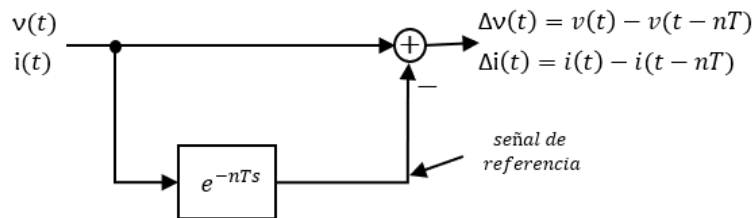


Fig. 4.4. Filtro delta utilizado en la obtención de las señales incrementales.

En un filtro delta, la forma de onda retrasada se denomina señal de referencia y la demora implementada en el filtro se denomina retardo delta-filtro. Este filtro elimina todos los efectos de periodicidad que se pueden presentar en la señal de corriente y voltaje, el cual sustrae de la señal original la misma forma de onda pero con un retardo de tiempo de un ciclo de la forma:

$$\begin{aligned} v(t - nT) \\ i(t - nT) \end{aligned} \tag{4.9}$$

Un filtro delta debe ajustarse a una sola frecuencia, normalmente esta es la frecuencia de red nominal (50 o 60 Hz). Cualquier cambio que ocurra después de un evento transitorio en cualquier componente de frecuencia que no sea fundamental tiene un efecto adverso en la salida del filtro delta tal como se muestra en la Fig. 4.5.

La Fig. 4.5 muestra la respuesta de frecuencia de un filtro delta con un retraso correspondiente a un periodo de 60 Hz. Se aprecia que en estado estable la corriente de error incremental tiene valor nulo ($\Delta i(t) = 0$) ya que no existe ningún transitorio en el sistema de potencia, sin embargo cuando se presenta algún evento en el sistema,

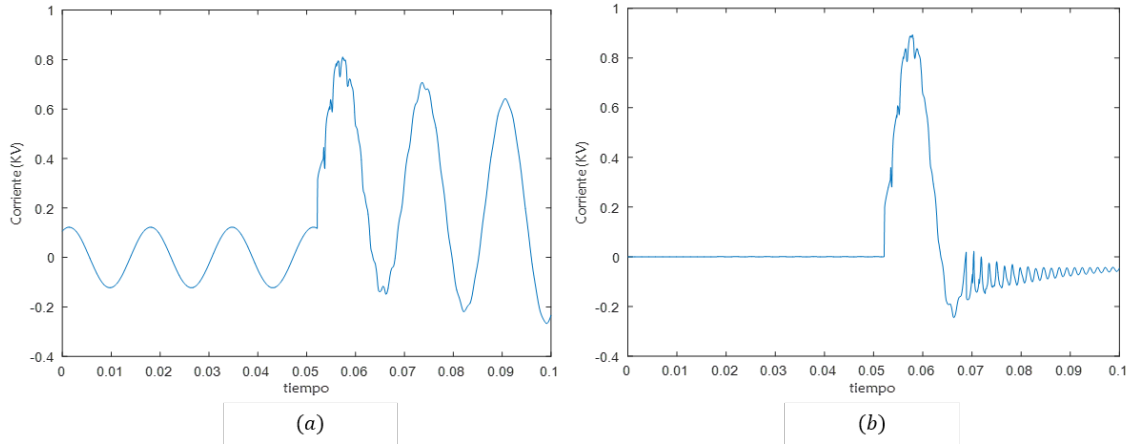


Fig. 4.5. Respuesta del filtro delta. a) Señal de corriente transitoria. b) Señal de salida del filtro.

la respuesta del filtro delta es igual a la variación de la forma de onda de la señal de entrada durante el primer ciclo ($\Delta i(t) \neq 0$).

La matriz de cantidades incrementales está compuesta de las corrientes incrementales en sus respectivos modos, representadas en cada una de sus filas. La cantidad de columnas de la matriz dependerá de las i muestras tomadas por ciclo $i = 1/(f \cdot T_s)$ y es representado por:

$$\Delta I_{012} = \begin{bmatrix} \Delta i_{0[x]} & \Delta i_{0[x-1]} & \dots & \Delta i_{0[x-i]} \\ \Delta i_{1[x]} & \Delta i_{1[x-1]} & \dots & \Delta i_{1[x-i]} \\ \Delta i_{2[x]} & \Delta i_{2[x-1]} & \dots & \Delta i_{2[x-i]} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

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 pequeña, 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.

Por el contrario si la ventana de datos es muy grande, contendrá información de las ondas reflejadas en la ubicación del relevador o en el extremo remoto de la línea. Esto ocasionará una distorsión en el contorno de los frentes de onda iniciales

originadas por el cortocircuito lo que puede dar lugar a una ubicación errónea del cortocircuito.

La selección se hizo en forma empírica siendo de $25 \mu s$, de esta forma se logra una buena caracterización del frente de onda originado por el cortocircuito. La ventana de datos sucesivas se forma con 25 muestras de las señal ΔS_1 con un intervalo de $1 \mu s$ entre muestras, lo que representa una frecuencia de muestreo de 1 MHz.

Se realiza ventanas sucesivas de datos que corresponde al valor de ΔS_1 para evaluar si supera el umbral ϵ_f como se indica en la ecuación 4.12. La Fig. 4.6 muestra una ventana de datos usada por el algoritmo, donde la línea horizontal corresponde al umbral ϵ_f (este se describe en la sección 4.5).

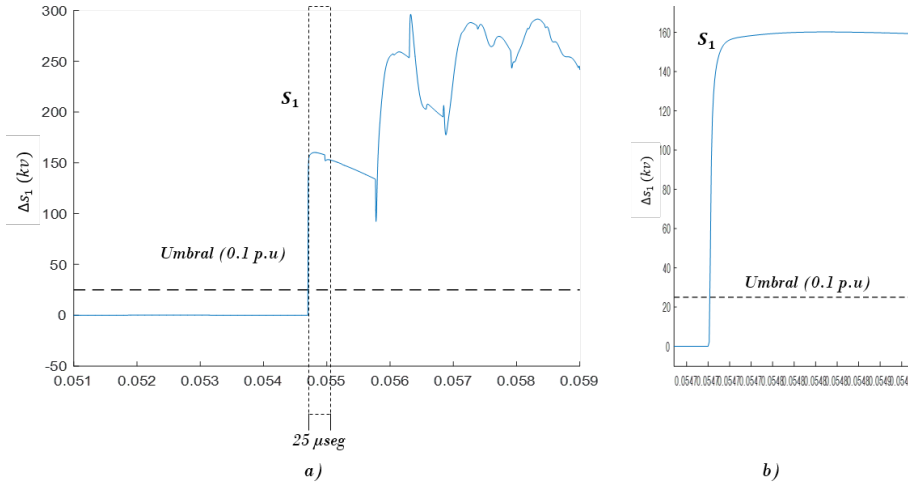


Fig. 4.6. Ventana de datos del algoritmo. a) Señal de entrada ($25 \mu seg$). b) Acercamiento de la forma de onda (25 muestras).

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 (correspondientes a los frentes de onda medidos en la ubicación del relevador) para que estén entre 0 y 1, con el propósito de no modificar el contorno de los frentes de onda, estos se escalaron de la forma:

$$t_n = \begin{cases} \frac{\Delta S_1}{\max(\Delta S_1)} & \text{si } |\max(\Delta S_1)| > |\min(\Delta S_1)| \\ \frac{\Delta S_1}{\min(\Delta S_1)} & \text{si } |\max(\Delta S_1)| < |\min(\Delta S_1)| \end{cases} \quad (4.11)$$

Los vectores t_n corresponden a las versiones normalizadas de los frentes de onda usados como patrones de prueba, que se realiza a la ventana de 25 muestras del primer frente de onda.

4.5 UMBRALES

En el algoritmo propuesto se utilizan 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, tal como se muestra en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. umbrales empleados

umbral	función	valor
ϵ_f	Determina si la señal pertenece a una falla	0.1 PU*
ϵ_{SMC}	Clasifica fallas internas y externas	0.2

* Tomando como base el voltaje de operación de la línea de transmisión.

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

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= 0 \text{ Estado estable} \\ \Delta S_1 &> \epsilon_f \text{ Cortocircuito} \end{aligned} \tag{4.12}$$

El valor seleccionado para ϵ_f es de 0.1 pu, tomando como base el voltaje de

operación de la línea de transmisión. Este umbral permite determinar si la señal transitoria corresponde a un evento de falla o si se debe a cualquier otra condición, como apertura/cierre de interruptores, conexión/desconexión de elementos a la red eléctrica, asimetrías u oscilaciones de potencia.

En la Fig.4.7 se muestra el comportamiento de ΔS_1 durante este tipo de transitorios en un sistema de 230 kV; en la Fig. Fig.4.7(a) se presenta un incremento de la corriente de carga del 50%, en la Fig. 4.7(b) se muestra una deformación de onda de tensión debido a la presencia de armónicos por la conexión a la red de convertidores estáticos que producen un THD del 4.18% y en la Fig. 4.7(c) se muestra la desconexión de cargas sensibles, que ocasiona un desbalance de voltaje del 2.3%. En todos los casos la señal ΔS_1 responde al evento transitorio, pero en ningún caso supera el umbral para detección de cortocircuitos.

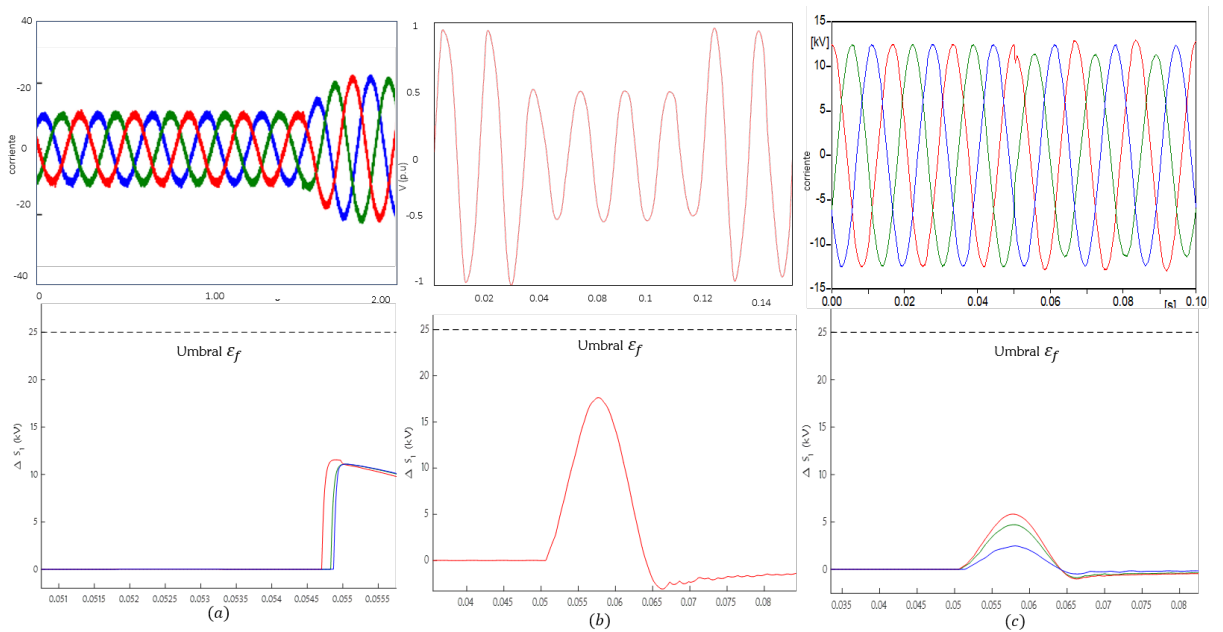


Fig. 4.7. Desempeño del umbral ϵ_f . a) Incremento de carga. b) Presencia de armónicos. c) Desbalance de cargas.

4.5.2 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 manera empírica como resultado de todas las simulaciones realizadas en donde se evaluó el desempeño del algoritmo bajo diferentes condiciones en el sistema de potencia.

Este criterio, obtenido de manera heurística de las 200 pruebas realizadas, establece que para eventos donde la falla se encuentra dentro de la línea protegida la magnitud de la señal supera el umbral de 0.2, por el contrario, cuando una falla se encuentra fuera de la línea protegida, la señal no supera este valor.

En la Fig. 4.8 se muestra el criterio de operación con una línea horizontal en 0.2, si supera el umbral se debe a una falla interna de la línea (Fig. 4.8(a)) y una falla externa se muestra cuando no supera el umbral (Fig. 4.8(b)).

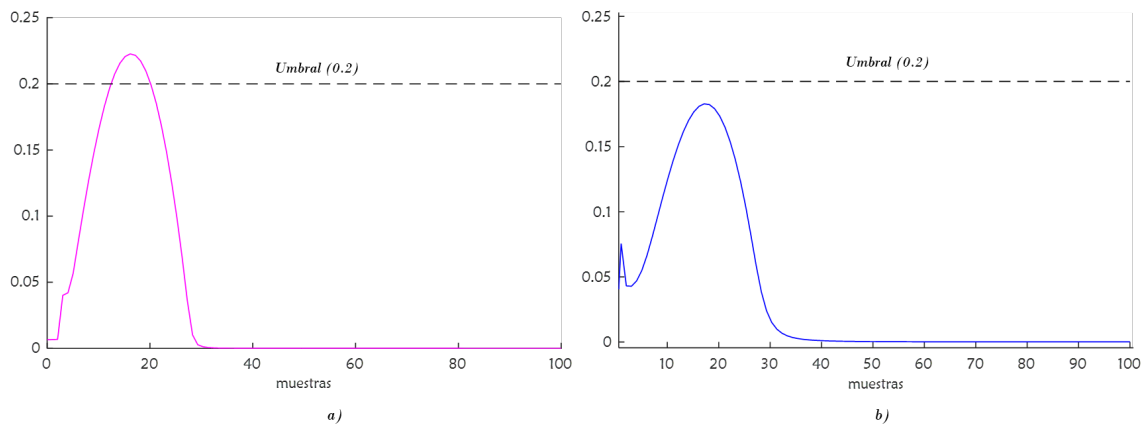


Fig. 4.8. Umbral para discriminar entre fallas internas y externas. a) Falla interna, b) Falla externa.

4.6 CASO DE ANÁLISIS

A continuación se describe el funcionamiento del algoritmo propuesto, considerando dos escenarios, una falla interna y una externa en una línea de transmisión. En este caso se utiliza las señales de corriente y voltaje.

Las simulaciones se realizaron en un sistema de potencia de 230 kV, con los generadores conectados a través de dos líneas de transmisión con diferente geometría de conductores e impedancia característica. En este caso la línea 1 es la línea protegida. La configuración de las líneas del sistema son prácticamente idénticas, solo se diferencian en que la línea 2 tiene 2 conductores por fase, las impedancias características de las líneas se muestran en la Tabla 4.2, esto origina una discontinuidad en el punto donde se unen ambas líneas; el diagrama unifilar del sistema se muestra en la Fig.A.1 y los detalles del mismo se encuentran en el Apéndice A.

Tabla 4.2. Impedancias características de la Línea 1 y Línea 2.

Línea	$Z_0(\Omega)$
1	394.65
2	318.75

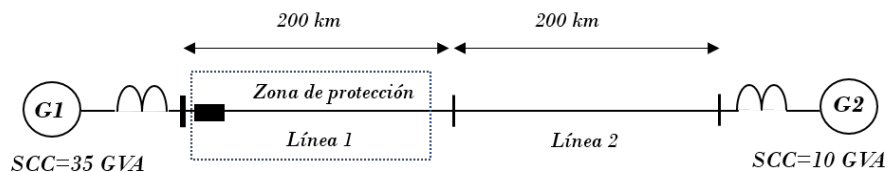


Fig. 4.9. Sistema de prueba.

Las simulaciones se realizaron en PSCAD utilizando el modelo de línea con parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia. El algoritmo del SMC se implementó en matlab, en total se simuló 200 casos.

Los frentes de onda generados por las fallas correspondientes al modo 1 (modo aéreo) fueron representados como vectores n -dimensionales de la forma $\Delta S_1 = [x_1 x_2 \dots x_p]$, cuyos valores corresponden al primer frente de onda que alcanza la ubicación del relevador.

En las Fig.4.10 se muestran las formas de onda de voltaje y corriente en componentes de fase ABC para una falla interna en L1 al 99% de la línea (respecto al punto de medición) y una falla externa en L2 al 1% de la línea. Ambas fallas se simulan con un ángulo de inserción de 90° . El objetivo es describir la operación del algoritmo propuesto para fallas que ocurren cerca del punto de conexión entre ambas líneas.

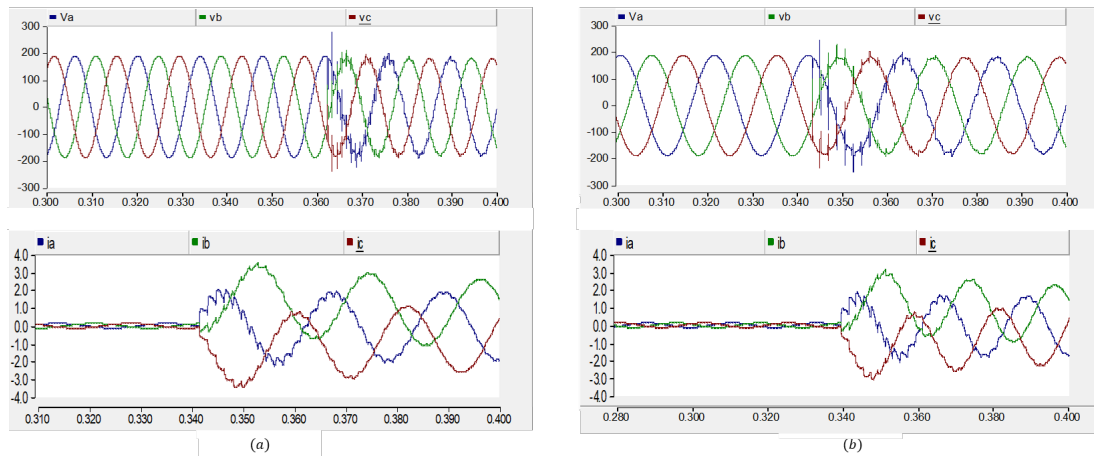


Fig. 4.10. Señales de voltaje y corriente en ABC para una falla, a) En la línea 1. b) En la línea 2.

En la Fig.4.11 se muestran las formas de onda de voltaje y corriente en componentes modales 012, correspondientes a la transformación de Wedephol. Estas señales pasan por el filtro Delta para eliminar las componentes de estado estable; en la Fig.4.12 solo se muestran las señales incrementales de corriente del modo aéreo 1 para ambas fallas.

Una vez determinadas las cantidades incrementales de voltaje y corriente se determina la señal ΔS_1 ; estas señales para ambas fallas se muestran en la Fig.4.13.

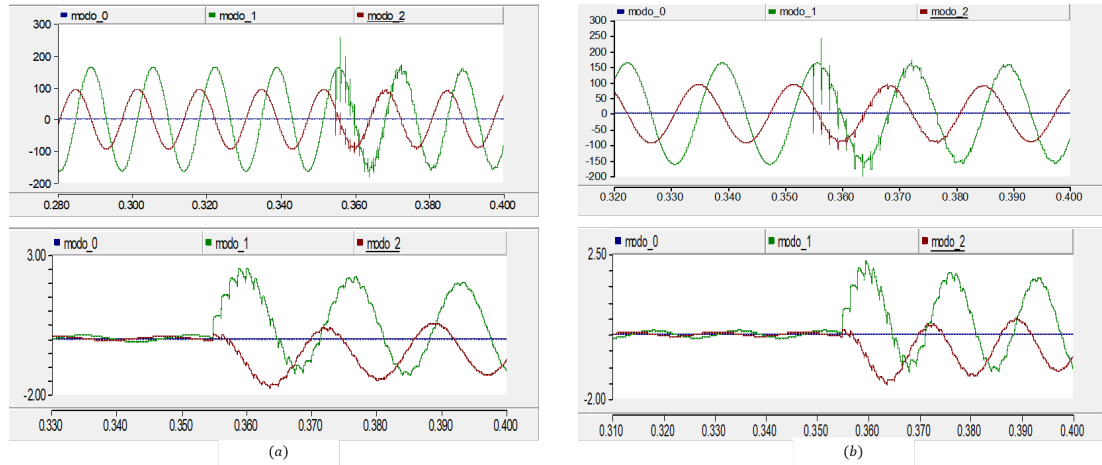


Fig. 4.11. Señales de voltaje y corriente en 012 para una falla, a) En la línea 1. b) En la línea 2.

La ventana de datos para cada falla se forma a partir de la primera muestra que supera el umbral de 0.1 p.u, éstas se muestran en la Fig.4.14 normalizadas en el rango $[-1, +1]$.

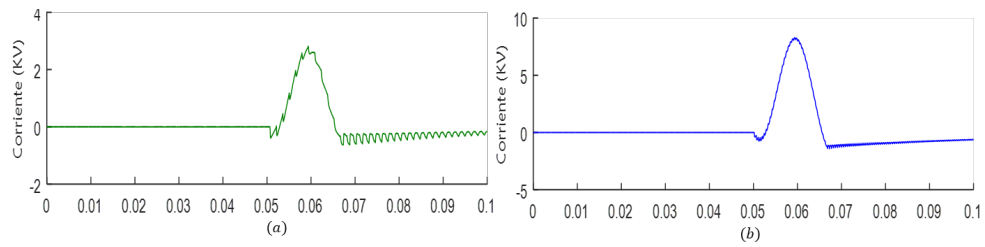


Fig. 4.12. Cantidades incrementales de corriente para la falla interna (a) y la falla externa (b).

En la Fig.4.15 se muestra la discriminación entre falla interna y externa; se calcula el SMC de las señales ΔS_1 y se compara con el umbral de 0.2. Se puede apreciar que cuando el SMC supera el umbral pre-establecido se concluye que ha ocurrido una falla en la línea protegida, independientemente de su ubicación, que en este caso es al 99% de la longitud de la línea.

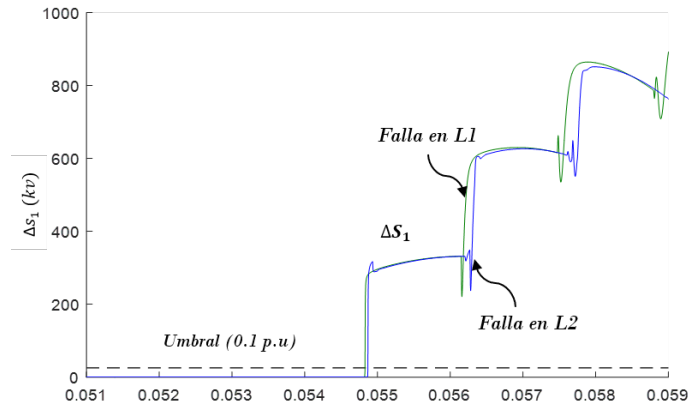


Fig. 4.13. Señal ΔS_1 , para falla interna (verde) y falla externa (azul).

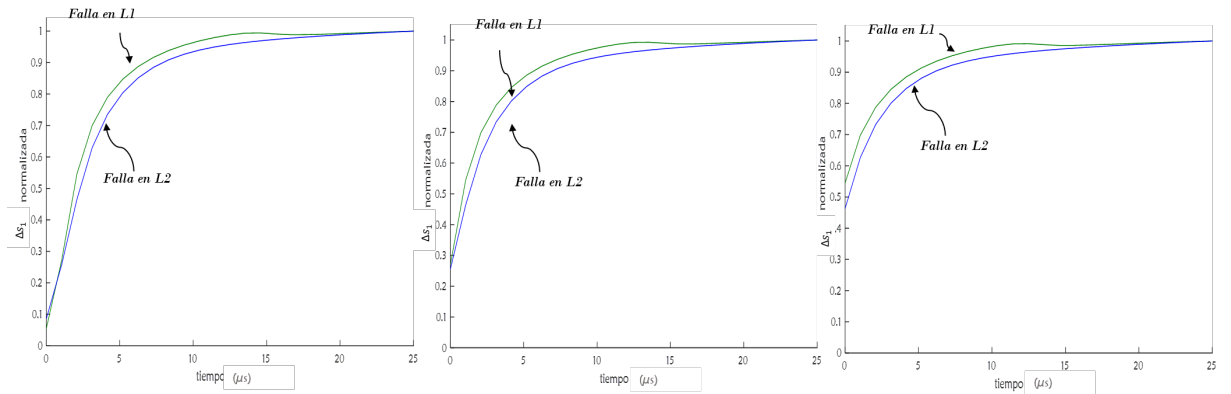


Fig. 4.14. Ventanas sucesivas ΔS_1 normalizada (ventana de 25 muestras).

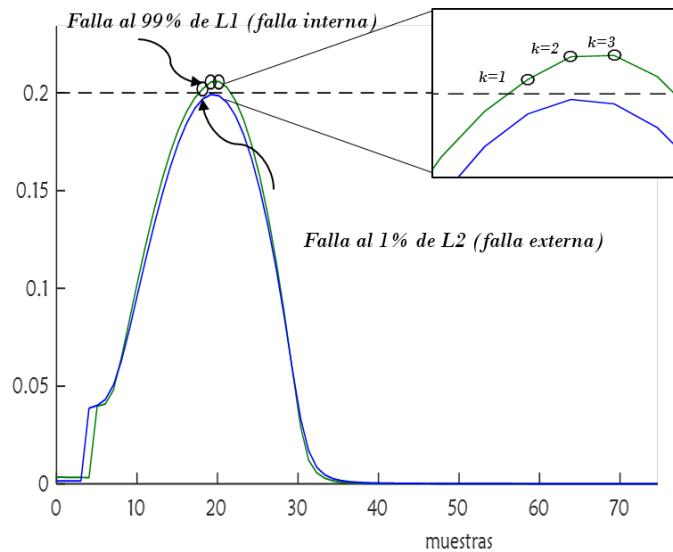


Fig. 4.15. Clasificación de falla interna y externa aplicando SMC.

4.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se explicó el principio de funcionamiento del algoritmo propuesto para protección de líneas de transmisión, utilizando como información el primer frente de las ondas viajeras, el algoritmo utiliza la información que proporciona el frente de onda sobre si se ha atravesado o no una discontinuidad o cambio de impedancia característica.

El algoritmo utiliza dos umbrales; el primero determina que ha ocurrido una falla utilizando un valor máximo del 0.1 p.u sobre la base del voltaje de operación de la línea de transmisión. El segundo discrimina entre una falla interna y una falla externa; este umbral se definió en forma heurística a partir de 200 casos de simulación considerando distintos escenarios (tipo de falla, resistencia de falla y ángulo de inserción de falla).

Se muestra el desempeño del algoritmo al analizar una falla interna al 99 % de la línea protegida y al 5 % de la línea adyacente; aunque las fallas son muy cercanas entre si, el algoritmo puede realizar la clasificación de fallas debido a que realiza los patrones característicos de fallas internas y externas.

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 *us* 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.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas a las que sometió el algoritmo propuesto, los casos de falla simulados incluyen fallas trifásicas (la más severa) y fallas monofásicas (la más común), también se incluyen casos de fallas críticos, tal es el caso de fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje. También se presentan casos de fallas simuladas en tiempo real (RSCAD) a una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

Las pruebas realizadas se hicieron con la finalidad de demostrar que el algoritmo puede detectar fallas en la línea protegida independientemente de la topología del sistema de potencia, esto es posible gracias a que las señales de entradas son normalizadas antes de aplicar el SMC. Se presenta una comparación de los resultados del algoritmo de SMC con el algoritmo de la componente principal, con la finalidad de demostrar las ventajas del algoritmo propuesto. Una mejora del algoritmo propuesto, es que puede discriminar entre fallas internas y externas usando únicamente la información de la onda viajera de corriente. Funciona como una protección diferencial, pero no requiere canal de comunicación para recibir la información del extremo remoto de la línea. Los resultados obtenidos muestran el buen desempeño

del algoritmo propuesto.

5.2 SISTEMA DE PRUEBA

El diagrama esquemático se muestra en la Fig.5.1, el sistema básicamente consta de dos generadores conectados por dos líneas de diferentes impedancias características, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 5.1. Para las pruebas de desempeño no se requiere simular un sistema de mayor tamaño (9 o 14 nodos del IEEE por ejemplo), ya que el algoritmo utiliza las primeras ondas viajeras incidentes producidas por un cortocircuito, por lo que no es afectado por las reflexiones/refracciones posteriores de las ondas viajeras; para las fallas críticas se simularon fallas cerca del cruce por cero, además, se modificaron los parámetros de L2, con la finalidad de comprobar si el algoritmo puede clasificar las fallas aún cuando entre las líneas presentan características similares de geometría.

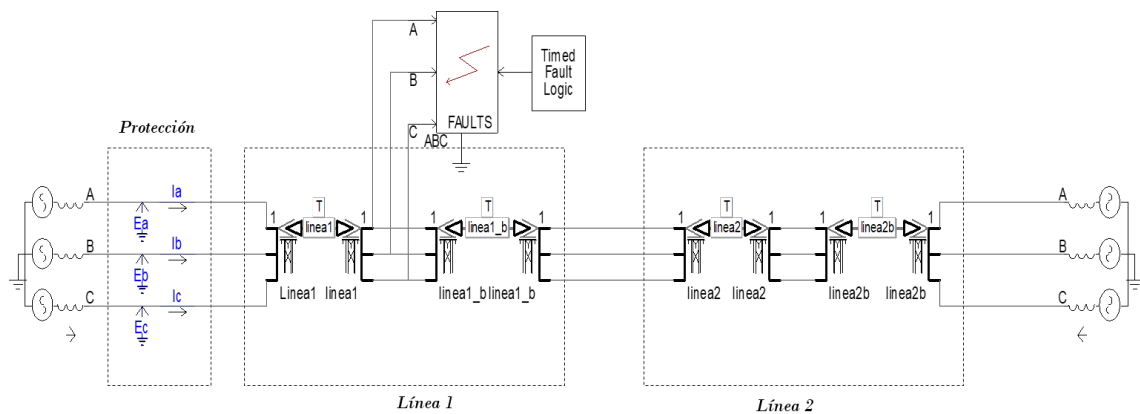


Fig. 5.1. Sistema de prueba.

El algoritmo está implementado en MATLAB, donde se realiza el procesamiento de señales y la detección del tipo de falla a partir de las mediciones obtenidas del sistema de prueba.

Tabla 5.1. Información de las líneas en el sistema de prueba.

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

5.3 CASOS DE FALLA

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 diferente ángulo de inserción de falla (4° , 5° , 15° , 30° , 45° y 90°), para diferentes valores de resistencia de falla (0, 30 y 50 Ω), y aplicadas a diferentes distancias de la línea 1 (1 %, 5 %, 10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % y 99 %) y de la línea 2 (1 %, 5 %, 10 %, 20 %, 50 %, 70 %, y 90 %), utilizando una frecuencia de muestreo de 1 MHz .

Se realizaron 70 casos de simulaciones en tiempo real, las simulaciones realizadas en RSCAD corresponden a fallas trifásicas (ABC) sólidas y monofásicas (A-G) con resistencia de falla de 0 y 50 Ω , con diferentes ángulos de inserción de falla (5° , 30° , 45° y 90°) y simuladas en distintas ubicaciones en las líneas 1 y 2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 % y 99 %). Para este caso la frecuencia de muestreo es de 100 kHz ; el propósito es relajar la restricción de la frecuencia de muestreo para evaluar la implementación del algoritmo propuesto en las plataformas de hardware utilizadas en los relevadores de protección actuales.

A continuación se describe los escenarios que se van a explicar:

- Fallas cercanas al nodo local.
 - Falla A-G sólida con ángulo de 90° de falla al 1 % de la línea 1.
 - Falla ABC sólida con ángulo de 90° de falla al 1 % de la línea 1.

- Fallas cercanas al nodo remoto.
 - Falla A-G sólida con ángulo de 90° de falla al 90 % de la línea 1.
 - Falla ABC sólida con ángulo de 90° de falla al 90 % de la línea 1.
 - Falla A-G sólida con ángulo de 90° de falla al 10 % de la línea 2.
 - Falla ABC sólida con ángulo de 90° de falla al 10 % de la línea 2.

- Ángulos de inserción de falla.
 - Fallas A-G sólida con ángulos de; 4° , 30° y 90° para fallas en L1 (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).
 - Fallas ABC sólida con ángulos de; 4° , 30° y 90° para fallas en L1 (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).

- Fallas con $R_f = 50 \Omega$.
 - Fallas A-G con ángulo de 90° para fallas en L1 (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).
 - Fallas ABC con ángulo de 90° para fallas en L1 (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).

- Señales de corrientes incrementales modo 0.
 - Fallas A-G sólidas con ángulo de 45° para fallas en L1 (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 99 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).

- Señales de corrientes incrementales modo 1.
 - Fallas A-G sólidas con ángulo de 45° para fallas en L1 (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 99 %) y L2 (1 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).
 - Fallas ABC sólidas con ángulo de 45° para fallas en L1 (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 99 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).

- Pruebas en RSCAD con frecuencia de 100 kHz .
 - Fallas A-G con ángulo de 90° para fallas en L1 (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).
 - Fallas ABC con ángulo de 90° para fallas en L1 (20 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %) y L2 (5 %, 30 %, 50 %, 70 %, y 90 %).

5.3.1 FALLAS CERCANAS AL NODO LOCAL

El uso de la ventana de datos puede ocasionar problemas para detectar fallas que ocurren cerca del nodo local (donde está la protección), esto se debe a que una onda viajera generada por una falla cercana llegará rápidamente a la ubicación del relevador reflejándose continuamente entre el nodo y el punto de falla, estas reflexiones sucesivas provocan distorsión en el frente de onda originado por la falla (falla kilométrica) [11].

En la Fig.5.2 se muestran las señales de corrientes y voltajes ABC y 012 para una falla A-G sólida simulada al 1 % de la línea 1 y en la Fig. 5.3 se muestran las señales de voltaje y corriente de falla trifásica al 1 % de la línea 1, ambos casos con un ángulo de inserción de falla de 90° .

Los frentes de onda para ambos casos se muestran en la Fig.5.4(a) y el resultado aplicando SMC se muestra en la Fig.5.4(b), se observa que las dos señales quedan por arriba del umbral (falla interna), demostrando que no existe problemas para identificar el evento como una falla interna.

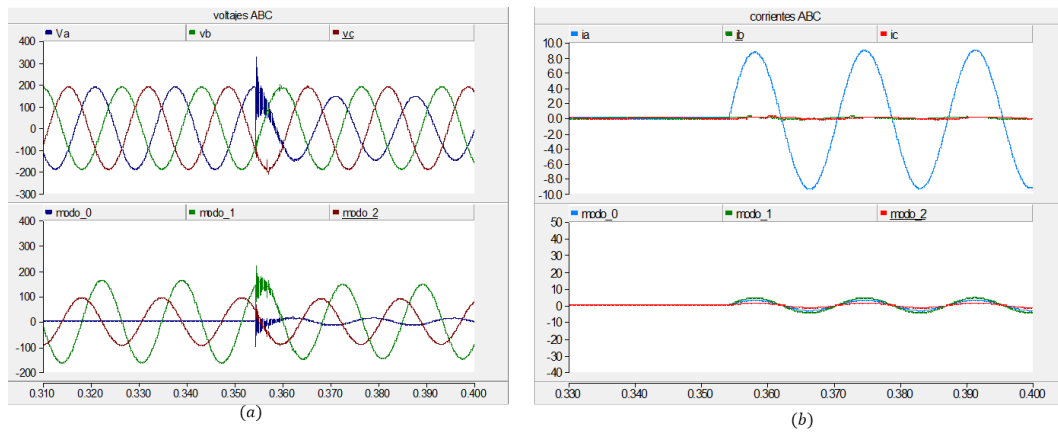


Fig. 5.2. Señales de voltaje y corriente para una falla A-G sólida al 1% de L1. a) Voltajes ABC y 012. b) Corrientes ABC y 012.

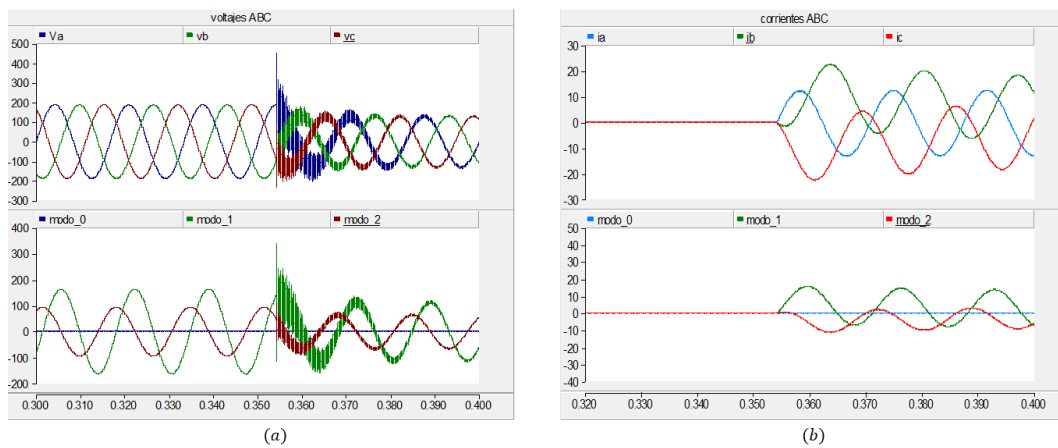


Fig. 5.3. Señales de voltajes y corrientes para una falla ABC sólida al 1% de L1. a) Voltajes en ABC y 012. b) Corrientes en ABC y 012.

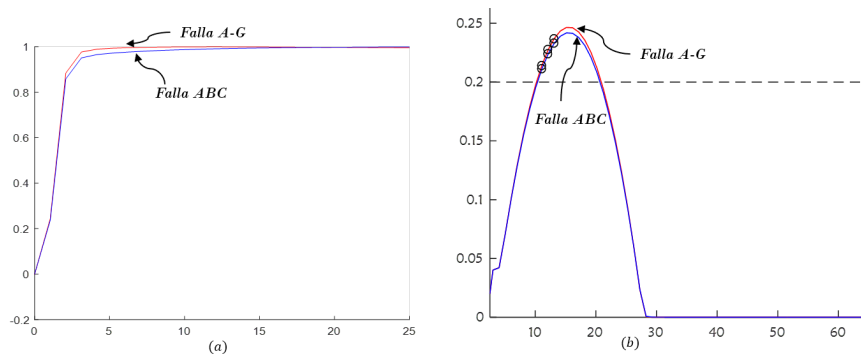


Fig. 5.4. Falla ABC y A-G sólida al 1% de L1. a) Ventana de datos. b) SMC.

5.3.2 FALLAS CERCANAS AL NODO REMOTO

En la Fig. 5.5(a) se muestran las señales de corriente y voltaje de una falla A-G sólida con ángulo de inserción de falla de 90° al 90% de la línea 1, en la Fig. 5.5(b) se muestra la misma condición de falla pero al 10% de la línea 2.

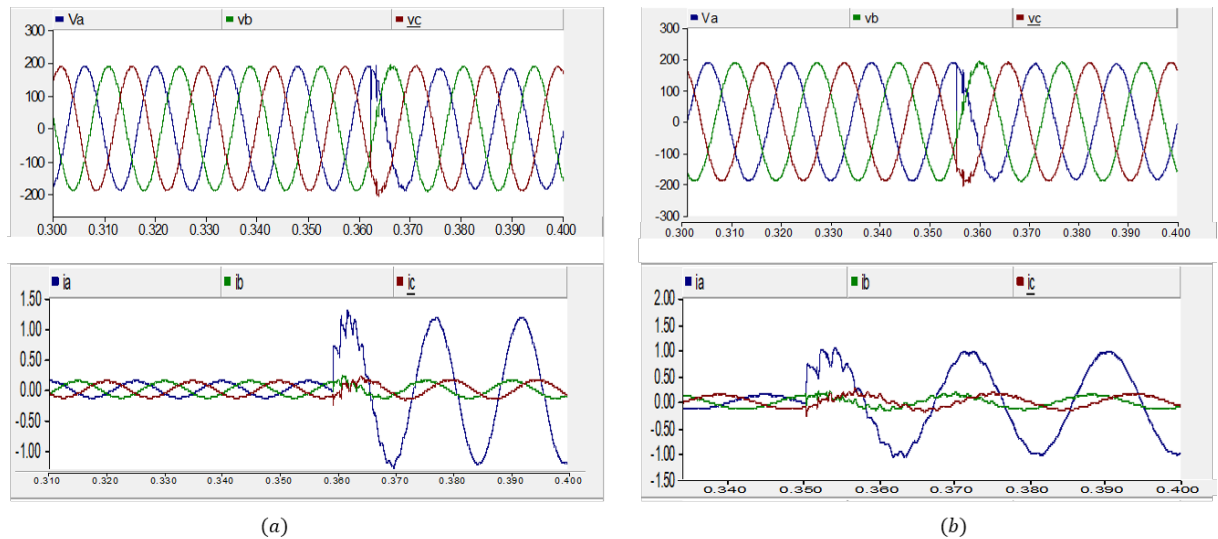


Fig. 5.5. Señales de voltaje y corriente para una falla A-G sólida con ángulo de inserción de falla de 90° . a) 90% de la línea 1. b) 10% de la línea 2.

Estas pruebas se realizan para verificar la sensibilidad del algoritmo, ya que la falla en la línea 1 se encuentra cerca de la línea 2 por lo que los frentes de ondas de 25 muestras tienen un comportamiento similar, (Fig.5.6(a)), sin embargo, el algoritmo propuesto permite identificar el tipo de falla, como se muestra en la Fig.5.6(b).

En la Fig. 5.7(a) se observa las señales de voltaje y corriente de una falla trifásica sólida con ángulo de inserción de falla de 90° al 90% de la línea 1 y en la Fig. 5.7(b) se muestran las señales de voltaje y corriente en la línea 2 al 10%. La respuesta del algoritmo se muestra en la Fig. 5.8(b), se puede apreciar como el algoritmo hace una correcta identificación del tipo de falla (interna/externa).

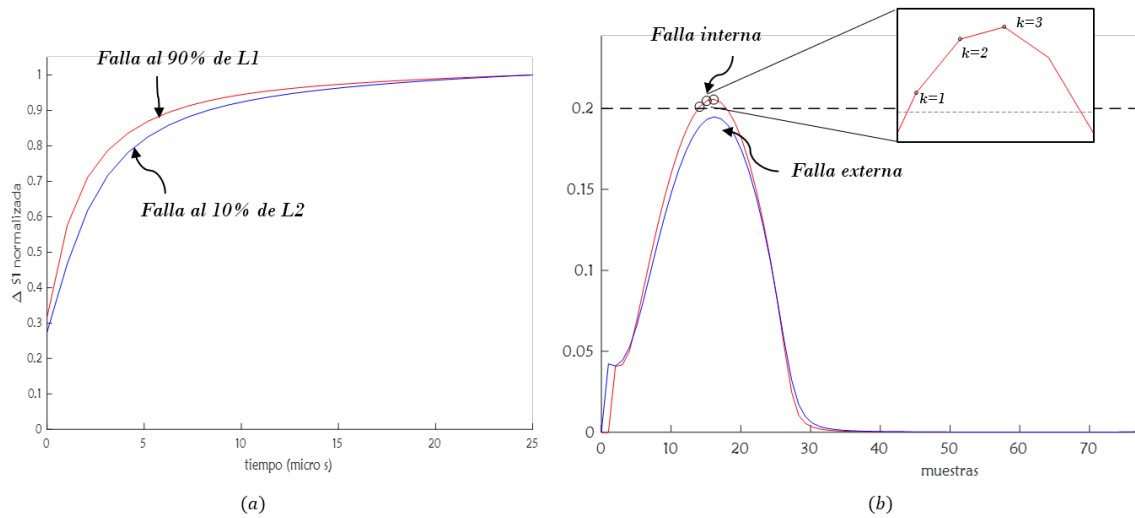


Fig. 5.6. Identificación de una falla A-G sólida con ángulo de inserción de falla de 90°. a) Ventana de datos. b) SMC.

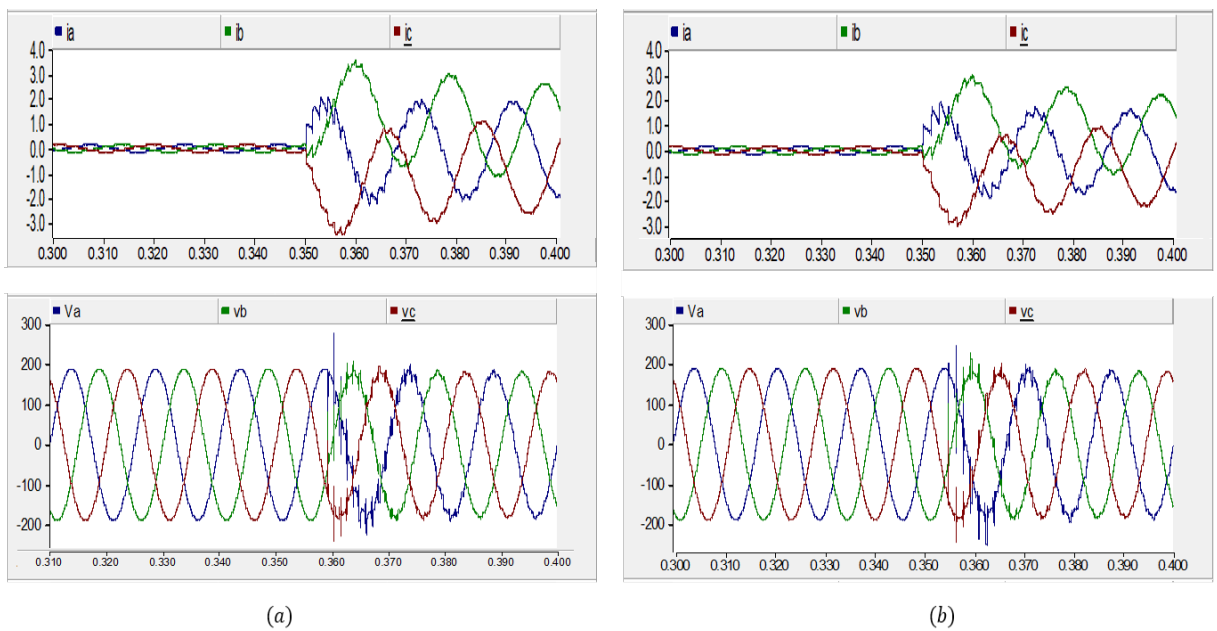


Fig. 5.7. Señales de voltaje y corriente para una falla ABC con ángulo de inserción de falla de 90°. a) 90% de la línea 1. b) 10% de la línea 2.

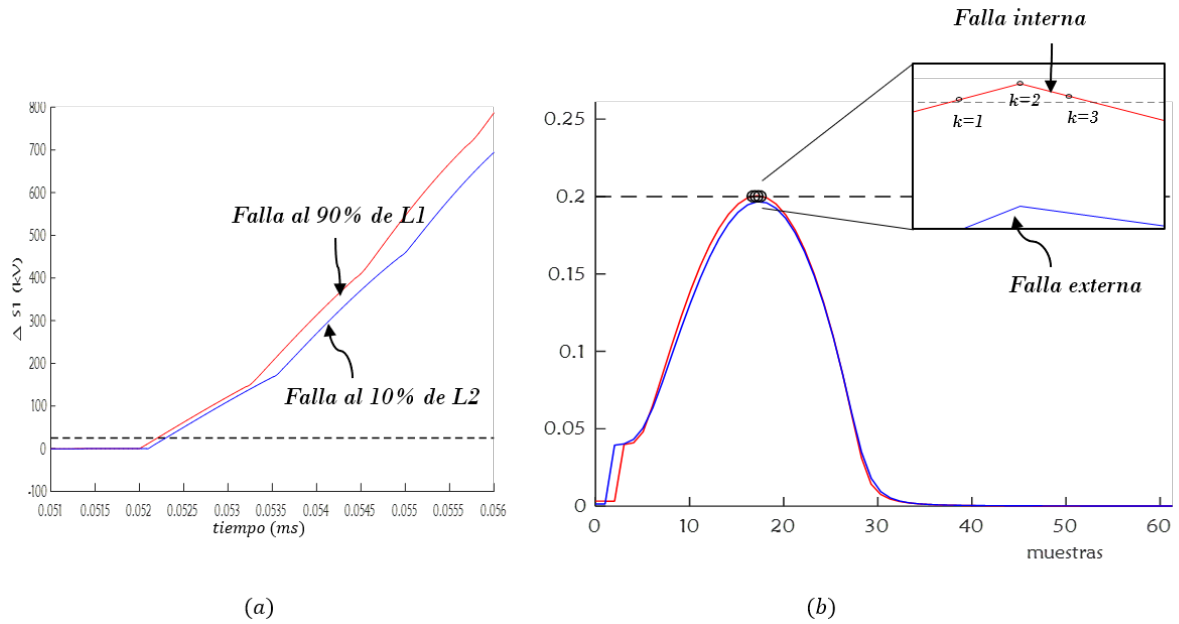


Fig. 5.8. Identificación de una falla ABC sólida con ángulo de inserción de falla de 90° . a) Ventana de datos. b) SMC.

5.3.3 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL ÁNGULO EN LA INSERCIÓN DE FALLA

El ángulo de inserción en el que ocurre una falla influye significativamente en los cambios en el voltaje y la corriente en la línea. Un ángulo de inserción de falla cercano o igual al cruce por cero de la onda de voltaje, genera cambios muy pequeños en la magnitud de las señales medidas en la ubicación del relevador.

Esto puede observarse en la Fig. 5.9(a) se muestran las señales de voltaje para una falla monofásica que ocurre a un ángulo de 4° en L1, y en Fig. 5.9(b) se muestran las señales de voltaje para una falla trifásica que ocurre a un ángulo de 4° en L1. En ambos casos se observa que las señales transitorias generadas por la falla son muy pequeñas, sin embargo el algoritmo muestra buena capacidad para discriminar fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje, excepto el caso donde el ángulo de inserción es exactamente 0° .

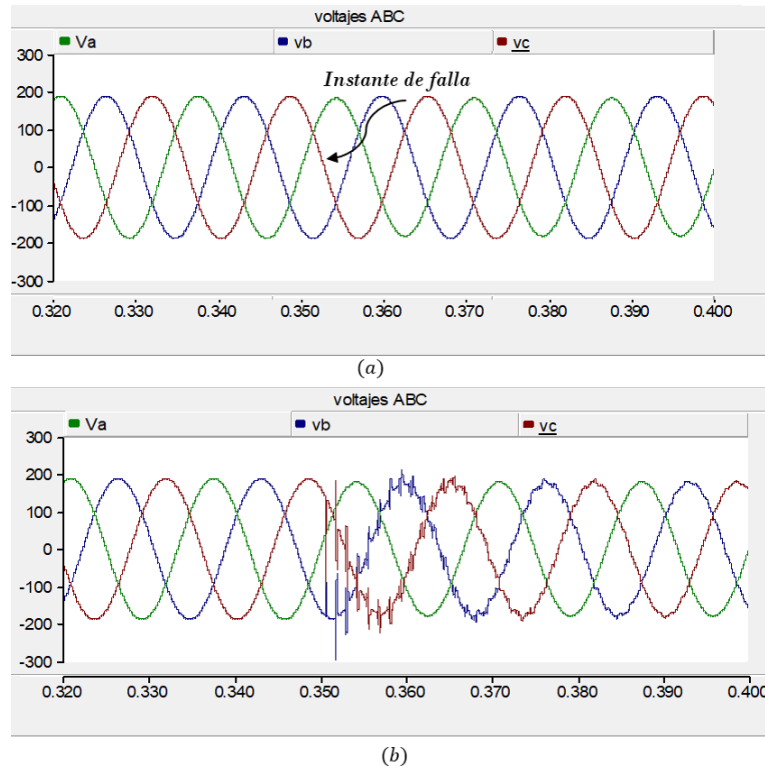


Fig. 5.9. Voltajes ABC para una falla con ángulo de inserción de falla de 4° , a) Falla A-G sólida, b) Falla ABC sólida.

Con el propósito de analizar el desempeño del algoritmo propuesto bajo estos escenarios se realizaron pruebas con diferentes ángulos de inserción de falla, para fallas monofásicas solidas y trifásicas sólidas. En la Tabla 5.2 se muestran las fallas simuladas.

Tabla 5.2. Escenarios para evaluar el efecto del ángulo de inserción de falla.

Tipo de falla	Ángulo de inserción de falla	Fallas en L1 (%)	Fallas en L2 (%)
A-G	4° 30° 90°	20 30 50 70 90	5 30 50 70 90
ABC	4° 30° 90°	20 30 50 70 90	5 30 50 70 90

Los resultados se muestran en las Fig.5.10, Fig.5.11 y Fig.5.12, en cada una se hace el comparativo de fallas A-G sólidas con ABC sólidas, se muestra que el

algoritmo propuesto es capaz de identificar las fallas internas y externas.

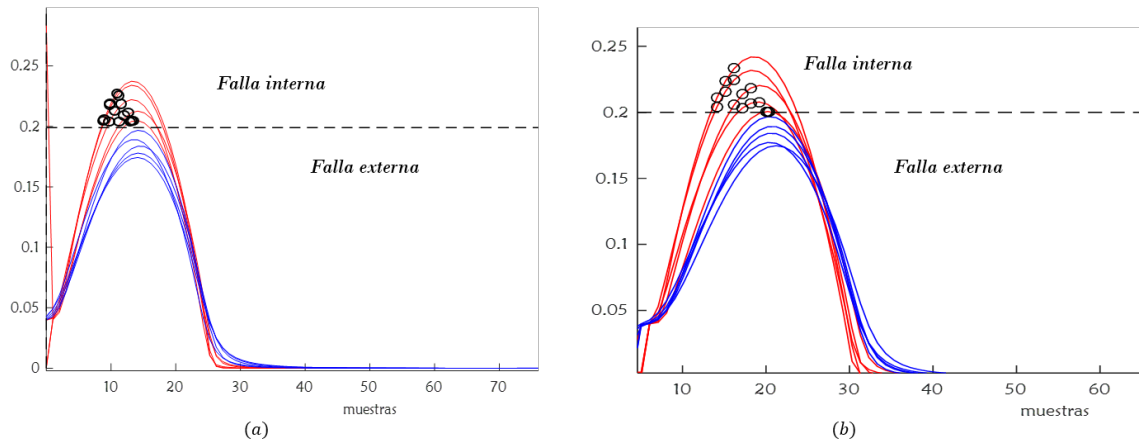


Fig. 5.10. Identificación de fallas con un ángulo de inserción de falla de 4°. a) Fallas A-G. b) Fallas ABC.

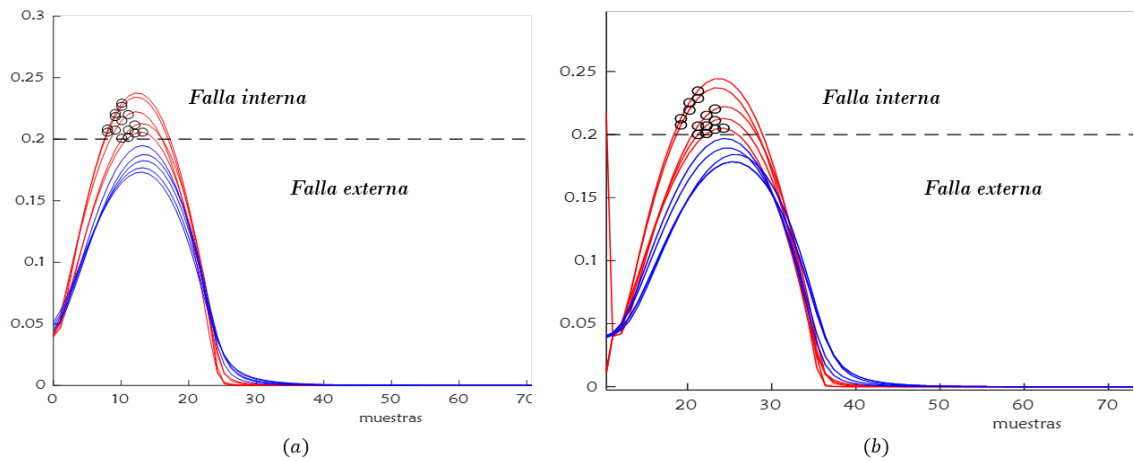


Fig. 5.11. Identificación de fallas con un ángulo de inserción de falla de 30°. a) Fallas A-G. b) Fallas ABC.

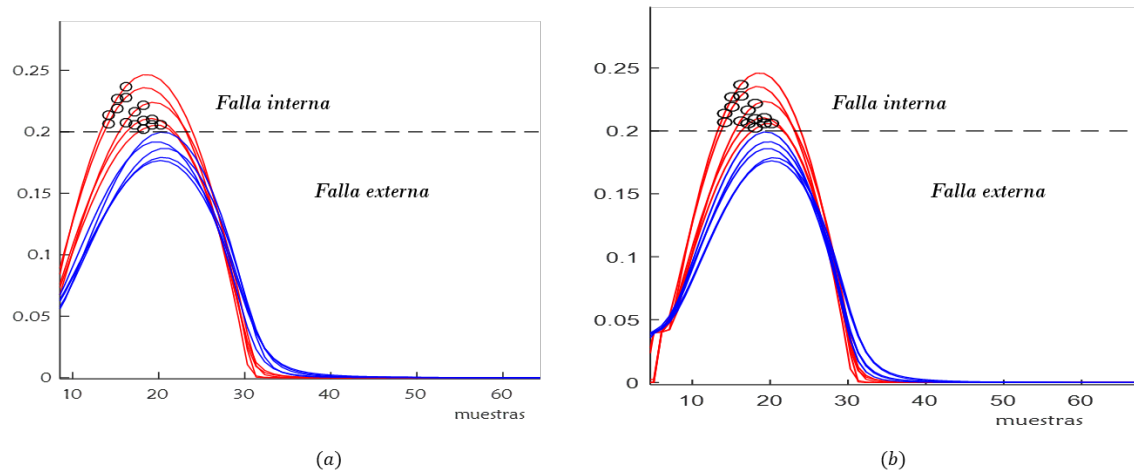


Fig. 5.12. Identificación de fallas con un ángulo de inserción de falla de 90° . a) Fallas A-G. b) Fallas ABC.

5.3.4 COMPARACIÓN CON EL ALGORITMO DEL ACP

Para evaluar la respuesta del algoritmo se realiza la comparación con el algoritmo de la componente principal; se evalúa el efecto de la resistencia de falla, ya que esta provoca cambios pequeños en las señales de voltaje y corriente de fase, haciendo que las ondas viajeras generadas por estas fallas sean de magnitud muy pequeña.

En las Fig. 5.13 y Fig. 5.14 se muestran las respuestas para una falla monofásica y trifásica con un ángulo de inserción de falla de 30° , las fallas simuladas se muestran en la Tabla 5.3. La comparación que se hace en la Fig. 5.14 se observa que para este caso de simulación, el algoritmo ACP no puede hacer la clasificación de la falla externa al estar muy cerca de la terminal remota, por el contrario el algoritmo propuesto permite identificar las fallas internas y externas bajo estas condiciones.

Tabla 5.3. Escenarios para comparar los algoritmos SMC y ACP.

Tipo de falla	Longitud L1 (%)	Longitud L2 (%)
A-G Rf=50	20 30 50 70 90	5 30 50 70 90
ABC Rf=50	20 30 50 70 90	5 30 50 70 90

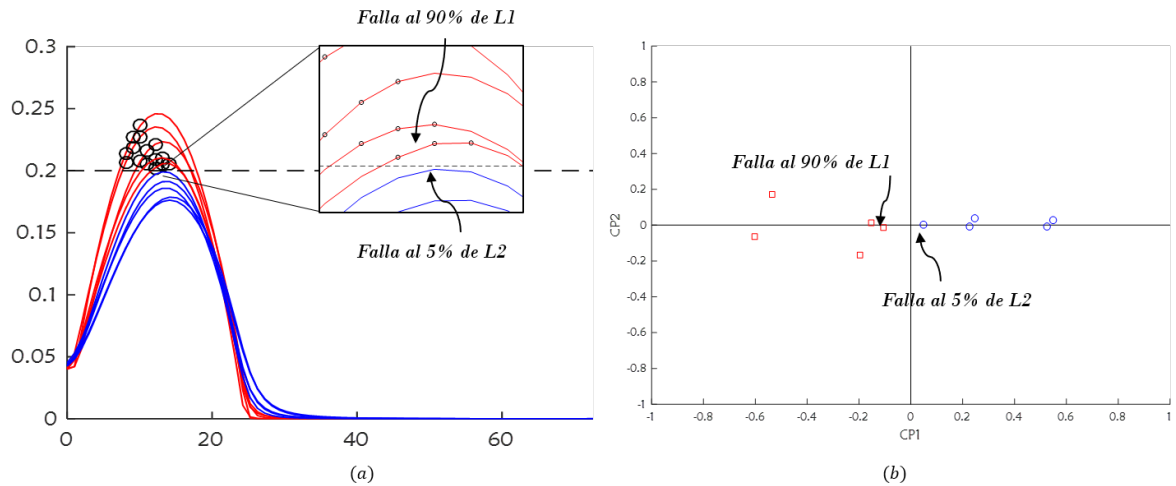


Fig. 5.13. Identificación de fallas A-G sólidas con un ángulo de inserción de 30°, a) Algoritmo SMC, b) Algoritmo ACP.

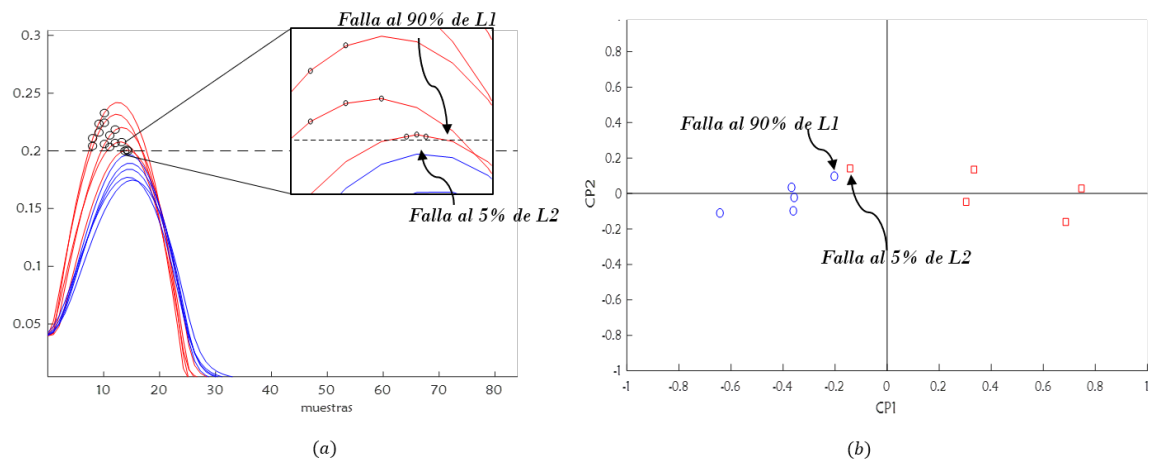


Fig. 5.14. Identificación de fallas ABC sólidas con un ángulo de inserción de 30°. a) Algoritmo del SMC. b) Algoritmo ACP.

5.3.5 PRUEBAS CON SEÑALES DE CORRIENTE

El algoritmo funciona de forma correcta con las señales ΔS_1 y en consecuencia se requieren mediciones de voltaje y corriente; sin embargo el problema con las mediciones de voltaje es que los transformadores de potencial son divisores capacitivos y presentan una respuesta deficiente a las altas frecuencias [33]. Es por ello que es deseable omitir las mediciones de voltaje y eliminar el problema del ancho de banda

de los TP. Para este algoritmo se puede trabajar con señales de corriente incremental en modo de tierra (ΔI_0) o aéreo uno (ΔI_1).

El umbral para estas condiciones fue obtenido de forma heurística y se debe modificar en dependencia de la señal de corriente que se utilice, en la Tabla 5.4 se muestran los valores.

Tabla 5.4. Umbrales para señales ΔI_0 y ΔI_1 .

Modo	Umbral
0	0.1
1	0.126

Para demostrar la respuesta del algoritmo propuesto con señales de corrientes incrementales se simularon las fallas descritas en la Tabla 5.5 que corresponden a un ángulo de inserción de falla de 45° .

Tabla 5.5. Falla simuladas usando corrientes en modo 0 y modo 1.

Modo	Tipo de falla	Falla L1 (%)	Falla L2 (%)
0	A-G	10 30 50 70 90	5 30 50 70 99
1	A-G ABC	10 30 50 70 90	5 30 50 70 99

Las fallas trifásicas solo se evaluaron para el modo 1, debido que al ser una falla balanceada el valor en modo 0 es casi cero, por lo que no es factible evaluarla. Los resultados se muestran en las Fig. 5.16 y Fig. 5.15, se observa que es posible clasificar las fallas internas y externas de acuerdo a los umbrales establecidos para el modo 0 y modo 1.

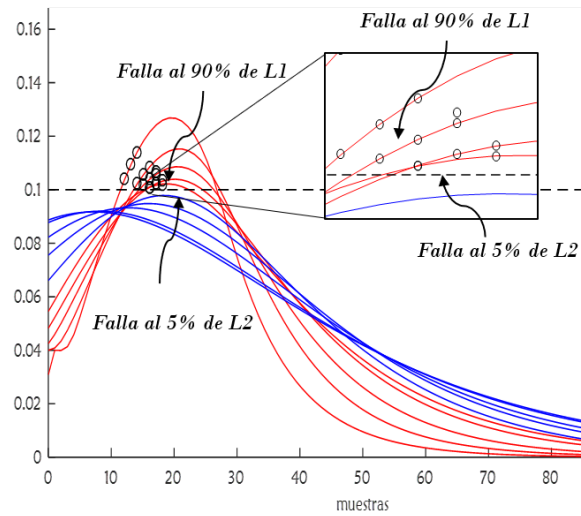


Fig. 5.15. Identificación de fallas utilizando corrientes incrementales modo 0.

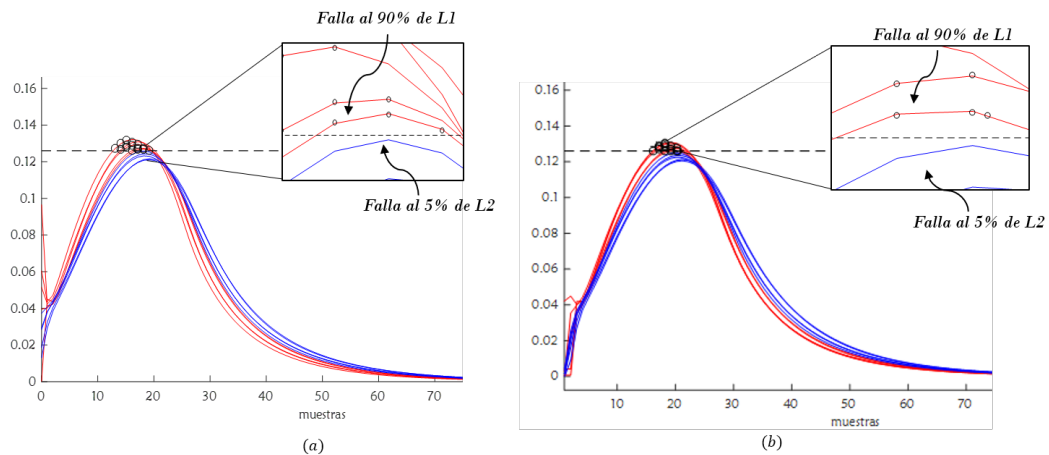


Fig. 5.16. Identificación de fallas utilizando corrientes incrementales modo 1. a) Fallas monofásicas. b) Fallas trifásicas.

5.3.6 PRUEBAS EN RSCAD

Se realizaron pruebas en un simulador de tiempo real para verificar la respuesta del algoritmo, en este caso se utilizó una frecuencia de 100 kHz con el propósito de relajar las restricciones de equipo para una implementación real, debido a que entre mas alta es la frecuencia de muestreo mayor es el costo de los equipos.

Las simulaciones en tiempo real fueron hechas en el software RSCAD, en la Fig.

5.17(a) se muestra la interfaz del área de trabajo y en la Fig. 5.17(b) se muestra la interfaz de las señales de salidas, el cual corresponde a señales de voltaje y corriente de una falla trifásica al 70% de la línea 1.

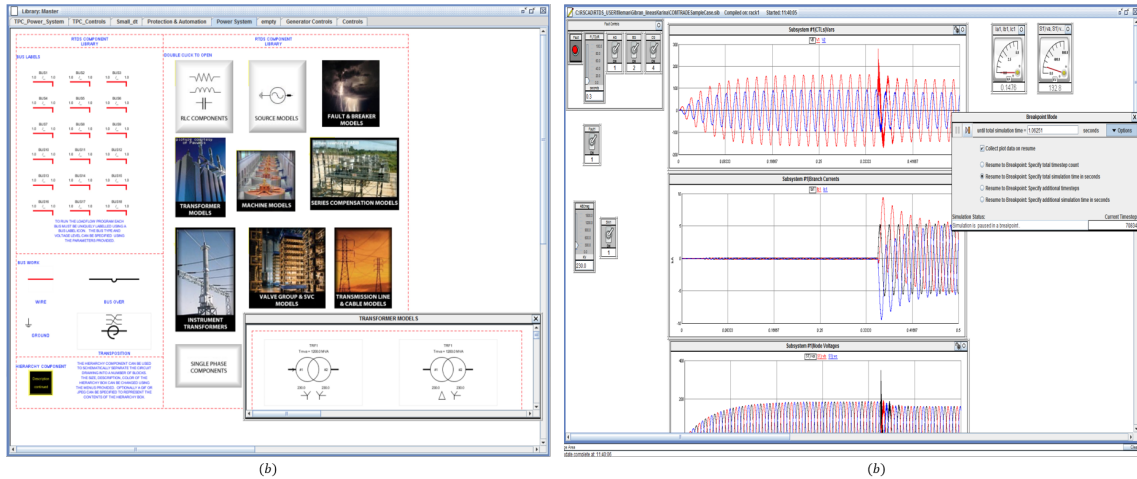


Fig. 5.17. Simulador en tiempo real (RSCAD).

Al modificar la frecuencia de muestreo se modificó el umbral a un valor de 0.112, el cual fue obtenido de forma heurística a través de las 70 pruebas realizadas en RSCAD para fallas trifásicas (ABC) y monofásicas sólidas y con resistencia de falla de 50Ω .

Las simulaciones realizadas en RSCAD corresponden a un paso de integración de $10 \mu s$. En la Fig. 5.18 se muestran los casos de simulación monofásicos y en la Fig. 5.19 se muestran los casos de simulación trifásicos, considerando los escenarios descritos en la Tabla 5.3, con un ángulo de inserción de falla de 90° . En las figuras se puede observar que el SMC permite determinar correctamente entre fallas internas y externas.

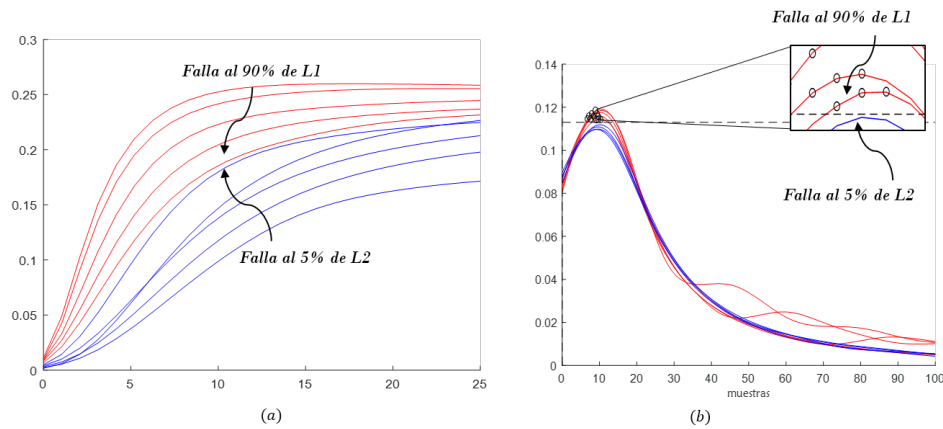


Fig. 5.18. Identificación de fallas monofásicas utilizando simulaciones en tiempo real.

a) Ventana de datos. b) SMC.

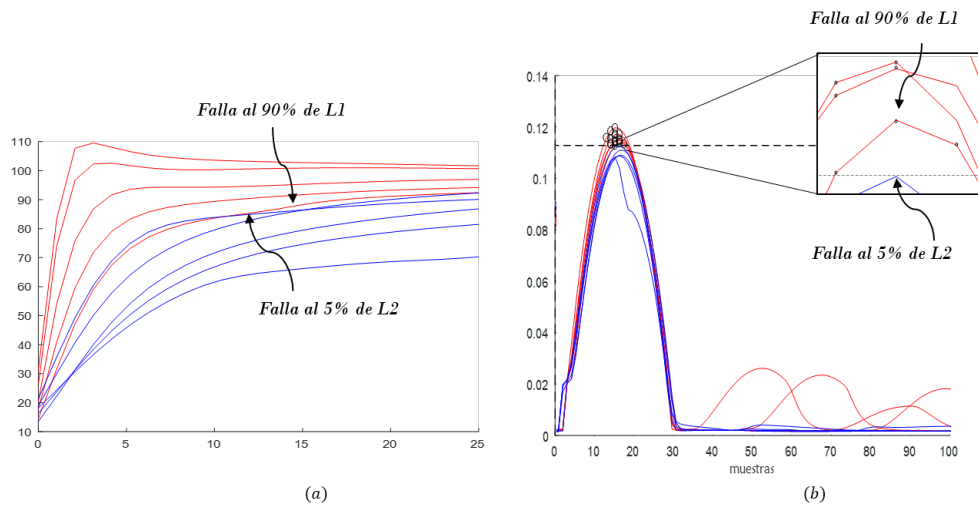


Fig. 5.19. Identificación de fallas trifásicas utilizando simulaciones en tiempo real. a)

Ventana de datos. b) SMC.

5.3.7 CONCLUSIONES

En las pruebas realizadas el algoritmo demostró la gran capacidad para discriminar las fallas más comunes que ocurren en las líneas de transmisión, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos demuestran que es posible utilizar el primer frente de onda para determinar si una falla se encuentra dentro o fuera de la línea protegida.

El análisis incluyó un estudio de fallas críticas que pueden presentarse en las líneas de transmisión, como son las fallas que ocurren cerca del nodo local y el nodo remoto de la línea, las fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la onda de voltaje.

Los umbrales utilizados para la identificación de fallas se determinaron en forma heurística a partir de 200 casos de simulaciones considerando distintos tipos de fallas, 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 RSCAD es de 0.112, este se determinó de forma heurística de acuerdo a los resultados de las 70 pruebas realizadas.

Se demostró la respuesta del algoritmo con señales ΔI_0 (modo 0) y ΔI_1 (modo 1), estas pruebas demostraron que el algoritmo puede funcionar sin necesidad de las señales de voltaje y de esta forma eliminar el problema del ancho de banda de los TP.

El algoritmo propuesto puede trabajar con una reducción de la frecuencia de muestreo, lo cual significa utilizar equipos de menor desempeño debido a que no se necesita memoria adicional para el almacenamiento de datos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se recopilan las conclusiones generales del presente trabajo de tesis, las principales aportaciones hechas por parte de esta investigación y finalmente las recomendaciones para trabajos futuros.

6.2 CONCLUSIONES

- Una falla puede ocasionar un colapso en el sistema eléctrico de potencia, así que entre más rápido se desconecte el elemento fallado, menor será la probabilidad de que esto ocurra; los esquemas de protección de línea de transmisión basados en ondas viajeras son una buena alternativa cuando se requiere detectar y localizar fallas de manera ultra-rápida.
- El elemento de protección diferencial abarca el 100 % de la protección de la línea pero necesita de un canal de comunicación para intercambiar información con el nodo remoto; en el algoritmo basado en el SMC propuesto en este trabajo solo se utiliza la información obtenida de un extremo de la línea para la protección

del 100 % de la línea.

- La aplicación del filtro delta para el pre-procesamiento de las señales permite que el algoritmo sea insensible a cualquier efecto periódico en las señales de entrada, como variaciones de carga y armónicos que se puedan presentar en un sistema de potencia.
- El algoritmo es capaz de clasificar fallas internas y externas utilizando el SMC que permite la agrupación de las señales de acuerdo al primer frente de onda generado por una falla; el SMC realza patrones de comportamiento en un tiempo de respuesta rápido debido al poco procesamiento computacional que requiere.
- El algoritmo propuesto es eficiente al utilizar la información contenida en el primer frente de onda generado por una falla; el frente de onda originado por una falla externa es modificado en su contorno al pasar por la discontinuidad que representa el cambio de impedancia de ambas líneas y la impedancia de los equipos conectados en el nodo remoto, en cambio un frente de onda generado por una falla interna se ve minimamente afectado principalmente por la atenuación de la propia línea. Esta información es utilizada por el algoritmo para distinguir entre fallas que ocurren dentro y fuera de la línea protegida.
- El algoritmo puede utilizar señales ΔS_1 en modo aéreo 1 ó puede utilizar solo señales incrementales de corriente, que pueden ser en modo 1 o modo 0, de esta forma se eliminan las mediciones de voltaje y con ello el problema del ancho de banda de los TP.
- El algoritmo propuesto puede ser aplicado a cualquier sistema de potencia independientemente de sus parámetros y voltaje de operación, a través de una normalización que limita los valores de las señales de entrada en un rango de

$[-1, +1]$; la ventaja de la normalización elegida es que facilita el proceso de clasificación para discriminar entre fallas internas y externas.

- Los resultados muestran la capacidad del algoritmo propuesto para distinguir entre fallas internas y externas usando solamente el primer frente de onda, lo que implica una disminución considerable en el tiempo de detección y liberación de falla en líneas de transmisión, la identificación de fallas se realiza a través de una ventana de datos de 25 muestras.
- Los umbrales se determinaron en forma heurística, para lo cual se realizaron 200 casos de simulación, en donde se abordaron los tipos de fallas más comunes y las más severas. Este umbral establece que si la magnitud del valor del SMC supera el valor de 0.2 equivale a una falla interna, por lo contrario, si no supera el umbral se establece que es una falla externa, este umbral se utiliza para las señales ΔS_1 modo 1. Para los casos donde se utiliza únicamente las señales incrementales de corriente, el umbral es de 0.1 para el modo 0 y de 0.126 para el modo 1. Para los casos de simulaciones en tiempo real se determinó el umbral con valor de 0.112, de forma heurística de acuerdo a los 70 casos simulados con una frecuencia de muestreo de 100 kHz.
- El algoritmo tiene la capacidad de identificar el tipo de falla (interna/externa) para ángulos de inserción de falla ($4^\circ - 90^\circ$). 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 buen desempeño, teniendo problemas únicamente para fallas que ocurren exactamente en el cruce por cero de la onda de voltaje.

6.3 APORTACIONES

Las principales aportaciones derivadas de la realización de este trabajo de investigación son:

- Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de los diferentes métodos de detección de fallas por onda viajera, esta revisión hizo notorio el problema que tienen los diferentes métodos en identificar fallas cerca del cruce por cero e identificar fallas internas y externas con información de una sola terminal de la línea.
- Se desarrolló un nuevo algoritmo de protección de onda viajera basado en el SMC que realiza los patrones característicos y que le permite identificar entre fallas internas y externas. El algoritmo es capaz de identificar fallas con diferentes ángulos de inserción de falla y resistencia de falla. El uso del primer frente de onda viajera disminuye el tiempo de detección de falla en 1/3 del tiempo de operación de los algoritmos convencionales basados en onda viajera.
- El algoritmo es rápido y confiable y no depende del contenido armónico de la señal, de los parámetros del sistema ni de la frecuencia de muestreo.

6.4 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En base a los resultados presentados en esta investigación se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Investigar el desempeño del algoritmo en líneas de transmisión que incluyen compensación serie capacitiva; esta situación provoca cambios en la impedancia

equivalente de la línea de transmisión y por ello es necesario evaluar el impacto de la reactancia capacitiva en el comportamiento del algoritmo.

- Evaluar el desempeño del algoritmo a partir de señales de casos reales de líneas de transmisión con diferentes condiciones de fallas internas y externas tomando en cuenta la saturación de los TC.

- Investigar la posibilidad de identificar la fase fallada de la línea de transmisión utilizando ondas viajeras con el propósito de implementar un esquema de recierre monopolar.

BIBLIOGRAFÍA

- [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] D. y. N. W. L. Lopes, F. V. y Fernandes, “A traveling-wave detection method based on park’s transformation for fault locators,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1626–1634, 2013.
- [3] P. C. P. G. McLaren, “Distance protection bases on traveling waves,” *IEEE*, vol. 1, pp. 2971–2983, 1983.
- [4] 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.
- [5] f. 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.
- [6] M. S. F. Namdari, “High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology,” *IEEE*, vol. 32, pp. 246–253, 2017.

-
- [7] A. Marx Stephen y Johnson, BK y Guzmán, “Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results,” *16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference Atlanta, Georgia*, pp. 1–14, 2013.
- [8] T.-d. L. Protection, “SEL-T400L,” 2015.
- [9] L. V. D. Sluis, “Transients in power systems, delf university of technology,” *The Netherlands, John Wiley y sons, LTD*, 2001.
- [10] 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.
- [11] C. y. E. V. M. Jorge, “Nuevo algoritmo de protección de distancia basado en el reconocimiento de patrones de onda viajera,” p. 124, 2004.
- [12] O. L. C. Ernesto Vázquez, Héctor J. Altuve, “Protección de onda viajera de líneas de transmisión,” no. 1, 1978.
- [13] H. W. D. y J. M. Michels, “High speed relaying using travelling wave transient analysis,” *Winter Power Meeting*, vol. A78 214-9, pp. January 29 – February 3, 1978.
- [14] M. Vitins, “A Fundamental Concept for High Speed Relaying,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 1, pp. 163–173, jan 1981.
- [15] A. Johns, “New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of e.h.v. transmission lines,” *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 127, no. 4, p. 228, 1980.
- [16] M. Sachdev, “Microprocessor relays and protection systems,” *IEEE Tutorial Course Text*, vol. Publication no.88EH0269-1-PWR, 2 1988.

-
- [17] H. H. Yoshiakira Akimoto, Takahiko Yamamoto, “Fault protection based on travelling wave theory (part 1-theory),” *Electrical Engineering*, vol. 98, p. 79, 1978.
- [18] J. Dabkowski, “Power Engineering Society for presentation at the,” vol. 3, pp. 788–794, 1979.
- [19] B. Vitins, M y Boveri, “a correlation method for transmission line protection,” no. 5, 1978.
- [20] S. E. y. J. B. X. D. J. Lang, “Pattern recognition technique for travelling wave protection,” *Electric Machines and Power Systems*, vol. 26, pp. January 29 – February 3, 1998.
- [21] S. R. AP Apostolov, D Tholomier, “uperimposed components based sub-cycle protection of transmission lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 592–597, 2004.
- [22] A. Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems-1.”
- [23] J. C. Martínez, Ernesto Vázquez y Ávila, “Protección de sistemas eléctricos mediante reconocimiento de patrones de onda viajera,” *Ingenierías*, vol. IX, no. 30, pp. 7–17, 2006.
- [24] S. y. B. P. Kale, Vijay y Bhide, “Fault Location Estimation Based on Wavelet Analysis of Traveling Waves,” *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1–5, 2012.
- [25] Y. y. O. G. y. P. J.-M. Misiti, Michel y Misiti, “Wavelet Toolbox TM 4 User ’ s Guide,” *The MathWorks Inc., . . .*, pp. 11–47, 2009.
- [26] A. A. Hajjar, “A high speed noncommunication protection scheme for power transmission lines based on wavelet transform,” *Electric Power Systems Research*, vol. 96, pp. 194–200, 2013.

-
- [27] S. y. D. J. B. X. Liang, J y Elangovan, “Application of wavelet transform in travelling wave protection,” vol. 22, pp. 537–542, 2000.
- [28] G. S. y. S.-p. M. y. M. S. Jafarian, Peyman y Member, “A Traveling-Wave-Based Protection Technique Using Wavelet / PCA Analysis,” vol. 25, no. 2, pp. 588–599, 2010.
- [29] M. Namdari, F. y Salehi, “High-Speed Protection Scheme Based on Initial Current Traveling Wave for Transmission Lines Employing Mathematical Morphology,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 246–253, 2017.
- [30] B. y. M.-M. y. G. A. y. S. V. Schweitzer, E O y Kasztenny, “New time-domain line protection principles and implementation,” no. March 2016, pp. 1–6, 2017.
- [31] H. y. R.-R. Hamidi, Reza Jalilzadeh y Livani, “Traveling-Wave Detection Technique Using Short-Time Matrix Pencil Method,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 6, pp. 2565–2574, 2017.
- [32] A. y. S. R. y. K. G. Sharma, R. y Sharma, “Means Moments and Newton’s Inequalities,” 2017.
- [33] 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.
- [34] J. Benmouyal, G. y Roberts, “Superimposed Quantities: Their True Nature and Application in Relays,” *26th Annual Western Protective Relay ...*, pp. 1–18, 1999.

APÉNDICE A

SISTEMA DE PRUEBA

En esta sección se muestra la configuración del sistema de prueba (Fig. A.1) y los parámetros de las líneas de transmisión usados para los casos de simulación; la Fig. A.2 corresponde a las características de la línea 1 y la Fig. A.3 muestra las características de la línea 2.

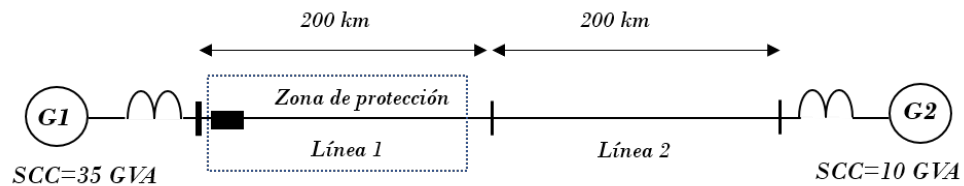


Fig. A.1. Sistema de prueba.

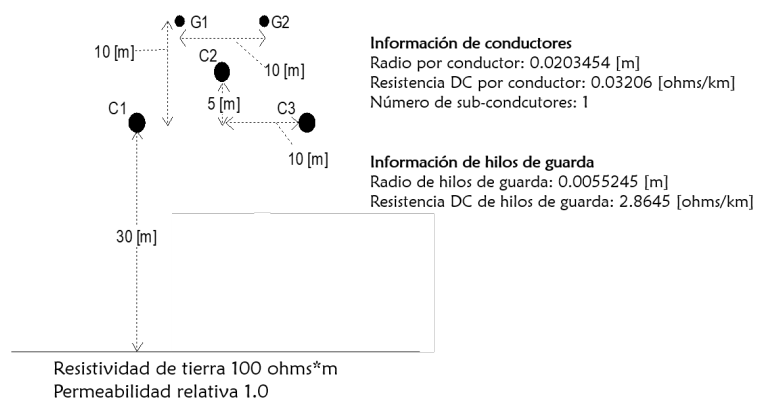


Fig. A.2. Configuración y parámetros de la línea 1.

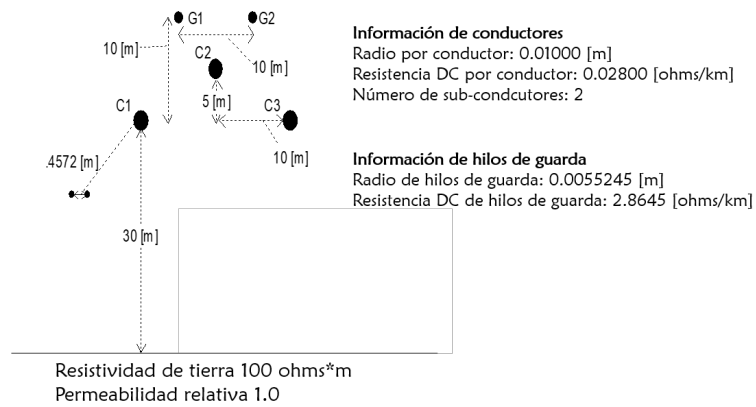


Fig. A.3. Configuración y parámetros de la línea 2.

En las Fig. A.4 y Fig. A.5 se muestran los diagramas esquemáticos simuladas en RSCAD, con los mismo parámetros de las Fig. A.2 y Fig. A.3 simuladas a una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

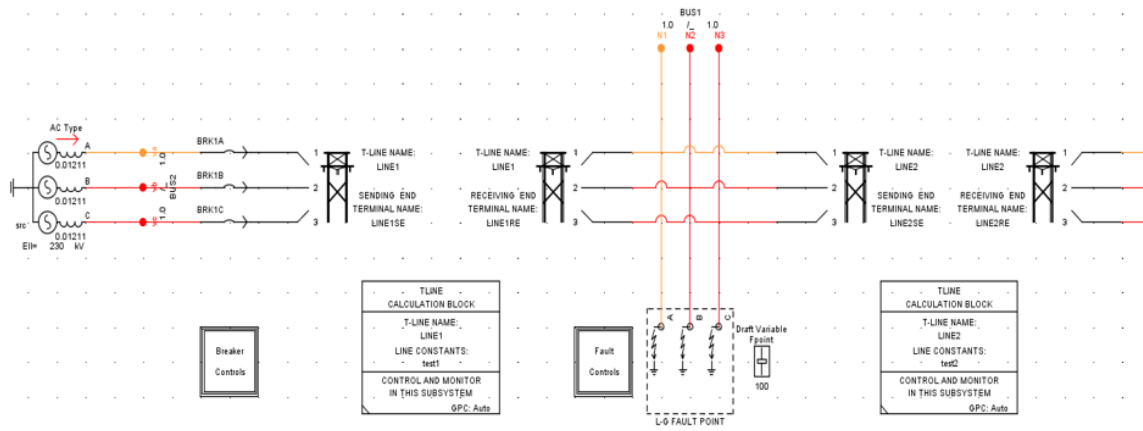


Fig. A.4. Diagrama esquemático de la configuración de la línea 1 en RSCAD.

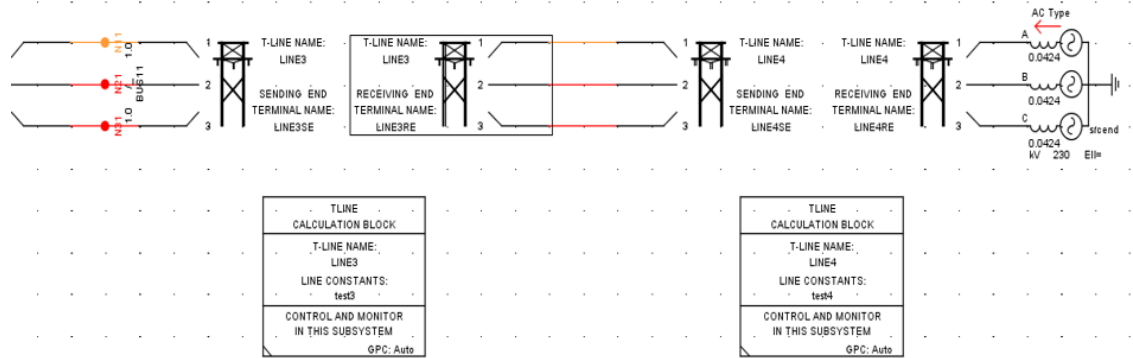


Fig. A.5. Diagrama esquemático de la configuración de la línea 2 en RSCAD.