



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

PROGRAMA OFICIAL DE POSTGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ENERGÉTICA

MÁSTER OFICIAL EN ENERGÍAS RENOVABLES Y RECURSOS
ENERGÉTICOS

LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN REDES INTELIGENTES

DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

AUTOR

NABIL EL HALABI

DIRECTOR

MIGUEL GARCÍA-GRACIA

CURSO ACADÉMICO 2009 / 2010

SEPTIEMBRE, 2010

LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN REDES INTELIGENTES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

RESUMEN

En este trabajo de investigación se desarrollan dos propuestas para la localización de faltas en redes de distribución eléctrica. En la primera propuesta se ha implementado un esquema adaptativo para compensar los errores producidos por la resistencia de falta y las condiciones de potencia en condiciones de prefalta. Para ello, se ha deducido un factor de corrección que se aplica a la impedancia aparente estimada por las protecciones de distancia.

El factor de corrección aplicado se ha determinado a partir del salto de fase en la corriente detectada una vez que ocurra la falta. El procedimiento consiste en deducir la relación entre el salto de fase de corriente y el error en la impedancia aparente estimada por el algoritmo de distancia. Los resultados de las simulaciones realizadas en comparación con los algoritmos convencionales de distancia DFFT y DEA reflejan la mejora en la localización de la falta en redes de distribución no ramificada, sin embargo, su desempeño es limitado al ser implementado en redes de distribución ramificados.

La segunda propuesta plantea un localizador de faltas basado en la respuesta a pulso por parte de la red de distribución. El localizador de faltas propuesto captura continuamente la respuesta del sistema eléctrico ante un pulso eléctrico para establecer una imagen base del estado de la red sin falta. Una vez detectada la falta, el algoritmo realiza un análisis comparativo entre la imagen base y la respuesta durante la falta. De la señal de error obtenida entre ambas ondas se determina la distancia a la cual ha ocurrido dicha falta. A diferencia de las exigencias impuestas por los métodos convencionales basados en ondas viajera en cuanto a la frecuencia de muestreo (1-10 MHz), esta técnica requiere de una frecuencia de muestreo de 100 kHz con una precisión alcanzada, hasta el momento actual, de 400 m en la ubicación de la falta.

LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN REDES INTELIGENTES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

ABSTRACT

The present research proposes two methods for fault location in electrical distribution networks. In the first technique, an adaptive scheme has been implemented to compensate the errors due to the fault resistance and prefault power conditions. The performance of this adaptive scheme is based in the implementation of a correction factor that is applied to the apparent impedance estimated by distance protections.

The correction factor applied has been deduced from the relation between current phase jump, prefault power conditions and fault resistance by means of an experimental curve that relates the error introduced into the estimated apparent impedance with the registered phase jump. The proposed adaptive scheme improves significantly the accuracy of the estimated fault location in comparison with conventional distance algorithms based on DFFT and DEA, without delaying the response time on two-terminal distribution networks. However, its performance is limited for applications involving distribution networks with laterals.

The second approach is based on a fault locator which operates using the response of the distribution network to an electrical pulse. The proposed fault locator records the network response to an electrical pulse to establish a base image of the state of the network in prefault conditions. Once detected the fault, the algorithm performs a comparative analysis between the response obtained in prefault conditions, and the response during the fault. The fault location is then determined through the error signal obtained between the two responses of the distribution network. Unlike the restrictions imposed by conventional methods based on traveling waves on the sampling frequency (1-10 MHz), this technique has been implemented using a sampling frequency of 100 kHz, achieving an accuracy of 400 m in the fault location.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS.....	7
2.1. MÉTODOS BASADOS EN EL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA	8
2.2. MÉTODOS BASADOS EN ONDAS VIAJERAS Y TRANSFORMADA WAVELET	9
2.3. MÉTODOS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO PREVIO DE LA RED ELÉCTRICA	9
2.3.1. <i>Técnicas basadas en inteligencia artificial y análisis estadístico</i>	9
2.3.2. <i>Técnicas basadas en la distribución de dispositivos en la red.....</i>	10
3. LOCALIZADORES DE FALTA DESARROLLADOS.....	10
3.1. IMPLEMENTACIÓN DE UN ESQUEMA ADAPTATIVO BASADO EN EL SALTO DE FASE DE CORRIENTE EN LOS ALGORITMOS DE DISTANCIA	10
3.1.1. <i>Influencia del flujo de potencia en estado de prefalta sobre el algoritmo de protección de distancia.....</i>	10
3.1.2. <i>Relación entre el salta de fase en la corriente y la ubicación de la falta.....</i>	13
3.1.3. <i>Implementación del factor de corrección basado en el salto de fase para el cálculo de impedancia</i>	15
3.1.4. <i>Resultados de la simulación del esquema adaptativo propuesto en el sistema de distribución</i>	18
3.2. LOCALIZADOR DE FALTA A PARTIR DE LA RESPUESTA A PULSO	22
3.2.1. <i>Principio de funcionamiento del localizador de faltas propuesto.....</i>	22
3.2.2. <i>Resultados de la implementación del localizador de faltas propuesto.....</i>	23
3.2.3. <i>Trabajos a futuro</i>	24
4. CONCLUSIONES.....	25
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

ANEXO A. ARTÍCULO ACEPTADO CON CAMBIOS REFERENTE A LA GESTIÓN DE MICRORREDES INTELIGENTES	29
ANEXO B. ARTÍCULO PUBLICADO REFERENTE A MEJORAR DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROTECCIONES DE DISTANCIA BASADAS EN EL ALGORITMO DEA ANTE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA RED	30
ANEXO C. ARTÍCULOS ACEPTADOS CON CAMBIOS RELACIONADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN EN LOS ALGORITMOS DE DISTANCIA DEL ESQUEMA ADAPTATIVO BASADO EN EL SALTO DE FASE EN LA CORRIENTE	39
ANEXO C. OTROS TRABAJOS DESARROLLADOS	40

LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN REDES INTELIGENTES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

1. INTRODUCCIÓN

Las nuevas tendencias en el ámbito de los sistemas eléctricos de potencia apuntan hacia el desarrollo de las redes inteligentes de distribución de energía eléctrica. La iniciativa de introducir el concepto de redes inteligentes tiene como principal meta maximizar la eficiencia servicio eléctrico. Recientes investigaciones ubican la eficiencia de las redes inteligentes en 60%, que mejora en un 27% la eficiencia de las redes eléctricas convencionales [1]. Asimismo, el desarrollo de las redes inteligentes de distribución es una condición necesaria para implementación de la generación distribuida o del vehículo eléctrico.

Bajo este contexto, la localización de faltas y la restauración del sistema eléctrico son funciones esenciales para evaluar la gestión de servicio eléctrico en términos de fiabilidad y tiempo de interrupción redes de distribución eléctrica. No obstante, la localización de la falta y la rápida restauración del servicio eléctrico en las redes de distribución eléctrica siguen siendo un problema difícil y sin una solución técnico-económica asumible.

La gran ventaja del localizador es que es directamente aplicable a las redes en su estado actual y, por tanto, la conversión a una red de distribución inteligente se realizaría sin inversiones especiales, aprovechando la estructura actual y de forma casi instantánea.

La mayoría de la investigación sobre algoritmos de localización de faltas ha sido desarrollada para redes de transporte y subtransporte. Sin embargo, la aplicación de tecnologías utilizadas en niveles de tensión superiores, como los relés de distancia digitales en la subestación, no son directamente aplicables a las redes de distribución debido principalmente a la diversidad de conductores y configuraciones en las redes, la existencia de ramificaciones y los cambios de configuración a los cuales están permanentemente sujetas las redes de distribución.

En este trabajo de investigación se ha realizado una revisión de los métodos empleados en la localización de faltas en redes de distribución. Asimismo, se han

desarrollado dos algoritmos cuyo objetivo es contribuir a mejorar la precisión en la localización de las faltas. Una propuesta se basa en la implementación de un algoritmo adaptativo para las protecciones de distancia basada en el salto de fase registrada en la corriente y que mejora la precisión en la ubicación de la falta. La segunda propuesta obtiene la localización de la falta a partir de la respuesta de la red de distribución a un pulso eléctrico.

En ambos casos, se consigue localizar con mayor precisión el tramo de línea en falta y minimizar los tiempos de restauración del servicio eléctrico en las redes de distribución. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con la primera propuesta, basada en el esquema adaptativo, se han contrastado con los algoritmos convencionales de protección de distancia basados en la Transformada Discreta de Fourier (DFFT) [1] y Ecuaciones Diferenciales (DEA) [3], [4] para resaltar la efectividad y precisión del esquema propuesto. Asimismo, la segunda propuesta del localizador de faltas a partir de la respuesta del pulso se ha modelado y simulado en una red de distribución ramificada para determinar la precisión de los resultados obtenidos. En este sentido, se ha desarrollado y probado un prototipo de inyector de pulsos para la implementación del esquema propuesto en redes de distribución.

2. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS

En la actualidad, el procedimiento habitual para la localización de faltas en redes de distribución eléctrica depende de la labor de un grupo de mantenimiento que se traslada hasta la zona afectada para inspeccionar, ubicar y aislar la falta, previo aviso del centro de operaciones. Con este procedimiento, el tiempo de restauración del servicio eléctrico suele comprender varios minutos incluso horas, dependiendo de la longitud de los circuitos eléctricos.

Los trabajos de investigación desarrollados hasta la fecha han tratado de aportar mejoras en las estrategias de búsqueda de averías en redes de distribución. En general, estos métodos se pueden clasificar en tres categorías, que son:

- Métodos basados en el cálculo de la impedancia
- Métodos basados en ondas viajeras y transformada wavelet
- Métodos basados en el conocimiento previo de la red eléctrica

2.1. MÉTODOS BASADOS EN EL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA

Los métodos basados en el cálculo de la impedancia estiman la ubicación de la falta a través de la medida de impedancia. Estos métodos emplean los parámetros del sistema de distribución y combinaciones de medidas de tensión e intensidad durante los estados de prefalta, falta y postfalta, registradas en al menos un extremo de la línea. Las medidas de prefalta son utilizadas para estimar las condiciones iniciales del sistema eléctrico mientras que las medidas durante la falta se emplean como variables conocidas en un conjunto de ecuaciones donde la distancia hasta la falta así como la resistencia de la falta son las variables a estimar [4]-[6].

En aplicaciones dirigidas a sistemas de distribución sin ramificaciones, la determinación de la impedancia aparente vista por el relé se realiza a partir de las componentes fundamentales de tensión e intensidad obtenidas a través de los algoritmos basados en DFFT [1], [7].

Por otra parte, se encuentran los algoritmos de distancia DEA, los cuales se basan en la ecuación diferencial que describe el circuito eléctrico para determinar la impedancia aparente vista por el relé [3]. A diferencia de la DFFT, los algoritmos DEA no se ven afectados por las componentes continuas existentes en las señales de medida, por lo que el tiempo de actuación de estos algoritmos son menores que un ciclo de operación a frecuencia industrial. Sin embargo, son afectados por la distorsión armónica presente en las redes de distribución. En [4] (adjunto en el Anexo A) se presenta una técnica de filtrado que permite estimar las componentes fundamentales de las señales de medida sin alterar la rapidez en la convergencia de la impedancia aparente vista por el relé.

El inconveniente de estos métodos basados en el cálculo de impedancia radica en que parámetros como la resistencia de falta y el flujo de potencia en estado de prefalta representan una fuente de error en la estimación de la impedancia aparente vista por el relé, resultado en una pobre localización de la falta. Por otra parte, las múltiples ramificaciones presentes en las redes de distribución conducen a una interpretación de múltiples ubicaciones de la falta a partir de la estimación de la impedancia sin capacidad suficiente para discriminar entre las diferentes soluciones posibles.

2.2. MÉTODOS BASADOS EN ONDAS VIAJERAS Y TRANSFORMADA WAVELET

El fundamento de estos métodos es el análisis de las ondas viajeras transmitidas y reflejadas en el sistema eléctrico bajo falta. En [8] se emplea la función cruzada de correlación entre la onda incidente y la reflejada para determinar la ubicación de la falta.

A pesar de que estas técnicas ofrecen una alta precisión en la localización de la falta, su implementación es compleja y más costosa que aquellas técnicas basadas en la estimación de la impedancia debido a que requieren de la instalación de equipos adicionales en el sistema de distribución tales como detectores de paso [9]. Alternativamente, en [10] se propone un método de localización de falta basado en el análisis de los transitorios presentes en la onda de tensión empleando la transformada continua de wavelet. El inconveniente en este último método es que impone una alta frecuencia de muestreo (1-10 MHz) para reducir el margen de incertidumbre en la estimación de la ubicación de la falta.

2.3. MÉTODOS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO PREVIO DE LA RED ELÉCTRICA

2.3.1. *Técnicas basadas en inteligencia artificial y análisis estadístico*

Existen varios métodos de inteligencia artificial tales como Redes Neuronales Artificiales (RNA), Lógica Difusa (FL), Sistemas Expertos (ES) y los Algoritmos Genéticos (GA). En [11]-[13] el método de localización de faltas en sistemas de distribución se fundamenta en entrenar el sistema eléctrico ante diferentes eventos de faltas para así crear una base de aprendizaje que permita discriminar la ubicación de la falta dependiendo las magnitudes de tensión e intensidad registradas en cada evento.

Por otra parte, en [14] se propone una metodología de naturaleza estadística y basada en mezclas finitas de posibles ubicaciones de la falta. Para ello, el modelo estadístico cuenta con una base de datos que contiene información de la magnitud de tensión para los diferentes tipos de faltas en cada localidad del sistema de distribución. Luego, la magnitud de tensión obtenida durante la falta es contrastada con la base de datos emitiendo una estadística de las posibles ubicaciones de la falta que posteriormente se refina con un algoritmo de optimización, que busca minimizar las posibles soluciones tomando en consideración parámetros adicionales del sistema eléctrico y topología del mismo.

El inconveniente de estas técnicas de localización de faltas basadas en la inteligencia artificial y análisis estadístico es que requieren de un extenso sistema de aprendizaje del sistema para contemplar los diferentes escenarios que pueden presentarse en la red. Además, las modificaciones en la configuración de la red, algo habitual en las redes de distribución, afecta considerablemente la estimación de la ubicación de la falta.

2.3.2. Técnicas basadas en la distribución de dispositivos en la red.

Esta técnica se basa en una formulación matemática que utiliza el estado de sensores adicionales instalados en la red eléctrica para la localización de la falta. La distribución de sensores o detectores de paso en la red ofrecen información precisa de la localidad donde la falta ha incidido, por lo cual reduce la incertidumbre en cuanto a múltiples posibilidades en la ubicación de la falta [15]-[17]. Estas técnicas no se ven afectadas por variaciones de la carga o la configuración de la red, no obstante, el comportamiento de los sensores puede verse comprometido con el efecto de la resistencia de falta.

Los principales problemas encontrados en los indicadores de paso de falta convencionales son las intensidades capacitivas, donde el detector de falta tiene que discriminar entre la intensidad de falta y la intensidad capacitiva, y las intensidades de magnetización de los transformadores de potencia, que hacen que los indicadores de falta fase-fase detectan el pico de intensidad magnetizante como una intensidad de falta.

3. LOCALIZADORES DE FALTA DESARROLLADOS

3.1. IMPLEMENTACIÓN DE UN ESQUEMA ADAPTATIVO BASADO EN EL SALTO DE FASE DE CORRIENTE EN LOS ALGORITMOS DE DISTANCIA

3.1.1. Influencia del flujo de potencia en estado de prefalta sobre el algoritmo de protección de distancia

Los algoritmos de protección de distancia se ven afectados por diferentes parámetros tales como la resistencia de falta, flujo de potencia en prefalta, acoplamientos mutuos y capacitancias paralelas, que en conjunto representan una fuente de error considerable en la estimación de la impedancia aparente y por tanto de la ubicación de la falta.

En particular, el efecto del flujo de potencia en prefalta sobre la determinación de la impedancia aparente vista por el relé puede conllevar a errores significativos de sobrealcance y subalcance en la estimación del punto donde ha ocurrida la falta. Este

efecto se debe a que la carga en estado de prefalta impone una diferencia tanto angular como modular en la tensión de operación registrada en ambos extremos de la línea. Para visualizar este efecto se considera un cortocircuito en el sistema eléctrico mostrado en la Figura 1 para una falta monofásica a tierra en la fase a .

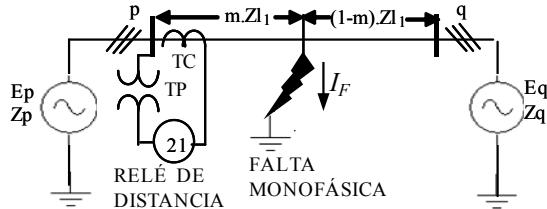


Figura 1. Sistema eléctrico considerado para el estudio de una falta monofásica a tierra

Resolviendo el respectivo circuito equivalente de redes de secuencia se determina la corriente de falta en la fase a que circula por la posición del relé, I_{relay}^F . Por simplicidad, se asume que la componente de secuencia positiva de las fuerzas electromotrices conectadas en los terminales p y q son iguales ($E_p = E_q = E$) y éstas a la vez son iguales a las de la componente de secuencia negativa. Luego, considerando que existe una resistencia de falta R_F , la tensión en la fase a vista por el relé V_{relay}^F se determina como sigue

$$V_{\text{relay}}^F = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} + 3 \cdot I_F \cdot R_F = 2 \cdot C_1 \cdot I_F \cdot m \cdot Zl_1 + C_0 \cdot I_F \cdot m \cdot Zl_0 + C_0 \cdot I_F \cdot m \cdot Zl_1 \cdot \left(\frac{Zl_0}{Zl_1} - 1 \right) \quad (1)$$

donde los subíndices 1 , 2 y 0 hacen referencia a la componente de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente. La corriente I_F representa la corriente de secuencia de falta y los parámetros C_1 y C_0 son factores de distribución para un sistema eléctrico dado y se determinan de la siguiente forma

$$C_1 = \left(\frac{Z_{q1} + (1-m) \cdot Zl_1}{Z_{q1} + Z_{p1} + Zl_1} \right) \text{ and } C_0 = \left(\frac{Z_{q0} + (1-m) \cdot Zl_0}{Z_{q0} + Z_{p0} + Zl_0} \right) \quad (2)$$

siendo Z_{p1} y Z_{p0} la impedancia de secuencia positiva y cero, respectivamente, de la fuente equivalente del terminal p , mientras que Z_{q1} y Z_{q0} la impedancia de secuencia positiva y cero, respectivamente, de la fuente equivalente del terminal q . La variable Zl_1 representa la impedancia de secuencia positiva de la línea de distribución y m es la distancia a la falta.

Sustituyendo las expresiones de (2) en (1) y simplificando esta última ecuación se obtiene que la tensión de falta vista por el relé puede expresarse como

$$V_{relay}^F = m \cdot Zl_1 \cdot I_F \cdot \left(2 \cdot C_1 + C_0 \cdot \frac{Zl_0}{Zl_1} \right) + 3 \cdot R_F \cdot I_F \quad (3)$$

donde al definir el parámetro ψ como la siguiente expresión de distribución

$$\psi = 2 \cdot C_1 + C_0 \cdot \frac{Zl_0}{Zl_1} \quad (4)$$

y la variable Z_F como la siguiente impedancia aparente hasta el punto de falta

$$Z_F = m \cdot Zl_1 + \frac{3 \cdot R_F}{\psi} \quad (5)$$

conlleva a reescribir (3) de la siguiente manera

$$V_{relay}^F = \psi \cdot I_F \cdot Z_F \quad (6)$$

donde la corriente de falta de la fase a vista por el relé I_{relay}^F es la siguiente

$$I_{relay}^F = \psi \cdot I_F \quad (7)$$

La ecuación (6) considera el efecto de la resistencia de falta sobre el lugar geométrico de la impedancia aparente vista por el relé, sin embargo, desprecia el efecto causado por la corriente de carga en prefalta I_{PF} . Por ello, es importante recurrir al teorema de superposición para tomar en consideración el efecto de la corriente I_{PF} en (6), tal y como se aprecia en [18]. Luego, considerar la corriente I_{PF} mediante superposición implica representar I_{relay}^F con dos términos como sigue

$$I_{relay}^F = \psi \cdot I_F + I_{PF} \quad (8)$$

siendo I_F la corriente de secuencia de falta.

En [19]y [20] (mostrados en el Anexo C) se muestran los términos asociados a (8) y se deriva explícitamente, utilizando las señales de tensión y corriente (V_{relay}^F y I_{relay}^F , respectivamente), la impedancia aparente vista por el relé Z_{relay}^F que se expresa como

$$Z_{relay}^F = \frac{V_{relay}^F}{I_{relay}^F} = Z_{PF} \cdot \frac{3 \cdot R_F + m \cdot Zl_1 \cdot (2 \cdot C_1 + \xi / Z_{PF})}{3 \cdot R_F + 2 \cdot C_1 \cdot Z_{PF} + \xi} \quad (9)$$

donde Z_{PF} es la impedancia aparente en prefalta ($Z_{PF}=V_{PF}/I_{PF}$) y el parámetro ξ es constante para una topología de red dada y se representa mediante la siguiente expresión

$$\xi = 2 \cdot C_1 \cdot Z_{pl} + C_0 \cdot \left(\frac{Zl_0}{Zl_1} + Z_{p0} \right) \quad (10)$$

Para apreciar de forma gráfica la influencia del flujo de potencia en prefalta sobre la impedancia aparente Z^F_{relay} resulta favorable representar el lugar geométrico de dicha magnitud compleja en el plano R-X ante diferentes condiciones de carga en prefalta.

En el plano R-X mostrado en la Figura 2 se ilustra el efecto que tiene el flujo de potencia en prefalta sobre el lugar geométrico de la impedancia aparente vista por el relé. En esta figura, φ_l representa el ángulo de la impedancia de la línea a proteger. Se aprecia que la trayectoria de la impedancia aparente Z^F_{relay} variando R_F es una línea recta cuando no existe flujo de potencia entre los terminales p y q de la línea a proteger (trayectoria P0), es decir, el argumento $\theta_F=0$. No obstante, bajo condiciones de flujo de potencia, el lugar geométrico de Z^F_{relay} genera un arco cóncavo hacia arriba (trayectoria P2) para un punto de falta en la que se varía la resistencia de falta ($R_F \neq 0$) cuando el terminal p se encuentra importando potencia ($\theta_F < 0$) y cóncavo hacia abajo (trayectoria P1) cuando se encuentra exportando potencia ($\theta_F > 0$).

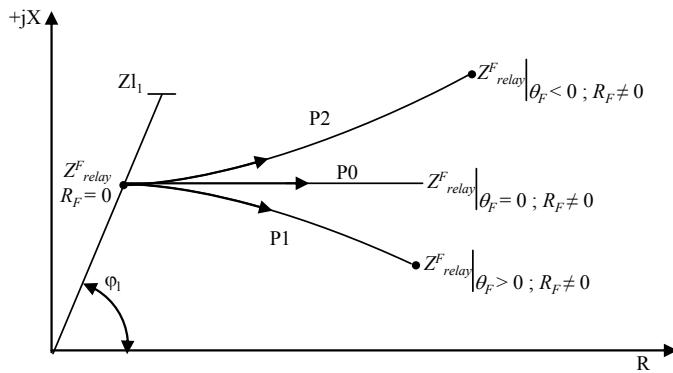


Figura 2. Lugar geométrico de la impedancia aparente Z^F_{relay} variando R_F y la condiciones de potencia en prefalta.

3.1.2. Relación entre el salto de fase en la corriente y la ubicación de la falta

Las fuentes de error de mayor envergadura en la medición de la impedancia son la resistencia de falta y el flujo de potencia en prefalta, las cuales se encuentran representadas en el segundo término de (5). Este error sólo puede ser compensado en caso de disponer de medidas de ambos extremos de la línea a proteger y del valor de la resistencia de falta. Sin embargo, en la operación de los relés de distancia, las magnitudes de tensión corriente del terminal remoto son variables desconocidas, para esquemas sin comunicación entre terminales, al igual que la resistencia de falta.

Luego, tanto la magnitud como la fase de la corriente total de falta I_F , mostrada en la Figura 1, son desconocidas y la tensión generada por la corriente de falta a través de la resistencia de falta no es considerada por el relé de distancia lo cual conlleva a errores en la estimación de la ubicación de la falta.

No obstante, en este trabajo de investigación se ha apreciado que el comportamiento del salto de fase en la onda de corriente, introducida al tener lugar una falta, está relacionado con el error introducido en la reactancia Xl_I vista por el relé. Con base a ello, se propone un factor de corrección basado en el salto de fase en la corriente para compensar los errores introducidos por el segundo término de (5).

Para visualizar la relación existente entre el salto de fase en la corriente y la impedancia aparente vista por el relé, se parte del hecho de que el salto de fase en la onda de corriente vista por el relé $i_{relay}^F(t)$ es apreciable para efectos de cálculos y está viene definida por

$$i_{relay}^F(t) = \sqrt{2} \cdot I_{relay}^F \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad (11)$$

siendo ϕ el arco tangente de Xl_I/Rl_I visto por el relé durante la falta.

En estado de prefalta, la corriente $i_{PF}(t)$ es representada por

$$i_{PF}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{PF} \cdot \sin(\omega t - \phi_{PF}) \quad (12)$$

donde ϕ_{PF} es el arco tangente de Xl_I/Rl_I visto por el relé en prefalta. Luego, el salto de fase registrado en la onda de corriente $\Delta\phi$, y que se muestra en la Figura 3, se determina como sigue

$$\Delta\phi = \arg(i_{relay}^F(t) - i_{PF}(t)) = \phi - \phi_{PF} \quad (13)$$

el cual es proporcional al argumento de la diferencia entre Z_{relay}^F y Z_{PF} , es decir

$$\Delta\phi = \arg(Z_{relay}^F - Z_{PF}) \quad (14)$$

Sustituyendo (9) en (14) obtenemos la siguiente expresión para $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = \arg \left(Z_{PF} \cdot \frac{(2 \cdot C_I \cdot Z_{PF} + \xi) \cdot \left(\frac{m \cdot Zl_I}{Z_{PF}} - 1 \right)}{3 \cdot R_F + 2 \cdot C_I \cdot Z_{PF} + \xi} \right) \quad (15)$$

Habitualmente, la impedancia de la carga suele ser mucho mayor que la impedancia de línea, esto es $Z_{PF} \gg m \cdot Zl_1$, por ello la relación $m \cdot Zl_1 / Z_{PF}$ tiende a cero y la expresión (15) puede simplificarse a

$$\Delta\phi = 180^\circ + \arg(Z_{PF}) + \arg\left(\frac{(2 \cdot C_l \cdot Z_{PF} + \xi)}{3 \cdot R_F + 2 \cdot C_l \cdot Z_{PF} + \xi}\right) \quad (16)$$

con ello se aprecia que el salto de fase $\Delta\phi$ contiene información tanto del efecto del flujo de potencia en prefalta Z_{PF} como de la resistencia de falta R_F .

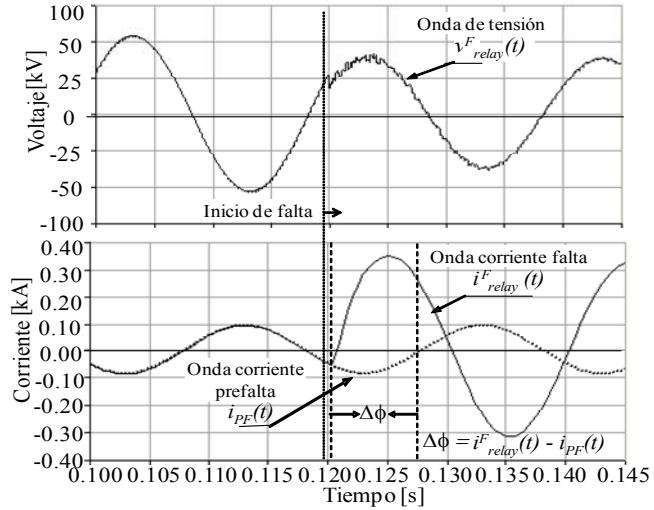


Figura 3. Salto de fase introducida en la onda de corriente una vez ocurrida la falta (línea sólida) en comparación con la forma de onda de tensión y con la onda de corriente sin falta (línea punteada).

3.1.3. Implementación del factor de corrección basado en el salto de fase para el cálculo de impedancia

El salto de fase deducido en (16) ha sido implementado, considerando un factor de corrección, en los algoritmos de distancia DFFT y DEA a partir de un esquema adaptativo mostrado en la Figura 4.

En este esquema las medidas de tensión y corriente pasan por un filtro anti-aliasing basado en un filtro Butterworth de segundo orden [21].

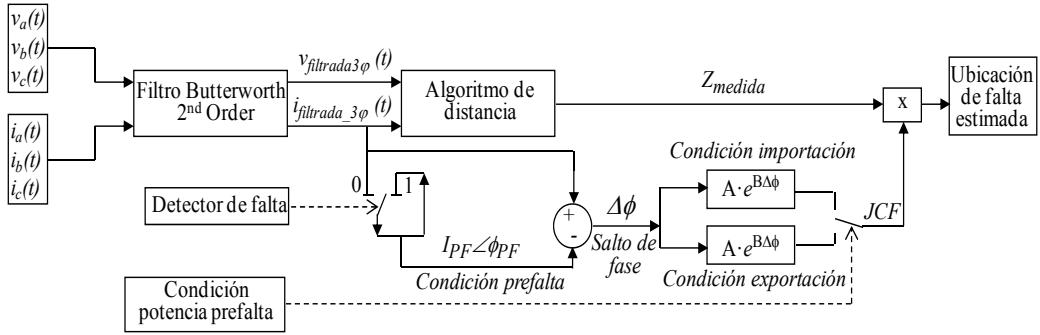


Figura 4. Esquema adaptativo para la implementación del factor de corrección, basado en el salto de fase en la corriente, en los algoritmos de distancia.

Seguido de esta etapa, las señales son introducidas al algoritmo de distancia para determinar la impedancia aparente vista por el relé. Se ha implementado un detector de falta para seleccionar el valor de la corriente en prefalta $i_{PF}(t)$. Cabe destacar que este valor es actualizado cada medio ciclo. Una vez detectada la falta, el salto de fase en la corriente es calculada utilizando (13) donde se toma en consideración tanto la señal $i_{relay}^F(t)$ como $i_{PF}(t)$.

El factor de corrección basado en el salto de fase en la corriente, JCF , representa el error relativo en la Z_{relay}^F y, experimentalmente, se ha apreciado que es una función exponencial del salto de fase $\Delta\phi$ vista por el relé durante la falta. En consecuencia, la forma canónica en que se presenta el JCF es

$$JCF(\Delta\phi) = A \cdot e^{B \cdot \Delta\phi} \quad (17)$$

donde A y B son constantes para cada relación X/R de la línea a proteger y varían de acuerdo a las condiciones de flujo de potencia en prefalta (importando o exportando potencia).

Finalmente, una vez calculada la impedancia aparente se aplica el factor de corrección JCF sobre la reactancia estimada X_{medida} para mejorar la precisión de la localización de faltas mediante algoritmos de distancia. Este factor de corrección JCF se aplica de la siguiente forma

$$\text{Punto de falta [km]} = \frac{X_{medida} \cdot (1 - JFC(\Delta\phi))}{Xl_1} \quad (18)$$

En la Figura 5(a) se muestra la curva del factor de corrección JCF con respecto al salto de fase $\Delta\phi$, cuya relación se asocia a una función exponencial que representa el error en la impedancia aparente estimada por el relé de distancia Z_{relay}^F variando la ubicación de la falta m de 10% al 100% de la línea protegida y considerando diferentes

valores de resistencias de falta. Por otra parte, en la Figura 5(b) se aprecia como la implementación del factor de corrección *JCF* compensa el error introducido por el efecto del flujo de potencia en la impedancia aparente estimada.

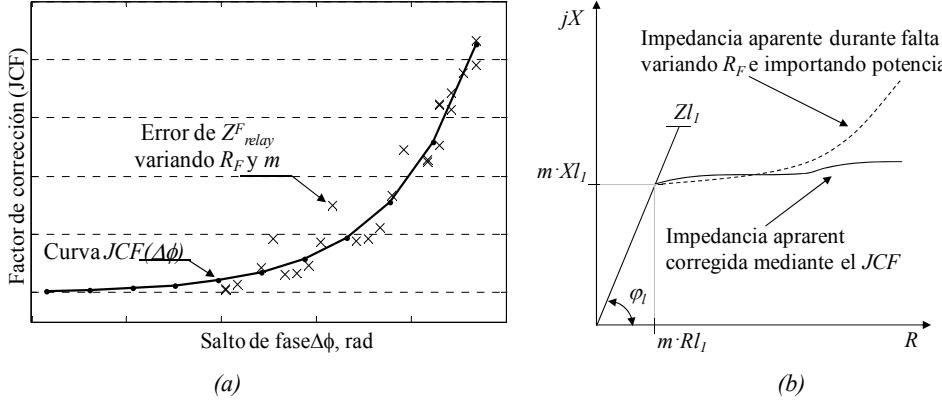


Figura 5. Mejora introducida por el factor de corrección *JCF* en la estimación de la impedancia aparente vista por el relé: (a) curva del factor de corrección *JCF* respecto al salto de fase $\Delta\phi$, (b) impedancia aparente corregida vista por el relé durante faltas en condición de importación de potencia en prefalta.

Los coeficientes *A* y *B* se han determinado experimentalmente a partir de numerosas simulaciones donde se han considerado variaciones en la tensión de operación del sistema eléctrico, longitud y relación Xl/Rl de la línea a proteger. De estas simulaciones se ha visualizado que estos coeficientes conservan una relación lineal con la relación Xl/Rl de la línea a proteger y que pueden determinarse a partir de las siguientes expresiones experimentales

$$A_{imp} = 1.0667 \cdot X/R + 6.652 \quad (19)$$

$$B_{imp} = 6.1139 \cdot X/R - 3.9533 \quad (20)$$

$$A_{exp} = -0.4439 \cdot X/R - 0.4820 \quad (21)$$

$$B_{exp} = 1.8722 \cdot X/R + 4.0095 \quad (22)$$

los subíndices *imp* y *exp* denotan la condición de importación y exportación de potencia en prefalta, respectivamente. En (19) y (22) los coeficientes A_{imp} y A_{exp} se encuentran normalizados a 1×10^{-6} y 1×10^{-18} , respectivamente. En el Anexo C se adjuntan [19] y [20] para mostrar la derivación de estos coeficientes y la aplicación de este esquema adaptativo en los algoritmos DFFT y DEA.

3.1.4. Resultados de la simulación del esquema adaptativo propuesto en el sistema de distribución

El sistema de distribución considerado para este estudio se muestra en la Figura 6. Las simulaciones se han realizado mediante la herramienta computacional PSCAD/EMTDC [22], empleando una frecuencia de muestreo de 10 kHz.

La tensión nominal de operación del sistema eléctrico es 45 kV y consta de dos cargas de $3.93+j2.58$ MVA and $1.5+j0.5$ MVA alimentadas cada una de éstas por una línea aérea proveniente de cada terminal. Las líneas L1 y L2 son idénticas, de 20 km de longitud y con acoplamiento mutuo entre ambas simulado por un circuito equivalente PI. Por otra parte, las líneas L3 y L4 son de 30 km de longitud e igualmente presentan acoplamiento mutuo entre ambas.

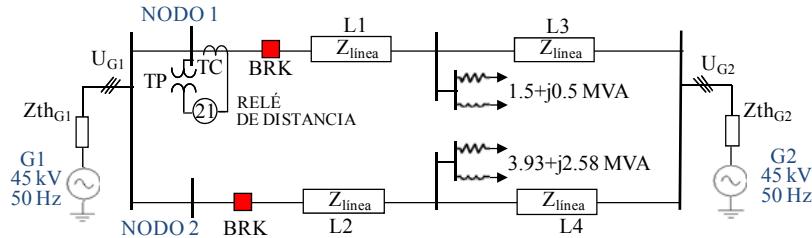


Figura 6. Sistema de distribución considerado para el estudio.

Las fuentes de tensión conectadas a los terminales G1 y G2 representan el equivalente de Thévenin del resto de sistema cuyas impedancias equivalentes de secuencia positiva Z_{thG1} y Z_{thG2} son

$$Z_{thG1} = 2.1850+j8.9498 \Omega \quad Z_{thG2} = 1.8414+j7.9761 \Omega$$

donde Z_{thG1} y Z_{thG2} representan la impedancia equivalente de secuencia positiva asociadas a las fuentes G1 y G2, respectivamente. Para simular diferentes escenarios de flujo de potencia en prefalta, vistos por el relé de distancia ubicado en el nudo 1, se han realizado variaciones comprendidas entre 0.9 y 1.1 pu en el módulo de la tensión del terminal G1 y variaciones de $\pm 5^\circ$ en el ángulo de la tensión de G1 con respecto al de G2. Los valores de secuencia de las líneas L1, L2, L3 y L4 son las siguientes

$$\begin{aligned} Zl_1 &= 0.2604+j0.3986 \Omega/\text{km} & Bl_1 &= 0.2878\text{E-}08 \text{ S/km} \\ Zl_0 &= 0.49105+j1.4325 \Omega/\text{km} & Bl_0 &= 0.1698\text{E-}08 \text{ S/km} \\ ZM_0 &= 0.2308+j0.9268 & BM_0 &= 0.5574\text{E-}09 \text{ S/km} \end{aligned}$$

siendo Bl_1 y Bl_0 las susceptancias de secuencia positiva y cero de la línea, respectivamente, y Z_{M0} y B_{M0} la impedancia mutua y susceptancia mutua de secuencia cero, respectivamente, del doble circuito mostrado en la Figura 6.

La red eléctrica equivalente conectada al terminal G1 se ha modelado con una distorsión armónica total (THD) en la onda de tensión de 5.5% en régimen permanente, generada de acuerdo a lo establecido en [23].

El sistema de distribución bajo estudio mostrado en la Figura 6 presenta una relación X/R de la línea L1 equivalente a 1.53. En consecuencia, los factores de corrección aplicados para cada condición de carga en prefalta son los siguientes

- Condición de importación de potencia:

$$JCF = 8.2841 \times 10^{-6} \cdot e^{5.401 \cdot \Delta\phi} \quad (23)$$

- Condición de exportación de potencia:

$$JCF = -1.162 \times 10^{-18} \cdot e^{6.874 \cdot \Delta\phi} \quad (24)$$

En la Figura 7 se muestran las curvas del factor de corrección JCF para las condiciones de importación y exportación de potencia y variando tanto la ubicación de la falta m desde 10% hasta el 100% de la longitud de la línea a proteger y la resistencia de falta hasta 75 Ω

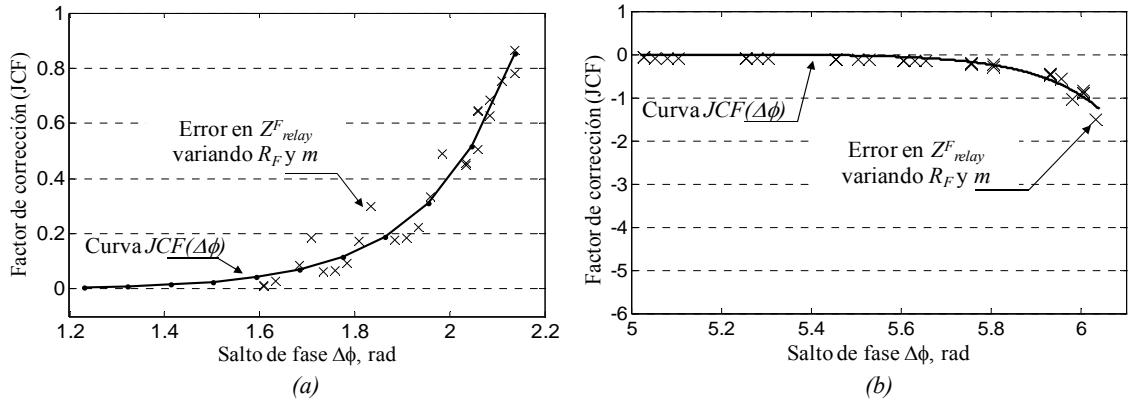


Figura 7. Curvas del factor de corrección JCF respecto al salto de fase $\Delta\phi$ para: (a) nodo 1 importando potencia, y (b) nodo 1 exportando potencia.

El desempeño de los algoritmos de distancia implementando el esquema adaptativo propuesto se han contrastado con los resultados obtenidos de las simulaciones utilizando los algoritmos DFFT y DEA de protección de distancia. De las simulaciones realizadas se ha apreciado que los algoritmos de distancia son menos precisos ante faltas monofásicas a tierra, por lo cual la comparación se presenta analizando la precisión en

la estimación de la impedancia aparente ante faltas monofásicas a tierra en el sistema eléctrico de la Figura 6.

El lugar geométrico de la impedancia aparente estimada por el algoritmo de distancia al implementar el esquema adaptativo propuesto se muestra en las Figuras 8(a) y 8(b) para las condiciones de importación y exportación de potencia, respectivamente. Por otra parte, el error relativo obtenido entre la localización de la falta estimada y la teórica empleando los algoritmos DFFT, DEA y el propuesto se muestran en la Tabla 1.

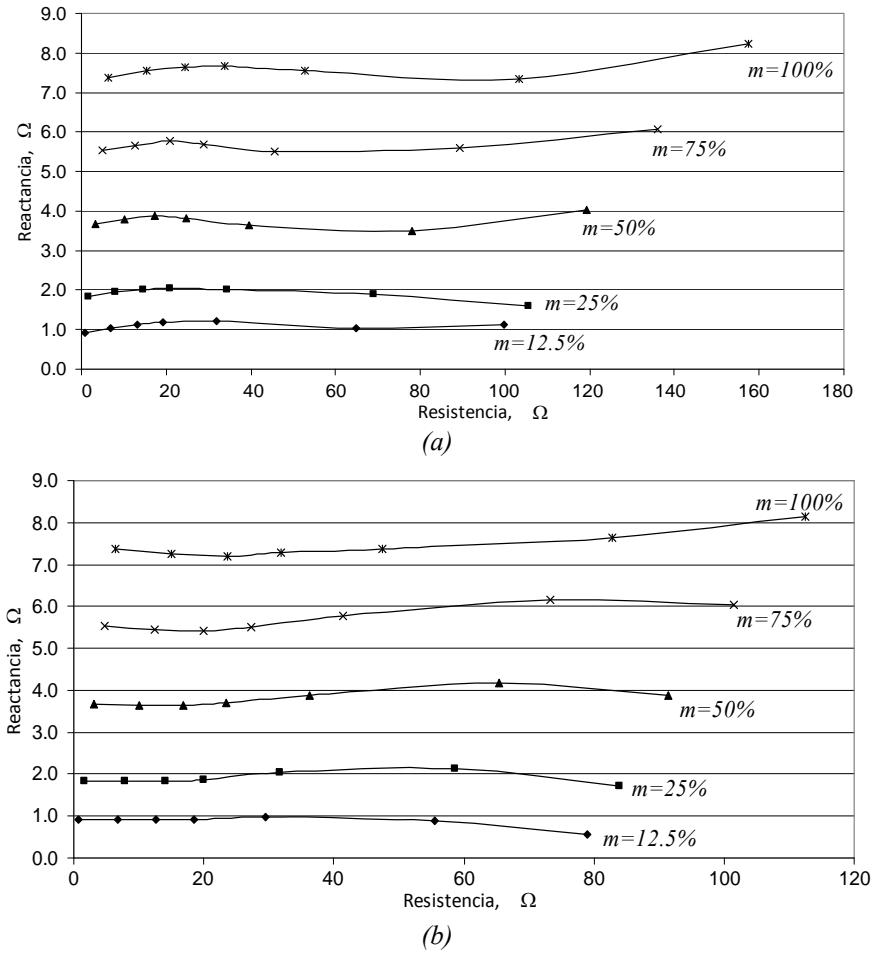


Figura 8. Impedancia aparente estimada para faltas monofásicas a diferentes distancias m de la línea L_1 y variando la R_F de 0.001 a 75Ω con la condición en prefalta en nodo 1 (a) importando potencia y (b) exportando potencia

Tal como se aprecia en la Tabla 1, para resistencias de falta superiores a 50Ω la mejora obtenida en la localización de la falta es de al menos 89.10% y 90.63% en comparación con los algoritmos de distancia basados en DFFT y DEA, respectivamente, para la condición de importación de potencia en prefalta.

Tabla 1. Error en la localización de la falta implementando el esquema adaptativo propuesto

Ubicación de la falta (m)	Resistencia de falta [Ω]	Error la ubicación de la falta, $\varepsilon\%$					
		Algoritmo DFPT		Algoritmo DEA		Esquema propuesto <i>JCF</i>	
		Importando potencia	Exportando potencia	Importando potencia	Exportando potencia	Importando potencia	Exportando potencia
25%	0.001	-6.55%	-6.05%	-7.97%	-8.45%	-4.88%	-4.26%
	5	-2.91%	-6.88%	0.04%	-9.81%	-2.51%	-9.09%
	10	1.79%	-7.97%	8.48%	-12.17%	1.19%	-8.75%
	25	22.42%	-12.73%	33.52%	-22.73%	1.00%	1.77%
	50	79.80%	-25.04%	62.64%	-58.22%	-5.98%	7.12%
	75	168.18%	-41.99%	77.92%	-152.55%	-24.56%	-15.78%
50%	0.001	-6.50%	-5.87%	-7.77%	-8.35%	-4.57%	-4.20%
	5	-4.23%	-6.67%	-2.77%	-10.05%	-5.05%	-9.44%
	10	-1.30%	-7.62%	2.91%	-12.28%	-2.87%	-9.84%
	25	11.56%	-11.38%	22.16%	-21.11%	-9.13%	-2.93%
	50	47.44%	-20.21%	50.37%	-45.23%	-14.19%	4.18%
	75	102.95%	-31.71%	68.50%	-90.79%	1.09%	-2.47%
100%	0.001	-6.32%	-5.42%	-7.40%	-8.20%	-5.09%	-5.07%
	5	-4.51%	-6.40%	-3.66%	-10.62%	-5.67%	-10.01%
	10	-2.14%	-7.50%	0.88%	-13.39%	-4.24%	-10.93%
	25	8.45%	-11.47%	17.53%	-23.53%	-5.54%	-8.17%
	50	38.64%	-19.97%	44.93%	-48.46%	-8.74%	-4.21%
	75	86.26%	-30.27%	64.30%	-90.43%	3.13%	1.94%

En la Figura 9 se muestra el error $\varepsilon\%$ en la localización de la falta para faltas monofásicas en diferentes ubicaciones de la línea L1 y con 75Ω de resistencia de falta, empleando el algoritmo DFPT, DEA y el propuesto y considerando importación de potencia en prefalta.

El algoritmo de distancia implementando el esquema adaptativo propuesto mejora considerablemente la estimación de la ubicación de la falta. No obstante, su desempeño ante faltas al 25% de la línea es menos preciso en comparación con faltas en el resto de la línea. Esto se debe a que la curva exponencial del factor de corrección *JCF* mostrado en la Figura 7 presenta mayor dispersión en la zona del salto de fase correspondiente a faltas al 25% de la línea que en el resto de zonas de esta curva, pero en cambio, es más preciso y efectivo en las faltas que tienen lugar en los extremos de la línea donde la estimación precisa de la localización de la falta es más importante a efectos de evitar operaciones erróneas del relé de protección.

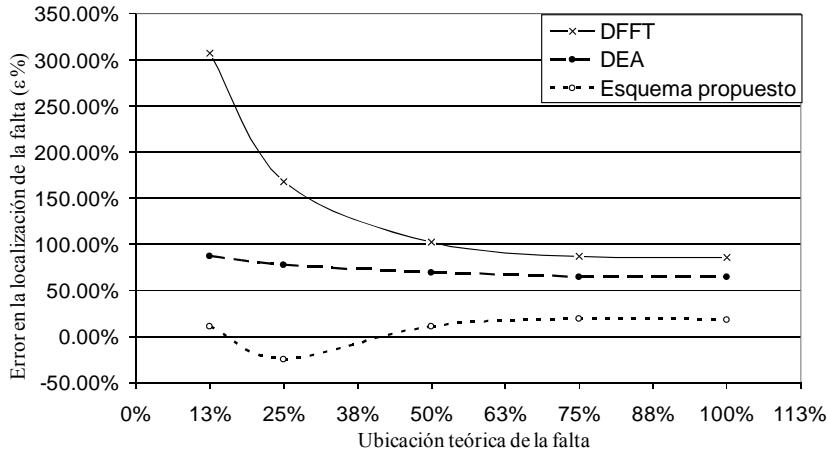


Figura 9. Error en la localización de la falta $\varepsilon\%$ ante faltas monofásicas en la línea L1 con R_F igual a 75 Ω y con el nodo 1 importando potencia en prefalta, utilizando los algoritmos DFPT, DEA y el esquema propuesto

3.2. LOCALIZADOR DE FALTA A PARTIR DE LA RESPUESTA A PULSO

3.2.1. Principio de funcionamiento del localizador de faltas propuesto

Como se ha mencionado, uno de los mayores inconvenientes en las técnicas basadas en la localización de faltas por medio de protecciones de distancia es la dificultad de discriminar entre las múltiples ubicaciones posibles de faltas en un circuito de distribución ramificado.

En estas redes de distribución ramificadas es necesario disponer de un algoritmo de localización de faltas que ejecute dos etapas fundamentales de cálculo; una primera etapa basada en el cálculo de la distancia hasta la falta, y una segunda etapa basada en la discriminación de las múltiples ubicaciones posibles de la falta. En este sentido, el presente trabajo de investigación propone la implementación de un localizador de faltas que estima la ubicación de la falta a partir de las variaciones detectadas en la respuesta de la red eléctrica ante un pulso emitido durante condiciones de prefalta y durante faltas.

Este localizador de faltas propuesto interactúa con la red de distribución inyectando un pulso eléctrico y registrando la respuesta obtenida tanto en condiciones de prefalta como durante la falta.

Una vez detectada la falta, el localizador tendrá establecida una imagen base que corresponde a la respuesta de la red a pulso inyectado en condiciones de prefalta e inicia el proceso de registro de la nueva respuesta de la red ante el mismo pulso inyectado pero ahora en condiciones de falta.

Con la señal de error resultante de ambas imágenes capturadas, en prefalta y durante la falta, se determina el tiempo transcurrido entre la onda incidente y la reflejada Δt con el cual se estima la distancia a la cual ha ocurrido la falta a través de la siguiente expresión:

$$\text{Distancia a falta} = \frac{\Delta t}{2} \cdot v \quad (25)$$

siendo v la velocidad de propagación de la onda electromagnética por la línea.

Con esta técnica propuesta de localización de faltas a partir de la respuesta a pulso se consigue detectar la distancia a la cual ha ocurrido la falta con una precisión de 400 m y considerando una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

En el Laboratorio, se ha desarrollado un prototipo de este inyector de pulsos el cual consta de un circuito de control, para determinar la duración y magnitud del pulso a inyectar, un circuito de medida para registrar la respuesta de la red ante el pulso y un circuito de potencia para inyectar el pulso a la red. Este circuito de potencia se ha realizado con un interruptor de electrónica de potencia (MOSFET) para generar el pulso eléctrico y un dieléctrico para formar un enlace capacitivo con la red de potencia. De esta forma, se obtiene el aislamiento adecuado a frecuencia industrial (50 Hz) y un medio de conexión a la red de potencia a altas frecuencias.

El inyector desarrollado genera pulsos eléctrico con un frente de subida de unos 90 ns y de hasta 1 μ s de duración para ser inyectados en redes de distribución de hasta 30 kV de tensión nominal.

3.2.2. Resultados de la implementación del localizador de faltas propuesto

En la Figura 10 se muestra la red de distribución modelada en PSCAD/EMTDC [22] para realizar las simulaciones. Esta red consta de 11 tramos de línea de diferentes longitudes y representadas a través del modelo frecuencial de conductores salvo el Tramo 1 que consiste en un tramo subterráneo modelado como cable. La tensión de operación de la red es de 15 kV y la frecuencia de muestreo del localizador de faltas es de 100 kHz.

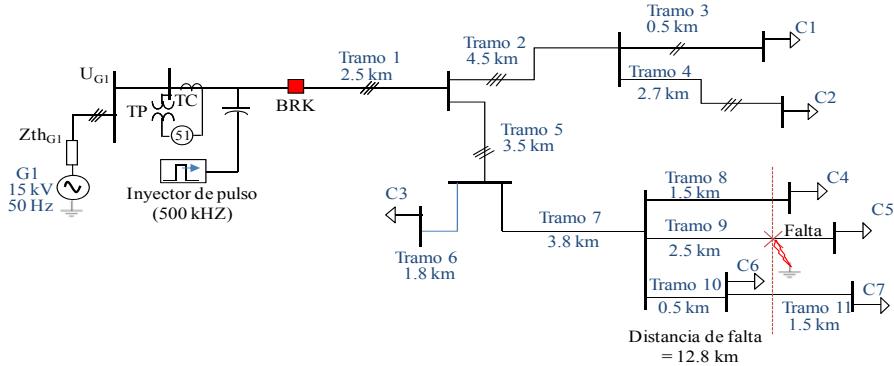


Figura 10. Red de distribución considerada para el estudio e implementación del localizador de faltas propuesto

Nótese que al realizar una falta en el Tramo 9 a una distancia de 12.8 km del centro de transformación (CT) se presentan 3 posibles ubicaciones de la falta. En la Figura 11(a) se muestra la imagen de la respuesta de la red al pulso inyectado durante la condición de prefalta y falta. De la comparación entre ambas señales, el algoritmo propuesto determina una Δt de 88.385 μ s, que aplicando (25) se corresponde a una distancia de 13.257 km. Este valor contiene un error relativo del 3.57% y un error absoluto de 0.457 km en comparación con el valor teórico de 12.8 km.

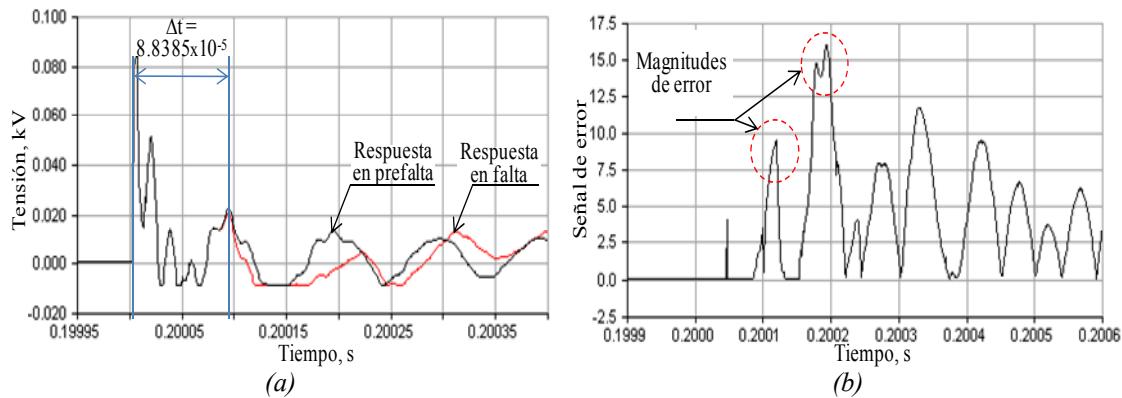


Figura 11. Desempeño de localizador de faltas propuesto durante (a) determinación de la distancia por comparación entre ambas imágenes y (b) magnitud de la señal de error y relación con el tramo asociado.

3.2.3. Trabajos a futuro

El localizador de faltas a partir de la respuesta a pulso permite determinar la distancia a la cual ha ocurrido la falta, sin embargo, tal y como se plantea en el punto anterior, se requiere de un algoritmo adicional para discriminar en el caso de múltiples ubicaciones posibles de la falta dentro de las redes de distribución ramificadas.

Para ello, se pretende desarrollar un algoritmo basado en redes neuronales que discrimine entre las diferentes posibilidades de la ubicación de la falta utilizando la

señal de error obtenida de ambas imágenes donde mediante el aprendizaje se relacione la magnitud del error calculada con su respectivo tramo que lo genere. Tal como se muestra en la *Figura 11(b)*, las magnitudes de la señal de error depende del tramo de línea donde ha ocurrido la falta y puede ser de utilidad para discriminar entre diferentes posibilidades de ubicación de falta.

Asimismo, y de forma complementaria, se desarrollará técnicas orientadas a incrementar la precisión actual en la ubicación de faltas, la cual consiste en 400 m con una frecuencia de muestreo de 100 kHz. Se pretende mejorar esta precisión introduciendo técnicas de muestreo de la señal, donde las consecutivas respuestas ante el mismo pulso durante las mismas condiciones son muestreadas en instantes de tiempo diferentes. De esta forma se duplicará la cantidad de puntos muestreados para la misma respuesta del sistema y por tanto mejorará la precisión de la ubicación de la falta.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se desarrollan dos propuestas de localizadores de faltas cuyo objetivo es contribuir a mejorar la precisión en la localización de las faltas y minimizar el tiempo de restauración del sistema eléctrico. La propuesta del localizador de faltas basado en la implementación de un esquema adaptativo aplica un factor de corrección, basado en el salto de fase en la corriente, a la impedancia aparente estimada por los algoritmos de distancia DFFT y DEA.

La implementación de este factor de corrección compensa el error de sobrealcance y subalcance en los algoritmos de distancia proveniente por el efecto del flujo de potencia en condiciones de prefalta y la resistencia de la falta. Este localizador de falta es efectivo en redes de distribución sin ramificaciones, pero carece de un algoritmo que discrimine entre las múltiples ubicaciones posibles de la falta en redes ramificadas.

Por ello se ha desarrollado un segundo localizador de faltas basado en la respuesta de la red eléctrica a pulso. Con este localizador de faltas se estima la ubicación de la falta a partir de las variaciones detectadas en la respuesta a pulso por parte de la red eléctrica, en condiciones de prefalta y durante la falta. La precisión lograda en la ubicación de la falta es satisfactoria con respecto a la frecuencia de muestreo empleada de 100 kHz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Khodr H.M., Soares J.P., Morais H., El Halabi N., García-Gracia M., Vale Z.A. y Ramos C., “Intelligent Microgrid Scheduling Controlled by Virtual Power Producer for Laboratory Purposes.” *Applied Energy*, 2010, aceptado con cambios: APEN-S-1000048.
- [2] Chi-Shan Yu, “A discrete Fourier transform-based adaptive mimic phasor estimator for distance relaying applications,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2006, vol. 21, núm. 4, pp. 1836 – 1846.
- [3] García-Gracia M., Osal W. y Comech M.P., “Line protection based on the differential equation algorithm using mutual coupling.” *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77, núm. 5-6, pp. 566-573.
- [4] García-Gracia, M., El Halabi N., Montañés, A., Khodr, H.M. y Villén, M., “Improvement of DEA performance against harmonic distortion.” *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, núm. 5, pp. 582-591.
- [5] Senger E.C., Manassero G. Jr., Goldemberg C. y Pellini E.L., “Automated Fault Location System For Primary Distribution Networks.” *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2005, vol. 20, núm. 2, pp. 1332-1340.
- [6] Tai Nengling y Chen Chen, “A New Weak Fault Component Reactance Distance Relay Based on Voltage Amplitude Comparison,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2008, vol. 23, núm. 1, pp. 87 – 93.,
- [7] Izykowski J., Rosolowski E, Saha M.M, “Postfault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2007, vol. 22, núm. 1, pp. 74 – 81.,
- [8] Thomas D., Carvalho R. y Pereira E., “Fault Location In Distribution Systems Based On Traveling Wave.” *In Proceedings of Power Technology Conference*,2003, vol. 2, pp. 468-472.
- [9] Bo Z.Q., Waller G. y Redfern M. A., “Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals.” *IEE Proc. Gen. Trans. and Dist.*, 1999, vol. 146, núm. 1, pp.73-79.

- [10] Borghetti A., Corsi S., Nucci C.A., Paolone M., Pereto L. y Tinarelli R., “On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems.” *Electrical Power and Energy Systems*, 2006, vol. 28, pp. 608-617.
- [11] Martins L.S., Martins J.F., Alegria C.M. y Pires V.F., “A Network Distribution Power System Fault Location based on Neural Eigenvalue Algorithm.” *In Proceeding of IEEE Bologna PowerTech Conference*, 2003, Bologna, Italy.
- [12] Chen W.H., Liu C.W. y Tsai M.S., “On-line Fault Diagnosis of Distribution Substations using Hybrid Cause-Effect Network and Fuzzy Rule Based Method.” *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2002, vol. 15, núm. 2, pp. 710-717.
- [13] Al-Shaher M., Sabra M.M. y Saleh A.S., “Fault Location In Multi-Ring Distribution Network Using Artificial Neural Network,” *Electric Power Systems Research*, 2003, vol. 64, núm. 2, pp. 87-92.
- [14] Mora-Flórez J., Cormane-Angarita J. y Ordóñez-Plata G., “K-means algorithm and mixture distributions for locating faults in power systems.” *Electric Power System Research*, 2009, vol. 79, pp. 714-721.
- [15] Mokhlis H. y Li H.Y., “Fault Location Estimation For Distribution System Using Simulated Voltage Sags Data.” In Proceedings UPEC Conference, Septiembre de 2007, Gran Bretaña.
- [16] Lee S.J., Choi M.S., Kang S.H., Jin B.G., Lee D.S., et al.. “An Intelligent And Efficient Fault Location And Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems.” *IEEE Trans on Power Delivery*, 2004, vol. 19, núm. 2, pp. 524-532.
- [17] Saha M. y Rosolowski E., “Method and device of fault location for distribution networks.” US Patent number 6,483,435; 2002.
- [18] Cook V., Analysis of Distance Protection, *Studies Press: England*, 1985, vol. I, pp. 63-169.
- [19] García-Gracia M., El Halabi N., Martín Arroyo S. y Khodr H.M., “Adaptive Distance Relaying Scheme Based on Current Phase Jump Correction Factor.” *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2010, aceptado con cambios: TPWRD-00764-2009.R2.

- [20] García-Gracia M., El Halabi N., Borroy S., Giménez de Urtasun L., “Phase jump correction factor applied to the differential equation algorithm by an adaptive scheme.” *IET Gen., Trans. & Dist.*, aceptado con cambios: GTD-2010-0247.R1.
- [21] Zhongshen L., “Design and Analysis of Improved Butterworth Low Pass Filter.” *Proc. 8th Conferencia Internacional en Medida e Instrumentación*, China, Aug. 2007, pp. 1-729-1-732.
- [22] Manitoba HVDC Research Centre: PSCAD v4.2, 2006.
- [23] Std. 519-1992: ‘IEEE Recommend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems’, 1992.