

MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN GRÁFICAS DE REACTANCIA

RESUMEN

La localización de fallas, es un tema que está estrechamente relacionado con la continuidad del servicio, y esta tarea es más complicada en sistemas de distribución que en transmisión. La complejidad está asociada a la presencia de conductores no homogéneos, laterales, desconocimiento del tipo de carga en cada barra, desbalance del sistema y de la carga, entre otros en los sistemas de distribución. Adicionalmente, en estos sistemas solo se cuenta con medidas en la subestación.

En este artículo se propone un nuevo método de localización de fallas para sistemas de distribución. A partir del análisis gráfico de la impedancia de falla. La validez de la propuesta se muestra mediante un ejemplo de aplicación a un sistema real, en el cual los errores en la estimación de la distancia, en función de la distancia y el tipo de falla son inferiores al 2,5%.

PALABRAS CLAVES: Localización de fallas, sistemas de distribución, reactancia de falla.

ABSTRACT

Fault location is close related to power service continuity. This task is more difficult in power distribution systems than in power transmission systems due the complexity of the first ones. Power distribution systems are composed by non homogeneous line sections, laterals, variable loads, unbalances on loads and system and so on. In addition in such systems only measurements are available at the power substation.

This paper proposes a new fault location method based on the graphical analysis of the fault impedance. The capability of the proposed method is tested in a real power distribution system, having obtained errors in distance estimation lower than 2.5%.

KEY WORDS: *Fault location, load variation, distribution power systems, support vector machines.*

1. INTRODUCCIÓN

Entre los aspectos más importantes de la calidad de energía eléctrica se tienen en cuenta, la forma de onda, la continuidad del servicio y la atención al cliente. La localización de fallas, es un tema que está estrechamente relacionado con la continuidad del suministro.

Los sistemas de distribución son el medio principal para el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales. Una falla en estos sistemas causa una interrupción del servicio a los usuarios, y consecuentemente pérdidas económicas por parada de procesos, pérdidas de información, daños y detrimentos en maquinarias e insumos, entre otros [1]. A nivel mundial se han realizado diversos estudios en los que se ha establecido que el 80% del total de las interrupciones se originan por fallas en los sistemas de distribución [2].

A pesar de la confiabilidad que pueda brindar un sistema de distribución de energía, es inevitable que haya interrupciones en la prestación del servicio debido a las fallas en las líneas. Las redes experimentan fallas causadas, por tormentas, relámpagos, fallas en los aislamientos y cortocircuitos causados por plantas,

animales entre otros agentes externos. Entonces, la confiabilidad del sistema de distribución ante cualquier falla que haya ocurrido depende de su rápido aislamiento, reparación y restauración del servicio. El restablecimiento del servicio se puede acelerar considerablemente si se determina con exactitud razonable la ubicación de la falla. La manera convencional de encontrar una falla es mediante inspección visual, lo cual toma mucho tiempo además de requerir un considerable número de personal [1].

Existen fallas permanentes y transitorias, y un localizador de fallas proporciona información para ambos tipos de falla. Generalmente, las fallas transitorias causan un menor daño y no se pueden localizar con una simple inspección. Ante estas fallas, los localizadores permiten detectar puntos débiles del sistema de potencia y tomar acciones correctivas para evitar mayores daños debido a reincidencias de la falla. Cuando ocurre una falla permanente, existe un sistema de protección con relés que típicamente hace una correcta y rápida desconexión de la falla basado en medidas tomadas en tiempo real.

En este artículo se presenta un método novedoso que utiliza el análisis de las reactancias de falla, para

**GERMÁN MORALES
ESPAÑA****

Ingeniero Electricista, M.Sc. ©
german.morales.e@gmail.com
Universidad Industrial de
Santander

JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ *

Ingeniero Electricista, Ph.D.
jjmora@ohm.utp.edu.co
Profesor asistente
Universidad Tecnológica de
Pereira

HERMAN VARGAS **

Ingeniero Electricista, Ph.D.
hrvargas@uis.edu.co
Profesor titular
Universidad Industrial de
Santander

*Grupo de Investigación en
Calidad de Energía Eléctrica y
Estabilidad – ICE³
Grupo de Planeamiento de
Sistemas Eléctricos – GPE

**Grupo de Investigación en
Sistemas Eléctricos – GISEL

determinar la localización de la misma y brindar una solución a este problema. Como contenido, en la sección dos se presentan las principales características del sistema de distribución. En el numeral tres se presenta el desarrollo del método de localización, mientras que en el numeral cuatro se presentan las pruebas y el análisis de los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN QUE AFECTAN LA LOCALIZACIÓN DE FALTAS

Para los sistemas de transmisión se han desarrollado excelentes algoritmos que permiten la localización precisa del punto de falla [3] [4] que normalmente emplean medidas en ambos terminales de la línea. Sin embargo, tales algoritmos no son aplicables o presentan una gran incertidumbre en las redes de distribución, debido a que éstas cuentan con características propias que las diferencian de las líneas de transmisión.

En los últimos años se han adaptado y diseñado diferentes métodos para su aplicación en las redes de distribución. La mayoría son adaptaciones de los métodos ya existentes utilizados en sistemas de transmisión, por tanto se han ignorado características importantes propias de los sistemas de distribución como se describe a continuación.

2.1 Monitorización de Tensión y Corriente sólo en la Cabecera del Circuito

Los dispositivos de protección digital generalmente están equipados con funciones de almacenamiento de datos que se activan automáticamente cuando detectan una falla. Adicionalmente tienen la capacidad de registrar y almacenar la forma de onda de las señales de tensión y corriente en la subestación. A partir de estas señales se pueden obtener los fasores del fundamental de tensión y corriente de prefalla, e inmediatamente después del transitorio ocasionado por la falla.

Los métodos más populares que se puede utilizar en sistemas de distribución son los que emplean las componentes fundamentales de tensión y corriente en un terminal de la línea, por economía, fácil implementación y las limitaciones propias del sistema de distribución.

2.2 Desbalance del Sistema

Los métodos que normalmente son utilizados para localizar fallas en sistemas de distribución utilizan redes de secuencia. El método de las componentes de secuencia genera tres impedancias de secuencia independientes únicamente en el caso de que el sistema esté perfectamente balanceado. Los sistemas de distribución normalmente están desbalanceados debido a las impedancias de línea desbalanceadas, laterales monofásicos y bifásicos además de cargas desbalanceadas. Por tanto trabajar con redes de secuencia

en sistemas de distribución puede llevar a grandes errores en la estimación de la falla [5].

2.3 Desconocimiento de la Variación de Carga en Cada Barra

En un sistema de distribución la potencia que se entrega varía en el tiempo, por tanto, las impedancias no son constantes. Un método de localización debe tener en cuenta la variación carga. Debido a que no se tienen medidas en cada barra para conocer detalladamente cada consumo, es necesario hacer una aproximación para tener en cuenta este fenómeno.

2.4 Redes no Homogéneas

Las redes de los sistemas de transmisión no son homogéneas, ya que generalmente presentan diferentes calibres de conductor en un circuito. Esto hace necesario tener cuidado cuando se utilizan los métodos de distancia, puesto que la distancia a una falla no es equivalente a la proporción de la línea.

2.5 Efecto de la Resistencia de Falla

En sistemas de transmisión es común ignorar el efecto de la resistencia de falla y se utilizan métodos sin tener en cuenta este fenómeno, como el de la reactancia [6]. Debido a que a mayor tensión las impedancias de las cargas son más altas, para el caso de los sistemas de distribución una falla de 40Ω , no se puede considerar muy pequeña con respecto a la carga. Por tanto el método de localización debe tener en cuenta los efectos de la variación de la resistencia de falla y en consecuencia el cambio de flujo de carga.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El método que se propone en esta sección se desarrolla teniendo en cuenta las características propias de los sistemas de distribución descritas en la sección dos. Para la implementación del método únicamente se necesita conocer las componentes fundamentales de tensión y corriente en el momento de prefalla y falla, además de la impedancia serie de la línea de cada tramo de calibre distinto.

La metodología propone determinar gráficamente la reactancia de falla en función de una distancia variable a partir de las medidas de tensión y corriente de prefalla y falla. Se asume que el punto de falla es correcto cuando la reactancia de la fase fallada alcanza un valor mínimo.

3.1 Impedancia Dinámica de Carga

Tomando únicamente medidas en la subestación no se puede conocer exactamente en cada momento la distribución de la carga, pero sí se puede conocer la carga total alimentada por la subestación inmediatamente antes de haber ocurrido la falla.

Si se hace un método considerando la carga detallada en cada barra, se está agregando error debido a que no se

tiene en cuenta la variación de la misma. Para considerar el efecto de la variación de la carga, ésta se concentra al final del circuito como se muestra en la figura 1. Es posible hacer esta aproximación, si la impedancia de carga es mucho mayor que la impedancia de línea. En la práctica $Z_C \gg Z_L$ por aspectos asociados a la regulación de tensión y pérdidas en las líneas. Varios métodos utilizan concentraciones de carga similares [7] [8]. En la figura 1, V_p es el vector que contiene los fasores de tensión por fase en prefalla [3x1]; I_p es el vector que contiene los fasores de corriente por fase en prefalla [3x1]; Z_L es la matriz de la impedancia serie de la línea [3x3], como se presenta en la ecuación (1).

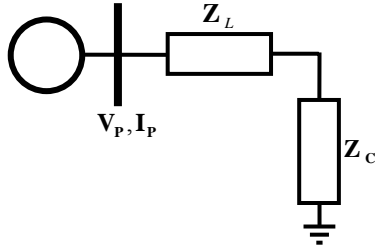


Figura 1. Circuito simplificado de un sistema de distribución antes de la falla

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Z_C es la matriz de la carga [3x3], que se asume de la forma que se presenta en (2).

$$Z_C = \begin{bmatrix} Z_{Ca} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{Cb} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{Cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

La impedancia de carga se estima a partir de las condiciones de prefalla. De la figura 1 se obtiene (3).

$$(Z_L + Z_C) \times I_P = V_P \quad (3)$$

Luego de despejar Z_C se obtiene (4) y (5).

$$Z_C \times I_P = V_P - Z_L \times I_P \quad (4)$$

$$Z_{Ca} = \frac{V_{Pa} - Z_{Laa} \cdot I_{Pa} + Z_{Lab} \cdot I_{Pb} + Z_{Lac} \cdot I_{Pc}}{I_{Pa}} \quad (5)$$

$$Z_{Cb} = \frac{V_{Pb} - Z_{Lba} \cdot I_{Pa} + Z_{Lbb} \cdot I_{Pb} + Z_{Lbc} \cdot I_{Pc}}{I_{Pb}}$$

$$Z_{Cc} = \frac{V_{Pc} - Z_{Lca} \cdot I_{Pa} + Z_{Lcb} \cdot I_{Pb} + Z_{Lcc} \cdot I_{Pc}}{I_{Pc}}$$

La carga se acumula en el nodo final debido a la incertidumbre de su valor, pero el método permite acumular la carga de distintas formas, si se tuviera seguridad sobre su característica de distribución.

3.2 Distancia a la Falla

Cuando ocurre una falla, suponiendo red homogénea, se obtiene el circuito de la figura 2.

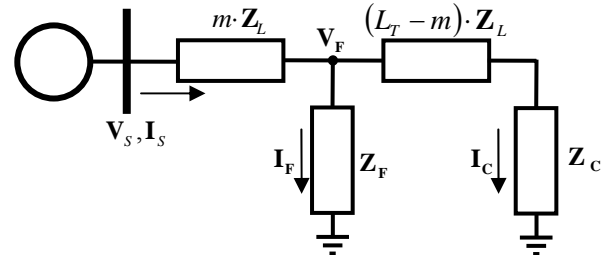


Figura 2. Falla en el punto m en un sistema de distribución. L_T es la longitud total del circuito y Z_F es la matriz de la impedancia de falla [3x3] como se presenta en (6).

$$Z_F = \begin{bmatrix} Z_{Fa} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{Fb} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{Fc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

De (6) se puede notar que la falla se puede considerar desbalanceada $Z_{Fa} \neq Z_{Fb} \neq Z_{Fc}$. Adicionalmente de la figura 2 se obtienen las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$V_F(m) = V_S - m \cdot Z_L \cdot I_S \quad (7)$$

$$I_F(m) = I_S - ((L_T - m) \cdot Z_L + Z_C)^{-1} \times V_F(m) \quad (8)$$

$$Z_F(m) = \frac{V_F(m)}{I_F(m)} \quad (9)$$

La magnitud de la reactancia de falla esta dada por (10)

$$X_F(m) = \left| \text{imag} \left(\frac{V_F(m)}{I_F(m)} \right) \right| \quad (10)$$

De manera similar se obtienen las reactancias de falla de línea. El método se puede generalizar para tener en cuenta la red no homogénea.

En esta técnica de localización de fallas, la posición asumida de falla m es variada sistemáticamente hasta encontrar un punto de la línea en el cual la reactancia de falla en la fase fallada da lo más cerca de cero (puesto que la falla se asume resistiva).

3.3 Tipo de Falla

Como presenta en la sección (4.2), varias reactancias de falla pueden estar cercanas a cero, por tanto se necesita conocer el tipo de falla para analizar la curva de reactancia adecuada. Se consideran las impedancias de prefalla por fase, como se presenta (11).

$$Z_{Pab} = \frac{V_{Pa}}{I_{Pa}} \quad Z_{Pab} = \frac{V_{Pb}}{I_{Pb}} \quad Z_{Pab} = \frac{V_{Pc}}{I_{Pc}} \quad (11)$$

Las anteriores ecuaciones se utilizan como límites para comparar todos los puntos de cada curva de la reactancia y así obtener el tipo de falla a partir de las señales que sobrepasen este límite. En la figura 3 se muestra el algoritmo utilizado para identificar el tipo de falla. El algoritmo propuesto de localización de fallas no requiere ningún conocimiento previo de las fases en falla.

La técnica propuesta puede proporcionar múltiple estimación si las líneas tienen laterales. El problema de la múltiple estimación es una falencia de todos los métodos

de distancia, pero se han planteado metodologías para atacar este problema con ayuda de inteligencia artificial [9] [10] [11].

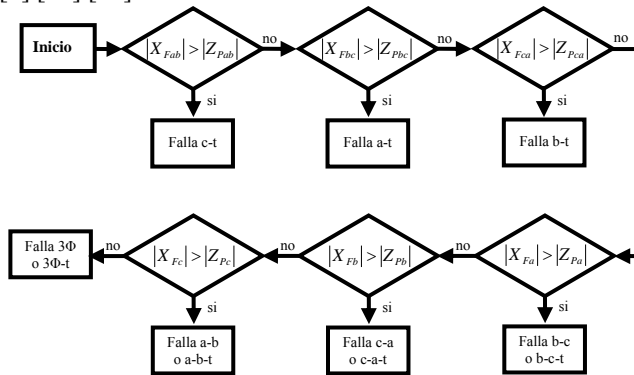


Figura 3. Algoritmo para identificar el tipo de falla

En la tabla 1 se muestra una comparación de los métodos más comunes utilizados para localización de fallas en sistemas de distribución. La fila sombreada indica los requerimientos mínimos que debe tener un método para poder aplicarlo a los sistemas de distribución. Los métodos que cumplen con las características fundamentales son el método propuesto y el método de Aggarwal [15]. El método de Aggarwal a diferencia del método propuesto, necesita conocer la impedancia aguas arriba donde se tomaron las medidas (esta no es constante debido a la salida y entrada de líneas de transmisión), y esta impedancia puede disminuir considerablemente la exactitud del método. Solo funciona para las fallas monofásicas y bifásicas a tierra, además que la implementación y costo computacional es más exigente [15].

3.4 Comparación Cualitativa del Método Propuesto, con los Métodos de Localización más Conocidos

Aspecto analizado			Método de localización de faltas											
			Método propuesto	Referencia [6]	Referencia [12]	Referencia [13]	Referencia [14]	Referencia [15]	Referencia [2]	Referencia [7]	Referencia [8]	Referencia [16]	Referencia [5]	
Identificación del tipo de falta			✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Procesamiento de la señal	Valor eficaz de tensión y corriente	Prefalla	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
		Falla	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Posfalla	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Componentes simétricas			-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Componentes de fase			✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
Sistema de distribución	Modelo de línea		Corta	Corta	Larga	Corta	Corta	Corta	Larga	Corta	Corta	Corta	Corta	Corta
	Modelo de carga		Z=cte	-	Z=f(V)	Z=cte	Z=f(V)	Z=cte	Z=f(V)	Z=cte	I=cte	Z=cte	Z=cte	Z=cte
	No homogeneidad		✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	Sistemas desbalanceados		✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	Laterales		✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
	Cargas intermedias		-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	Variación de carga		✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Tipos de falta	Línea – tierra		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Línea – línea – tierra		✓	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
	Línea – línea		✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
	3 líneas		✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
	3 líneas a tierra		✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-

Tabla 1. Comparación de métodos de distancia para la localización de faltas

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Sistema Prototipo de Pruebas

El sistema de distribución seleccionado para las pruebas es el utilizado en [2] y [17] y se presenta en la figura 4. Corresponde a uno de los circuitos de distribución de 25kV de la ciudad de SaskPower que contiene 21 nodos distribuidos para ramales monofásicos y trifásicos.

El circuito fue simulado mediante EMTP/ATP [18] para fallas monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas, sobre un rango de resistencias de fallo de 0,05 Ω a 40Ω.

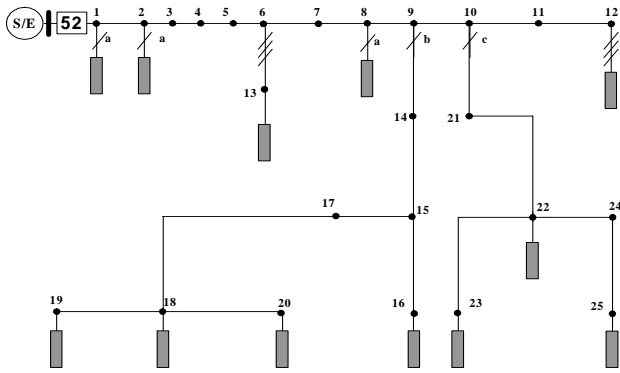


Figura 4. Diagrama unifilar del sistema de pruebas
En las pruebas, el error de las localizaciones de falla se calcula con la ecuación (12).

$$\%Error = \frac{|Long_{est} - Long_{real}|}{Long_{total}} \times 100 \quad (12)$$

$Long_{est}$ es la distancia estimada por el método, $Long_{real}$ es la distancia real al punto de falla y $Long_{total}$ es la longitud total del circuito.

4.2 Efecto del Tipo de Falla en la Localización

El tipo de falla se adquiere a partir de las fases no falladas como se presentó en la sección 3. En las figuras 5 y 6 se muestra una falla *b-t* y *a-b* respectivamente.

Estas curvas muestran como varias señales pueden tener valores muy cercanos a cero.

Según el algoritmo mostrado en la figura 3, para la falla *b-t* de la figura 5, se observa que el mayor valor lo alcanza la curva Xf_{ca} , lo cual significa que las fases *c* y *a* no fallaron, entonces la falla es monofásica *b-t*. La curva que brinda información acerca de la posición de la falla es la curva Xf_b . De manera similar se observa que para la falla bifásica *a-b* de la figura 6, la curva que alcanza mayor valor es Xf_c , por tanto la curva a analizar es la Xf_{ab} .

4.3 Efecto de la Resistencia de Falla

En las figuras 7 se muestran las gráficas de errores para las fallas monofásicas y trifásicas, los cuales son mayores que en el caso de las fallas bifásicas y bifásicas a tierra. Las graficas presentan el error ante una variación del valor de la resistencia de falla (0,05; 10; 20; 30 y 40Ω) y para diferentes distancias. Debido que el error no supera el 2,5%, se demuestra el buen desempeño del método. Se puede observar como el error aumenta con la distancia, éste es un precio justo que se paga debido a la acumulación de carga, es decir a medida que la falla está más lejos de la subestación hay más carga entre la subestación y la falla que no se tiene en cuenta.

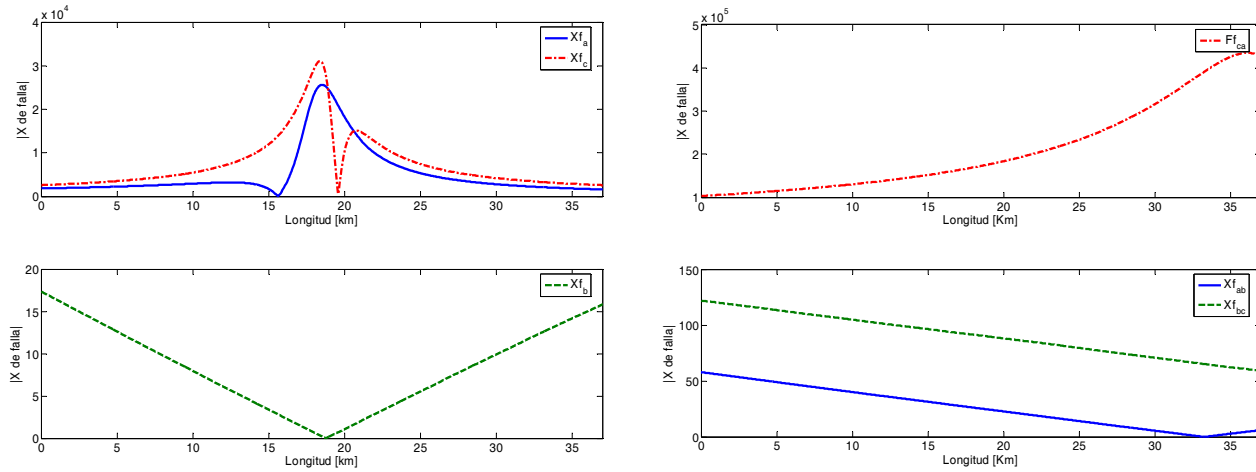


Figura 5. Reactancias de falla ante una falla *b-t* en la barra 6, el error de la localización es de 0,55%. Curvas de fase a la izquierda y curvas de línea a la derecha.

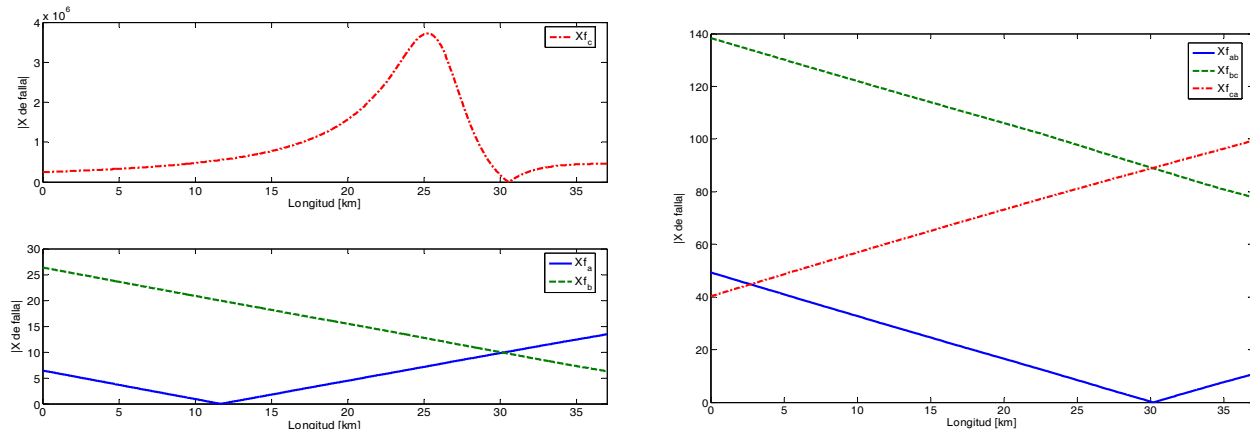


Figura 6. Reactancias de falla ante una falla a-b en la barra 10, el error de localización es de 0,17%. Curvas de fase a la izquierda y curvas de línea a la derecha.

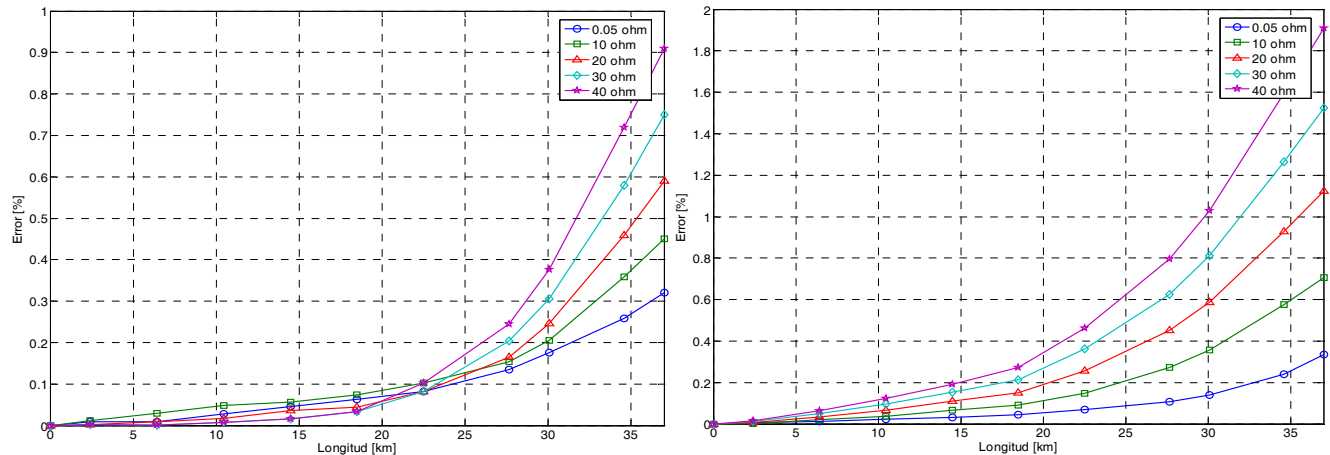


Figura 7. Porcentajes de error en función de la distancia y la resistencia de falla para una falla a-t (izquierda), y trifásica (derecha).

5. CONCLUSIONES

En este artículo se propone un nuevo método de localización de fallas para sistemas de distribución que determina la reactancia de falla en alguna posición asumida, y sólo cuando el punto de falla es correcto, la reactancia de falla de la fase fallada alcanza un valor mínimo. El método conserva una alta precisión sin importar el valor de la resistencia de falla y a distintas localizaciones, los errores presentados no superan el 2,5%. La única información que necesita el método es la impedancia serie de línea de cada tramo, y la componente fundamental de tensión y corriente. El algoritmo propuesto no requiere ningún conocimiento a priori de las fases involucradas en la falla.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Mora J. “Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos Basados en el Modelo y Métodos Basados en el Conocimiento” 2006, Tesis doctoral. Universidad de Girona, España.
 [2] Das R. “Determining the Locations of Faults in Distribution Systems”, 1998. Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
 [3] Takagi T., Yamakoshi Y., Baba J., Uemura K., Sakaguchi T. “A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: Part—Fourier transform method”, Mar 1981. IEEE Transactions Power App. Syst., vol. PAS-100, Pages. 1316–1323.
 [4] Phadke A., Horowitz S. “Power System Relaying”, 1995. Research studies press. Baldock, England
 [5] Son Choi M., Lee S., Lee D. and Jin B. “A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems”. 2004, pp 35-41. IEEE Transactions on Power Systems.
 [6] Warrington, A. R., Van C. “Protective relays. Their theory and practice”, Chapman and Hall Ltd. London, 1968.
 [7] Novosel D., Hart D., Myllymaki J. “System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads”. 1998. US Patent number 5,839,093.

[8] Yang L. “One terminal fault location system that corrects for fault resistance effects”. 1998. US Patent number 5,773,980.
 [9] Morales G., Gómez A. “Estudio e implementación de una herramienta basada en máquinas de soporte vectorial aplicada a la localización de fallas en sistemas de distribución”, 2005. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
 [10] Mora J., Morales G, Carrillo G. “Selección de descriptores para localización de fallas en redes de distribución de energía”. Revista Ingeniería, Volumen 11, Número 1 de 2006 (ISSN 0121-750X). Pag 43-50
 [11] Morales G., Gómez A., Vargas H. “Estrategia de mejoramiento en la selección de descriptores para la localización de fallas en sistemas de distribución con SVM”, 2006. III Congreso iberoamericano ANDESCON, ponencia y exposición, Quito, Ecuador, 2006.
 [12] Krishnaswamy S., and St-Jacques A. “A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads”. 1989, pp 1676-1682. IEEE Transactions on Power Delivery.
 [13] Girgis A., Fallon C., Lubkerman D. “A fault location technique for rural distribution feeders” IEEE transactions on industry and applications. Vol 26 N.6 1993 pp 1170-1175.
 [14] Zhu J., Lubkerman D. and Girgis A. “Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders”. 1997, pp. 801–809. IEEE Transactions on Power Delivery.
 [15] Aggarwal R., Aslan Y., and Johns A. “An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps”. 1997, pp 184-187. IEE Developments in Power System Protection. Conference Publication No. 434.
 [16] Saha M., Provoost F. and Rosolowski E. “Method and device for fault location in distribution systems” 2002. US Patent number 6,483,435.
 [17] Jin B., Lee D., Choi M., Kang S.. “Intelligent Fault Location and Diagnosis System on Radial Distribution Systems”, 2002. Next-Generation Power Technology Center, Myongji University, Yongin, Korea.
 [18] Mora J., Melendez J., Bedoya J. “Extensive Events Database Development using ATP and Matlab to Fault Location in Power Distribution Systems” In proceedings of 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Caracas, August 2006.