

La asimetría de fase: un nuevo parámetro para la detección de faltas de baja intensidad en redes de distribución con puesta a tierra de alta impedancia

K. J. Sagastabeitia¹, I. Zamora², A. J. Mazón², Z. Aginako¹ y G. Buigues²

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.U.I.T.I. de Bilbao, Universidad del País Vasco
Plaza de La Casilla nº 3, 48012 Bilbao
Tel.:+34 94 6014371, fax:+34 94 6014300, e-mail: koldo.sagastabeitia@ehu.es

² Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.T.S.I. de Bilbao, Universidad del País Vasco
c/ Urkijo s/n, 48013 Bilbao

Resumen. La detección de faltas monofásicas a tierra, en redes de distribución con puesta a tierra de alta impedancia, resulta complicada debido al bajo valor de la corriente de defecto. Para detectar este tipo de faltas, seleccionando el circuito y la fase afectados, se pueden vigilar la resistencia fase a tierra de cada circuito, la variación relativa de las asimetrías de línea o las tensiones residuales parciales.

En esta comunicación se define la asimetría de fase como un nuevo parámetro que puede ser utilizado, conjuntamente con los anteriores, para mejorar la eficacia y la fiabilidad del proceso de detección de faltas de baja intensidad, en los sistemas con puesta a tierra de alta impedancia. El uso de este parámetro ha sido validado mediante la simulación de faltas resistivas de hasta 15 k Ω con el programa Resfal basado en Matlab/Simulink. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos al vigilar la variación de las asimetrías de fase y utilizarlo como parámetro de decisión para la detección y selección de faltas de baja intensidad en sistemas de distribución aislados y resonantes.

Palabras llave

Detección de faltas, Redes de distribución, Puesta a tierra de alta impedancia, Faltas monofásicas a tierra.

1. Introducción

La utilización de sistemas de distribución con puesta a tierra de alta impedancia, tales como los sistemas resonantes, aislados o con puesta a tierra de alta impedancia, conlleva como principal ventaja la limitación de la corriente de defecto en caso de establecerse una falta monofásica a tierra. Sin embargo, su uso supone también el inconveniente de que la detección y selección de dicha falta resulte más difícil y complicada, lo que implica una concepción particular de las protecciones [1].

Debido al bajo valor de la corriente de defecto, las faltas monofásicas a tierra de carácter muy resistivo pueden tener un carácter duradero y permitir que la red llegue a

operar en régimen permanente. Por lo tanto, en muchos casos será posible dar continuidad al suministro, a pesar de la situación de defecto.

Por todo ello, la detección de faltas monofásicas muy resistivas en este tipo de redes es ciertamente problemática. De hecho, tal y como se reconoce en las conclusiones del grupo de trabajo D15 de la IEEE Power Engineering Society [2] “no importa cual sea el método de detección utilizado, no todas las faltas de alta impedancia (FAI) son detectables” y “en la práctica, resulta imposible detectar todas las FAI y al mismo tiempo proporcionar un alto grado de seguridad contra las falsas detecciones”.

En cualquier caso, la detección y rápida reparación de estas faltas adquiere una gran relevancia, ya que:

- 1) Una falta resistiva cuya eliminación se demora en exceso puede convertirse en un cortocircuito.
- 2) Una falta resistiva puede haber sido provocada por la rotura y caída de un conductor energizado o por la caída de una rama o árbol sobre la línea. En estos casos, el riesgo de accidente eléctrico es evidente.

En esta comunicación se define un nuevo parámetro (la asimetría de fase) que puede ser utilizado en la detección de faltas monofásicas a tierra permanentes en sistemas con puesta a tierra de alta impedancia. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos al aplicar dicho parámetro en la detección y selección de faltas de baja intensidad en sistemas de distribución aislados y resonantes. Este estudio se ha efectuado mediante simulación con el programa Resfal [3] basado en Matlab/Simulink.

2. Detección de Faltas de Baja Intensidad

Para detectar las faltas de baja intensidad (LCF) se han propuesto métodos que hacen uso de diferentes técnicas y

vigilan distintos parámetros. Así, en unos casos se vigila la fase de las corrientes residuales o de sus variaciones (método DESIR) [1,4] y en otros se propone el uso combinado de dos algoritmos basados en los cambios producidos en la tensión de neutro y en las corrientes de secuencia cero [5].

Existe también un grupo de metodologías que detectan las LCF en redes resonantes e identifican el circuito y la fase en falta. Según el caso, la detección se lleva a cabo calculando y vigilando el valor de la resistencia a tierra de cada fase y circuito, la variación relativa de las asimetrías de línea o las tensiones residuales parciales de cada circuito. Estas magnitudes son calculadas a partir de las magnitudes registradas en régimen permanente. Todas estas metodologías requieren caracterizar la red de forma cíclica por medio de las admitancias a tierra o de las asimetrías de cada circuito. Esta caracterización se obtiene, en ausencia de falta, a partir de las medidas registradas en dos situaciones diferentes. Estas dos situaciones distintas se obtienen inyectando una corriente de 50/60 Hz en el circuito homopolar de la red [6,7], modificando el grado de sintonización de la bobina compensadora [8] o superponiendo señales de tensión a una frecuencia superior a la nominal de la red [9].

El nuevo parámetro definido es directamente aplicable en combinación con cualquiera de estos últimos métodos de detección. En este caso proporciona un elemento de decisión adicional para ofrecer una mayor eficacia y fiabilidad en la complicada detección de este tipo de faltas.

3. La asimetría de fase

A. Definición

En un sistema tipo como el representado en la Fig.1, la asimetría de línea del circuito 'i' viene definida por (1).

$$\underline{K}_i = \frac{\underline{Y}_{1Gi} + a^2 \underline{Y}_{2Gi} + a \underline{Y}_{3Gi}}{j\omega C_{tref}} \quad (1)$$

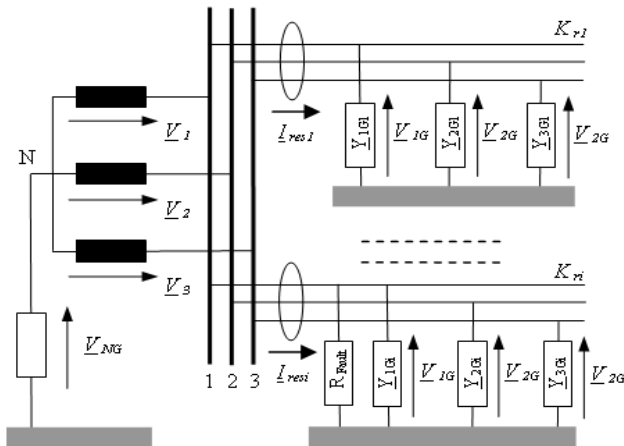


Fig. 1. Configuración del sistema de distribución con una falta monofásica.

El nuevo parámetro presentado en esta comunicación, a similitud de la asimetría de línea, proporciona una idea aproximada sobre cuán diferentes son las líneas y cargas alimentadas por cada fase de los distintos circuitos. Así, en un sistema de "n" circuitos, la asimetría de la fase 'p' (\underline{K}_{Fp}) viene definida por la expresión (2).

$$\underline{K}_{Fp} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{Y}_{pGi}}{j\omega C_{tref}} \quad (2)$$

En este caso, y al contrario de lo que ocurre con la asimetría de línea de un circuito, la asimetría de fase es un concepto teórico que no se corresponde con una realidad física concreta del sistema. Así, mientras que la asimetría de línea proporciona una información clara y precisa del grado de equilibrio existente en las cargas de un determinado circuito (incluidas las propias líneas de distribución), la asimetría de fase resulta de aplicar el mismo criterio a las cargas que, correspondiendo a una misma fase, son alimentadas por diferentes circuitos. Resulta por tanto evidente que el valor así obtenido no podrá proporcionar por sí mismo información alguna, más allá de corroborar la diferente naturaleza de unos circuitos que, en principio, no tienen por qué ser equiparables, ni simétricos.

Sin embargo, se ha podido comprobar que, vigilando la variación experimentada por este parámetro a lo largo del tiempo, es posible determinar cuándo se han producido cambios significativos en una fase concreta del sistema, sin afectar al resto de las fases. Este hecho resulta de una gran utilidad, ya que el fin último no va a consistir en conocer el valor concreto adquirido por la asimetría de cada una de las fases, sino comprobar cuánto varía la misma de una situación a otra e interpretar cuál puede ser la causa de dicha variación.

B. Cálculo

La asimetría de línea del circuito 'i' se puede obtener mediante (3).

$$\underline{K}_i = \frac{\underline{I}_{resi} - \left(\frac{\underline{I}_{resi}^{(b)} - \underline{I}_{resi}^{(a)}}{\underline{V}_{NG}^{(b)} - \underline{V}_{NG}^{(a)}} \right) \cdot \underline{V}_{NG}}{j \cdot \text{Imag} \left(\frac{\underline{I}_{resi}^{(b)} - \underline{I}_{resi}^{(a)}}{\underline{V}_{NG}^{(b)} - \underline{V}_{NG}^{(a)}} \right) \cdot \underline{V}_{nom}} \quad (3)$$

Para llevar a cabo el cálculo anterior se requiere conocer el valor de la tensión nominal del sistema (\underline{V}_{nom}), la tensión neutro a tierra (\underline{V}_{NG}) y la corriente residual del circuito (\underline{I}_{resi}) en el momento para el cual se realiza dicho cálculo. Además, previamente y en ausencia de falta, se debe caracterizar la red mediante la medición de dichas magnitudes en dos situaciones independientes que proporcionen diferentes valores de la tensión de neutro a tierra, (a) y (b).

Del mismo modo, la asimetría de fase de la fase ‘p’ se obtiene mediante (4).

$$\underline{K}_{Fp} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{I}_{pi} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \underline{I}_{pi}^{(b)} - \sum_{i=1}^n \underline{I}_{pi}^{(a)}}{\underline{V}_{NG}^{(b)} - \underline{V}_{NG}^{(a)}} \right) \cdot \underline{V}_{NG}}{j \cdot \text{Imag} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \underline{I}_{pi}^{(b)} - \sum_{i=1}^n \underline{I}_{pi}^{(a)}}{\underline{V}_{NG}^{(b)} - \underline{V}_{NG}^{(a)}} \right) \cdot \underline{V}_{nom}} \quad (4)$$

4. Detección de LCF mediante el cálculo de las asimetrías de línea y de fase

La aparición de una falta monofásica a tierra en una fase de un determinado circuito va a afectar únicamente al valor de las asimetrías de línea y de fase para el caso del circuito y fase afectados por el defecto. Al no verse afectados por el camino a tierra que supone la aparición de la falta, tanto el valor de la asimetría de línea en los circuitos sanos como el de la asimetría de fase en las fases sanas no variarán de la situación de prefalta a la situación de falta.

Así, vigilando la variación relativa de las asimetrías de línea mediante (5), es posible detectar la existencia de alguna incidencia que afecta a un solo circuito.

$$\Delta \underline{K}_{ri} = \frac{\underline{K}_i - \underline{K}_i^{(ref)}}{\underline{K}_i^{(ref)}} \quad (5)$$

Del mismo modo, vigilando la variación relativa de las asimetrías de fase mediante (6), se pueden detectar las incidencias que afectan a una sola fase.

$$\Delta \underline{K}_{rFp} = \frac{\underline{K}_{Fp} - \underline{K}_{Fp}^{(ref)}}{\underline{K}_{Fp}^{(ref)}} \quad (6)$$

Finalmente, se puede hacer una comparación entre los valores obtenidos para los diferentes circuitos y fases. La finalidad de esto último no es otra que identificar aquellos casos donde la variación relativa de la asimetría, aún pudiendo ser pequeña, es significativamente superior a la experimentada por el resto. Con esta finalidad, se calculan según (7) las variaciones residuales de las asimetrías como el cociente entre cada variación relativa y el mínimo valor de entre todas las variaciones relativas calculadas.

$$\Delta \underline{K}_{resi} = \frac{\Delta \underline{K}_{ri}}{\Delta \underline{K}_{r \min}} \quad (7)$$

$$\Delta \underline{K}_{resFp} = \frac{\Delta \underline{K}_{rFp}}{\Delta \underline{K}_{rF \min}}$$

Así, mientras que las variaciones residuales de las asimetrías de los circuitos y fases sanas serán prácticamente la unidad, en el circuito y en la fase donde ha tenido lugar la falta dichas variaciones residuales se elevarán hasta alcanzar valores que los harán claramente identificables.

Por ello, aprovechando la información complementaria que proporcionan ambos tipos de variaciones residuales, se construye una tabla de doble entrada (tabla I), donde:

- 1) Las variaciones residuales de las asimetrías de fase se introducen por columnas.
- 2) Las variaciones residuales de las asimetrías de línea se consignan por filas.
- 3) En la celda correspondiente a la fila “i” columna “p” se introduce el producto entre las variaciones residuales de las asimetrías de la fase “p” y del circuito “i”.

De este modo, la aparición de una celda con un valor significativamente superior al resto (celda dominante) implicará la existencia de una falta en la fase y circuito correspondientes. En la tabla I se ha supuesto la existencia de una falta monofásica a tierra en la fase I del circuito “i”. En este caso, se pueden distinguir tres tipos de celdas:

- 1) La celda dominante, correspondiente a la fase y circuito en falta.
- 2) Las celdas secundarias, correspondientes a las fases sanas del circuito en falta y a la fase en falta de los circuitos sanos. Se tratará de celdas con valores significativos, pero claramente inferiores al obtenido para la celda dominante.
- 3) Las celdas unitarias, correspondientes a las fases y circuitos sanos, son celdas cuyo valor estará próximo a la unidad. Es decir, hacen referencia a circuitos y fases donde la asimetría no ha sufrido prácticamente variaciones.

Por el contrario, si aparece una fila dominante cuyos términos son claramente superiores al resto, se puede establecer que en el circuito correspondiente se ha producido un cambio de topología. Es decir, un cambio de topología en un determinado circuito se verá reflejado por la aparición de:

- 1) Una fila dominante, correspondiente al circuito que ha visto modificada su topología.
- 2) Filas unitarias, correspondientes al resto de los circuitos. Se trata de filas compuestas únicamente por celdas unitarias con valores cercanos a la unidad.

Si todas las celdas de la tabla resultan unitarias, se debe interpretar que el sistema permanece estacionario.

TABLA I. – Tabla de detección por variaciones residuales de las asimetrías

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	$\Delta K_{resF1} * \Delta K_{res1}$	$\Delta K_{resF2} * \Delta K_{res1}$	$\Delta K_{resF3} * \Delta K_{res1}$
ΔK_{res2}	$\Delta K_{resF1} * \Delta K_{res2}$	$\Delta K_{resF2} * \Delta K_{res2}$	$\Delta K_{resF3} * \Delta K_{res2}$
-----
ΔK_{resi}	$\Delta K_{resF1} * \Delta K_{resi}$	$\Delta K_{resF2} * \Delta K_{resi}$	$\Delta K_{resF3} * \Delta K_{resi}$
-----
ΔK_{resn}	$\Delta K_{resF1} * \Delta K_{resn}$	$\Delta K_{resF2} * \Delta K_{resn}$	$\Delta K_{resF3} * \Delta K_{resn}$

5. Resultados

La validez del nuevo parámetro propuesto como parámetro de decisión ha sido verificada mediante pruebas de simulación realizadas con el software RESFAL [3], desarrollado en el entorno Matlab/Simulink. En estas pruebas se han contemplado faltas monofásicas con una resistencia de falta de hasta 15 kΩ, en redes de distribución aisladas y compensadas. Asimismo, a fin de cotejar su fiabilidad y la ausencia de falsas detecciones, se han simulado también diferentes maniobras y cambios de topología en el sistema.

Aunque la detección de LCF mediante el cálculo de las asimetrías se puede aplicar también cuando se utilizan los métodos basados en la inyección de una corriente homopolar en el neutro del sistema o en la modificación del grado de sintonización de la bobina compensadora, en esta comunicación se presentan los resultados obtenidos al utilizar las asimetrías de fase en la detección y selección de faltas de baja intensidad mediante la superposición de señales de tensión [9].

Para ello, se ha empleado el modelo de un sistema de distribución simplificado, en el que se ha incorporado el sistema de superposición de señales de tensión (Fig. 2). En este modelo, a fin de facilitar la simulación de los distintos tipos de tratamiento del neutro, en la puesta a tierra del neutro del secundario del transformador se ha dispuesto una impedancia parametrizable, cuyo valor es ajustado en función de la configuración deseada en cada caso (aislada o resonante).

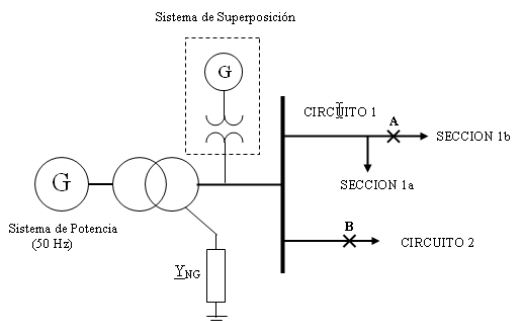


Fig. 2. Modelo del sistema de distribución.

A. Detección de faltas

A modo de resumen, en las tablas II a V se muestran los resultados obtenidos al simular faltas de hasta 15 kΩ en los puntos A y B (Fig. 2). En estas tablas únicamente se reflejan los valores de las asimetrías correspondientes al circuito y a la fase en falta.

TABLA II. – Cuadro de resultados. Sistema Resonante

Punto en falta	Resistencia de falta (Ω)	ΔK_r	ΔK_{rF}	ΔK_{res}	ΔK_{resF}
A	1500	4,42	0,133	191998	5779
A	5000	4,12	0,1241	191996	5779
A	15000	3,39	0,1019	192000	5779
B	1500	3,36	0,156	67199	6235
B	5000	3,13	0,1454	67196	6235
B	15000	2,53	0,1171	67194	6235

TABLA III. – Cuadro de resultados. Sistema Aislado

Punto en falta	Resistencia de falta (Ω)	ΔK_r	ΔK_{rF}	ΔK_{res}	ΔK_{resF}
A	2000	3,47	0,1045	192010	5779
A	7000	3,28	0,0987	192006	5779
A	14000	3,03	0,0911	192129	5779
B	2000	2,43	0,1127	67160	6235
B	7000	2,32	0,1074	67175	6235
B	14000	2,16	0,1	67152	6235

TABLA IV. – Tabla de detección por ΔK_{res} . Faltas en punto A

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	1,11 E09	1,9 E05	1,9 E05
ΔK_{res2}	5779	1	1

TABLA V. – Tabla de detección por ΔK_{res} . Faltas en punto B

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	1	6,23 E03	1
ΔK_{res2}	6,7 E04	4,19 E08	6,7 E04

A la vista de los resultados obtenidos se concluye que:

- 1) La vigilancia de las variaciones de las asimetrías ha permitido detectar todas las faltas simuladas. La aparición de una celda claramente dominante en las tablas de detección identifican el circuito y la fase en falta.
- 2) Las variaciones relativas de las asimetrías obtenidas para el circuito y la fase en falta son siempre de un orden de magnitud claramente superior a las obtenidas para los circuitos y fases sanas.
- 3) Como consecuencia de lo anterior, las variaciones residuales de las asimetrías para el circuito y la fase en falta son siempre muy elevadas. Mientras que para los circuitos y fases sanas valen en todos los casos 1.
- 4) Las variaciones relativas de las asimetrías del circuito y de la fase en falta disminuyen al aumentar el valor de la resistencia de la falta. Asimismo, varían con el tipo de sistema y en función del punto donde se ubica la falta.
- 5) Por el contrario, las variaciones residuales de dichas asimetrías se mantienen prácticamente constantes para cada uno de los puntos donde se han simulado las faltas (variaciones inferiores al 0,2 %), con independencia del valor de la resistencia de falta utilizada y del tratamiento dado al neutro de la red.
- 6) A consecuencia de lo anterior, las tablas de detección obtenidas con las distintas configuraciones del sistema al simular diferentes faltas en un mismo punto resultan ser prácticamente idénticas. Así, en las tablas IV y V se muestran las tablas de detección obtenidas al simular faltas en los puntos A y B.

TABLA IV. – Tabla de detección por ΔK_{res} . Faltas en punto A

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	1,11 E09	1,9 E05	1,9 E05
ΔK_{res2}	5779	1	1

TABLA V. – Tabla de detección por ΔK_{res} . Faltas en punto B

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	1	6,23 E03	1
ΔK_{res2}	6,7 E04	4,19 E08	6,7 E04

B. Detección de cambios de topología

En segundo lugar, también se ha comprobado que el uso de las asimetrías de línea y de fase como parámetros de detección permite distinguir los cambios de topología producidos en los circuitos del sistema y no los confunde

con situaciones de falta, evitando así disparos intempestivos producto de las falsas detecciones. Con este fin, se han simulado la conexión y la desconexión de cada uno de los circuitos y secciones que componen el sistema de la Fig. 2.

A modo de resumen, en las tablas VI y VII se muestran los resultados obtenidos al simular la desconexión de la sección 1b del circuito 1 en los sistemas resonante y aislado.

TABLA VI. – Tabla de resultados. Desconexión Sección 1b en sistema resonante.

Asimetrías de Línea		
	ΔK_r	ΔK_{res}
Circuito 1	1,61	7369
Circuito 2	2,18 E-04	1

Asimetrías de Fase		
	ΔK_{rF}	ΔK_{resF}
Fase 1	0,4359	1,021
Fase 2	0,437	1,024
Fase 3	0,4268	1

TABLA VII. – Tabla de resultados. Desconexión Sección 1b en sistema aislado.

Asimetrías de Línea		
	ΔK_r	ΔK_{res}
Circuito 1	2,29	12637
Circuito 2	1,82 E-04	1

Asimetrías de Fase		
	ΔK_{rF}	ΔK_{resF}
Fase 1	0,3687	1,061
Fase 2	0,352	1,013
Fase 3	0,3474	1

En todos los casos analizados, el cambio de topología ha sido correctamente identificado y no se ha producido ninguna falsa detección. Asimismo, los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- 1) La variación relativa de la asimetría de línea correspondiente al circuito afectado por la maniobra toma siempre valores muy superiores a los obtenidos para el otro circuito. Como consecuencia, la variación residual de ese circuito es muy elevada.

- 2) Las variaciones relativas de las asimetrías de fase calculadas presentan siempre valores muy similares para las tres fases. Esto se ve reflejado en variaciones residuales de las asimetrías de fase muy próximas a la unidad.

De este modo, en las tablas de detección (tablas VIII y IX) el cambio de topología es identificado claramente por la aparición de una fila dominante, que se corresponde con el circuito afectado. La fila correspondiente al otro circuito se compone únicamente de celdas unitarias.

TABLA VIII. – Tabla de detección por ΔK_{res} . Desconexión Sección 1b en sistema resonante.

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	7524	7546	7369
ΔK_{res2}	1,021	1,024	1

TABLA IX. – Tabla de detección por ΔK_{res} . Desconexión Sección 1b en sistema aislado.

	ΔK_{resF1}	ΔK_{resF2}	ΔK_{resF3}
ΔK_{res1}	13408	12801	12637
ΔK_{res2}	1,061	1,013	1

6. Conclusiones

En esta comunicación se define la asimetría de fase como un nuevo parámetro de decisión en la detección de faltas de baja intensidad en los sistemas con puesta a tierra de alta impedancia.

Los resultados obtenidos han permitido validar la utilidad de este nuevo parámetro para la detección y selección de faltas de baja intensidad en sistemas de distribución resonantes y aislados. Así, se han detectado la totalidad de las faltas simuladas con resistencia de falta de hasta 15 k Ω . Además, en todos los casos se han identificado correctamente el circuito y la fase afectados por la falta. Del mismo modo, se ha podido comprobar su fiabilidad y no se ha registrado ninguna falsa detección cuando se han simulado cambios de topología de todo tipo.

Nomenclatura

- K_i : Asimetría de línea del circuito 'i'
 K_{Fp} : Asimetría de fase de la fase 'p'
 ΔK_{ri} : Variación relativa de K_i
 ΔK_{rFp} : Variación relativa de K_{Fp}
 ΔK_{resi} : Variación residual de K_i
 ΔK_{resFp} : Variación residual de K_{Fp}
 Y_{pGi} : Admitancia a tierra de la fase 'p', circuito 'i'
 I_{resi} : Corriente residual del circuito 'i'

- I_{pi} : Corriente de la fase 'p', circuito 'i'
 V_{NG} : Tensión de neutro
 V_{nom} : Tensión nominal del sistema
 a : Factor de rotación de fase ($1 \angle 120^\circ$)
 w : Pulsación eléctrica del sistema
 C_{tref} : Capacidad a tierra de referencia
(a): Situación de prefalta 'a'
(b): Situación de prefalta 'b'
(ref): Valor de referencia

Referencias

- [1] D. Griffel, Y. Harmand, V. Leitloff, J. Bergeal, "A new deal for safety and quality on MV networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12 (4), pp 1428-1433, October 1997.
- [2] Working Group D15 of the IEEE Power Engineering Society, "High Impedance Fault Detection Technology", Report of the Power System Relaying Committee, February 1999.
- [3] I. Zamora, A.J. Mazón, K.J. Sagastabeitia, O. Picó, J.R. Saenz, "Verifying resonant grounding in distribution systems", IEEE Computer Applications in Power, Vol 15 (4), pp. 45-50, October 2002.
- [4] T. Welfonder, V. Leitloff, R. Teuillet and S. Vitet, "Location Strategies and Evaluation of Detection Algorithms for Earth Faults in Compensated MV Distribution Systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15 n° 4, pp. 1121-1128, October 2000.
- [5] S. Hanninen, M. Lehtonen, U. Pulkkinen, "A probabilistic method for detection and location of very high resistive earth faults", Electric Power Systems Research, Vol. 54 (3), pág. 199-206, Junio 2000.
- [6] V. Leitloff, R. Feuille and D. Griffel, "Detection of resistive single-phase earth faults in a compensated power-distribution system", European Transaction on Electrical Power, vol. 7 (7), pp. 65-73, January-February 1997.
- [7] J G. Druml, "Détection de défauts à la terre très résistants sur les réseaux compensés" REE, ISSN 1265-6534, No 2, pp. 68-75, February 1996.
- [8] F. Ruz, A. Quijano and E. Gómez, "DSTRP: A new algorithm for high impedance fault detection in compensated neutral grounded M. V. Power Systems", European Transaction on Electrical Power, vol. 13 (1), pp. 23-28, January-February 2003.
- [9] I. Zamora, A. J. Mazón, K. J. Sagastabeitia, J. J. Zamora, "New Method for Detection of Low Current Faults in Electrical Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22 (4), pp. 2072-2079, October 2007.