



MAIGE: Sistema de Monitorización Avanzada de Instalaciones de Distribución de Gas y Electricidad

<http://proyectomaige.gnfdigital.com>

Nueva metodología para la Localización de Faltas en redes de distribución

David Cervero y María Gabriela Cañete
Fundación CIRCE

RESUMEN: el proyecto MAIGE tiene como objetivo monitorizar de forma remota las instalaciones de media tensión de la red de distribución para incrementar la eficiencia de su mantenimiento y mejorar la calidad y seguridad del suministro. Uno de los parámetros claves para medir la calidad de este servicio es la fiabilidad de suministro, lo que requiere, entre otras medidas, disminuir el tiempo de interrupción que los clientes sufren cuando se produce una avería en la red de distribución. Un mecanismo imprescindible para lograr esta reducción es la localización automática y precisa de faltas, es decir, la existencia de una instrumentación en la red de distribución capaz de indicar al operador del sistema el lugar en el que se encuentra la avería que está ocasionando la pérdida de suministro. De esta manera las brigadas de mantenimiento no se ven obligadas a localizar el lugar de incidencia visualmente, con el tiempo que ello conlleva, y pueden acceder directamente al punto donde se ha producido la falta para proceder a su reparación. En el proyecto MAIGE se desarrolla una nueva tecnología para construir un prototipo que permita la localización automática de falta, salvando los desafíos que introducen las características específicas de la red de distribución de media tensión, las cuales complican la resolución del problema.

© Reservados todos los derechos

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto MAIGE pretende dar solución a una serie de necesidades que existen actualmente en las redes de distribución. En su proceso de adaptación a las nuevas realidades, los operadores de estas infraestructuras deben comenzar su adaptación al paradigma de las *smart grids*, capaces de solventar muchos de los problemas que actualmente existen en las redes de distribución y que se verán agravados con la introducción de los recursos energéticos distribuidos [1].

Para adaptarse a este cambio de paradigma, un primer paso consiste en el desarrollo de nuevas funcionalidades en la monitorización de los activos que, a través de la gestión de los datos, permitan implementar nuevas capacidades para la gestión de la red de distribución [2].

Esta nueva gestión pretende conseguir una red donde se mejore, esencialmente, la eficiencia de las operaciones de mantenimiento, así como la seguridad y fiabilidad de suministro. Considerando los enormes costes anuales ocasionados por la pérdida de suministro eléctrico que, por ejemplo, en Estados Unidos, están contabilizados en más de 100.000 millones de dólares anuales [3], y que en torno al 80 % de estas pérdidas de suministro provienen de fallos en la red de distribución [4], [5], la minimización de tiempos de interrupción es una necesidad actual para la mejora del sistema eléctrico. Esta reducción se puede lograr mediante el desarrollo de sistemas de localización automáticos de faltas [6].

La localización automática de faltas permite indicar a las brigadas de mantenimiento, de manera precisa, la distancia que existe hasta el lugar donde se ha producido la avería, evitando su localización visual. Esta última operación, que puede ser intensiva en tiempo, no resulta

necesaria cuando se dispone de un sistema de localización automática, lo que permite comenzar a trabajar en la reparación de la incidencia con mayor rapidez.

De esta manera, la empresa distribuidora puede lograr una mejora en los índices que miden la calidad del suministro que ofrece a sus clientes.

2. ESPECIFICIDADES DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

Viendo la potencialidad que presenta la localización de faltas para la mejora de las redes eléctricas, desde hace tiempo se viene investigando en sistemas que logren, de manera automática, resultados precisos.

En primer lugar, los desarrollos se centraron en la red de transporte, donde esta aplicación está ampliamente implantada. Sin embargo, las redes de distribución presentan una serie de características propias que impiden realizar una traslación directa de las tecnologías de la red de transporte a la red de distribución [4], [7], [8], [9]. Concretamente, cabe destacar [10], [11]:

- *Los requerimientos hardware de los equipos que deben aplicar las distintas metodologías de localización son generalmente inasumibles en las redes de distribución, debido al coste unitario de los dispositivos y al despliegue requerido: muchas de las soluciones planteadas hasta el momento requieren para su funcionamiento en*

redes de distribución la instalación de una gran cantidad de equipos, debido a la topología de las mismas.

- *La baja, o inexistente, monitorización de la red en comparación con la red de transporte, lo que implica que no existen equipos previos de los que se pueda sacar provecho*
- *La heterogeneidad de las líneas del sistema que, generalmente, combinan distinta tipología de cables y/o conductores en un mismo circuito de explotación*
- *Es habitual la presencia de derivaciones y de cargas laterales en la línea principal, así como la explotación radial de los circuitos.*

Todas estas características específicas de la red de distribución suponen un reto para los sistemas actuales de localización de faltas, que no están preparados para resolver esta problemática que no se presenta en las redes de transporte.

En los últimos años se han realizado múltiples investigaciones en la materia, aunque ninguna propuesta ha conseguido superar todos los inconvenientes existentes con unos costes asumibles para las empresas distribuidoras [6], [12], [13]. Por tanto, la localización de faltas se sigue realizando en muchas ocasiones de manera visual, mediante las brigadas de mantenimiento de las compañías [9].

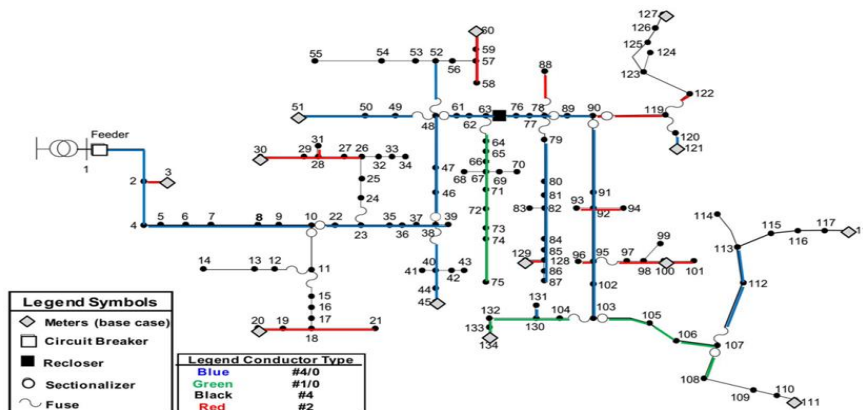


Figura 1. Topología clásica de una red de distribución [14]

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Tal y como se ha expuesto, la localización de faltas es una disciplina en la que se viene trabajando desde hace tiempo. Resulta adecuado introducir, como antecedentes, los métodos que se han desarrollado hasta el momento, para poder enmarcar la solución propuesta por CIRCE.

3.1. Clasificación métodos

Existen multitud de técnicas para lograr la localización automática de faltas en las redes eléctricas. Esta proliferación de métodos ha derivado en la existencia de distintos tipos de clasificaciones, en función del criterio seguido para elaborarlas. Una clasificación clásica que permite visualizar la variedad de soluciones existente en el mercado se muestra a continuación:

- *Métodos basados en la medida de la impedancia*
- *Métodos basados en la detección de la onda viajera*
- *Métodos expertos (inteligencia artificial)*
- *Instalación de múltiples equipos en la red*
- *Métodos híbridos*

A pesar de que se han mostrado 5 tipos distintos de soluciones, existe una gran diversidad en cuanto a la manera en que se puede aplicar cada una de las metodologías. Por lo tanto, se debe considerar que esta clasificación es solo una primera aproximación que abre la puerta a multitud de técnicas que se enmarcan en cada

una de las categorías, pero que aplican la solución de manera distinta.

La clasificación revela 5 grupos de técnicas para la localización de faltas. Sin embargo, los principios físicos fundamentales que permiten la localización son, esencialmente, dos:

- *Medida de la impedancia para la localización de la avería:* cuando se produce una falta, la impedancia característica de la línea vista desde cualquiera de sus extremos se ve modificada. La longitud hasta la falta es directamente proporcional a este nuevo valor, por lo que es posible localizarla
- *Detección de la onda viajera:* cada vez que se produce una falta en la red eléctrica se genera un transitorio en la señal de tensión. Este transitorio viaja a lo largo de las líneas existentes siguiendo los principios de las ecuaciones del telegrafista, lo que permite localizar el punto de ocurrencia de la falta a través de la determinación del tiempo de viaje y la velocidad de desplazamiento de la señal.

3.2. Principio de funcionamiento

La solución propuesta en MAIGE se enmarca dentro de los métodos basados en la detección de la onda viajera, que son considerados los más precisos, lo que ha llevado a su gran implantación en las redes de transporte [15].

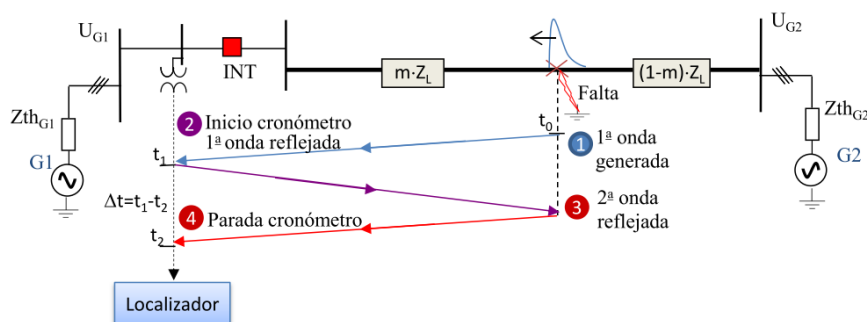


Figura 2. Localización de faltas haciendo uso del principio de la onda viajera

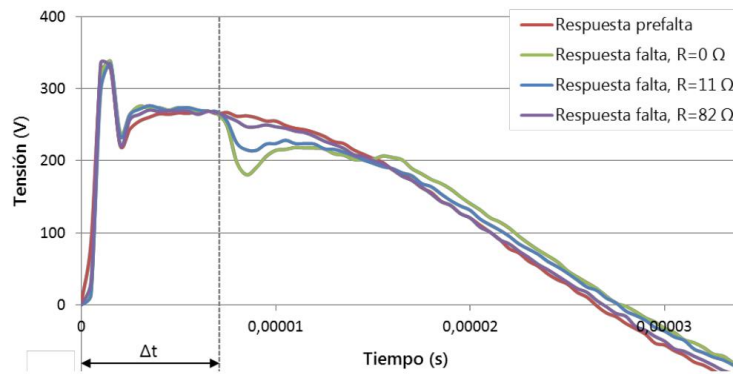


Figura 3. Respuestas obtenidas por el localizador en distintos momentos de la operación

Dentro de esta técnica, el localizador de MAIGE no se basa en la detección del transitorio que se produce en la señal de tensión cuando hay una falta y en la medida de su tiempo de llegada, si no en el estudio de la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR en sus siglas en inglés) de las señales inyectadas a la red por parte del propio localizador.

La técnica de localización propuesta consiste en la inyección periódica de señales en la red de distribución. En función de la teoría de la onda viajera, estas señales se propagan a través de las líneas, regresando al localizador. Este fenómeno permite realizar una medición de la respuesta del sistema a la inyección, que se denominará imagen eléctrica de la red.

La reiteración periódica de la inyección de esta señal sirve para mantener actualizado el estado de la red. Cualquier cambio en la topología o estructura de la misma se verá reflejado en la respuesta, por lo que el equipo siempre dispone de una imagen actualizada del estado base.

Una vez que se detecta una falta, el localizador recibe un aviso por parte de las funciones de protección. En ese instante, se realiza una nueva inyección cuya respuesta corresponderá con la imagen eléctrica del sistema en falta. La comparativa entre estas dos situaciones (última imagen eléctrica del estado base e imagen eléctrica tras la falta) permite determinar la distancia a la que se ha producido la avería desde la posición en la que está instalado el localizador.

Característica	Valor
Alcance	10.000 m
Precisión	100 m
Tensión nominal red	Hasta 24 kV

Tabla 1. Características principales del localizador

3.3. Montaje

Para poder inyectar señales en una red de media tensión no es posible realizar una conexión directa del equipo, sino que es necesario utilizar algún tipo de acoplamiento.

En el proyecto MAIGE se desarrolla un acoplador capacitivo para permitir la conexión del localizador a la red de distribución. Este equipo se diseña para cumplir con todos los requisitos eléctricos para líneas de hasta 24 kV: 50 kV/1min y 125 kV de impulso tipo rayo.



Figura 4. Prototipo del acoplador capacitivo

Las características de las señales que deben atravesar el acoplamiento capacitivo hacen especialmente sensible la respuesta en frecuencia que debe presentar este elemento. Para ello se ha diseñado de manera que tenga la capacidad de permitir la transmisión de señales de alta frecuencia de hasta 10 MHz con una atenuación inferior a los 1,5 dB. Por otro lado, este equipo cumple con la misión de eliminar la componente de frecuencia fundamental en el lado de baja tensión, de manera que el



localizador de faltas solamente trabaja con las señales de alta frecuencia.

Finalmente, cabe indicar que el localizador de faltas dispone de un sistema de adquisición de datos analógicos de alta frecuencia, con el objetivo de poder registrar las respuestas eléctricas de la red fielmente.

4. POTENCIAL INNOVADOR

Dentro del proyecto MAIGE se va a probar la solución innovadora desarrollada por CIRCE, que se basa en los principios bien conocidos de la onda viajera. Esta metodología es considerada la más precisa para la localización de faltas y así se ha comprobado en las redes de transporte [15].

Tal y como se ha indicado en el apartado 3, dentro de cada metodología existen múltiples aproximaciones para aprovechar los principios físicos en los que se basa. Concretamente, la propuesta de CIRCE consiste en utilizar la técnica de la inyección de señales y su análisis a través de TDR. La resolución de la distancia que existe hasta la falta se produce comparando la respuesta eléctrica del sistema con el caso base. El estado base se obtiene mediante la monitorización continua de la red en situación de prefalta. Esta aproximación al problema es totalmente novedosa.

Con la solución propuesta se pretende adaptar la técnica a las condiciones específicas de las redes de distribución. De hecho, con esta metodología se resuelven los siguientes problemas:

- Esta solución tan **solo requiere la instalación de un equipo** en el centro de transformación, evitando la instalación de múltiples equipos, lo que dificulta su implementación.
- **Se evitan los problemas de sincronización**, que suponen un coste elevado en cuanto a adquisición de equipos (para implementar la sincronización) y mantenimiento (para mantener el sistema). Además, la sincronización puede ser problemática en algunos entornos geográficos como las ciudades, donde evidentemente hay un amplio despliegue de las redes de distribución.

- La metodología permite realizar un **equipo con menores requerimientos** en cuanto a la frecuencia de muestreo, reduciendo el coste objetivo de los equipos de monitorización y haciendo factible su instalación en redes de distribución.
- La solución es **independiente del modelo de la red**, pudiendo instalarse en cualquier sistema de distribución de media tensión.

En definitiva, el desarrollo propuesto para la localización de faltas en el proyecto MAIGE tiene un potencial claramente innovador, ya que va a permitir la demostración en un entorno real de una solución al problema que puede ser viable tanto económicamente como técnicamente para su implantación en las redes de distribución.

5. INVESTIGACIÓN FUTURA

Dentro del desarrollo del localizador en el marco del proyecto MAIGE se están realizando distintos trabajos para adaptar lo máximo posible la metodología de localización al problema real que existe en las redes de distribución. No en vano, se está desarrollando una nueva señal de inyección que limite las pérdidas sufridas por las atenuaciones. Además, se pretende limitar el ancho de banda de la inyección para facilitar el análisis posterior de la respuesta, ya que se minimizará el efecto de la dispersión.

Estas nuevas características permitirán avanzar en la investigación de las variaciones frecuenciales sufridas por la señal en su viaje por la red de distribución, lo que abrirá la puerta a poder solventar el problema de la múltiple localización, que aparece siempre que la localización se realiza desde un solo equipo sobre redes con explotación radial.

Considerando únicamente los desarrollos a ejecutar dentro del proyecto, se propone una solución intermedia que, en el marco de las pruebas de pilotaje de MAIGE, permita trabajar en la problemática de la localización múltiple. Así, se pretende desarrollar una solución mixta que, en una capa de más alto nivel, coordine el dato aportado por el localizador con las señales provenientes de equipos que ya se encuentren

instalados en la red (por ejemplo, detectores de paso de falta o reenganchadores), de manera que esta combinación permita discernir el punto exacto de ocurrencia de la avería.

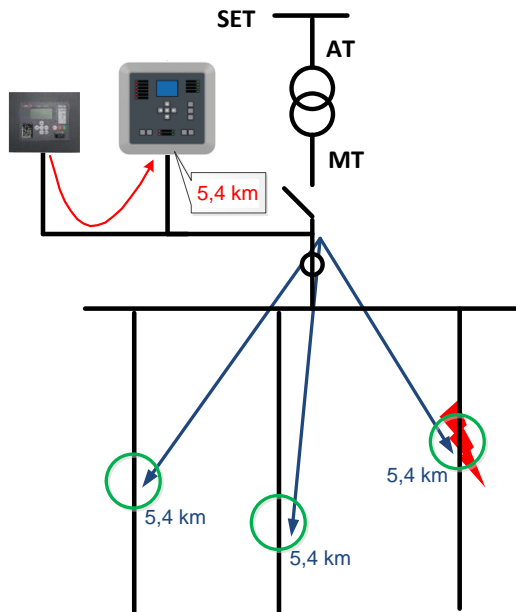


Figura 5. Problema localización múltiple

Por otra parte, otro de los puntos en los que se debe trabajar es en el estudio sobre el alcance del equipo. Las pruebas reales en campo que se desarrollarán en MAIGE, con la red de distribución en explotación, permitirán establecer la distancia real hasta la que el localizador es capaz de observar una falta. Considerando la variedad de configuraciones existente, es de especial relevancia conocer correctamente este dato, que se puede ver alterado por múltiples parámetros.

Estos trabajos dejarán abierta otra nueva línea de investigación sobre la posibilidad, en un mismo circuito de explotación radial, de la instalación de varios equipos para ampliar el alcance de la localización, de manera que sea capaz de abarcar la longitud total de esa red.

6. CONCLUSIONES

Uno de los aspectos fundamentales para mejorar las redes de distribución es la disminución de los tiempos de ausencia de suministro a los clientes. Para ello, resulta esencial desarrollar sistemas automáticos de localización de faltas, que eviten la localización visual de las mismas y permitan una actuación

más inmediata por parte de las brigadas de mantenimiento.

El enorme potencial de mejora que ofrece esta solución ya se ha explotado en las redes de transporte, donde su instalación está ampliamente extendida. Sin embargo, las redes de distribución presentan características propias que impiden realizar una traslación directa de las tecnologías existentes. Actualmente no existe una metodología que, de manera general, solvete el problema de la localización automática de faltas en redes de distribución.

Dentro del proyecto MAIGE se desarrolla una tecnología de localización basada en el método de la onda viajera, que se probará en una red en explotación. Con esta metodología se pretenden solventar los limitantes que introducen las características propias de la red de distribución, consiguiendo una solución que no requiera la instalación de múltiples equipos, que no precise la sincronización de los mismos (con los problemas que esto conlleva), que presente unos requerimientos hardware asumibles en cuanto a coste y que sea independiente del modelo de la red y, por tanto, se adapte a cambios de topología.

Las características diseñadas para el equipo junto con las pruebas en una red en explotación abrirán la posibilidad de evaluar el alcance de la solución, así como la posibilidad de determinar la posición exacta de la incidencia, evitando el problema de la localización múltiple. Por supuesto, también se evaluará el desempeño de la solución propuesta en un entorno real de funcionamiento, por lo que se podrá valorar esta nueva tecnología.

7. REFERENCIAS

- [1] European Commission, "Roadmap 2050," *Policy*, no. April, pp. 1–9, 2012.
- [2] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010.
- [3] L. Peretto, R. Tinarelli, A. Bauer, and S. Pugliese, "Fault location in underground power networks: A case study," *ISGT 2011*. pp. 1–6, 2011.
- [4] A. Bahmanyar, S. Jamali, A. Estebarsari, and E. Bompard, "A comparison framework for distribution system



- outage and fault location methods," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 145, pp. 19–34, Apr. 2017.
- [5] J. H. Teng, W. H. Huang, and S. W. Luan, "Automatic and Fast Faulted Line-Section Location Method for Distribution Systems Based on Fault Indicators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1653–1662, 2014.
- [6] A. Farughian, L. Kumpulainen, and K. Kauhaniemi, "Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, no. Supplement C, pp. 373–380, 2018.
- [7] M. Abad López, "Algoritmos de localización de faltas en redes eléctricas," Zaragoza, 2016.
- [8] S. Robson, A. Haddad, and H. Griffiths, "Fault Location on Branched Networks Using a Multiended Approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1955–1963, 2014.
- [9] K. Sun, Q. Chen, and Z. Gao, "An Automatic Faulted Line Section Location Method for Electric Power Distribution Systems Based on Multisource Information," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1542–1551, 2016.
- [10] S. Lotfifard, M. Kezunovic, and M. J. Mousavi, "A Systematic Approach for Ranking Distribution Systems Fault Location Algorithms and Eliminating False Estimates," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 285–293, 2013.
- [11] J. Mora-Flòrez, J. Meléndez, and G. Carrillo-Caicedo, "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 657–666, 2008.
- [12] S. S. Gururajapathy, H. Mokhlis, and H. A. Illias, "Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 949–958, Jul. 2017.
- [13] R. J. Hamidi and H. Livani, "Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithm for Hybrid Multiterminal Circuits," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 135–144, 2017.
- [14] F. C. L. Trindade, W. Freitas, and J. C. M. Vieira, "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 251–260, 2014.
- [15] X. Lin, F. Zhao, G. Wu, Z. Li, and H. Weng, "Universal Wavefront Positioning Correction Method on Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithms," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 3, pp. 1601–1610, 2012.