

EXPERIENCIA PILOTO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN RED DE MEDIA TENSIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE LA REFLECTOMETRÍA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDR) EN EL PROYECTO H2020 - FLEXIGRID

Javier Granado Fornás, Grupo de sistemas electrónicos, Centro Tecnológico CIRCE

David Cervero García, Grupo de sistemas electrónicos, Fundación CIRCE

Mario Mañana Canteli, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria

Roberto Cimadevilla González, ZIV Automation

Carlos Gil Martín, ZIV Automation

Jose Ivan Rodriguez Alonso, EDP Redes España

Antonio González Diego, EDP Redes España

Resumen: Actualmente, los operadores de sistemas de distribución (DSO) están especialmente preocupados por reducir los tiempos de interrupción ante una falta. Las técnicas de localización automática de faltas son un método eficaz para reducir los tiempos de interrupción que se producen durante una avería en la red de distribución. Debido a que las redes de distribución suelen tener una topología radial, de anillo o de malla, con muchos nodos y ramas, los métodos de localización necesitan supervisar toda la red o una sección importante de la misma. Además, la presencia de cargas desequilibradas es una característica de los sistemas de distribución. Las dos casuísticas anteriores pueden afectar a los métodos de localización, reduciendo su rendimiento. Por ejemplo, los métodos clásicos basados en la impedancia pueden tener errores sustanciales en este tipo de redes. Sin embargo, la técnica de localización de faltas TDR, se presenta como una solución con gran potencial para permitir la localización automática de faltas en redes de media y baja tensión. En este trabajo presentado en el proyecto FLEXIGRID, financiado por la comisión europea, se muestra como se ha desarrollado un prototipo funcional que se ha instalado en una red real de media tensión. Se presenta la arquitectura del prototipo, así como el modelo de la red real, la simulación de las faltas, y el diseño y fabricación del prototipo del inyector de señal (TDR), así como la instalación y funcionamiento de este y los resultados obtenidos y esperados en el proyecto.

Palabras clave: Redes de distribución, Localización de Faltas, Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).

1) INTRODUCCIÓN

Cuando se produce una falta, un número indeterminado de clientes se queda sin suministro durante el tiempo necesario para solucionar el problema y restaurar el servicio y, algunas centrales eléctricas pueden verse afectadas por ello. Las centrales de generación convencionales suelen ser muy grandes y están conectadas típicamente a la red de transporte, por tanto las faltas en las redes de distribución no suelen afectarles *per se* porque pueden seguir dando servicio a otros puntos de la red, pero la GD (Generación Distribuida) está instalada en la red de distribución y por tanto una falta en esa red no solo afecta a los usuarios de esa red sino que imposibilita a la GD para verter energía a esa red. Las técnicas de localización automática de averías pueden ayudar a minimizar este tiempo de interrupción, teniendo en cuenta que la mayoría de las interrupciones se producen durante una avería en la red de distribución [1]-[3]. Cuando los equipos de mantenimiento son capaces de encontrar el problema más rápidamente gracias a las técnicas de localización de averías, éstas pueden repararse antes.

Las técnicas de localización de averías se utilizan mucho en las líneas de transporte, donde cada línea se supervisa por separado. Pero las redes de distribución suelen tener una topología radial, de anillo o de malla, con muchos nodos y ramas [4]-[8]. Por lo tanto, los métodos de localización necesitan un enfoque diferente para obtener un sistema rentable que pueda supervisar toda la red o una sección importante de la misma. La presencia de cargas desequilibradas, laterales y diferentes tipos de cables/conductores son características específicas de los sistemas de distribución. Estas características afectan a varios supuestos de los métodos de localización, reduciendo su rendimiento. Además, las redes IT (*Isolé-Terre*) son habituales en los sistemas de distribución. La localización es más difícil en estas redes [9]. En este tipo de redes, los métodos clásicos basados en la impedancia presentan errores considerables. Existen otras técnicas, como las basadas en “onda viajera”. Dentro de estas, existe fundamentalmente dos métodos:

- Medición de la señal transitoria producida por la avería. Este enfoque se utiliza ampliamente en los sistemas de transmisión [10], en los que las líneas se supervisan por separado. Sin embargo, en las redes de distribución, esas

ondas transitorias experimentan múltiples reflexiones debido a la topología. Por lo tanto, la intensidad de la señal puede ser demasiado débil cuando llega al localizador, lo que dificulta la localización del origen de la avería.

- Inyectar una señal de alta frecuencia y medir los frentes de onda reflejados. Esta técnica se denomina comúnmente reflectometría en el dominio del tiempo (TDR). En este piloto instalado para el proyecto FLEXIGRID, se ha utilizado esta técnica. En ella se inyectan pulsos en la red continuamente y se va registrando la respuesta de la red a esos pulsos. De este modo, se tiene siempre una “foto” del estado de la red antes de ocurrir la falta. Esto es necesario porque la topología de la red, así como sus impedancias conectadas pueden variar con el tiempo. Una vez que se ha producido la falta, se vuelve a realizar una nueva inyección de pulsos y su respuesta se procesa junto con la última respuesta de la red guardada antes de la falta. De este modo se obtienen mejores resultados, ya que esta técnica es más robusta frente a cambios de la topología de la red (bifurcaciones) que otras técnicas antes mencionadas.

2) EL PROYECTO H2020 FLEXIGRID

Dentro del proyecto FLEXIGRID, la localización de faltas pretende desarrollar el primer demostrador en una instalación real de un localizador de faltas basado en la técnica ya mencionada de la Inyección de pulsos de alta frecuencia (TDR).

En el proyecto se pretende colocar el prototipo (en una primera fase), en una red de Viesgo en la que se producirán faltas con un generador de faltas que se dispondrá a tal efecto. Una vez verificado el funcionamiento correcto y reajustado el algoritmo de localización, se instalará en otra red de Viesgo donde se producen faltas “naturales” con relativa frecuencia. De este modo se pretende comprobar la precisión en la localización del prototipo desarrollado. Con toda la información recopilada durante el proyecto y los datos de campo se podrá seguir mejorando el sistema de cara a conseguir diseñar un equipo que pueda ser industrializado al menor coste posible.

Esquemáticamente, el sistema se puede representar tal como se aprecia en la Figura 1.

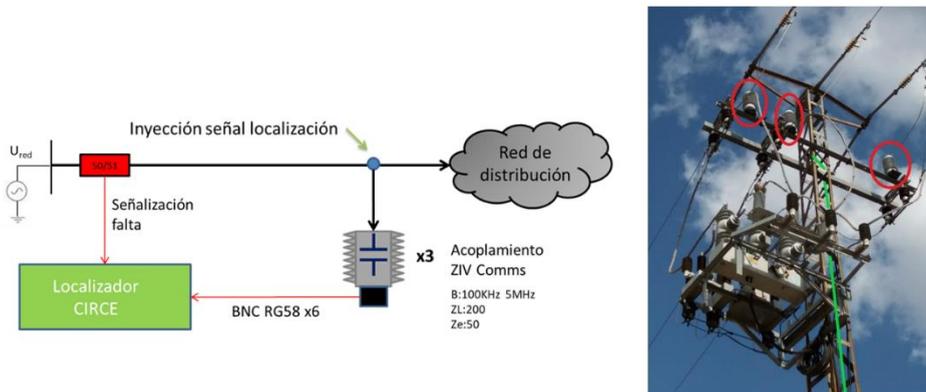


Figura 1. Esquema del localizador (TDR)

El sistema consta del localizador propiamente dicho, el cual genera los pulsos de alta frecuencia que se inyectan en la red y también digitaliza la señal de respuesta de la red para poder ser almacenada y procesada posteriormente. El Localizador se conecta a la red de MT a través de un acoplamiento desarrollado por la empresa ZIV. Este acoplamiento es en esencia una capacidad y una inductancia que sirve para aislar el localizador de la tensión de red (12kV) al bloquear las bajas frecuencias (50 Hz) de la misma. Asimismo, permite que los pulsos de alta frecuencia generados por el localizador atraviesen el acoplamiento y se inyecten en la red. También se cuenta con un relé de señalización de falta que avisa al localizador cuando se produce una falta. De este modo el localizador sabe cuándo realizar la inyección en falta.

Para alcanzar este hito se han realizado varias etapas dentro del proyecto que se detallan a continuación:

2.1) Modelado de una red real de VIESGO

La red en la que inicialmente se ha colocado el equipo es una línea de MT (12 kV) en Cantabria, (Figura 2).

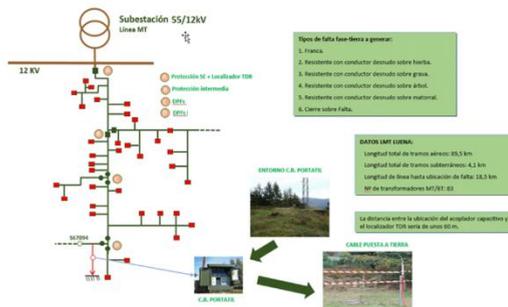


Figura 2. Detalle de la línea de MT

Tal como se ha mencionado, como primer paso se ha procedido a modelar la red, el acoplamiento y el inyector en DigSilent™ (Figura 3) para posteriormente, realizar simulaciones y determinar cuál es la mejor localización para colocar el prototipo.

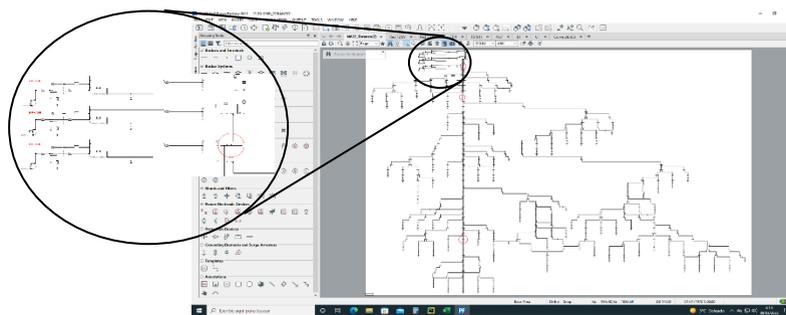


Figura 3. Detalle de la simulación de la red, acoplamiento e inyector en DigSilent

2.2) Simulación de DigSilent™

Tras el modelado se han realizado simulaciones de distintas faltas en distintas localizaciones para estudiar el resultado y verificar con un primer algoritmo básico, si las distancias reales se pueden inferir de las señales recibidas.

A continuación se muestra un ejemplo del resultado obtenido de una simulación de falta:

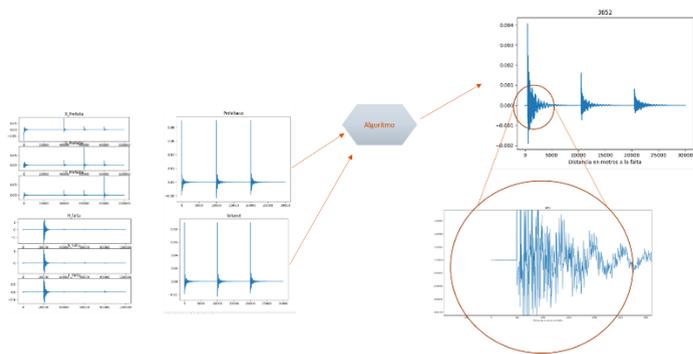


Figura 4. Señales simuladas en DigSilent™ sobre la red modelada y distancia calculada por el algoritmo

En la Figura 4 se muestra a la izquierda arriba las señales de respuesta de la red a la inyección de los pulsos (uno por cada fase R-S-T) en el estado de pre-falta (red en estado normal) y abajo la respuesta de la red en el estado de falta (se aprecian los *spikes* producidos por la falta simulada). Posteriormente se cogen los pulsos y se concatenan para conformar una única señal de pre-falta y otra de falta. Se introducen las dos señales en el algoritmo de localización para determinar el grado de precisión que se puede obtener a nivel de simulación. En este caso la distancia real era de 3650 m y la distancia calculada por el algoritmo fue de 3652 m.

2.3) Desarrollo del Hardware/Firmware del prototipo

Para el desarrollo del prototipo se ha partido de una plataforma comercial robusta y de alta capacidad de cómputo. Se ha elegido un equipo de National Instruments™. A continuación se muestra un detalle del sistema desarrollado:

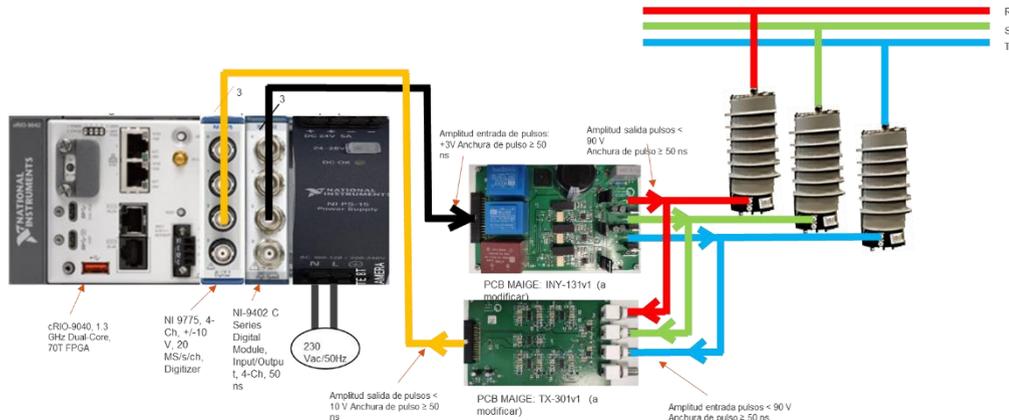


Figura 5. Detalle del desarrollo del Hardware del localizador.

En la Figura 5 se aprecia como el sistema comercial utilizado es un CompactRIO™ de National Instruments™, que dispone además de 4 convertidores A/D para digitalizar las señales de respuesta de la red, así como 4 canales I/O con el que se generan los pulsos de alta frecuencia para inyectar en la red. Las señales de salida (pulsos) se adaptan en tensión y corriente para poder inyectar la energía necesaria a la red. Esto se consigue mediante una tarjeta electrónica desarrollada *ad-hoc* por CIRCE. Asimismo CIRCE ha desarrollado una tarjeta de adaptación de las señales de respuesta para adaptarlas en nivel de tensión a los requisitos de entrada del convertidor A/D. En la Figura 5 se puede apreciar también los acoplamientos aportados por ZIV (uno por cada fase R-S-T-) para conectar el localizador a la red.

2.4) Verificación del prototipo en laboratorio

Una vez montado el prototipo, se procedió a verificar en laboratorio (Figura 6) si su funcionalidad era adecuada. Para ello se conectó a un carrete de cable de unos 2.550 m y se puso a funcionar inyectando pulsos y digitalizando la respuesta. En la Figura 7 se puede observar una señal obtenida durante las pruebas:

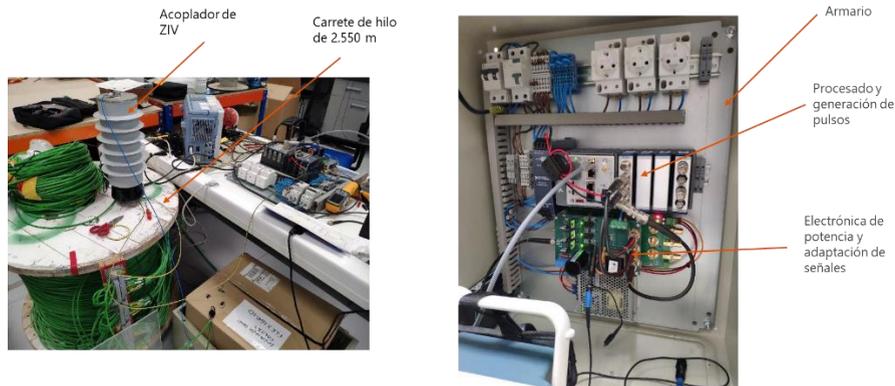


Figura 6. Detalle de las pruebas del localizador en el laboratorio

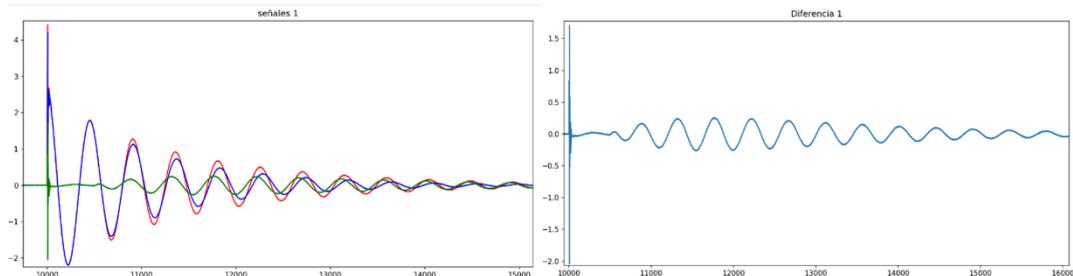


Figura 7. Izquierda: Señales inyectada en pre-falta (azul) y en falta (roja). Derecha: Señal diferencia entre pre-falta y falta.

$$d = \frac{(500) \times \left(\frac{3 \times 10^8}{1,5}\right) \times (50 \times 10^{-9})}{2} = 2.500 \text{ m (1)}$$

En la ecuación (1) se calcula la distancia d . Las señales de pre-falta y falta empiezan a diferir en torno a las 500 muestras. Por lo tanto, teniendo en cuenta que se muestrea a 50 ns (50×10^{-9}) y que la velocidad de la señal por ese tipo de cable es aproximadamente la de la luz partido por 1,5 $\rightarrow \left(\frac{3 \times 10^8}{1,5}\right)$ y que hay que dividir por 2 porque el pulso va hasta la falta y tiene que volver al localizador, se obtiene una distancia de la falta realizada en el carrito de prueba del laboratorio de aproximadamente 2.500 m. Calculamos el error cometido:

$$e = |\text{Valor real} - \text{Valor obtenido}| = |2.550 - 2.500| = 50 \text{ m (2)} \quad \varepsilon(\%) = \frac{e}{\text{Valor real}} = \frac{50}{2.550} \times 100 = 1,9\% (3)$$

Con el cálculo del error absoluto de (2) y el error relativo de (3) se comprueba que a nivel de laboratorio, el sistema tiene una precisión suficiente como para poder instalarlo en campo.

2.5) Instalación en campo

En la primera fase de instalación en campo, se instala el prototipo en la línea de MT (Figura 8) y se recogen las señales de respuesta de la red (Figura 9):



Figura 8. Imágenes de la instalación. De izquierda a derecha, poste al lado del C.T. donde instalar el localizador/Trabajos previos para instalación bajo tensión / Instalación de los acopladores / Armario del localizador instalado dentro del C.T.

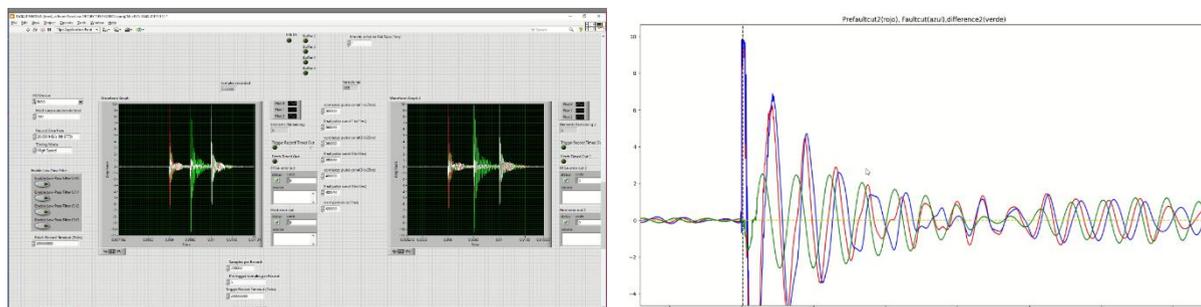


Figura 9. Imágenes de las señales del piloto instalado. Izquierda, señales digitalizadas por el Localizador con el software desarrollado bajo LabView™. Derecha, Señales procesadas off-line mediante algoritmo desarrollado en Python.

3) CONCLUSIONES

Tras su instalación, el prototipo ha estado durante 2 meses funcionando de manera ininterrumpida cumpliendo así uno de los requisitos del proyecto en cuanto a robustez del sistema. Por otro lado, las señales de respuesta de la red real tienen unas características muy similares a las simuladas y sobre todo a las inyectadas en el carrete del laboratorio. La siguiente fase del piloto es la de generar unas faltas provocadas con el generador de faltas que VIESGO tiene a tal efecto y con el que se comprobará el grado de precisión alcanzado con esta primera versión de algoritmo implementado. En función de estos resultados, se espera poder mejorar el algoritmo para, posteriormente trasladar el prototipo de localizador a otra red, donde se podrá verificar contra faltas naturales que se producen en la línea.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la unión Europea bajo el marco del proyecto FLEXIGRID con Nº de acuerdo 864579.

REFERENCIAS

- [1] L. Peretto, R. Tinarelli, A. Bauer, and S. Pugliese, "Fault location in underground power networks: A case study," *ISGT* 2011. pp. 1–6, 2011. doi: 10.1109/ISGT.2011.5759198.
- [2] A. Bahmanyar, S. Jamali, A. Estebarsari, and E. Bompard, "A comparison framework for distribution system outage and fault location methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 145, pp. 19–34, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.12.018.
- [3] 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. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2294338.
- [4] M. Abad López, "Algoritmos de localización de faltas en redes eléctricas," Zaragoza, 2016.
- [5] 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. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2302137.
- [6] 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. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2473681.
- [7] 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. doi: 10.1109/TPWRD.2012.2213616.
- [8] 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. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2589265.
- [9] A. Farughian, L. Kumpulainen, and K. Kauhaniemi, "Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, no. Supplement C, pp. 373–380, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006>.
- [10] X. Lin, F. Zhao, G. Wu, Z. Li, and H. Weng, "Universal Wavefront Positioning Correction Method on Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1601–1610, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2190108.