

Nuevas posibilidades para probar las funciones de localización de fallas con ondas viajeras en campo

Autores: Christopher Pritchard, Heinz Lampl, Thomas Hensler, OMICRON electronics GmbH
christopher.pritchard@omicronenergy.com, heinz.lampl@omicronenergy.com,
thomas.hensler@omicronenergy.com
Austria

Resumen

La localización de fallas utilizando ondas viajeras ha demostrado ser un método preciso y confiable para la localización de fallas en líneas de transmisión largas. Integrada tanto en los modernos relés de protección de línea como en los dispositivos de localización de fallas autónomos, proporciona información útil para operadores y técnicos. La prueba y verificación del correcto funcionamiento de estos dispositivos supone todo un reto y en la mayoría de los casos no se realiza durante la puesta en servicio. Aunque esto tal vez sea aceptable en el caso de los localizadores de fallas puros, las nuevas generaciones de relés de protección utilizarán ondas viajeras para determinar las fallas y en consecuencia cuándo dispararse.

Utilizando un método novedoso, estas pruebas son posibles utilizando dispositivos de prueba de protección convencionales en el campo. De esta manera, los pulsos de ondas viajeras se superponen a las señales de baja frecuencia pero alta corriente utilizadas para las pruebas de protección convencionales. La inyección de tensiones y corrientes en ambos extremos de la línea se sincroniza en el tiempo con una precisión muy alta utilizando relojes GPS en ambos extremos. Desde un software de control que funciona en un PC, pueden simularse fallas en cualquier punto de la línea, y luego observarse y evaluarse de manera integrada la reacción de los elementos de protección y del localizador de fallas. Este documento también ofrecerá una visión general de las dificultades que suponen probar los disparos de los relés en función del análisis avanzado de las ondas viajeras.

Palabras clave: Onda viajera, localización de fallas, relé de protección, pruebas de protección, pruebas de extremo a extremo.

Introducción

El principio de las ondas viajeras en las líneas de transmisión es bien conocido en el sector eléctrico desde hace décadas. Sin embargo, la mayoría de los dispositivos de protección digitales actuales utilizan elementos fasoriales y algoritmos basados en cantidades fasoriales e impedancias para la protección y la localización de fallas, de forma similar a como lo hacían los dispositivos electromecánicos en el pasado. Pero hoy en día los avances en el tratamiento de las señales y la velocidad de cálculo de los relés digitales abren nuevas posibilidades para los algoritmos en el dominio del tiempo. Junto con una sincronización horaria precisa de los dispositivos distribuidos dentro del sistema eléctrico general, es posible realizar la localización de fallas y protección de manera mucho más precisa y rápida.

Para el ingeniero de protección, que tiene que poner en servicio y mantener en funcionamiento estos nuevos dispositivos en el campo, surgen nuevos retos. Con las pruebas convencionales que utilizan la inyección de fasores de estado uniforme para tensiones y corrientes, no es posible comprobar los elementos de los relés que funcionan en el dominio del tiempo, tales como los elementos de ondas viajeras. Además, en el caso de los sistemas de protección que utilizan información precisa sincronizada en el tiempo desde varios extremos, una prueba de puesta en servicio sobre el terreno debe poder simular o reproducir tales sucesos con un equipo de pruebas de protección sincronizado en el tiempo al menos con la misma precisión que los dispositivos sometidos a prueba.

Principios básicos de las ondas viajeras

Una falla en una línea, que puede ocurrir en cualquier momento, excepto en el paso por cero de la tensión, genera una onda viajera que se propaga desde el punto de la falla hasta ambos extremos de la línea con una velocidad cercana a la velocidad de la luz. El principio se muestra en la figura 1 con una línea de transmisión simple cuando ocurre una falla en la línea.

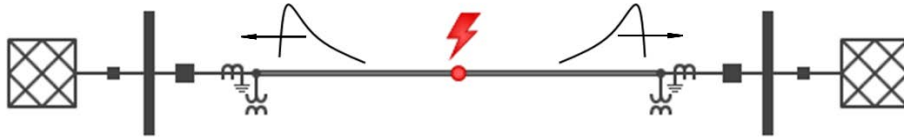


Figura 1: Principio básico de propagación de las ondas viajeras

Las ondas viajeras pueden deducirse como resultado de la solución del sistema de ecuaciones diferenciales lineales para líneas de transmisión (ecuaciones telegráficas). En el caso de una línea de transmisión sin pérdidas, el siguiente par de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden describe las tensiones $v(x, t)$ y las corrientes $i(x, t)$ en la línea:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C' \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}$$

Donde L' es la impedancia de la línea por unidad y C' es la capacitancia por unidad. Esto puede combinarse en las ecuaciones de onda (ecuación de d'Alembert) como sigue:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = L' C' \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} = L' C' \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2}$$

La solución general de las ecuaciones de onda puede expresarse como una suma (superposición) de una onda viajera f en sentido hacia delante y g en sentido hacia atrás:

$$v(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_W} (f(x - ct) - g(x + ct))$$

Donde $c = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$ es la velocidad de propagación y $Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$ la impedancia característica de la línea. En el caso de una línea de transmisión con pérdidas, las ecuaciones tienen que considerar también las pérdidas por resistencia y por conductancia. Puede encontrarse una exposición más detallada en [1] y [2] o en cualquier libro de texto avanzado sobre ingeniería eléctrica.

En los terminales de la línea, las ondas viajeras resultantes de un cambio repentino de tensión y corriente pueden detectarse como pulsos de alta frecuencia. Los dispositivos de protección o localizadores de fallas utilizan algoritmos específicos para marcar los tiempos de llegada de las ondas viajeras. A partir de los retardos de los tiempos de llegada medidos, la ubicación de una falla puede calcularse fácilmente y con alta precisión (de hasta 300 m, que es aproximadamente un tramo entre torres).

Debido a los efectos de dispersión, la forma de las ondas se estira ligeramente cuando viajan a lo largo del medio de una línea eléctrica. Esto lo tienen que tener en cuenta los dispositivos de protección cuando se marca el tiempo de llegada de las ondas. Cada vez que una onda viajera alcanza un terminal de una línea (o la ubicación de una falla), parte de la onda es transmitida, parte es reflejada y otra parte es absorbida. Al reflejarse, se invierte la polaridad del pulso de la onda viajera, tal como se muestra en la figura 2. En el caso de las ondas viajeras de corriente, la polaridad del pulso también depende evidentemente de la dirección con la que la onda pasa por el transformador de corriente (TC).

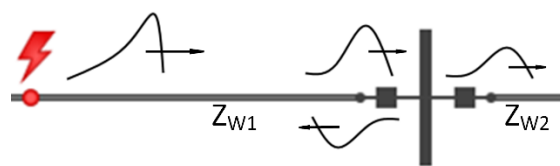


Figura 2: Las ondas viajeras se dividen en ondas transmitidas y reflejadas en las discontinuidades

La propagación de las ondas viajeras, incluyendo sus reflexiones, se visualizan comúnmente usando diagramas de celosía de Bewley, como se muestra en la figura 3. El gradiente de las líneas de propagación es proporcional a la velocidad de propagación de las líneas. En el caso de diferentes medios, por ejemplo, en topologías mixtas de líneas aéreas y cables, pueden mostrarse en el mismo diagrama incluso las velocidades diferentes.

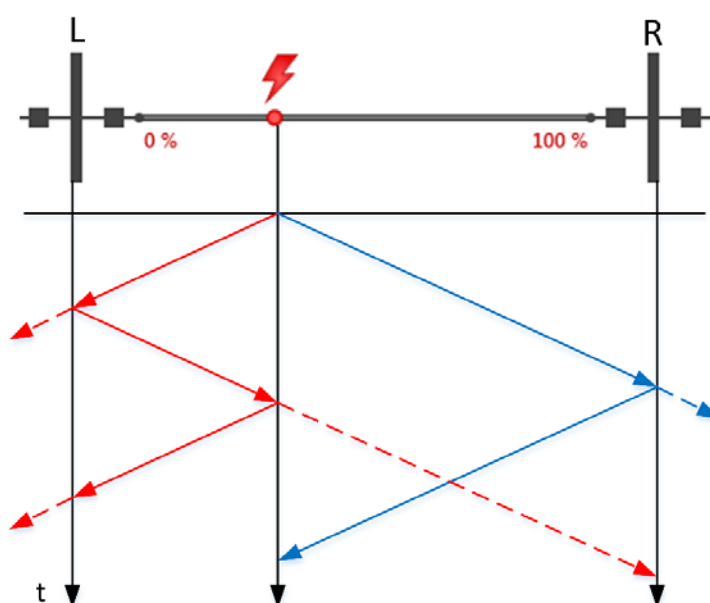


Figura 3: Diagrama de celosía de Bewley que muestra la propagación de las ondas viajeras a lo largo del tiempo

Si la topología del sistema eléctrico es más compleja, por ejemplo, con múltiples buses, líneas adyacentes y líneas paralelas, los algoritmos de los dispositivos tienen que discriminar las ondas viajeras reflejadas de los distintos puntos con discontinuidades en la topología. A veces esto es bastante complicado y en realidad es difícil tomar tales decisiones de forma confiable, porque incluso los detalles menores de los circuitos también pueden causar reflexiones, de modo que unos pocos algoritmos robustos consideran sólo el primer frente de ondas viajeras detectado. Por ejemplo, en el siguiente caso, mostrado en la figura 4, no es fácil distinguir una onda viajera, reflejada desde la ubicación de la falla en la línea protegida de vuelta hasta el extremo local, a partir de una reflexión de una línea predecesora en dirección inversa o de una reflexión desde el extremo remoto de la línea.

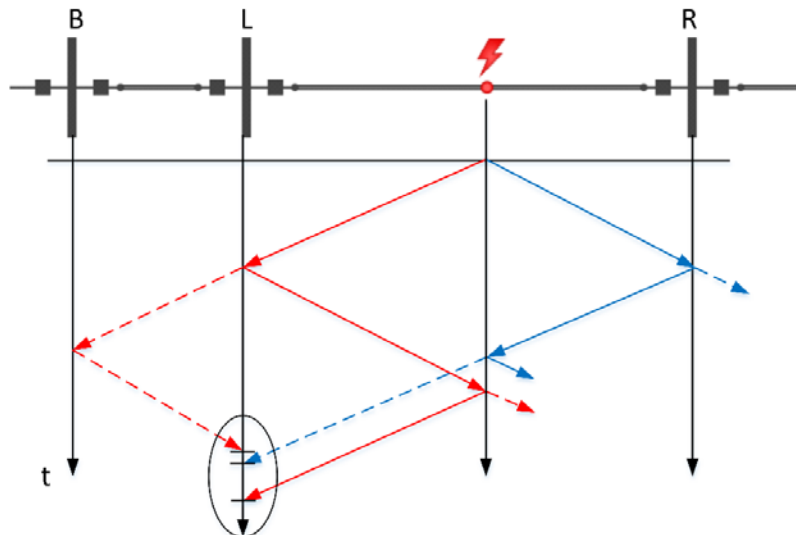


Figura 4: Dificultades de la discriminación de las reflexiones de las ondas viajeras

En el caso de los equipos secundarios, es posible la detección de ondas viajeras en los terminales secundarios de los transformadores de corriente (TC) y transformadores de tensión (TT). Los TC comunes tienen un ancho de banda lo suficientemente amplio para permitir la detección confiable de pulsos de ondas viajeras en las entradas de corriente secundaria de los dispositivos. En el caso de los TT y particularmente en el de los transformadores de tensión capacitivos y con condensador de acoplamiento (CVT y CCVT, por sus siglas en inglés) los picos de ondas viajeras en el secundario son mucho más difíciles de detectar, por lo que algunos principios de los elementos de ondas viajeras se basan únicamente en las ondas viajeras de corriente (en el caso de los CVT y CCVT, sólo las capacitancias parásitas facilitan una ruta para las altas frecuencias). Pero en el futuro podrían ser posibles nuevos sensores de tensión y corriente que ofrecieran un mejor comportamiento de transferencia dinámica con las señales de alta frecuencia.

Los elementos de protección y localización de fallas basados en ondas viajeras tienen algunas ventajas sobre los elementos basados en fasores. Dado que el cálculo de la localización de fallas se basa en la medición de las diferencias entre los tiempos de llegada de los diferentes pulsos de las ondas viajeras, es posible obtener una alta precisión en la localización de las fallas. Hoy en día es posible realizar mediciones de tiempo precisas en los equipos de subestaciones digitales, incluso entre diferentes dispositivos distribuidos, que pueden sincronizarse en el tiempo utilizando una referencia horaria global común.

La propagación de las ondas viajeras no se ve afectada por la compensación en serie de las líneas de transmisión largas, dondequiera que estén instaladas (para los elementos basados en la impedancia, la compensación en serie supone una gran dificultad). Y las ondas viajeras no se producen solamente en las líneas de transmisión de CA. El principio también se puede aplicar a las redes HVDC, donde no es posible en absoluto la localización de fallas basada en la impedancia.

Dado que las ondas viajeras se propagan a una velocidad próxima a la de la luz, la información sobre una falla se recibe en los extremos de la línea con la mayor rapidez físicamente posible y puede procesarse inmediatamente. En el caso de los elementos basados en fasores, es necesaria una ventana de datos de un ciclo de la frecuencia del sistema eléctrico para obtener valores fasoriales confiables. De este modo, en el futuro, los relés de protección podrán dispararse en función de la información de las ondas viajeras, permitiendo tiempos de disparo de tan sólo unos pocos milisegundos.

Uso de las ondas viajeras para la localización de fallas

Lo que está bien establecido y aplicado en múltiples dispositivos en el campo desde hace años, es la aplicación de ondas viajeras para la localización precisa de fallas en las líneas de transmisión. Tanto como dispositivos específicos para la localización de fallas y como una función integrada en los relés de protección, es posible un cálculo más preciso de la ubicación de una falla en comparación con los principios basados en la impedancia.

Todos los algoritmos para la localización de fallas basados en la impedancia aparente vista desde la línea tienen una precisión limitada debido a los errores de medición de los fasores de tensión y corriente y están influenciados por muchos factores que son difíciles de eliminar, tales como la impedancia de la falla (resistencia de arco), las condiciones de alimentación en los extremos local y remoto de la línea, el flujo de carga superpuesto, las condiciones de puesta a tierra y el acoplamiento mutuo con una línea paralela. Además, dependen de los ajustes correctos para las impedancias de línea, tanto para la secuencia positiva como homopolar, que deben calcularse correctamente o determinarse con una medición de impedancia de línea primaria.

Localización de fallas entre dos extremos basada en ondas viajeras

La localización de fallas basada en ondas viajeras más obvia y robusta se basa en un principio de dos extremos, como se muestra en la figura 5, y se ha implementado en varios dispositivos de localización de fallas y protección en el campo (ver [3] y [4] para obtener más información).

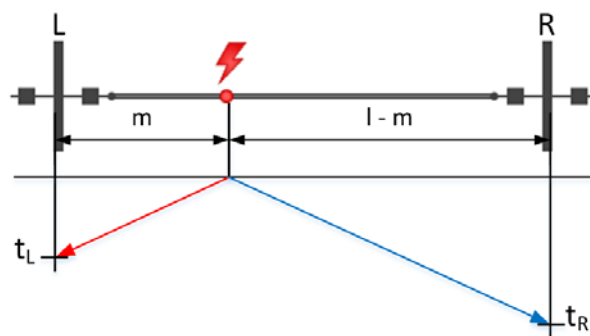


Figura 5: Localización de fallas entre dos extremos basada en la diferencia entre los tiempos de llegada

Se comparan los tiempos de llegada de las ondas viajeras entre ambos extremos de la línea y se calcula la ubicación de la falla m de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$m = \frac{1}{2}(l + (t_L - t_R)v)$$

Donde l es la longitud de la línea, t_L y t_R son los tiempos de llegada de la onda viajera a los extremos local y remoto respectivamente y v es la velocidad de propagación. La ubicación calculada depende únicamente de las precisas marcas de tiempo de llegada de los frentes de ondas viajeras detectados y de la longitud correcta de la línea de transmisión. Hoy en día, una precisa sincronización de tiempo de los dispositivos de protección o localización de fallas es posible utilizando una referencia horaria basada en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en ambos extremos o la sincronización en red mediante un reloj maestro, que distribuye el tiempo utilizando el protocolo de precisión de tiempo (PTP) IEEE 1588 en una red Ethernet dentro de una subestación.

Para una localización de fallas fuera de línea, es necesario recopilar las marcas de tiempo de ambos extremos para realizar el cálculo. Los diferentes tiempos de llegada de las ondas viajeras se pueden alinear en un diagrama de celosía de Bewley, ya sea manual o automáticamente con una herramienta de software, donde se puede calcular y verificar la ubicación de la falla. El principio puede incluso ampliarse a líneas de tres terminales o a topologías de múltiples extremos.

Para la localización de fallas en línea, tal como se implementa dentro de los relés de protección, las marcas de tiempo se transmiten al extremo remoto inmediatamente, en la mayoría de los casos utilizando los canales de comunicación ya existentes, utilizados, por ejemplo, para la protección diferencial de línea en paralelo. En un relé de protección, la información de localización de fallas de las ondas viajeras puede aumentarse con información adicional de un algoritmo de localización de fallas basado en la impedancia, de modo que se pueda emitir una declaración confiable y precisa en el registro de fallas o comunicarse al centro de control.

Localización de fallas en un solo extremo basada en ondas viajeras

La localización de fallas en un solo extremo basada en ondas viajeras no necesita información del extremo remoto de la línea para calcular la ubicación de las fallas y, por lo tanto, la localización de fallas en línea incluso funciona sin un canal de comunicación entre los dispositivos. La ubicación se calcula en función de los tiempos de llegada de la primera onda viajera y de la primera onda reflejada de vuelta por la falla, como se muestra en la figura 6.

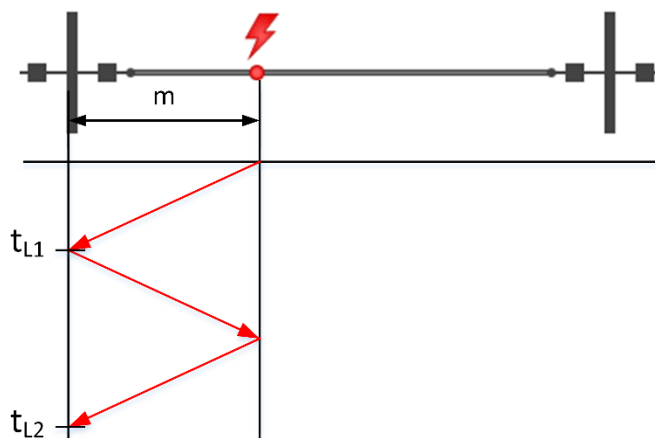


Figura 6: Localización de fallas en un solo extremo basada en la diferencia de tiempo entre la primera llegada y las primeras ondas reflejadas

La sencilla fórmula siguiente puede usarse para calcular la ubicación de la falla m :

$$m = \frac{t_{L2} - t_{L1}}{2} v$$

Donde t_{L1} es el tiempo de llegada de la primera onda viajera, t_{L2} la marca de tiempo de la primera onda reflejada desde la falla y v la velocidad de propagación. Pero, por supuesto, el dispositivo de protección tiene que discriminar la onda reflejada desde la ubicación de la falla de otras reflexiones, por ejemplo, de una línea corta justo detrás de la misma, como se muestra en la figura 3. Esto puede hacerse en función de una información direccional basada en la polaridad de las ondas viajeras tanto de corriente como de tensión o en información topológica más sofisticada que se obtiene del registro de ondas viajeras durante la energización de la línea (ver [5] para obtener más información). Por otro lado, el cálculo en el método de un solo extremo es independiente de la longitud total exacta de la línea y, por lo tanto, no introduce errores debidos a la variación de la longitud de la línea debido a la flecha (caída) del conductor.

Dificultades para la prueba y puesta en servicio de los elementos de ondas viajeras

Para la prueba y puesta en servicio de elementos basados en ondas viajeras, es necesario simular o reproducir los fenómenos transitorios que ocurren durante ciertos eventos del sistema eléctrico, tales como una falla en la línea de transmisión protegida. Dado que estos fenómenos transitorios incluyen señales de muy alta frecuencia y se producen en momentos temporales de alta precisión, el equipo de prueba debe ser capaz de simular e inyectar dichas señales en los dispositivos sometidos a prueba.

Para la simulación fuera de línea de fenómenos de ondas viajeras en una computadora, existen numerosos programas bien establecidos (por ejemplo, el Programa de Transitorios Electromagnéticos EMTP), que pueden simular la propagación de señales en una línea de transmisión en el dominio del tiempo correctamente y a velocidades de muestreo lo suficientemente altas como para incluir las partes relevantes de alta frecuencia. Pero supone todo un reto hacer una simulación de este tipo y establecer todos los parámetros necesarios correctamente para que se pueda obtener un resultado cercano a la realidad.

Además, la mayoría de los programas disponibles tienen diferentes ajustes y algoritmos de simulación, por lo que es difícil obtener resultados confiables y comparables.

La simulación precisa a velocidades de muestreo tan altas sigue consumiendo bastante tiempo y requiere mucha memoria si se realiza para una amplia duración de simulación. Sólo se puede hacer prácticamente para un corto período de tiempo de un solo evento de ondas viajeras (algunos milisegundos o hasta 1 segundo).

Los resultados de estas simulaciones fuera de línea quedan luego disponibles como señales muestreadas de tensiones y corrientes (p.ej. en formato COMTRADE) con las correspondientes altas tasas de muestreo y pueden utilizarse para investigaciones y análisis fuera de línea. Durante el desarrollo y en el laboratorio, es posible inyectar tales señales de alto ancho de banda en los dispositivos de protección y localización de fallas utilizando directamente las entradas de señales analógicas de baja energía de los dispositivos y evitando las conexiones TC/TT convencionales (ver [6]).

Pero con los equipos de prueba de protección disponibles actualmente, una inyección de tales señales transitorias en las entradas convencionales de TC/TT no es posible debido a que los amplificadores de tensión y corriente de esos equipos de prueba tienen un ancho de banda limitado. En los dispositivos de protección se muestrean las señales de los elementos de ondas viajeras a frecuencias de muestreo de 1 MHz y superiores. Por lo tanto, las señales simuladas deben tener un ancho de banda aún mayor que esta velocidad de muestreo. Sin embargo, los amplificadores utilizados para la generación de señales de estado uniforme para las entradas de tensión y corriente de 100 V y 1 A / 5 A en los dispositivos de protección, que se conectan a los TC y TT durante el funcionamiento, tienen un ancho de banda en el rango de algunos kHz solamente.

Posibles soluciones

Una posible solución para la prueba práctica de los elementos de ondas viajeras se basa en una simulación independiente de los pulsos de ondas viajeras de alta frecuencia. Utilizando un dispositivo de prueba de inyección específico que pueda crear pulsos de ondas viajeras de temporización precisa para las entradas de corriente y/o tensión, es posible estimular los elementos de ondas viajeras dentro de los dispositivos de protección o de localización de fallas sometidos a prueba y verificar la función correcta de la marca de tiempo y los algoritmos de localización de fallas.

La creación de picos de ondas viajeras es ligeramente diferente para las entradas de tensión y corriente. Por ejemplo, para las entradas de corriente una solución podría ser tan simple como descargar un condensador cargado previamente justo en el momento adecuado. Sin embargo, la circuitería minuciosa y la conexión a las entradas del dispositivo de protección tiene que diseñarse cuidadosamente y adaptarse eventualmente a la carga de entrada de las entradas del dispositivo. Por último, la pendiente de la señal ha de ser lo suficientemente pronunciada para que el dispositivo sometido a prueba pueda determinar con precisión la hora de llegada.

Para poder simular diferentes escenarios con ondas viajeras, debe ser posible controlar la polaridad de los pulsos, así como la temporización. La amplitud de los picos no es tan fácil de controlar, ya que depende de la carga de entrada y de los circuitos de conexión. Pero los dispositivos de ondas viajeras no pueden confiar de todos modos en la amplitud absoluta de las señales de ondas viajeras, ya que depende de muchos otros factores también. Para escenarios avanzados se requieren incluso varios pulsos seguidos con retardos de tiempo precisos entre ellos, por ejemplo, para simular reflexiones de ondas viajeras.

En el caso de algunos de los dispositivos que supervisan señales de ondas viajeras, es suficiente inyectar sólo los pulsos de ondas viajeras, sin ninguna señal fundamental significativa o de bajo ancho de banda, lo que es suficiente para probar solamente la funcionalidad en cuanto a ondas viajeras. En el caso de otros dispositivos, es posible configurar los ajustes a un modo específico que acepte señales con pulsos de ondas viajeras solamente. Sin embargo, los ingenieros de protección no quieren reconfigurar un dispositivo en el campo con la única finalidad de realizar pruebas y en el caso de algunos dispositivos, esto no es posible en absoluto.

Un método mucho mejor es el que se ha aplicado recientemente con la superposición de los pulsos de ondas viajeras específicos en las señales de corriente y tensión fundamentales o de bajo ancho de banda utilizadas para probar los elementos de protección convencionales. Por lo tanto, las señales de los amplificadores de salida de un equipo de prueba de protección convencional, que sea capaz de inyectar señales de tensión y corriente en un rango de frecuencia que va desde la frecuencia fundamental hasta algunos kHz, se utilizan en paralelo con una inyección específica para pulsos de ondas viajeras, como se

explicó anteriormente. Por ejemplo, en el caso de las corrientes inyectadas, las dos salidas se conectan en paralelo a las entradas de corriente del dispositivo de protección que se está probando. Para las tensiones se puede realizar una conexión en serie utilizando un transductor de tensión para el pulso de tensión de ondas viajeras.

Para la simulación de un escenario de falla, el equipo de prueba de protección se controla desde un software de prueba que se ejecuta en un PC, el cual calcula las señales transitorias de tensiones y corrientes utilizando un algoritmo de simulación de red con una frecuencia de muestreo de, por ejemplo, 10 kHz. Dentro del software, la topología del sistema eléctrico se modela con líneas de transmisión, buses y entradas. Para el modelado de la línea de transmisión se puede utilizar un simple modelo RLC concentrado para obtener señales suficientemente realistas al inicio de la falla. Las señales de tensiones y corrientes podrían parecerse a las de la figura 7, tal como se muestra en el software de prueba del PC.

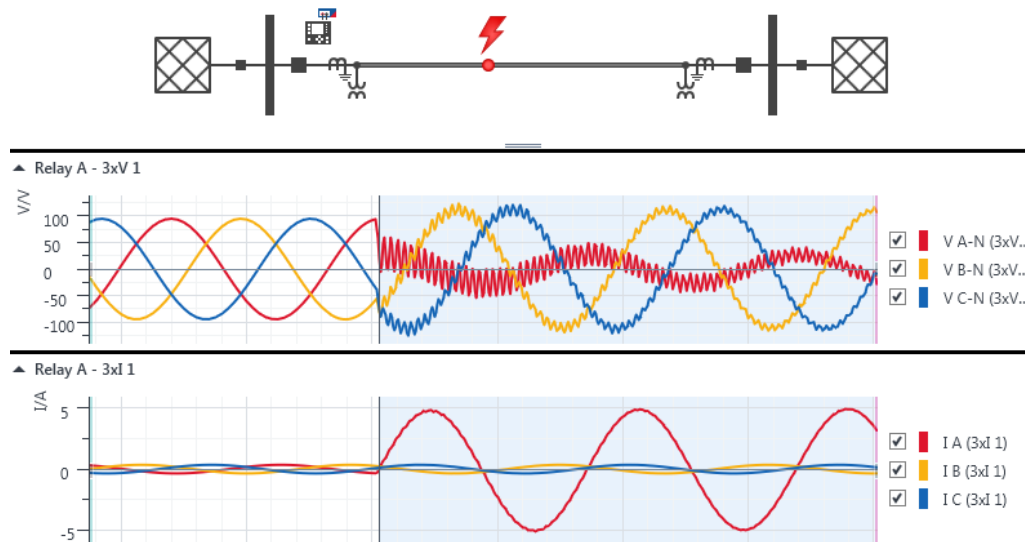


Figura 7: Simulación de red de una falla monofásica a tierra en una línea de transmisión de 100 km utilizando un modelo de RLC concentrado

La información sobre la propagación de las ondas viajeras se deduce utilizando otro algoritmo. En el caso de las líneas de transmisión se conoce la longitud de la línea y la velocidad de propagación de las ondas viajeras. A partir de ahí se pueden calcular los tiempos exactos de llegada de los picos de ondas viajeras a los terminales de la línea donde están conectados los dispositivos de protección. Por lo tanto, se utiliza la misma topología modelada utilizada para la simulación de red anterior. La idea detrás de los diagramas de celosía de Bewley puede extenderse a un gráfico de nodos (barras) y líneas de conexión, a partir del cual un algoritmo puede deducir fácilmente la propagación de ondas viajeras desde cualquier punto de la topología a todas las diferentes ubicaciones de los relés investigados, incluyendo las reflexiones y cambios de polaridad en las discontinuidades.

Para la inyección de tal escenario de prueba, el equipo de prueba tiene que controlar con precisión la salida de las señales muestreadas con bajo ancho de banda junto con los pulsos de ondas viajeras superpuestos. La temporización de los pulsos de ondas viajeras tiene que estar sincronizada con la hora de inicio de la falla de las señales convencionales. Por lo tanto, se requiere un equipo de prueba en el que la generación de la señal se sincronice con un reloj interno de referencia preciso y el disparo de los pulsos de ondas viajeras se pueda controlar con una temporización precisa de una resolución en el rango de nanosegundos utilizando el mismo reloj de referencia. Una solución con el disparo de los pulsos de ondas viajeras mediante una señal binaria externa, introduciría errores de temporización adicionales que podrían evitarse utilizando este método.

En el caso de los dispositivos que utilizan el principio de ondas viajeras con dos extremos, por supuesto, la inyección en ambos extremos debe realizarse simultáneamente y debe establecerse una sincronización horaria precisa entre los dos extremos. Como se describe en [7] y [8] en detalle, es posible realizar una configuración tal como la que se muestra en la figura 8.

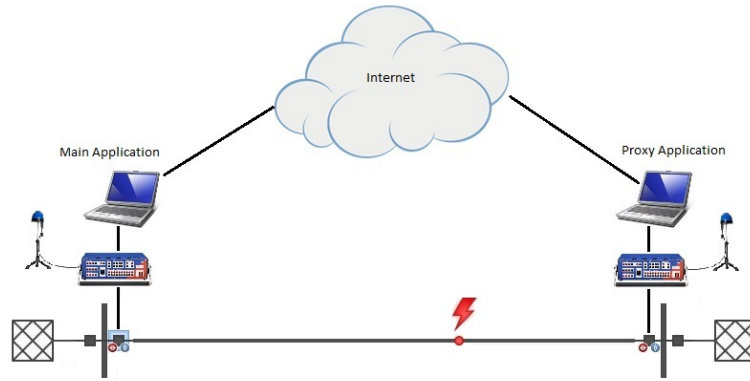


Figura 8: Configuración para una prueba de extremo a extremo utilizando equipos de prueba distribuidos sincronizados mediante GPS

Para una configuración distribuida con equipos de prueba de protección en ambos extremos de la línea, la sincronización de los equipos de prueba se realiza utilizando un reloj de referencia basado en GPS conectado a los equipos de prueba utilizando PTP IEEE 1588 que proporciona una precisión horaria en el rango de decenas de nanosegundos. Ambos equipos de prueba se controlan desde una única solución de software para PC que se ejecuta en un extremo de la línea y que realiza todos los cálculos con las señales transitorias y las ondas viajeras simuladas. El software controla los equipos de prueba en ambos extremos utilizando una conexión de red directa a la subestación remota o incluso puede utilizar una conexión a través de la nube de Internet.

Tanto la inyección de las señales transitorias para corrientes y tensiones a velocidades de muestreo de 10 kHz, como los picos de ondas viajeras temporizadas según el inicio de la falla del escenario, utilizan la misma referencia horaria. La fluctuación de la temporización de los pulsos de ondas viajeras en una configuración distribuida de este tipo puede mantenerse dentro de un par de décimas de nanosegundos, incluso durante un período de tiempo más largo, tal como se muestra en la figura 9.

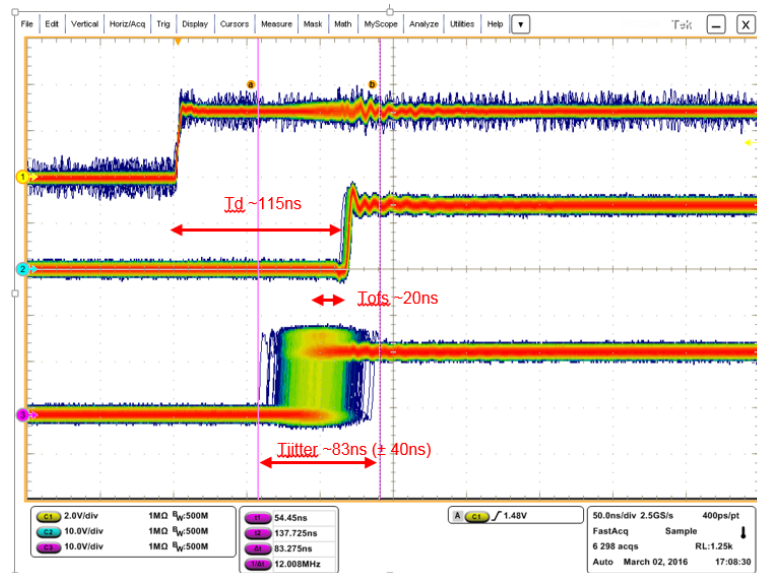


Figura 9: Fluctuación de pulsos de ondas viajeras de dos dispositivos de prueba distribuidos sincronizados en el tiempo

Utilizando este método, fue posible realizar con éxito pruebas con relés diferenciales de línea que implementan una localización de fallas basada en las ondas viajeras entre dos extremos, en función de las ondas viajeras de corriente en una configuración de extremo a extremo. En el caso de las fallas simuladas en diferentes puntos de la línea protegida, que variaban entre el 0 y el 100 % de la longitud de la línea, los

relés calcularon la localización de las fallas de forma precisa con sólo pequeños errores en el rango de 10 a 30 m. La localización de fallas basada en la impedancia se evaluó en los relés en paralelo y también mostró los valores correspondientes, aunque no siempre con la misma precisión, por supuesto. Todas las pruebas se realizaron con los ajustes de los relés exactamente igual que si los relés hubieran estado en funcionamiento en las subestaciones.

Perspectivas futuras

En la actualidad, la mayoría de los dispositivos de protección y localización de fallas desplegados en las subestaciones utilizan elementos basados en ondas viajeras únicamente para la localización de fallas. Pero en los últimos relés de protección desarrollados, la ventaja de que las ondas viajeras son tan rápidas como la velocidad de la luz y no requieren una ventana de datos relativamente larga para un cálculo fasorial confiable, se utilizará para habilitar la protección de la línea con tiempos de disparo tan rápidos como tan sólo un par de milisegundos.

Para una decisión de disparo confiable de un relé de protección, por supuesto, la localización de fallas basada en la información de las ondas viajeras no sólo tiene que estar disponible de forma rápida, sino también confiable. El relé tiene que diferenciar las fallas en la línea protegida de las fallas fuera del área protegida, por ejemplo, falla en las líneas predecesoras en sentido inverso, falla en la línea sucesora detrás del relé en el extremo remoto y falla en una línea paralela, como se muestra en la figura 10.

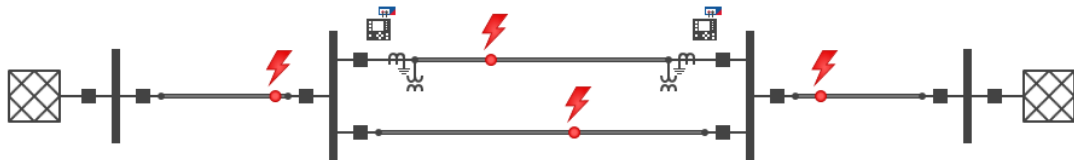


Figura 10: Diferentes fallas que debe discriminar un relé de protección

Para implementar un relé de protección confiable basado en elementos de ondas viajeras, generalmente elementos adicionales funcionan en paralelo y la decisión de disparo se refuerza con información de todos estos otros elementos. Los elementos de relé basados en cantidades incrementales son una buena opción para utilizarlos junto con los elementos de ondas viajeras, ya que también funcionan en el dominio del tiempo y pueden proporcionar información sobre fallas muy rápidamente.

Dado que hoy en día los canales de comunicación entre las unidades de relé distribuidas están disponibles fácilmente, la protección de la línea puede mejorarse aún más utilizando información de ambos extremos de la línea. Los esquemas de protección de extremo a extremo y los esquemas de diferencial de línea pueden enriquecer aún más la información rápida de las ondas viajeras para una decisión de disparo confiable utilizando canales de comunicación rápidos entre los dos dispositivos de protección. Por supuesto, el canal de comunicación introducirá un retardo adicional al menos igual al retardo de propagación de la línea protegida. Ver en [9] y [10] innovaciones recientes sobre cómo realizar relés de protección de línea basados en el dominio del tiempo y elementos de ondas viajeras.

En la puesta en servicio y prueba de dispositivos en una subestación es mucho más importante los relés de protección que disparan los interruptores de potencia que otros dispositivos que sólo proporcionan información de localización de fallas. Una prueba integrada que incluya todos los elementos de relé, es obligatoria y debe ejecutarse en el campo en los dispositivos instalados en la subestación. En el caso de los esquemas de protección que utilizan canales de comunicación entre subestaciones, también se requiere una prueba de extremo a extremo utilizando equipos de prueba distribuidos.

Las pruebas de protección descritas como una posible solución para los elementos basados en ondas viajeras se desarrollarán aún más hasta convertirse en una solución integrada aplicable a cualquier relé nuevo basado en cualesquiera elementos de dominio del tiempo en el campo. Con la posibilidad de estimular múltiples elementos de relé, que trabajan juntos en los relés, en paralelo con cantidades inyectadas lo suficientemente precisas para verificar que los algoritmos funcionan como se espera y que el relé está configurado correctamente, la puesta en servicio y las pruebas serán posibles para el ingeniero de protección de una manera práctica.

Conclusión

Las pruebas y la puesta en servicio de elementos de ondas viajeras en los dispositivos modernos de localización de fallas y de protección, no son posibles con los equipos de prueba de protección convencionales. El uso de una solución con la superposición de pulsos de ondas viajeras temporizadas con precisión en la inyección de tensión/corriente de ancho de banda inferior, permite una prueba integrada del dispositivo sometido a prueba que incluye todos los elementos del relé simultáneamente y sin necesidad de una conexión especial o ajustes para la prueba en el relé.

Una configuración que utiliza varios equipos de prueba sincronizados en el tiempo permite incluso realizar una prueba distribuida de todos los esquemas de dispositivos, lo cual es obligatorio, ya que el principio de la mayoría de los elementos de ondas viajeras en los esquemas de protección de línea se basa en la información de ambos extremos utilizando un canal de comunicación de alta velocidad.

Las ondas viajeras y otros elementos del dominio del tiempo abren la posibilidad de nuevos relés de protección que puedan funcionar mucho más rápido que cualquier dispositivo basado en fasores. Para probar y poner en servicio dichos dispositivos se necesitarán nuevos equipos de prueba que utilicen estos nuevos métodos para pruebas integradas.

Encuentre más información viendo nuestro último video sobre ondas viajeras:

[„Field Testing Travelling Wave Protection System“](#)

Referencias

- [1] L. V. Bewley, "Traveling Waves on Transmission Systems", General Electric Company, Pittsfield, MA, 1933
- [2] A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1991
- [3] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx, "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch", 40th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2013
- [4] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx, "A New Traveling Wave Fault Locating Algorithm for Line Current Differential Relays", 12th International Conference on Developments in Power System Protection, Copenhagen, Denmark, 2014
- [5] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, C. Gallacher, and S. Marx, "Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves", 13th International Conference on Developments in Power System Protection, Edinburgh, UK, 2016
- [6] S. Marx, B. K. Johnson, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results", 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, 2013
- [7] B. Bastigkeit, C. Pritchard, T. Hensler, "New Possibilities in Field Testing of Distributed Protection Systems", PACWorld Conference, Zagreb, Croatia, 2014
- [8] T. Hensler, C. Pritchard, F. Fink, "New Possibilities for Protection Testing using Dynamic Simulations in the Field", MATPOST Conference, Lyon, France, 2015
- [9] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?", 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2014
- [10] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults", 42st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2015

Acerca de los autores



Dipl.-Ing. (FH) Christopher **Pritchard** nació en 1982 en Dortmund / Alemania. Recibió su diploma en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Dortmund en 2006. Se unió a OMICRON electronics en 2006, donde trabajó en el desarrollo de software de aplicación en el campo de soluciones de pruebas para sistemas de protección y medida.

christopher.pritchard@omicronenergy.com



Dipl.-Ing. Heinz **Lampl** nació en 1962 en Graz / Austria. Recibió su diploma (licenciatura) en Ingeniería eléctrica en la Universidad Técnica de Viena en 1986. Se incorporó a OMICRON electronics en 1990, donde trabajó en el desarrollo de hardware para los equipos de prueba de protección de sistemas eléctricos.

heinz.lampl@omicronenergy.com



Dipl.-Ing. Thomas **Hensler** nació en 1968 en Feldkirch / Austria. Recibió su diploma (licenciatura) en Informática en la Universidad Técnica de Viena en 1995. Se unió a OMICRON electronics en 1995, donde trabajó en el desarrollo de software de aplicación en el campo de soluciones de pruebas para sistemas de protección y medida. Además, es responsable de la gestión de productos de software de aplicación para las pruebas de protección.

thomas.hensler@omicronenergy.com