

# Pruebas de protecciones basadas en cantidades superpuestas y ondas viajeras

Christopher Pritchard, Heinz Lampl, Thomas Hensler, OMICRON electronics GmbH  
Klaus, Austria

## Resumen

Los relés de protección más recientes, que utilizan elementos basados en cantidades superpuestas y ondas viajeras para implementar la protección de líneas de ultra alta velocidad, plantean nuevas dificultades para las pruebas. La simple inyección de corrientes y tensiones de estado estacionario no permite disparar estos elementos.

Para los diferentes tipos de pruebas, tanto si se realizan en el laboratorio del fabricante como in situ durante la puesta en servicio en una subestación, se plantean diferentes requisitos. Las pruebas de aceptación y rendimiento requieren formas de onda muy realistas y un entorno de prueba automatizado. Las pruebas en campo requieren una configuración práctica y la posibilidad de ejecutar pruebas de extremo a extremo.

Se tratan aquí las diferentes posibilidades de probar dichos relés. Una simulación realista de las ondas viajeras requiere un modelo preciso de la línea de transmisión que considere correctamente los efectos dependientes de la frecuencia y las impedancias mutuas de los sistemas multifásicos. La simulación debe realizarse con frecuencias de muestreo superiores a 1MHz para obtener transitorios con ondas viajeras.

Por otro lado, los amplificadores de corriente utilizados hoy en día para las pruebas de protección no proporcionan el ancho de banda necesario para inyectar tales señales. Una solución práctica para las pruebas en campo es la simulación de pulsos de ondas viajeras con la temporización correcta. La superposición de estos pulsos de ondas viajeras a las señales de corriente y tensión con un punto de onda de menor ancho de banda constituye una solución para probar todos los elementos de los relés de manera integral sin necesidad de cambiar ninguno de los ajustes de los relés durante la puesta en servicio.

Es posible incluso una prueba de extremo a extremo con múltiples dispositivos de prueba sincronizados en el tiempo. Los dispositivos de prueba, sincronizados con relojes GPS con una precisión del orden de submicrosegundos, tienen suficiente precisión de temporización para probar también los elementos basados en ondas viajeras.

**Palabras clave:** Cantidades superpuestas, componentes incrementales, onda viajera, relé de protección, pruebas de protección, pruebas de extremo a extremo

## 1. Introducción

Las múltiples ventajas de los relés de protección y localización de fallas que utilizan componentes superpuestos y ondas viajeras (OV) los hacen muy atractivos para las compañías eléctricas. Pero cuando se introduce una nueva tecnología, la primera cuestión es siempre cómo probar la tecnología. Para comprender las posibles soluciones de prueba, y sus ventajas y limitaciones, es necesario comprender los principios básicos de los componentes superpuestos y de las OV. [1] y [2] facilitan una amplia introducción a los principios y algoritmos utilizados para los relés de protección en el dominio del tiempo. En [3] se explican en detalle los diferentes elementos de protección basados en cantidades incrementales: la distancia en el dominio del tiempo (DT21) y la dirección en el dominio del tiempo (DT32), así como los elementos basados en ondas viajeras: diferencial de ondas viajeras (OV87) y dirección de ondas viajeras (OV32).

## 2. Requisitos para las pruebas de protecciones basadas en cantidades incrementales y ondas viajeras

Los requisitos para las pruebas de los dispositivos de protección y localización de fallas basados en cantidades incrementales y OV dependen en gran medida del tipo de prueba realizada. De acuerdo con IEEE C37.233-2009, deben distinguirse los siguientes tipos de pruebas:

- Certificación (incluida la de conformidad y de rendimiento)
- Aplicación
- Puesta en servicio
- Mantenimiento

A efectos de las pruebas de certificación, tanto si se realizan en fábrica como durante las pruebas de aceptación por parte del usuario final, se requiere una investigación detallada de cada uno de los elementos de protección empleando las señales de prueba más

realistas. Estas pruebas se realizan principalmente en un entorno de laboratorio, donde es fácil el acceso a todos los dispositivos sometidos a prueba e incluso se puede llevar a cabo utilizando rutas alternativas de las señales, tales como entradas de bajo nivel o digitales de los elementos de procesamiento. Se realizan pruebas específicas para cada uno de los elementos del relé. Las pruebas en el laboratorio suelen incluir muchos pasos de prueba individuales, por lo que se requiere un entorno para la ejecución de pruebas automatizadas.

Por otro lado, las pruebas de puesta en servicio y de mantenimiento deben realizarse en campo, donde el esfuerzo de las pruebas y de los equipos de prueba también debe justificarse económicamente. La finalidad de estas pruebas es comprobar que la instalación, los ajustes y el funcionamiento de los dispositivos sean los correctos. Pero en campo, las señales de prueba, que normalmente se generan con equipos de prueba portátiles, deben aplicarse a las entradas convencionales de tensión y corriente en el emplazamiento de los dispositivos de protección instalados. Para un esquema de protección de extremo a extremo, esto implica una prueba de extremo a extremo utilizando equipos de prueba sincronizados en el tiempo, de modo que la prueba incluya ambos extremos, incluidos todos los canales de comunicación. Además, durante las pruebas de puesta en servicio y de mantenimiento, no deben modificarse los ajustes de los relés y las pruebas deben incluir todos los elementos de protección en paralelo.

Los requisitos comunes incluyen la prueba de todos los elementos de protección en busca de fallas dentro de la zona protegida (donde debe funcionar la protección) y de fallas fuera de la zona protegida, tales como en dirección inversa o en una línea paralela (donde la protección debe permanecer estable). Además, se deben realizar pruebas que validen la función de localización de fallas; estas pruebas deben verificar la precisión de la localización de fallas tanto con los métodos de doble extremo como de un solo extremo.

### 3. Requisitos técnicos para la prueba de elementos basados en cantidades incrementales

La prueba de las funciones de protección basadas en cantidades incrementales es posible mediante una prueba dinámica en la que se simula correctamente la transición del estado de prefalla al estado de falla. Esto puede lograrse fácilmente mediante una prueba basada en la simulación en la que se modela la red del sistema eléctrico (línea protegida y alimentaciones en cada extremo) en un software de simulación que calcula las señales de prueba que se inyectan para representar una falla que se produce en un momento predeterminado.

Estas señales se pueden aplicar a los dispositivos en prueba utilizando un equipo de prueba de relés convencional. Un ejemplo de tal caso de prueba se muestra en la figura 1, donde las señales de corriente y tensión inyectadas pueden verse con la respuesta de los

elementos DT21 y DT32. El cambio de la corriente de prefalla a la de falla incluye la desviación de CC correcta. El registro también indica las cantidades incrementales calculadas.

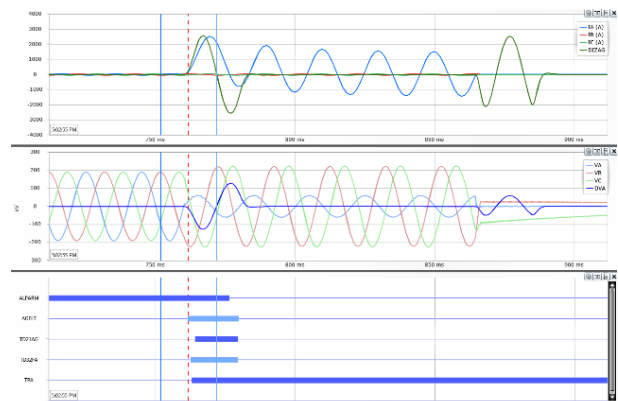


Figura 1: Prueba de elementos basados en cantidades incrementales

Mediante una prueba basada en la simulación, es fácil simular el flujo de carga superpuesto o pruebas con diferentes condiciones de alimentación (por ejemplo, con una variación de la relación de impedancia de la fuente [SIR]), de modo que es posible realizar pruebas exhaustivas del comportamiento de los elementos de DT y verificar los valores de ajuste (véase [4] para más detalles). Los relés se comportan como lo harían en campo cuando no hay OV presentes, como es el caso de las fallas que ocurren cerca del cruce por cero de la tensión.

Para evitar operaciones de relé no deseadas al final de cada prueba, también se debe simular una correcta cancelación de las fallas, lo que incluye una apertura realista de los polos del interruptor de potencia donde la falla se extingue con el paso por cero de la corriente.

### 4. Dificultades planteadas para la prueba de elementos de ondas viajeras

Las pruebas y simulaciones de los fenómenos de OV plantean más dificultades. Debido a que las OV son señales a frecuencias muy altas, se debe realizar una simulación a velocidades de muestreo muy altas (mayores de 1 MHz) y se deben generar señales de prueba con este ancho de banda, lo que supone considerables requisitos de cálculo y memoria.

Además, para simular fenómenos realistas de alta frecuencia en un sistema eléctrico, se requiere un modelo realista y detallado. Las simulaciones de sistemas eléctricos en cuanto al comportamiento de frecuencias fundamentales están bien consolidadas; la simulación de fenómenos de alta frecuencia requiere modelos mucho más detallados y complejos de todos los equipos primarios implicados, incluidos los modelos adecuados para líneas de transmisión, cables y cualquier otro equipo de terminación.

Para aplicar estas señales de prueba de alta frecuencia a los dispositivos en prueba, el equipo de prueba también requiere un ancho de banda en el orden de MHz. Actualmente hay disponibles equipos de prueba y amplificadores que inyectan cantidades nominales (100 V/5 A) a frecuencia nominal (50/60 Hz) en los terminales de corriente y tensión del relé. Sin embargo, hoy en día, estos amplificadores tienen un ancho de banda limitado en el rango de decenas de kHz. Los amplificadores de potencia con un ancho de banda de cientos de kHz son caros y complejos de implementar, lo que conlleva dispositivos muy grandes que ya no son prácticos para las pruebas en campo.

Se pueden utilizar dos métodos diferentes para probar los elementos de OV. En el laboratorio y durante el desarrollo, es posible inyectar señales de muestreo de alta frecuencia utilizando señales de bajo nivel o incluso entradas de señales digitales. En campo, es posible utilizar un equipo de prueba especial para inyectar pulsos de OV; estos pulsos simulan los cambios bruscos en las corrientes y tensiones debidos a la llegada de una OV. Debido a que el dispositivo de protección detecta las OV filtrando estos cambios bruscos, es posible estudiar los elementos de OV de esta manera. Los tiempos exactos de llegada de los pulsos de OV se extraen de las OV. Por lo tanto, el equipo de prueba debe ser capaz de inyectar los pulsos de OV con una resolución de tiempo en el rango de nanosegundos, incluso para la inyección distribuida de un esquema de extremo a extremo en el campo.

## 5. Simulación de transitorios de ondas viajeras

Las OV pueden simularse usando el programa de transitorios electromagnéticos (EMTP™) con un paso de tiempo mayor de 2 MHz. Existen en EMTP modelos precisos para la simulación de las líneas de transmisión largas que simulan correctamente el tiempo de propagación por la línea de las ondas viajeras (TWLPT). Debido a que las líneas de transmisión multifásicas tienen diferentes impedancias características (ZC) y velocidades de propagación en los modos aéreo y terrestre, y los efectos dependientes de la frecuencia de las líneas de transmisión tienen un efecto considerable en la forma de las señales de OV, se debe utilizar una línea de transmisión avanzada como el modelo de línea JMARTI [5]. Además, es necesario modelar correctamente todas las líneas adyacentes y equipos de terminación (tales como transformadores, líneas paralelas, reactores de derivación, etc.) para que se calculen señales realistas con las OV reflejadas y transmitidas.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de simulación EMTP. La topología corresponde a una línea paralela con líneas adyacentes en ambos terminales de la línea (izquierda y derecha) con fuentes de tensión constante.

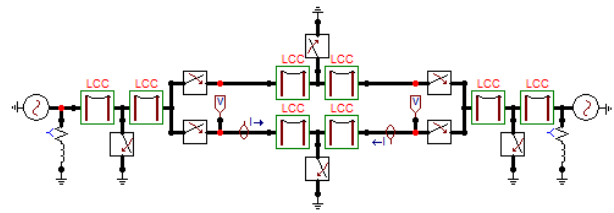


Figura 2: Topología para la simulación de OV utilizando el EMTP

Las señales de tensión y corriente resultantes de ambos extremos de la línea protegida se muestran en la figura 3 en el caso de una falla AG ubicada al 30 por ciento de la línea protegida más abajo del terminal izquierdo.

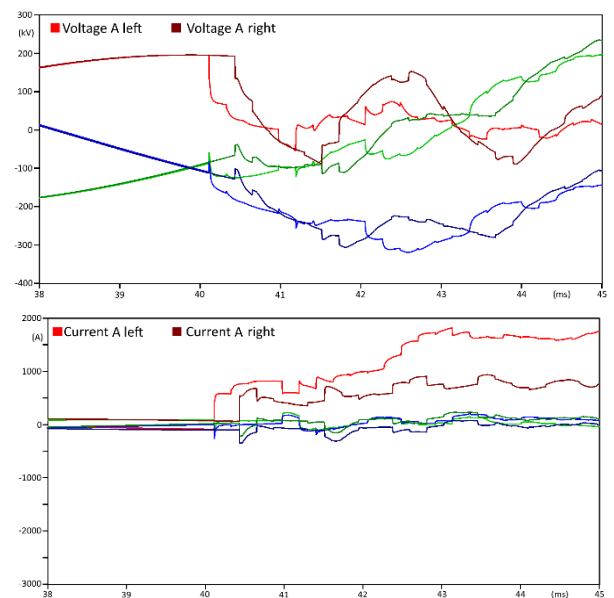


Figura 3: Simulación de señales de tensión (arriba) y corriente (abajo) usando EMTP

El inicio de la falla se simuló a 90 grados de la tensión de la fase A. La llegada de las primeras OV de tensión se percibe como un fuerte colapso de la tensión de la fase A, con un retardo de tiempo entre los extremos izquierdo y derecho que corresponde a la diferencia de distancia con respecto a la ubicación de la falla. En el caso de las corrientes, se puede observar un fuerte aumento. La llegada de OV adicionales se debe a las diversas reflexiones de todas las discontinuidades (barras, fuentes y la propia ubicación de la falla) en el sistema eléctrico simulado.

A partir de la salida de la simulación EMTP, se pueden obtener señales de tensión y corriente con una frecuencia de muestreo de 2 MHz o más. Estas señales de tensión y corriente se pueden aplicar entonces a los relés de protección en prueba utilizando generadores especiales de señales de bajo nivel. De este modo, es posible realizar

pruebas exhaustivas utilizando un gran número de casos de pruebas de simulación en un entorno de laboratorio que utilice este planteamiento.

### 6. Simulación de pulsos de ondas viajeras

El dispositivo de protección detecta las OV como pulsos de corriente y tensión después del filtrado. Es posible disparar los elementos de OV mediante la inyección de pulsos de corriente y tensión que tienen bordes marcados distinguibles. Para ello se podría utilizar un dispositivo capaz de inyectar pulsos trifásicos de corriente y tensión con una temporización precisa.

Para los diferentes casos de prueba, al igual que para los diferentes tipos de fallas y diferentes ubicaciones de las fallas (tanto dentro como fuera de la zona de protección), el dispositivo debe ser capaz de simular diferentes pulsos de OV para cada una de las fases de corriente y tensión con las polaridades correctas. En un esquema de extremo a extremo, dos dispositivos de prueba necesitan inyectar estos pulsos de OV con un sincronismo muy preciso; esto se puede lograr usando dispositivos de alta precisión sincronizados mediante GPS.

Los elementos de OV pueden dispararse con tan solo inyectar pulsos de OV. Sin embargo, los elementos de DT actúan en función de cantidades incrementales, ya que de lo contrario, otras funciones de supervisión (por ejemplo, lógica de armado) no se activarían y podrían bloquear la actuación de otros elementos del relé. Por lo tanto, algunos relés ofrecen un modo de prueba para que los elementos de OV puedan utilizar sólo pulsos de OV.

El objetivo de las pruebas de puesta en servicio o mantenimiento es probar y verificar todos los elementos de protección activos en paralelo, tal y como se encuentran durante el funcionamiento normal. Por esta razón, a veces no se permite o no se desea cambiar los ajustes del relé o ponerlo en modo de prueba. Una prueba con pulsos de OV superpuestos a las señales convencionales permite una prueba integral de todos los elementos de DT y OV en paralelo con exactamente los mismos ajustes y condiciones que durante el funcionamiento normal.

### 7. Pulsos de ondas viajeras superpuestos al punto de onda

Es posible una prueba integral de todos los elementos de DT y OV con una configuración como la que se muestra en la figura 4.

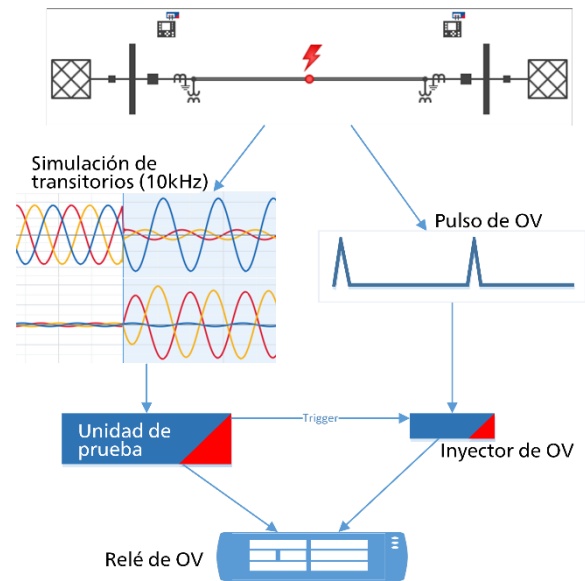


Figura 4: Pulsos de OV superpuestos a las señales convencionales

Mediante un software de pruebas de simulación que funciona en un PC, se integran tanto una simulación transitoria de las señales convencionales a una frecuencia de muestreo de 10 kHz como la simulación de los pulsos de OV. Las señales muestreadas simuladas con una frecuencia de muestreo de 10 kHz se inyectan utilizando un equipo de prueba de protección convencional, tal como se muestra en la figura 4 y de forma similar a la prueba de los elementos de DT por sí solos. Los pulsos de OV se generan con un inyector controlado desde el equipo de prueba de relés. Esto permite una sincronización precisa de los pulsos de OV para que las OV puedan coincidir con las señales de punto de onda de bajo ancho de banda.

En la figura 5, las señales de prueba resultantes se muestran tal y como han sido registradas por los relés en prueba.

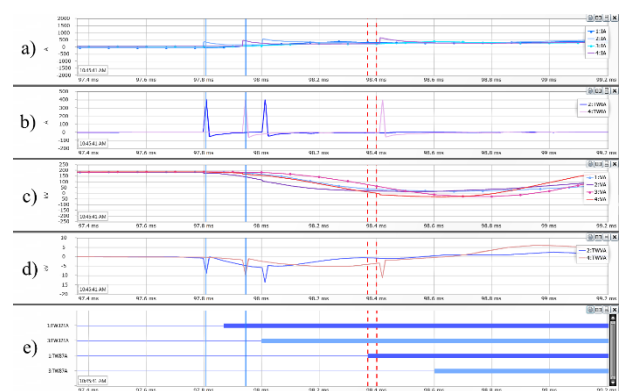


Figura 5: Señales de prueba con pulsos de OV superpuestos al punto de onda

La figura 5(a) muestra las corrientes al inicio de la falla y el primer pulso de OV inicial y el primero reflejado en

ambos terminales de línea. La figura 5(b) es un trazo de las señales de corriente de OV después del filtrado (usando el filtro más suave del diferenciador). Estas se utilizan para marcar la fecha y hora de las OV para su posterior procesamiento. En las figuras 5(c) y 5(d), las señales de tensión son similares excepto que los pulsos de OV tienen la polaridad opuesta.

La generación de las señales convencionales (frecuencia de muestreo de 10 kHz) y la temporización de los pulsos de OV superpuestos son controlados por el equipo de prueba, que se sincroniza con una fuente horaria precisa. Para una prueba de extremo a extremo, se utiliza un reloj GPS externo para la sincronización, tal como se explica en el siguiente apartado.

### 8. Configuración de la prueba en campo

Una prueba de extremo a extremo en campo requiere la inyección de señales de prueba en ambos terminales de línea, que se encuentran en ubicaciones geográficas muy diferentes (subestación local y remota). Sin embargo, es posible realizar una prueba integral de todo el sistema de protección a partir de una sola aplicación de prueba. El software es capaz de controlar toda inyección en todos los terminales de línea simultáneamente, tanto las señales convencionales como los pulsos de OV superpuestos.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de configuración de prueba para una línea de transmisión de dos terminales.

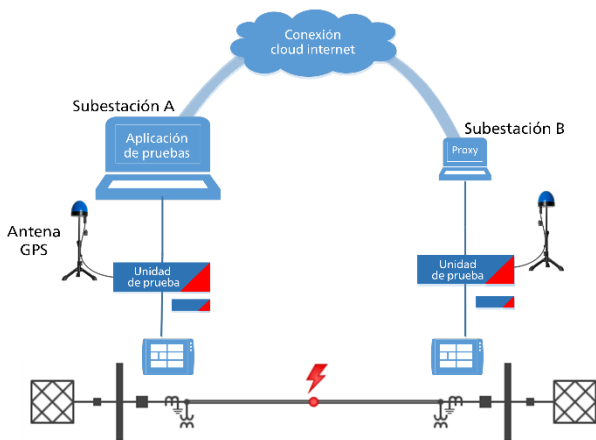


Figura 6: Configuración de una prueba de extremo a extremo en campo

A la izquierda de la figura 6 se encuentra el software de control, que realiza todas las simulaciones de casos de prueba y calcula todas las señales inyectadas, funcionando en un PC de la subestación A. El PC controla directamente el equipo de prueba local, incluido el inyector de OV. Para el equipo de prueba remoto y su inyector de OV, el PC puede utilizar una conexión de red a la subestación remota o una conexión en la nube por Internet, que se establece mediante una pequeña

aplicación proxy que se ejecuta en un segundo PC con acceso a Internet en la subestación B [6].

Usando este acceso remoto al equipo de prueba remoto, todas las señales de prueba calculadas se descargan primero a los equipos de prueba. Un inicio de inyección preciso y sincronizado en el tiempo requiere que los equipos de prueba estén sincronizados por GPS utilizando un reloj con una precisión de 100 ns o superior.

### 9. Experiencias con pulsos de ondas viajeras

Para comprender mejor los principios del funcionamiento conjunto de los elementos de protección de DT y OV en diferentes situaciones de falla, en esta sección se presentan algunos ejemplos de casos de prueba. Las señales simuladas se presentan junto con la respuesta de cada uno de los elementos del relé.

El primer escenario es una falla en la línea protegida ubicada al 30 por ciento de la línea más abajo del terminal izquierdo, como se muestra en la figura 7.

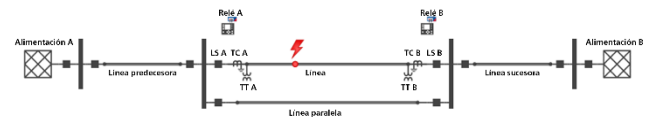


Figura 7: Topología para el caso de prueba con una falla en la línea protegida

Las OV que llegan primero se simulan con pulsos de OV positivos en las corrientes y pulsos de OV negativos en las tensiones (suponiendo un ángulo de inicio de la falla de +90 grados), de modo que los elementos de OV32 en ambos terminales de línea detectan la falla en una dirección hacia adelante (véase la figura 8). No hay OV salientes después del tiempo de propagación por las líneas de protección, por lo que los elementos de OV87 reaccionan en consonancia. Adicionalmente, los elementos de DT32 declaran la falla en dirección de avance (utilizando las cantidades superpuestas de las señales convencionales inyectadas), por lo que se accionan ambos elementos de protección.

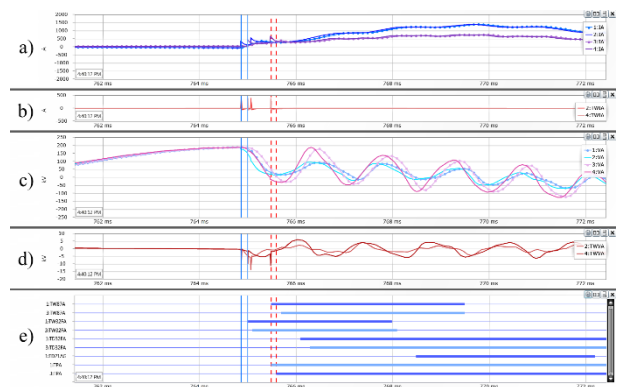


Figura 8: Señales de prueba y reacción del relé en caso de una falla en la línea protegida

La simulación de las OV que llegan primero a ambos terminales de la línea se realiza con un retardo de tiempo de  $136 \mu\text{s}$  entre el terminal izquierdo y el terminal derecho. Esto corresponde exactamente a la diferencia debida a la ubicación de la falla (línea de 100 km de longitud). Además, las primeras OV reflejadas desde la ubicación de la falla hasta las ubicaciones de los relés en ambos terminales de la línea también se simulan para que tanto el localizador de fallas de doble extremo como el de un solo extremo puedan probarse al mismo tiempo. El diagrama de Bewley en la figura 9 confirma que coincide la localización de la falla con uno y dos extremos.

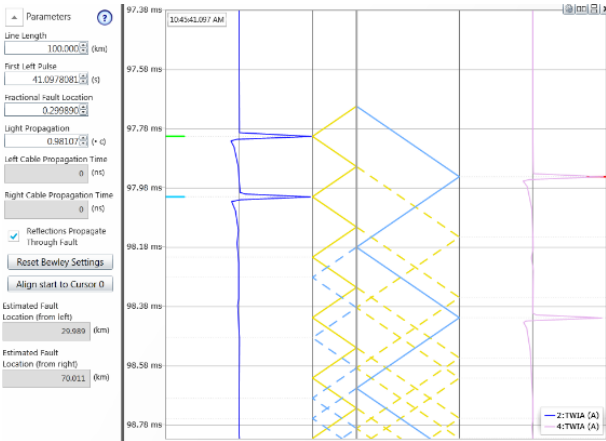


Figura 9: Localización de fallas con localizador de fallas de dos extremos y de un extremo

El segundo escenario es el de una falla fuera de la zona de protección detrás del terminal izquierdo de la línea protegida, como se muestra en la figura 10.

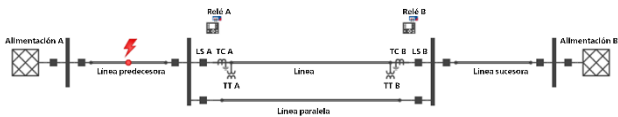


Figura 10: Topología para el caso de prueba con una falla externa (hacia atrás)

Las primeras OV que llegan al terminal izquierdo se simulan con polaridad negativa tanto para la corriente como para la tensión, de forma que el elemento de OV32 del relé del terminal izquierdo declara la falla en sentido inverso (véase la figura 11).

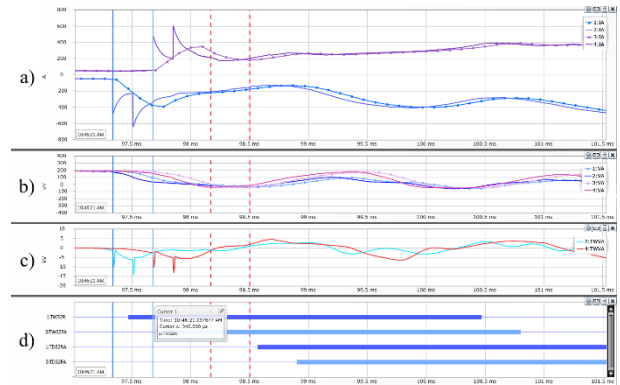


Figura 11: Señales de prueba y reacción del relé en el caso de una falla externa (hacia atrás)

En el terminal derecho se simulan los pulsos de OV con polaridad positiva para la corriente y negativa para la tensión, por lo que el elemento de OV32 declara la falla en la dirección de avance. Los elementos de DT32 detectan la dirección de la falla de la misma manera. Sin embargo, en el caso de esta falla, el tiempo de retardo entre el terminal izquierdo y el terminal derecho es exactamente igual al tiempo de retardo de propagación por la línea ( $340 \mu\text{s}$ ), por lo que el elemento de OV87 no se activa y el relé no se dispara.

El último caso muestra una falla fuera de la zona de protección en la línea paralela ubicada al 30 por ciento de la línea más abajo del terminal izquierdo, figura 12.

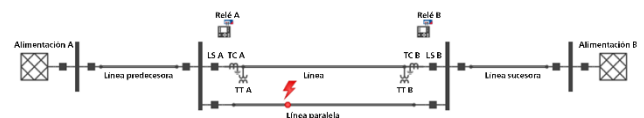


Figura 12: Topología para el caso de prueba con una falla en la línea paralela (exterior)

La polaridad de los pulsos de OV se simula con corrientes y tensiones negativas en ambos terminales de línea, de forma que los dos elementos de OV32 se reafirman en la dirección inversa. El mismo sentido es declarado por los elementos de DT32. Además, hay un segundo pulso de OV asociado con la OV saliente en cada uno de los terminales de línea, exactamente  $340 \mu\text{s}$  después de las primeras OV, de modo que los elementos de OV87 permanecen estables y el relé no se dispara (véase la figura 13).

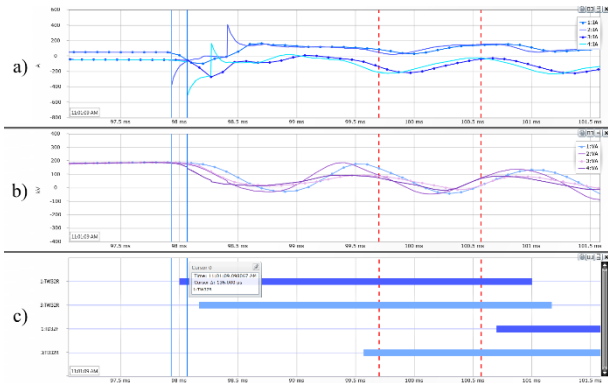


Figura 13: Señales de prueba y reacción del relé para una falla en la línea paralela

Como se muestra en los ejemplos de esta sección, es posible probar todos los elementos de DT y OV de forma integral utilizando pulsos de OV superpuestos en las señales de prueba convencionales simuladas. También es posible la simulación de diferentes tipos de fallas (bifásicas y trifásicas) con pulsos de OV simultáneos y polaridades específicas en las fases con falla y sin falla.

### 10. Exactitud de la temporización

La precisión de la temporización de los pulsos de OV es importante porque un error de temporización de 1  $\mu$ s produce un error de aproximadamente 300 m (900 pies) en la localización de la falla. Con pruebas prácticas, la diferencia de tiempo entre dos equipos de prueba sincronizados mediante relojes GPS puede mantenerse dentro del rango de nanosegundos, como se muestra en la figura 14.

Las mediciones de la figura 14 tienen un error de desviación (Tdes) de aproximadamente 20 ns (equivalente a 6 m) y una fluctuación de tiempo entre los dos equipos de prueba durante un largo período de tiempo de  $\pm 40$  ns. Esta precisión es suficiente para verificar el comportamiento correcto y preciso de las funciones de protección OV y de localización de fallas.

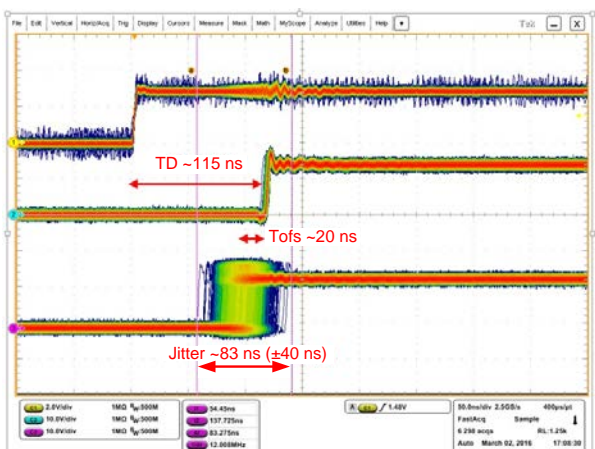


Figura 14: Fluctuación de los pulsos de OV con dos equipos de prueba sincronizados en el tiempo

### 11. Casos de prueba avanzados

El mismo método con software basado en simulación en un PC, donde se modela la topología del sistema eléctrico y se utiliza una simulación de red para derivar las señales de prueba convencionales (muestreadas a 10 kHz) y los pulsos de OV superpuestos que se van a inyectar (incluyendo la temporización y la polaridad), también es aplicable a los casos de prueba más avanzados. Podemos modelar cualquier topología utilizando diferentes segmentos de línea y de cable, y los retardos de propagación correspondientes a las diferentes secciones pueden especificarse individualmente. Esto permite probar la protección de líneas de transmisión no homogéneas, así como conexiones mixtas de líneas aéreas y cables.

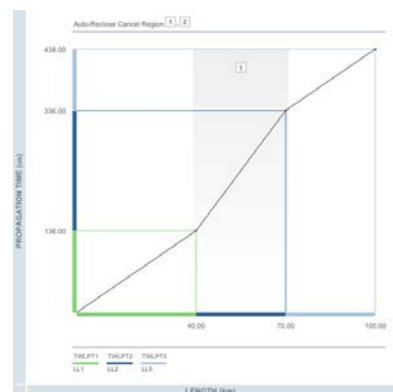
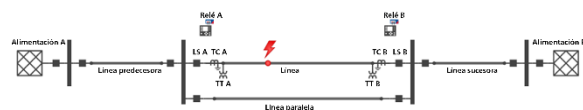


Figura 15: Relé configurado para una línea no homogénea con dos líneas aéreas y un segmento de cable

Como se muestra en la figura 15, los relés pueden configurarse para diferentes segmentos de línea con diferentes velocidades de propagación de ondas viajeras. Además, los dispositivos de protección pueden detectar la ubicación de la falla en los segmentos de cable y bloquear el autorecierre mediante la afirmación de un objetivo específico del relé (ARC - cancelación de autorecierre). Para probar un relé de este tipo, la misma configuración de línea tiene que modelarse en consonancia en el software de prueba. Como se muestra en la figura 16, en el software de prueba es posible entonces colocar fallas en cualquier ubicación de la línea no homogénea y comprobar si la cancelación de autorecierre es correcta para cualquier falla en el segmento de cable.

Figura 16: Topología para el caso de prueba con una falla en la línea paralela (exterior)



El software de simulación también nos permite modelar capacitancias en serie en cualquier ubicación. Aunque no se supone ningún retardo de tiempo adicional para las OV, se trata de un caso de prueba importante para los

elementos de DT21 y DT32. Utilizando un sencillo algoritmo, los tiempos de llegada de los pulsos de OV simulados pueden calcularse en función de la ruta más corta desde la ubicación de la falla hasta la ubicación del relé. Este principio puede incluso ampliarse a múltiples extremos (por ejemplo, para la protección de una línea de tres terminales utilizando un esquema diferencial avanzado basado en elementos en el dominio del tiempo).

## 12. Conclusión

Las pruebas de los elementos de protección de línea basados en DT y OV plantean nuevos retos. En el laboratorio, es posible realizar una simulación transitoria de OV a velocidades de muestreo de 1 MHz y superiores utilizando las herramientas de software EMTP. Sin embargo, estas señales de alta frecuencia no pueden inyectarse fácilmente en las entradas convencionales de corriente y tensión de los dispositivos de protección y localización de fallas que suelen estar conectados a los TC y TT de un equipo primario.

La inyección de pulsos de OV, que están exactamente sincronizados según el escenario de prueba simulado, puede disparar los elementos de OV en los relés. Las pruebas con pulsos de OV requieren que el relé se ponga en modo de prueba porque los elementos de OV son supervisados por otras funciones y elementos que utilizan cantidades fundamentales.

Un método práctico para superponer los pulsos de OV a las señales convencionales de corriente y tensión inyectadas en un punto de onda específico, permite realizar pruebas integrales de los elementos de protección sin necesidad de cambiar los ajustes ni utilizar modos de prueba. Esto permite probar todos los elementos del relé en paralelo, como en el caso de las condiciones normales de funcionamiento.

En una solución global para las pruebas en campo, un PC puede ejecutar el software de prueba para simular el sistema eléctrico primario y calcular todas las señales requeridas, incluyendo la temporización y polaridad de los pulsos de OV. El mismo PC y el mismo software pueden controlar varios equipos de prueba de protección convencionales, que utilizan las salidas del amplificador convencional para las señales transitorias (muestreadas a 10 kHz) y un simple dispositivo de extensión generador de pulsos de OV para superponer los pulsos de OV. Para una temporización precisa, los equipos de prueba de protección se sincronizan mediante relojes GPS. Esta configuración funciona para pruebas de extremo a extremo y también puede ampliarse a múltiples extremos.

Los casos de prueba avanzados que incluyen líneas no homogéneas y líneas compensadas en serie son posibles mediante el modelado de la topología en el software de simulación y el uso de un algoritmo para calcular los tiempos de llegada de las OV en función de la topología. Los experimentos con esta solución de pruebas de inyección en los relés de protección de OV demostraron

la viabilidad de la solución y lograron una precisión en el rango de los nanosegundos.

## Referencias

- [1] E. O. Schweitzer, III, B. Kaszteny, A. Guzmán, V. Skendzic y M.V. Mynam. "Speed of Line Protection - Can We Break Free of Phasor Limitations" (Velocidad de la protección de línea - ¿podemos liberarnos de las limitaciones fasoriales), actas de la 68ª Conferencia Anual de Ingenieros de Relés de Protección, College Station, TX, marzo de 2015.
- [2] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kaszteny y S. Marx. "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch" (Localización de fallas mediante las ondas viajeras que emiten), actas de la 67ª Conferencia Anual de Ingenieros de Relés de Protección, College Station, TX, marzo de 2014.
- [3] Manual de instrucciones de SEL-T400L. Disponible en: <https://selinc.com>
- [4] T. Hensler, C. Pritchard y F. Fink. "New Possibilities for Protection Testing using Dynamic Simulations in the Field" (Nuevas posibilidades de las pruebas de protección mediante simulaciones dinámicas en campo), presentado en MATPOST 2015, Lyon, Francia, noviembre de 2015.
- [5] J. R. Marti. "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations" (Modelado preciso de las líneas de transmisión dependientes de la frecuencia en simulaciones de transitorios electromagnéticos), Transacciones IEEE en aparatos y sistemas de potencia, Vol. PAS-101, Issue 1, enero de 1982, pp. 147-157
- [6] B. Bastigkeit, C. Pritchard y T. Hensler. "New Possibilities in Field Testing of Distributed Protection Systems" (Nuevas posibilidades de pruebas en campo de sistemas de protección distribuida), actas de la 5ª Conferencia Mundial Anual de Protección, Automatización y Control, Zagreb, Croacia, junio de 2014.



## 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](mailto: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](mailto: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](mailto:thomas.hensler@omicronenergy.com)

OMICRON es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 160 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.

Para obtener más información, documentación adicional e información de contacto detallada de nuestras oficinas en todo el mundo visite nuestro sitio web.