

# Mejora de la confiabilidad de los sistemas de relés de protección mediante pruebas dinámicas

Steven de Clippelaar, DOW Chemical, Países Bajos

## Resumen

La distribución de energía eléctrica confiable a las plantas petroquímicas adquiere cada vez mayor importancia. Los falsos disparos pueden producir daños en los equipos, problemas medioambientales, pérdida de producción, etc. Las caídas de energía en la red pública ya no son raras debido a la generación distribuida, los cambios del sistema de puesta a tierra en la red pública, etc. Un funcionamiento estable de los relés de protección asegura el suministro confiable de energía eléctrica a las plantas químicas. Para la confiabilidad es esencial la ausencia de disparos falsos, capacidad FRT ante fallas (inmunidad frente a las caídas de energía) y disparo rápido cuando se produzca una falla eléctrica en los equipos. Los fabricantes de relés de protección están añadiendo cada vez más funciones en una caja. La flexibilidad del sistema de relés (relés multifuncionales) implica unas largas listas de ajustes que necesitan probarse, lo que otorga cada vez mayor importancia a las pruebas de todo el esquema.

En este artículo se describe la modelización para las pruebas de relés de protección críticos (relés de protección de línea, generador, barra, transformador y transferencia) y el uso de Advanced Transplay. Las pruebas dinámicas se han convertido en norma dentro de DOW para el sistema de relés de protección críticos y forma parte de las pruebas de todo el esquema. Se utilizan modelos EMTP (ATP) para generar archivos PL4, COMTRADE. Se inyectan corrientes, tensiones y cambios de entradas para comprobar si el sistema de relés es estable o inestable. Los datos de los dispositivos CT Analyzer y CPC 100 se utilizan para modelizar transformadores de corriente. Usando el módulo Advanced Transplay se prueban dinámicamente relés de protección del generador, sistemas de transferencia, diferenciales de línea, barra y transformador. El método de pruebas desarrollado se utiliza en todas las aplicaciones de relés de protección críticos en DOW Europe.

## 1 El procedimiento utilizado para las pruebas dinámicas

El modelo se basa en los datos de la red y de la máquina disponibles a través del fabricante de la máquina. Los datos de la red se validan con los datos del registro de fallas procedentes de los relés. DOW utiliza ETAP para hacer cálculos de flujo de carga y de cortocircuito estático. En base a todos estos datos, se hace un modelo EMTP. El modelo EMTP desarrollado se valida con el programa de cálculo de la red ETAP.

Los cálculos de cortocircuito se realizan en ambos programas para comprobar los resultados y validar el modelo EMTP.

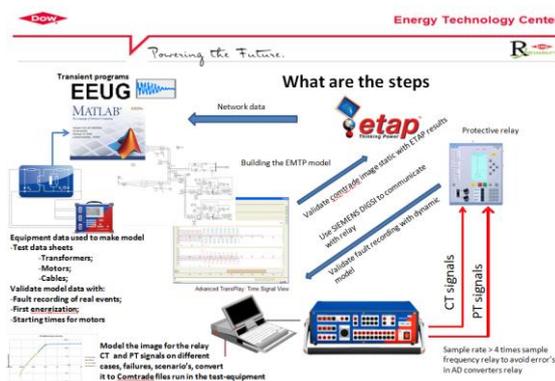


Figure 1: El procedimiento para las pruebas de todo el esquema

Hacer el modelo es la parte más difícil y lleva mucho tiempo. Y como "si entra basura, sale basura", hay que validar la modelización. El siguiente paso es definir los casos de simulación críticos (fallas en la red, caídas de energía, etc.). A veces se hacen ensayos con diferentes sensibilidades para encontrar los eventos más críticos del sistema e identificar dónde es importante una modelización más precisa para los resultados. La simulación de datos del modelo EMTP se convierte en archivos COMTRADE con la frecuencia de muestreo adecuada. El siguiente paso es importar el formato COMTRADE del archivo PL4 en el software Test Universe del equipo de prueba de OMICRON. Los casos simulados pueden así reproducirse. El software Test Universe de OMICRON genera directamente un informe de la prueba. Algunos relés utilizan la adaptación de la frecuencia de muestreo para producir resultados correctos en un amplio rango de frecuencias de 11-69 Hz. Siempre se simula un estado de prefalla sano para asegurarse de que el muestreo con frecuencia adaptable funciona correctamente. Los datos modelizados se exportan con una frecuencia de muestreo de 10 kHz. La frecuencia de muestreo de los datos debe ser como mínimo cuatro veces la frecuencia de muestreo del relé para evitar errores debido a la conversión A/D y al filtrado del relé. Durante las pruebas se recoge y analiza el registro de fallas de los relés. En el registro de fallas puede mostrarse la imagen inyectada del caso de prueba y compararse con la imagen inyectada real.

## 2 Modelos EMTP

### 2.1 Transformadores de corriente

Para inyectar corrientes realistas en el sistema de relés hay que hacer un modelo de los transformadores de corriente. Para las nuevas instalaciones, los datos proceden de los fabricantes y de las pruebas de aceptación FAT y SAT. Con las instalaciones nuevas o durante las paradas de la subestación, se obtienen las características del transformador de corriente con los dispositivos de OMICRON CT Analyzer o CPC 100. Estos dispositivos proporcionan los datos necesarios para la modelización. En la figura 2 se muestra el modelo EMTP del TC:

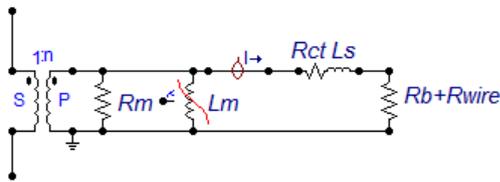


Figure 2: Modelo de transformador de corriente en EMTP

Los datos primarios  $R_p$ ,  $L_p$  pueden despreciarse para estudios de relés de protección. Cuando no se conoce la curva de excitación, se toma una curva KEMA típica. En este caso se calculan los valores  $R_{ct}$ ,  $R_b$  y  $R_{wire}$ . El modelo EMTP necesita los valores ligados al flujo en [V-seg] pico. Se toma la medición IEC 60044-6 para convertir a valores voltio-segundo. En la figura 3 se muestra la diferencia entre IEC 60.044-6 e IEC 60044-1 convertidos a valores pico.

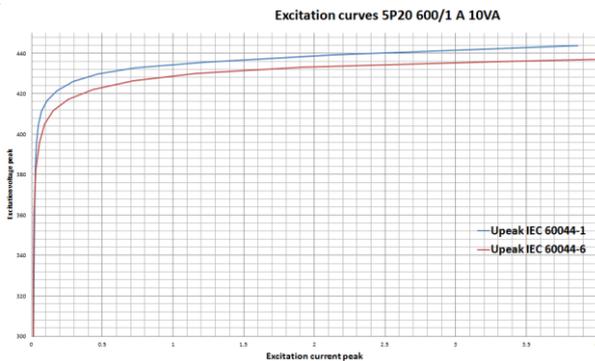


Figure 3: Curva de excitación IEC 60.044-1/IEC 60044-6

Cuando se ingresan los datos en el modelo, se valida el modelo para dejar que el programa EMTP ejecute la prueba de excitación.

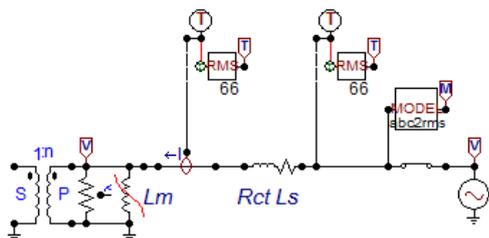


Figure 4: Prueba de excitación en EMTP para la validación

Normalmente se añaden puntos a la curva de excitación para obtener la respuesta correcta en la región de saturación profunda. Para esquemas de autorrecierre debe modelizarse la histéresis. Debe tenerse en cuenta el efecto de remanencia en la simulación especificando el nivel de flujo en estado estacionario al comienzo de la simulación. DOW utiliza un nivel de remanencia del 40% cuando realiza un estudio sensible sobre el desempeño del relé con la saturación del transformador de corriente.

### 2.2 Transformadores de tensión

Para la modelización de los transformadores de tensión en EMTP, DOW utiliza un transformador monofásico saturable. Si es necesario, también se puede utilizar la curva de excitación.

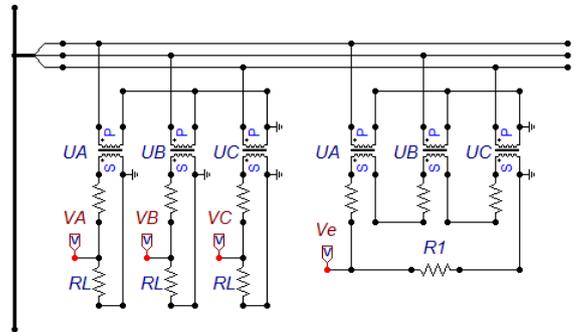


Figure 5: Modelo de transformadores de tensión en EMTP

También pueden modelizarse los transformadores de tensión por acoplamiento capacitivo, pero, por lo general, no se utilizan en las redes de la compañía.

### 2.3 Modelización de fallas

La modelización de fallas se realiza con interruptores monopolos controlados con una resistencia en serie. Se utiliza una resistencia al arco muy baja, 1 mΩ y se puede cambiar fácilmente. El modelo de arco no se utiliza en las simulaciones, ya que en las redes industriales la mayoría de las conexiones se hacen con cables y los sistemas son de baja resistencia a tierra. En las redes industriales, la compañía observa que las fallas comienzan como una falla a tierra y evolucionan a una doble falla a tierra en unos pocos ciclos. La mayoría de los relés tienen problemas con fallas a tierra fuera de la zona que evolucionan a una falla de fase a tierra dentro de la zona. Esta falla de fase a tierra fase provoca la saturación del TC y algunos relés tienen retardado el disparo para estos escenarios.

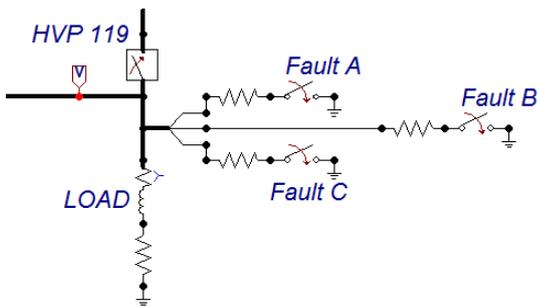


Figure 6: Modelo de falla EMTP

El ángulo de inicio de la falla define el ángulo de la tensión en el instante de la falla. El ángulo de inicio de la falla controla la cantidad de corriente transitoria asimétrica generada en la falla. La componente CC afectará a la saturación de los transformadores de corriente y por tanto a la velocidad de funcionamiento y la seguridad del relé. Para las pruebas de protección diferencial, DOW varía el ángulo de inicio de la falla y prueba, como mínimo, a 0, 30, 60 y 90 grados. Con los resultados, DOW puede observar la saturación, el peor caso y si se necesitan más estudios de sensibilidad. La falla de precarga se utiliza para obtener un funcionamiento estable del relé antes de simular la falla en la red. Algunos relés como los Siemens 7UM necesitan señales de tensión estable para poder funcionar bien, y utilizan la adaptación de la frecuencia de muestreo. La inyección de corriente de carga durante las pruebas diferenciales o direccionales de línea, mostrará la dirección de las corrientes que se inyectan.

### 2.4 Modelización de cables

Puede utilizarse un simple cable trifásico con el modelo equivalente de PI exacto para modelizar cables cortocircuitados de una red industrial. Para los relés, DOW no necesita el modelo dependiente de alta frecuencia para el cableado. De todos modos, los filtros antisolape cortan las frecuencias altas. No se realiza la modelización para el estudio de transitorios electromagnéticos.

## 3 Nueva prueba de diferenciales de línea en el Siemens 7SD80

En los próximos años se sustituirán los antiguos diferenciales de línea con cableado piloto. El equipo de relés de protección de DOW en Terneuzen hizo pruebas dinámicas en el relé Siemens 7SD80 para ver si el relé cumplía las especificaciones y podía utilizarse en las antiguas instalaciones. Se hizo un modelo EMTP de un alimentador de cable desde la subestación principal a la subestación de la planta. Se utilizaron como entrada los datos del transformador de corriente medidos con el equipo CPC 100.

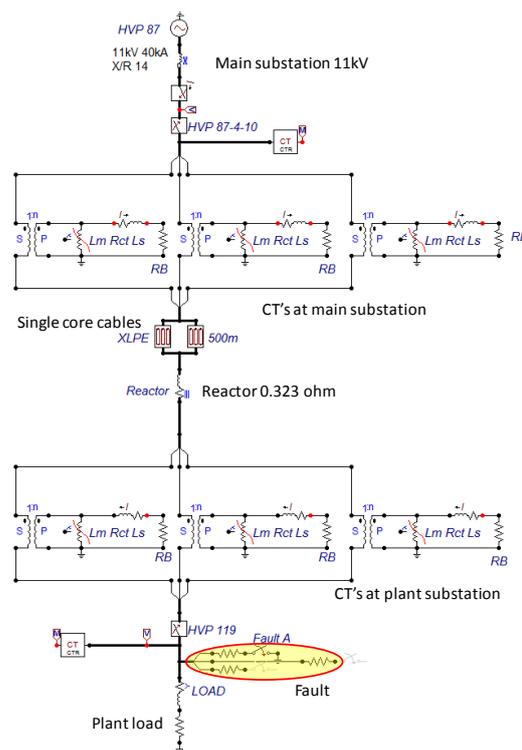


Figure 7: Modelo EMTP para la prueba diferencial de relé

Se simularon los siguientes casos:

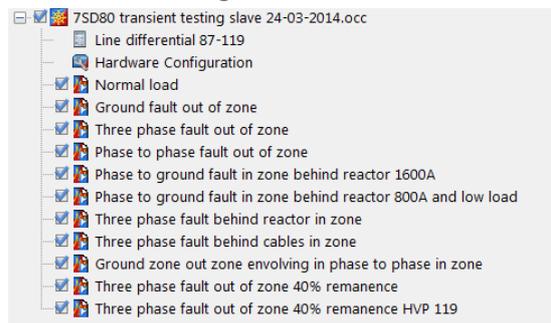


Figure 8: Casos de prueba

Las corrientes y tensiones simuladas se importan en Advanced Transplay, y se hace un archivo OCC maestro y otro esclavo. Se utilizaron dos equipos CMC 356 para inyectar las corrientes en dos lugares al mismo tiempo.

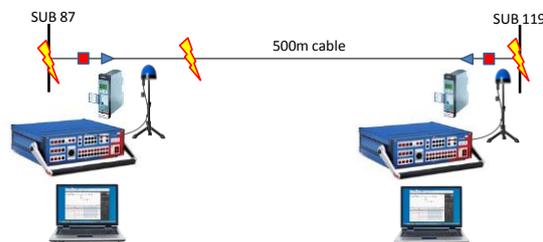


Figure 9: Configuración de la prueba para pruebas de diferencial de línea

Un ejemplo de las corrientes con saturación del TC se muestra en la siguiente figura:

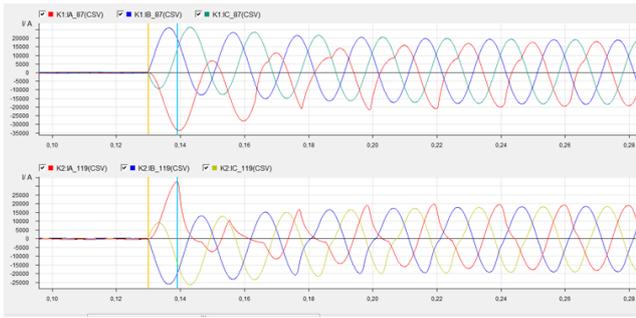


Figure 10: Corrientes simuladas en EMTP que se utilizan en Advanced Transplay

Para certificar el relé en DOW Terneuzen se realizan comprobaciones de los tiempos de disparo y de estabilidad.

### 4 Pruebas de sistemas de transferencia automática

El propósito de un sistema de transferencia automática es cambiar a una fuente alternativa de electricidad cuando se pierde una fuente primaria de electricidad. La conmutación automática permite al personal de la planta operar la planta sin necesidad de determinar si es seguro cambiar a una fuente alternativa de electricidad. El correcto funcionamiento de los esquemas de transferencia y rearranque de motores puede reducir el impacto comercial y ahorrar millones de dólares y, algo muy importante hoy en día, evitar el impacto medioambiental. En el sector se utilizan diferentes esquemas de transferencia. En DOW Terneuzen se utiliza el esquema de transferencia de tensión residual "principal - cierre manual - principal". La mayoría de las cargas en una planta química son los motores de inducción. Vea la disposición típica de la subestación de la planta.

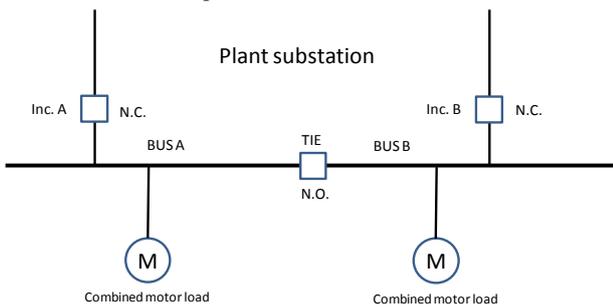


Figure 11: Esquema típico de "principal - cierre manual - principal"

Cuando se desconecta una barra de motor de la fuente de alimentación, la energía atrapada en la inercia y en el campo magnético de los motores de giro da como resultado una tensión de amortiguación en la barra. La magnitud y la frecuencia de la tensión residual disminuyen a medida que aumenta el deslizamiento de los motores. El esquema de transferencia de tensión residual es más lento que un esquema de transferencia rápida o en fase. Se permite la transferencia residual para cerrar el interruptor del

acoplador cuando la tensión de la barra de la fuente desconectada está por debajo del 25% del valor nominal. Este valor de consigna se puede disminuir para limitar las fuerzas mecánicas transitorias (pares) de los motores que están transfiriendo. En la norma IEEE C50.41-2012 se recomienda que la relación V/Hz debe ser inferior a 1,33 pu. En esta norma el tiempo de transferencia recomendado es de 1,5 veces T'do (constante de tiempo de circuito abierto del motor). Los tiempos de transferencia son ajustes de 1-2 segundos dependiendo de la coordinación de la red. Los ajustes de tiempo deben validarse y verificarse con pruebas dinámicas. También se comprueba el comportamiento del par de entrehierro durante la transferencia en la simulación de la transferencia y se verifica con los datos del fabricante.

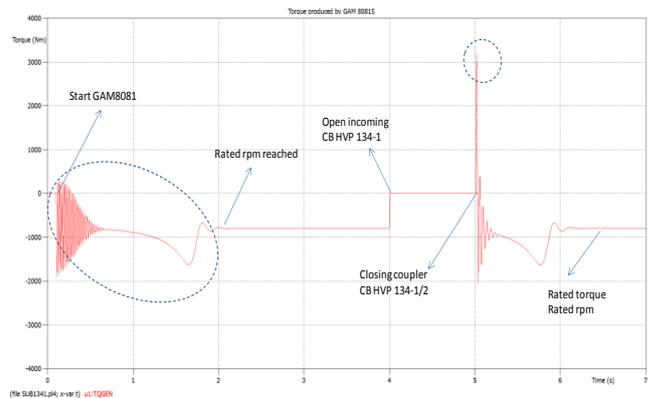


Figure 12: Pares de entrehierro transitorios del motor de inducción

Con las pruebas dinámicas, se comprobará la filosofía completa del esquema de transferencia automática: ¿Seremos inmunes a las caídas de energía? Para hacer un buen modelo dinámico, DOW necesita los datos del fabricante de los motores, la inercia, las características de carga y la inercia de carga, y estos datos se utilizan para hacer el modelo del motor. En EMTP se utiliza el modelo de inducción UM3. Vea el modelo de la figura 13.

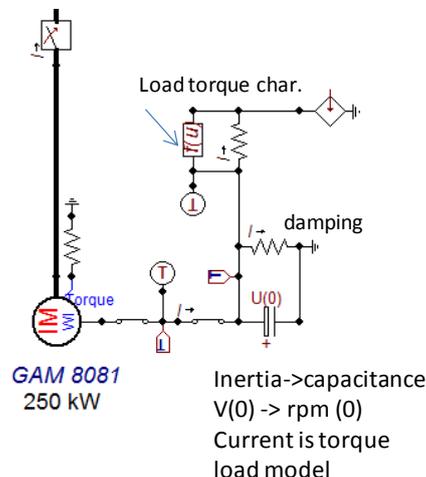


Figure 13: Modelo de motor UM3 EMTP

La curva de carga del motor también se simula, figura 14.

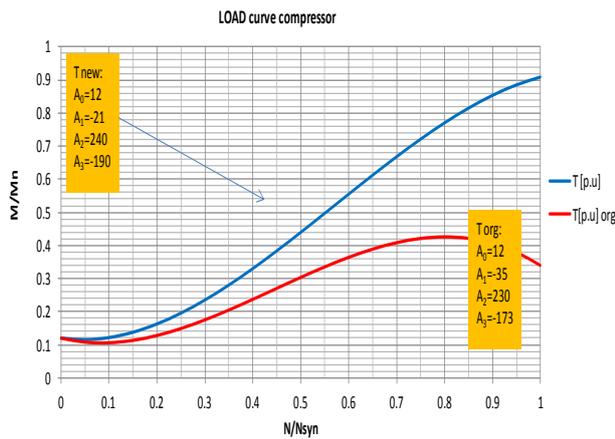


Figure 14: Modelo de carga

Los datos eléctricos del motor pueden rellenarse en el modelo UM. El modelo de carga se debe hacer con una fuente de corriente y un condensador. La resistencia se añade para la fricción y amortiguación. El modelo puede validarse con los datos de fábrica. Utilice una fuente de tensión sin impedancia a un 100% de la tensión para simular el arranque del motor y comparar los resultados de aceleración con los datos la prueba FAT. Una vez validado el modelo de motor, el modelo puede utilizarse en el modelo del sistema eléctrico completo. El modelo siguiente tiene dos fuentes eléctricas independientes de 11 kV, dos transformadores de potencia 11/6 kV, motobombas de 6 kV y motores de baja tensión. El sistema de transferencia mide las tensiones de barra en ambas barras y la corriente en ambas fuentes. Se simulan corrientes y tensiones para diferentes casos y se convierten a archivos COMTRADE a 10 kHz. Estos archivos COMTRADE se utilizan para su reproducción en dos equipos OMICRON sincronizados. En Advanced Transplay se hace un archivo OCC maestro y otro esclavo. El sistema de transferencia se compone de tres relés Siprotec. El software para los relés se realiza en código CFC. Con las pruebas dinámicas, DOW prueba el comportamiento de ATS frente al comportamiento del motor. En el pasado se utilizaba el módulo State Sequencer para este tipo de pruebas. No pudo probarse ningún comportamiento dinámico de la carga del motor.

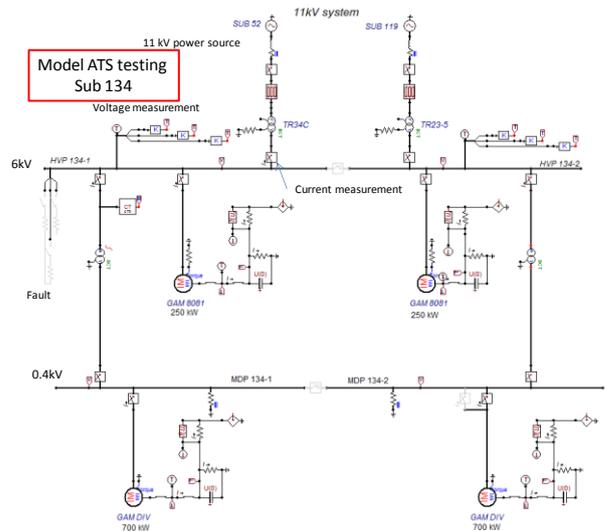


Figure 15: Modelo EMTD para la subestación con carga del motor

La transferencia se inicia cuando todas las tensiones de fase a tierra en un lado se encuentran por debajo del 70% y la barra sana tiene una tensión en las tres fases superior al 90% y no hay señal de bloqueo activa. La figura siguiente muestra la configuración de prueba de la subestación de 134.

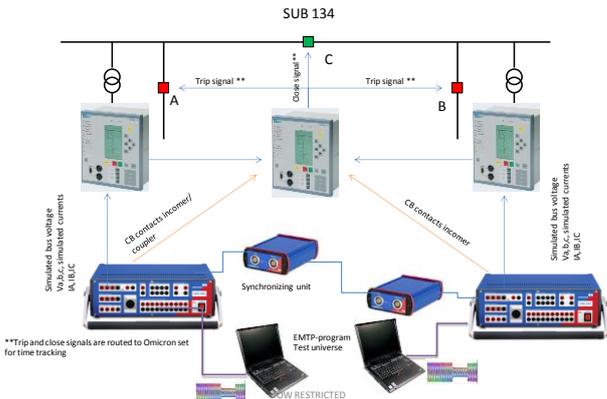


Figure 16: Configuración de prueba para las pruebas del sistema de transferencia "principal - cierre manual - principal"

Los dos equipos CMC se sincronizan con dos unidades IRIG-B. Los siguientes casos se simulan en EMTD y se reproducen:

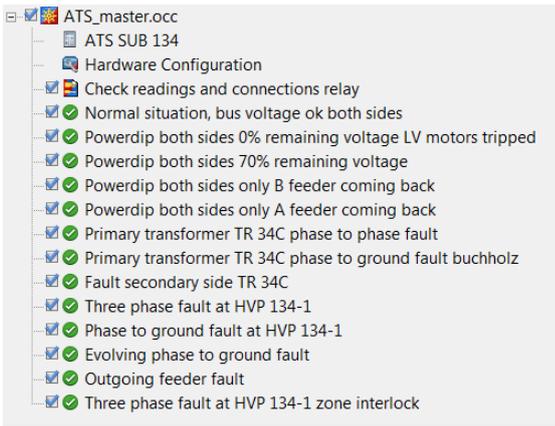


Figure 17: Casos simulados

El archivo maestro para una caída de energía en ambos lados con el regreso solo del alimentador B.

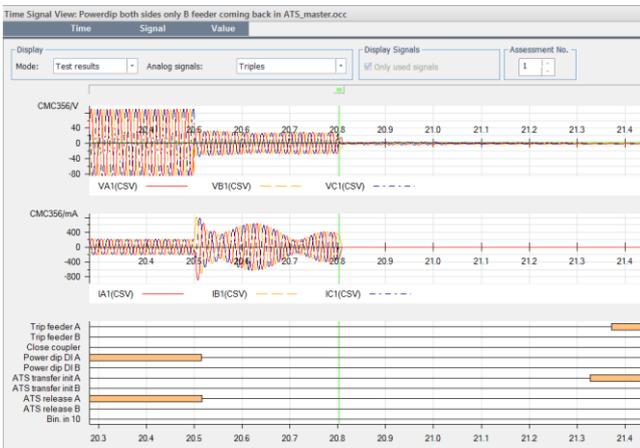


Figure 18: Salida de Advanced Transplay, archivo maestro

El archivo esclavo para una caída de energía en ambos lados con el regreso del alimentador B.

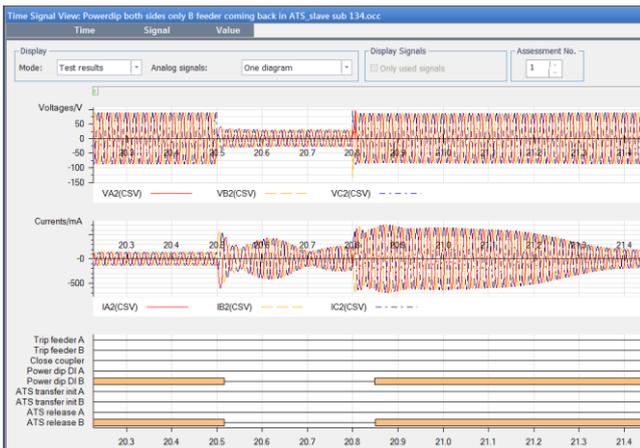


Figure 19: Salida de Advanced Transplay, archivo esclavo

En los trazos se puede observar la contribución del motor durante la falla y la corriente de avalancha una vez cerrado el acoplador. El esquema de transferencia se compone de 7 relés SJ sencillos. DOW descubrió que el rastreo de la frecuencia estándar de los relés tenía problemas con la frecuencia de amortiguación de la tensión residual cuando los motores están desconectados de la fuente de alimentación. Esto

conduce a una detección más rápida, falsa de subtensión de cero voltios. Cuando la tensión alcanza una caída de frecuencia por debajo de 25 Hz, el relé ya no puede definir el nivel de tensión y se inicia la transferencia y se produce un cierre más rápido del interruptor del acoplador. Este comportamiento se tiene en cuenta al definir el tiempo de transferencia.

## 5 Pruebas de diferenciales de transformadores

El modelo de matriz BCTRAN se utiliza para modelizar el comportamiento del transformador. Los elementos de la matriz para transformadores con cualquier número de devanados se pueden derivar de las impedancias de cortocircuito entre pares de devanados. Los cálculos son bastante complejos, y respaldan que debe utilizarse la rutina BCTRAN disponible en EMTP. La rutina BCTRAN produce las matrices de rama a partir de los datos de prueba de cortocircuito y de excitación positivos y homopolares. El modelo se valida simulando la prueba de excitación y la prueba de cortocircuito. Los resultados deben ser los mismos que en los documentos de las pruebas FAT. Un modelo producido mediante BCTRAN es bueno desde cc hasta 2 kHz. Se pueden tener en cuenta las pérdidas de excitación, pero el comportamiento no lineal no está representado y debe añadirse externamente, como para la simulación del comportamiento de corriente avalancha. DOW estaba muy interesado en la modelización de fallas internas de devanados. ¿Qué profundidad tiene la protección mediante relés del devanado especialmente con la saturación del transformador de corriente? Para modelizar estas fallas a tierra del devanado en EMTP deberá realizarse una nueva matriz de impedancia del transformador. La rutina BCTRAN calcula la matriz de impedancia sana  $R\omega L$ . Esta matriz sana deberá cambiar a la matriz de falla a tierra del devanado mediante la división del devanado  $n_2$  en dos devanados a, b cuando la falla a tierra está en el lado secundario, [5], [6]. Para la resistencia, es físicamente evidente un principio de proporcionalidad simple, por lo que:

$$R_a = \frac{n_a}{n_2} R_2 \tag{1}$$

$$R_b = \frac{n_b}{n_2} R_2 \tag{2}$$

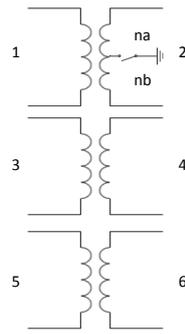


Figure 20: Falla de espira a tierra del transformador en devanado secundario

Las nuevas matrices se muestran a continuación:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{a1} & L_{1b} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} \\ L_{a1} & L_a & L_{ab} & L_{a3} & L_{a4} & L_{a5} & L_{a6} \\ L_{b1} & L_{b1} & L_b & L_{b3} & L_{b4} & L_{b5} & L_{b6} \\ L_{31} & L_{3a} & L_{3b} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \\ L_{41} & L_{4a} & L_{4b} & L_{43} & L_{44} & L_{45} & L_{46} \\ L_{51} & L_{5a} & L_{5b} & L_{53} & L_{54} & L_{55} & L_{56} \\ L_{61} & L_{6a} & L_{6b} & L_{63} & L_{64} & L_{65} & L_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & & & & & & 0 \\ & R_a & & & & & \\ & & R_b & & & & \\ & & & R_3 & & & \\ & & & & R_4 & & \\ & & & & & R_5 & \\ 0 & & & & & & R_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Se calcula una nueva matriz 7x7 en Excel. Para el cálculo de la inductancia propia y mutua entre las subbobinas A y B deben aplicarse las siguientes reglas:

$$L_a = \frac{L_{22}}{\frac{1}{k^2} + \frac{2\sqrt{1-\sigma_{ab}}}{k} + 1} \quad (5)$$

$$L_b = \frac{L_{22}}{k^2 + 2k\sqrt{1-\sigma_{ab}} + 1} \quad (6)$$

$$L_{ab} = \frac{L_{22}\sqrt{1-\sigma_{ab}}}{(k + \frac{1}{k}) + 2\sqrt{1-\sigma_{ab}}} \quad (7)$$

$$k = n_a/n_b$$

Si la bobina i se considera en la misma columna que a y b, entonces la bobina defectuosa

$$L_{ai} = L_{2i}\sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{L_a}{L_{22}} \sqrt{1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{L_{22}L_{ii}}{L_{2i}^2}}} \quad (8)$$

$$L_{bi} = L_{2i} - L_{ai} \quad (9)$$

Si la bobina i está arrollada en una columna diferente de a y b, entonces

$$L_{ai} = \frac{k}{1+k} L_{2i} \quad (10)$$

$$L_{bi} = \frac{1}{1+k} L_{2i} \quad (11)$$

$L_{22}$ ,  $L_{2i}$  y  $L_{ii}$  son elementos de la matriz L del transformador sano.  $\varepsilon$  se supone que es 1. El factor de dispersión  $\sigma_{ab}$  es igual a:  $\sigma_{ab} = \frac{n_a}{n_b} \sigma_{12}$  y  $\sigma_{12}$  es el factor de dispersión entre los devanados primario y secundario del transformador sano y puede calcularse mediante:

$$\sigma_{12} = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_{11}L_{22}} \quad (12)$$

Por ejemplo: la nueva matriz de impedancia puede calcularse para el 50% de la falla del devanado. El modelo en EMTP se expande con el transformador defectuoso utilizando el módulo de la biblioteca en EMTP. El nodo del devanado defectuoso constituye el 50% en el devanado secundario y se denomina ZZZZZZ.

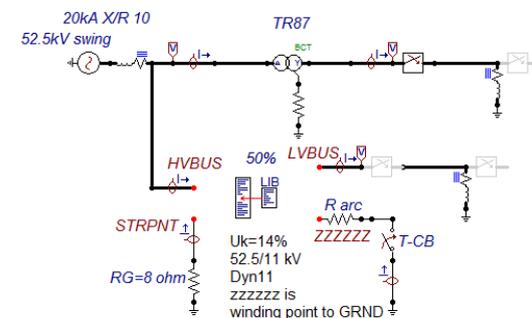


Figure 21: Modelo EMTP de falla del devanado secundario

Los resultados de la simulación se muestran a continuación y se usan para las pruebas del diferencial del transformador Siemens 7UT613. La falla del devanado se inicia cerrando el interruptor de potencia T-CB a 0,2 segundos en la fase C.

La tensión secundaria de 11 kV:

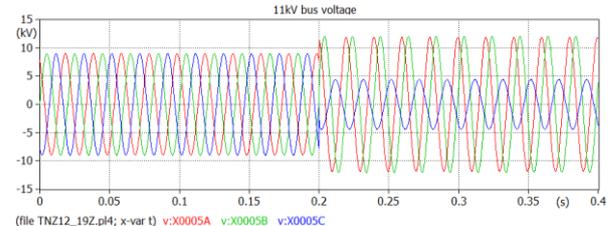


Figure 22: Tensión en lado bajo, falla en fase C

El salto de fase se debe a la falla a tierra. La tensión de la fase C cae un 50%. La tensión de excitación de la falla es del 50%.

La corriente del punto de estrella es:

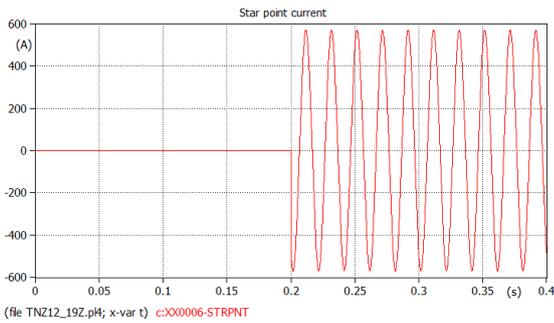


Figure 23: *Falla del 50% de corriente del punto de estrella en el devanado*

La corriente es de 570 A pico y 403 A eficaces y casi en fase con la tensión de falla de excitación. La modelización del transformador de corriente se añadió al modelo. Los transformadores de corriente se midieron con el dispositivo CPC 100 para obtener los datos de modelo adecuados. Se simularon diferentes casos y se inyectaron en el relé Siemens 7UT.

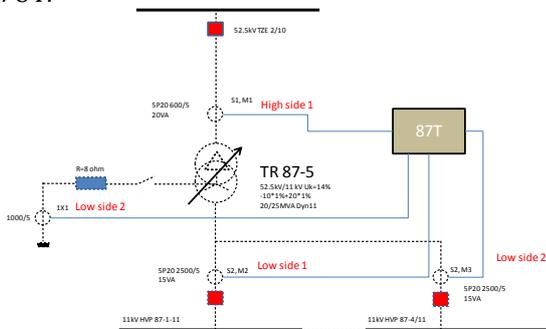


Figure 24: *Configuración del diferencial del transformador*

Se utilizaron dos equipos CMC 356 sincronizados para probar el relé.

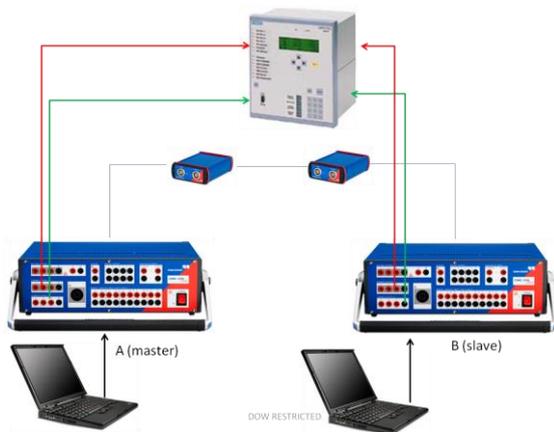


Figure 25: *Configuración de la prueba para pruebas de diferenciales*

Los siguientes casos se simularon y se reprodujeron en el relé Siemens 7UT.

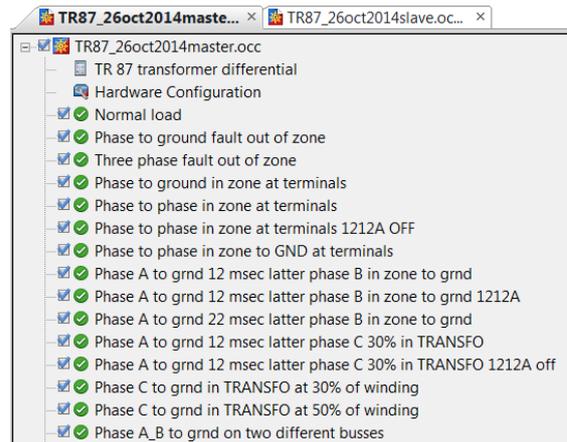


Figure 26: *Casos de prueba*

Durante las pruebas del relé, este tenía tiempos de disparo largos para fallas a tierra en evolución en el lado secundario. A veces, el relé no disparaba cuando una falla a tierra fuera de la zona se convertía en una falla dentro de la zona. Cambiando los ajustes después de consultar a Siemens hemos reducido los tiempos de disparo. Los transformadores de corriente cumplían los requisitos de los relés. Debido a la saturación del transformador de corriente, que se inició en el momento de la doble falla a tierra, el relé bloqueaba el disparo mediante segundos armónicos. Una vez desaparecida la saturación del transformador de corriente los segundos armónicos desaparecen y el relé se dispara.

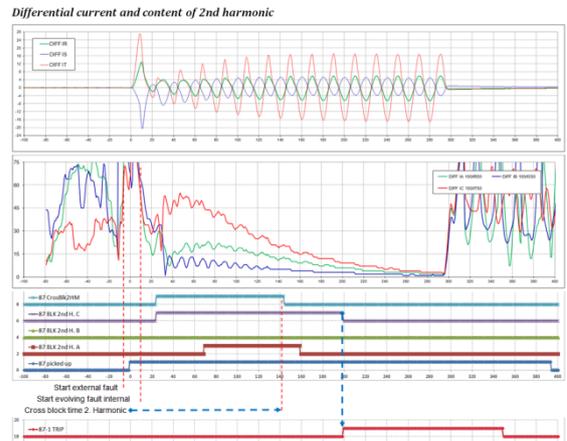


Figure 27: *Análisis detallados de retardo de disparo en 7UT*

Esta fue una buena experiencia de aprendizaje y una buena prueba para validar los ajustes. Las experiencias son que el 90% de las fallas se inician con fase a tierra en algún lugar en el punto más débil del sistema y aumentan a una falla de fase a fase a tierra. También se necesita una eliminación rápida de fallas en este caso y los ajustes del relé de protección deben comprobarse para este fin. En estos casos la modelización para la prueba de relés de protección ha demostrado aportar valor añadido.

## 6 Pruebas de relés de barra

En 2013/2014 se construyó una nueva instalación Cogen en DOW Stade. Se instaló una nueva



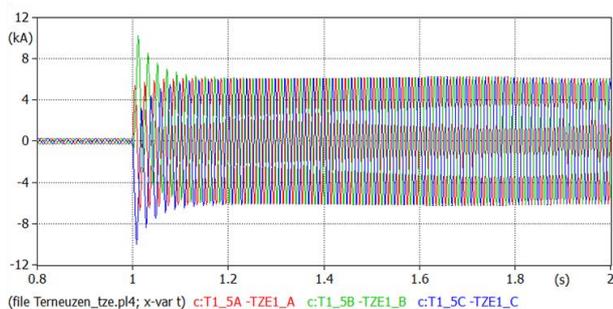


Figure 31: Contribución del transformador

La contribución del transformador es de aprox. 4 kA, figura 31. El generador también contribuye aprox. 3 kA, figura 32.

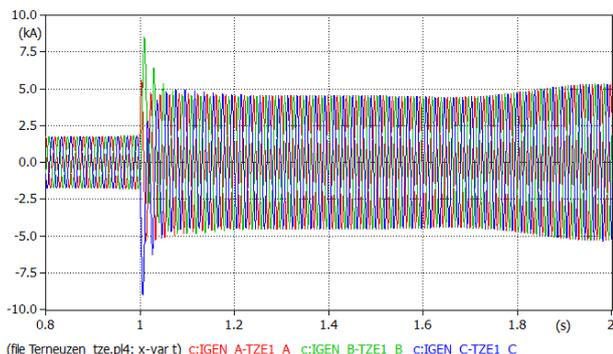


Figure 32: Contribución del generador

DOW tenía previsto obtener una corriente de falla de aproximadamente 7 kA en un seccionador y de 7+4 =11 kA en el otro relé del seccionador. La simulación mostró la siguiente contribución total en un seccionador, vea la figura 33.

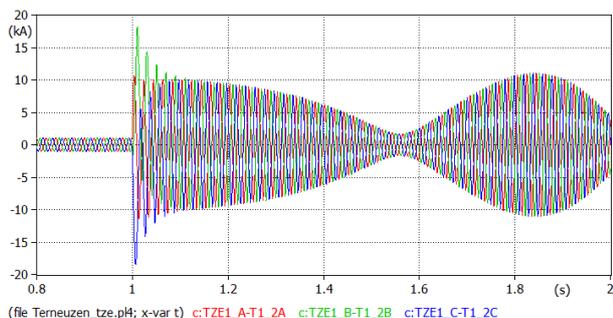


Figure 33: Corriente en el interruptor del seccionador [Contribución de TR+GT]

Los relés del seccionador se configuran con una curva extremadamente inversa IEC para obtener la correcta coordinación actual. La turbina de gas se acelera debido a que no pueden introducirse en el sistema megavatios. Por tanto la frecuencia de la contribución del generador cambia. La contribución sobre el seccionador no es constante, vea el gráfico de la figura 33. El algoritmo extremadamente inverso del relé es una función de integración, por lo que los tiempos de disparo no son los indicados en el manual con la inyección normal ecuación 13.

$$\text{EXTREMELY INV. (Type C)} \quad t = \frac{80}{(1/p)^2 - 1} \cdot T_p \quad [s] \quad (23)$$

$$\int_0^{t_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (34)$$

t (I) se calcula con la ecuación (13) y dt es intervalo de tiempo de cálculo, para el relé de Siemens de 10 ms. En Excel o ATP se puede calcular fácilmente el tiempo de disparo de la curva IEC de la corriente transitoria. Con las simulaciones y las pruebas afinamos los ajustes del relé del seccionador.

## 8 Conclusiones

Las pruebas dinámicas de relés aportan un valor añadido a los sistemas de relés críticos en el sector químico. Las pruebas dinámicas se realizan tras las pruebas de funcionamiento normal. Los fabricantes cada vez agregan más funciones a una sola caja de relés, lo que implica esquemas de relés y pruebas más complejos. Los técnicos necesitan más conocimiento sobre la lógica de los relés y la comunicación. DOW cuenta con dos años de experiencia con las pruebas dinámicas en sistemas críticos. Puede abordarse lo siguiente:

- El desarrollo y validación de la modelización en EMTP ocupa el 80% del tiempo. Si entra basura, sale basura. Así que la modelización y la validación llevan tiempo, pero son esenciales para el éxito del esfuerzo.
- El uso de la simulación EMTP para las pruebas ya puede detectar incipientes errores de diseño en una fase temprana del proyecto.
- Retardos detectados en disparos de diferenciales del transformador debidos a la saturación del transformador de corriente y al bloqueo de segundos armónicos. DOW tenía que cambiar la configuración estándar para los relés 7UT.
- Puede probarse la lista completa de ajustes y no hay que bloquear grupos de ajustes durante esta prueba. Esto es una ventaja en las pruebas de relés de protección del motor y de protección del generador.
- Los ajustes pueden afinarse, después de las pruebas, para diferentes fallas del sistema eléctrico.
- Puede simularse y probarse la amortiguación de la tensión residual de motor de las barras del motor para los sistemas de transferencia. Se pueden realizar análisis de sensibilidad de diferentes parámetros como la inercia y la carga del motor. Se prueba también el comportamiento de rearmado del motor después de la transferencia.
- Se necesitan antecedentes sobre la modelización transitoria para poder utilizar EMTP para los relés. La interfaz de usuario ATPDRAW agiliza el trabajo de modelización y la interfaz de usuario es más sencilla.
- La flexibilidad de EMTP constituye también una desventaja para un ingeniero que no tenga experiencia suficiente para entender todas sus complejidades.

## Referencias

- [1] ATP rule book
- [2] J. L. Blackburn; Protective relaying
- [3] ETAP 11
- [4] Siemens Sigras
- [5] D. Dakhlan; Modeling internal faults in three winding transformers for differential protection.
- [6] M. Kezunovic; A new ATP add-on for modeling internal faults in power transformers.

## Acerca del autor



**Steven de Clippelaar** es ingeniero de sistemas eléctricos y trabaja para el Centro de Tecnología de Energía de DOW Chemical.

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 140 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.