

RELEVADORES DE PROTECCION REGISTRO DIGITAL DE FALLAS Y ANALISIS

ELMO PRICE

MANAGER, APPLICATION ENGINEERING AND CONSULTING

POWER AUTOMATION AND PROTECTION DIVISION

ABB POWER T&D COMPANY INC.

CORAL SPRINGS, FLORIDA



PRESENTADO A EL

4TH SIMPOSIO

IBERO AMERICANO DE PROTECCIONES

MONTERREY, MEXICO

NOVIEMBRE 15-18, 1998

RELEVADORES DE PROTECCION REGISTRO DIGITAL DE FALLAS Y ANALISIS

Elmo Price
Manager, Application Engineering Consulting
ABB Power Automation & Protection Division
Coral Springs, Florida

Introducción

La aplicación de la función Registro Digital de Fallas (DFR = Digital Fault Recording) en los relevadores de protección ha incrementado considerablemente la disponibilidad de información para el análisis de perturbaciones en el sistema. Se ha extendido el rango de aplicaciones de DFR más allá de las grandes subestaciones críticas a un bajo costo razonable. Mejoras en comunicaciones, el descendiente costo de la tecnología y la conectividad de aparatos “inteligentes” en la subestación ha hecho la información de fallas accesible inmediatamente para análisis más rápidos e inteligentes. Los programas de análisis utilizando la información del DFR han probado ser valiosas herramientas en el análisis de la operación de los relevadores de protección y el sistema de potencia. Nuevas capacidades usando datos distribuidos permiten nuevos acercamientos al análisis de perturbaciones usando datos de terminales multiples para proporcionar soluciones más exactas. Esta tendencia continuará.

Este artículo discute las capacidades del Registro Digital de Fallas y las herramientas de análisis en dos generaciones de relevadores microprocesados y como la información de falla es usada para las pruebas de desarrollo del producto y el análisis de aplicaciones en un sistema real. Hay cuatro partes. Éstas son:

- Una discusión del Registro Digital de Fallas del relevador. . . elementos importantes y cómo se graba los datos del evento,
- Los registro de falla usados como una herramienta de desarrollo de producto,
- Las herramientas de análisis de falla y análisis de fallas del sistema con ejemplos de análisis de las mismas, y
- Tendencias

El propósito es traer al ingeniero de protecciones a un nivel más alto de entendimiento de los registros de la falla y su uso para aplicaciones en el sistema y análisis.

El Registro Digital de Fallas

Un registro de fallas adecuado para el funcionamiento de relevador de protección y el análisis del sistema requiere datos grabados antes, durante y después de una perturbación del sistema. Debe haber información suficiente en la forma de datos análogos y de estado digital (on/off) para analizar y, si necesario, recrear el evento. También puede ser necesario coordinar el funcionamiento del relevador con otros dispositivos alrededor del sistema. El relevador de protección puede hacer esto. Su propósito primario, sin embargo, es aclarar la falla fiablemente y restaurar el sistema con tiempo de parada y daño del sistema mínimo. Limitaciones de diseño impuestas por presiones de mercado competitivo limitan las capacidades de funciones secundarias distintas a protección tales como registro de la falla. Estas limitaciones, sin embargo,

puede ser dirigidas a un mejor entendiendo de las fallas usando registros y un diseño más práctico del registro de fallas. La siguiente discusión se dirige a los requisitos de información para el registro de fallas del relevador de protección.

Señales Análogas y Digitales (on/off)

Señales análogas

Las señales análogas son las entradas al relevador digitalmente muestreadas de voltaje y corriente. La frecuencia de muestreo está limitada por el diseño del relevador. La necesidad de filtrar frecuencias más altas en las señales análogas que son perjudiciales a la medición precisa de las muestras de la frecuencia fundamental es dependiente del algoritmo del relevador. Típicamente, un método de filtro se aplica para limitar el análisis de la frecuencia a la mitad la frecuencia de la de muestreo por el anti-aliasing. Otras consideraciones también pueden reducir aún más la frecuencia del análisis. La Tabla 1 muestra las frecuencias límites de Nyquist para las muestras especificadas.

Tabla 1. Análisis La Frecuencia y Resolución Basados en Frecuencia de Muestreo

Muestras por Ciclo	Frecuencia de Muestreo, Hz,	Frecuencia Limite de Nyquist, Hz,	Resolución del Análisis digital, ms,
4	240	120	4.167
8	480	240	2.083
12	720	360	1.389
16	960	480	1.042
20	1200	600	0.833

Hay otras técnicas que permiten la recolección de datos de muestra antes de filtrarse es empleado para el algoritmo de la protección. En todo caso, la frecuencia de la muestra afecta los requisitos de memoria del relevador directamente para grabar y el rango de frecuencia que puede analizarse con el registro de la falla.

Otro factor a considerar es el efecto de frecuencia de la muestra en el análisis a realizarse. La Tabla 2 refleja el uso típico de los datos convencionales [no-protección] de DFR. Está basada en una encuesta de automatización de subestación de 20 Empresas de Energía compilado por el autor en 1992.

Tabla 2. Use de Datos de DFR

% de Uso	Tipo de Análisis	Comentarios
70	Análisis de la falla	Tipo de la falla, localización, secuencia de eventos, etc.,
15	Comprobación de parámetros de sistema	Impedancia de la línea, Niveles de corriente de Falla, etc.,
8	Análisis de Armónicos	Limitado a distribución según los encuestados

Ochenta y cinco por ciento del uso es para el análisis de 60Hz. Del resto 8 % fue para el análisis armónico. . . determinando el contenido de armónicos de las señales análogas. Este análisis generalmente se limita normalmente a las aplicaciones especiales en el sistema de la distribución o mayores puntos de carga industriales. La búsqueda de problemas se define como verificar el estado de contactos, la presencia de voltajes, la sucuencia de eventos, etc., y generalmente no depende de la frecuencia. Puede observarse de los datos que las frecuencias de Nyquist listados en Tabla 1 para los datos analógicos son adecuados para la mayoría de los usos en análisis, particularmente para las fallas de línea de transmisión.

Señales Digitales (on/off)

La Figura 1 es un ejemplo de una estructura típica de lógica de relevador. Los elementos operativos son la impedancia, voltaje, corrientes, direccionales u otras unidades de medida que operan basados en las entradas de señales análogas y un valor del umbral fijo. Ellos están encendidos o apagados. Las entradas binarias son entradas de voltaje en el relevador para proporcionar información de estado de los dispositivos externos. La lógica del relevador es normalmente en estructura modular que utiliza entradas de los elementos operativos, entradas binarias, o salidas de otros módulos de la lógica. Las salidas individuales del relevador operan basado en la afirmación de señales de la lógica específica.

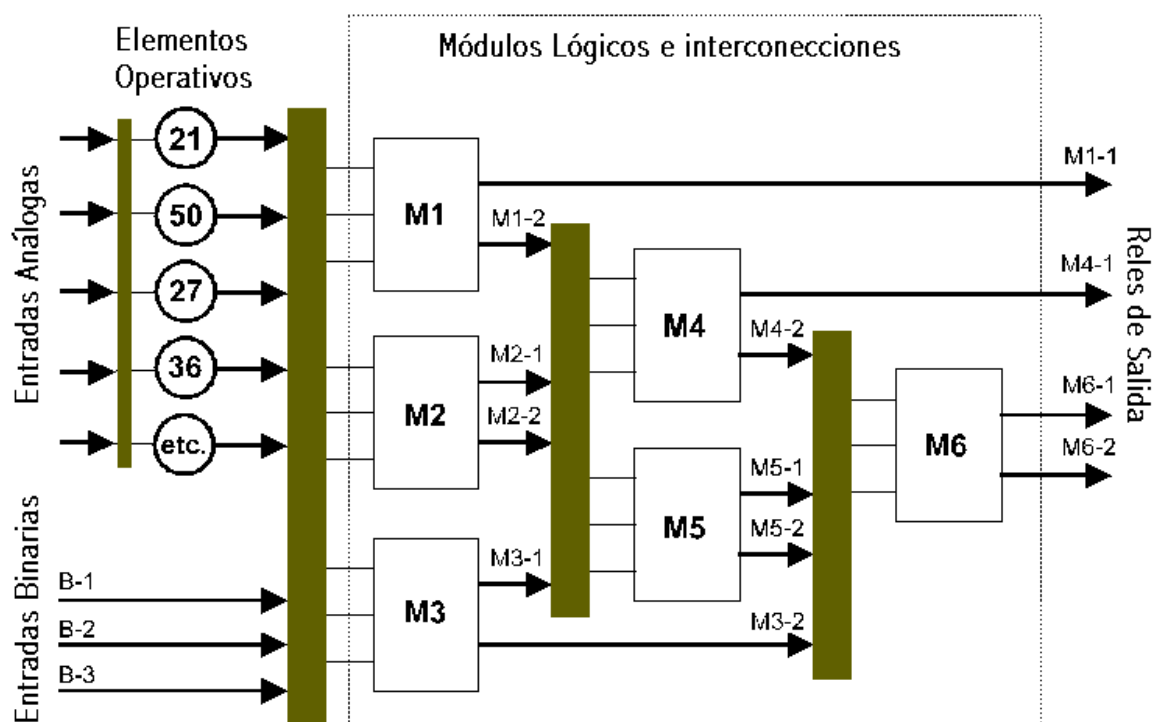


Figura 1. Estructura de la Lógica de relevador

La resolución de los elementos operativos del relevador y el estado de la lógica generalmente se proporcionan al intervalo donde los elementos o la lógica son calculados. Si un elemento se calcula una vez cada ciclo entonces su resolución es aproximadamente 16.67 ms. Esto es encendido o apagado durante el ciclo completo. Si el elemento o la lógica se evalúa cada muestra entonces la resolución es el periodo de la frecuencia de muestreo. Diferentes elementos operativos del relevador puede tener resoluciones diferentes. Es entendiendo que las resoluciones de los datos de estado digitales de un relevador particular... los elementos operativos, entradas/salidas y su lógica, son importantes para analizar la actuación del relevador. La Tabla 1 muestra la resolución mínima para el análisis de señales digitales (tiempo entre las muestras). Debe notarse que entre mayor número de elementos operativos y lógica de estado disponibles para analizar un proceso operativo más fácil el análisis.

Coordinación de Señales Digitales y Análogas

La señal de estado de una unidad operativa es generalmente el resultado de un cálculo que usa varias muestras de datos que son reunidos previamente al cálculo de la unidad operativa. Por ejemplo, puede ser que una unidad de impedancia sólo se computa una vez en un ciclo y que se use muestras recolectadas en el ciclo anterior. Esto se ilustra en Figura 2. La región sombreada muestra los datos reunidos para el cómputo de la próxima unidad de impedancia (Z). El cómputo se hace cada ciclo usando los correspondientes datos del ciclo muestreado. Esto muestra cómo la salida de unidad de impedancia Z se afirma en algún momento después de la iniciación de la falla y se de-afirma en algún momento después que la falla se aclara. Este retraso es dependiente del diseño del relevador y debe ser considerado en el proceso del análisis.

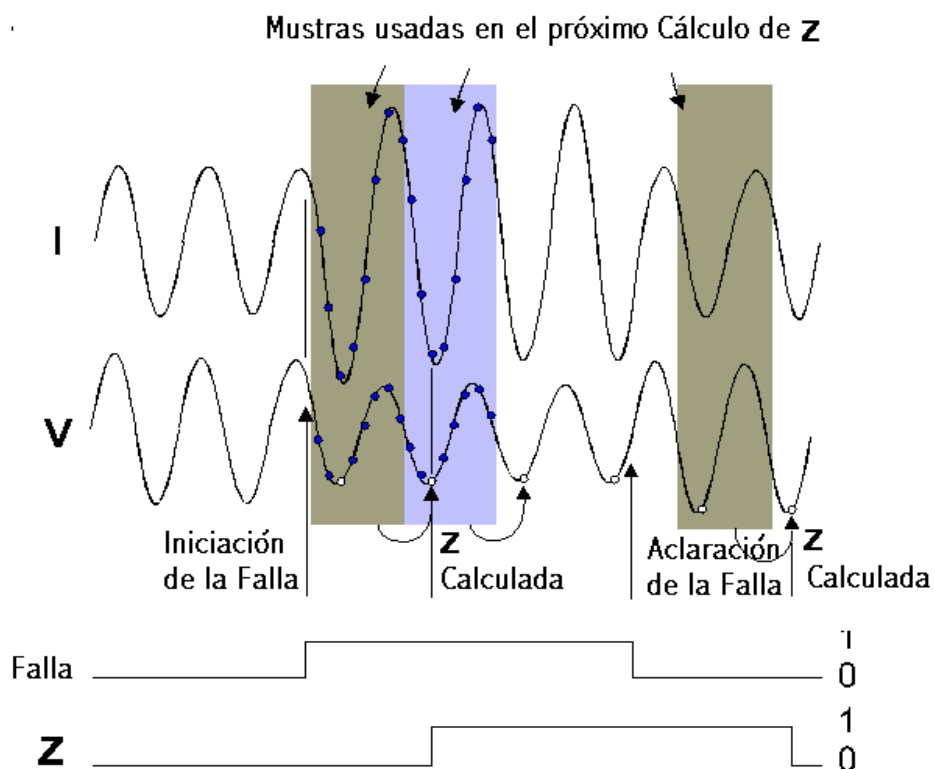


Figura 2. Coordinación de Señales Digitales y Análogas

El Registro de Falla de Relevador

Lo siguiente se proporciona para permitirle al ingeniero de relevadores de protección desarrollar y entender los elementos claves del registro de fallas y cómo un registro de la falla se produce en un relevador. Sólo se proporciona como un ejemplo y puede diferir en alguna manera de soluciones igualmente buenas proporcionadas por otros fabricantes de relevadores. Hay cuatro problemas básicos para entender. Éstos son:

1. Cobertura del sistema,
2. Detección de la iniciación del evento,
3. Requisitos de datos de Pre - y Post -iniciación, y
4. La fecha y tiempo de evento.

Cobertura del sistema

Debido a la limitada memoria del relevador puede ser deseable limitar los registros de falla gravados a las fallas en la línea protegida o en las proximidades cercanas de la línea. La recolección de datos para las fallas remotas pueden llenar rápidamente la memoria. Hay varias maneras de restringir la cobertura utilizando los elementos operativos del relevador. Un método típico podría ser usar una zona hacia adelante y una zona de impedancia inversa para definir el límite para los registros de la falla gravados. Esto asegura registros gravados para las fallas en la línea protegida, el próximo barraje y el barraje reverso. El gravar un registro también puede estar restringido a aquellas condiciones en las cuales el relevador dispara. En algunos casos puede ser apenas deseable capturar todas las fallas remotas posibles o aquéllas dentro de la zona de arranque. El relevador, sin embargo, debe verificar a menudo por los datos del último caso porque registros frecuentes puede producir sobre-escribir registros. La mayoría de los relevadores tienen ajustes para proporcionar algún grado de flexibilidad.

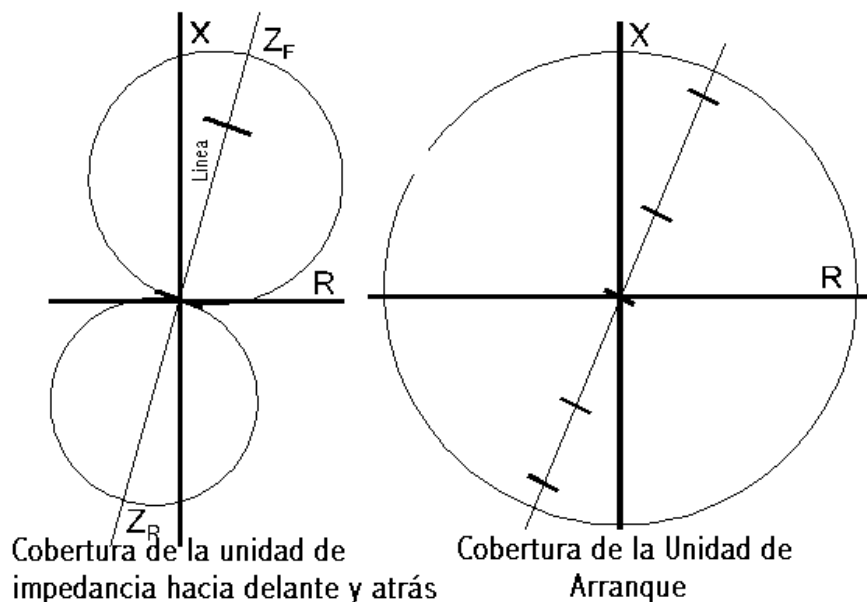


Figura 3. Cobertura de DFR

Detección de la Iniciación del evento

La detección de la iniciación del evento, a menudo llamada la unidad de arranque o arranque general, es un detector de sobrecorriente, detector de bajo voltaje, detector de la proporción de cambio, u otro medio para descubrir el principio de una falla u otro evento donde un registro de la falla se desea. El detector de la proporción de cambio se ha usado eficazmente para identificar el momento cuando principia una falla y otros súbitos cambios de parámetros del sistema con una resolución de un periodo de muestra. Sigue una explicación del detector de la proporción de cambio.

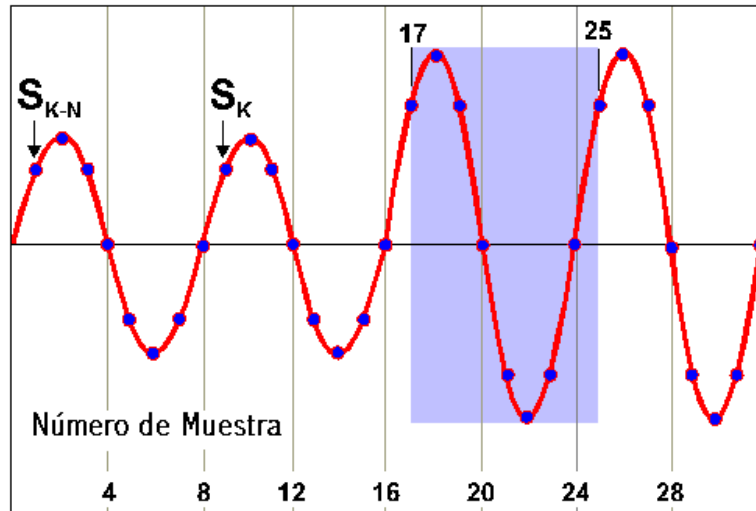


Figura 4. Funcionamiento del Detector de Proporción de cambio

Figura 4 muestra una función periódica típica del seno a ser muestreada 8 veces por ciclo. En el caso general, bajo condiciones de estado estable la magnitud de cada muestra es medida como:

$$S_K = A \sin(K2\pi / N + \theta)$$

dónde A es una constante, representando la amplitud de la cresta de la función, θ es una constante dependiendo dónde la muestra 0 es tomada dentro del ciclo, $K = 0, 1, 2, \dots, N-1$, y N es el número de muestras por ciclo.

De un ciclo al próximo, las magnitudes de la muestra respectivas S_K y S_{K-N} son iguales si no hay perturbación entre ellos. El detector de cambio compara continuamente la muestra actual S_K con S_{K-N} un ciclo atrás. Si hay una diferencia mayor que un valor especificado entonces el detector de cambio operará. En este caso, con una frecuencia de muestreo de 8 muestras por ciclo, el primer cambio ocurre al comparar la muestra 17 con la 9. El detector de cambio se afirma como las transiciones de la función a la nueva condición de estado estacionario [la falla] y la diferencia entre S_K y S_{K-N} regresa a cero. Esto es indicado por el área sombreada entre las muestras 17 y 25. La condición de la falla de estado estable continuará después de muestra 25 hasta que alla otro cambio de parámetro creado por otra condición de falla subsecuente o aclaramiento de la falla. De nuevo el detector de cambio operará hasta que una nueva condición operativa de estado estable se establezca. La resolución de la detección de la falla es el periodo $(1/f)$ de la frecuencia a la que se verifica el detector de cambio. Esto ha demostrado ser una forma muy fiable de detectar la falla a una respuesta menor de 1.0 ms.

Requisitos de datos de Pre - y Post -iniciación

Datos de Pre-iniciación

Los datos de voltaje y corrientes de prefalla [la iniciación] son las cantidades estables que existieron inmediatamente antes de iniciar la falla. La condición del prefalla no ha cambiado durante mucho tiempo salvo las variaciones debido a los cambios de carga. Estos cambios son medidos en segundos en lugar de ciclos y son por consiguiente inadvertidos. El ciclo que inmediatamente precede al principio de la falla, como medido por un detector de la proporción de cambio de alta velocidad como se describió anteriormente, será igual que los anteriores 10 o 20 ciclos. Por consiguiente, el mínimos datos de prefalla son requeridos.

Los datos de prefalla requeridos son definidos por la selección de fase fallada del relevador y el algoritmo de localización de fallas o los datos del programa de análisis de falla fuera de línea. Para el análisis correcto que requiere el uso de cantidades fasoriales de prefalla calculados a partir de un ciclo [el periodo] de muestra de datos, es necesario que las muestras de prefalla tengan la correcta alineación de fase con el ciclo [el periodo] de datos de la falla muestreados usados en el cálculo. El ciclo de la falla usado podría ser cualquier ciclo durante la falla. La alineación de la fase correcta requiere que los dos juegos de muestras, prefalla y falla, sean tomados a partir de los mismos puntos de tiempo en sus ciclos respectivos. Esto se muestra en Figura 5. Si usted fuera a comenzar contando desde uno con la primera muestra de ciclo de prefalla hacia arriba y no incluyera la primera muestra de ciclo de falla seleccionada, al dividir ese número por la proporción de la muestra (samples/cycle) el residuo debe ser cero.

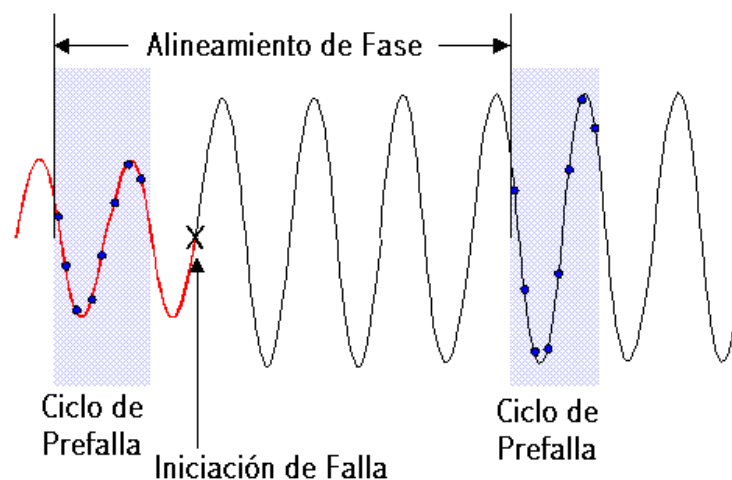


Figura 5. Alineación de Fase Ciclos de Prefalla y Falla

Dos métodos pueden usarse para proporcionar los datos de prefalla requeridos. El primero es usar sólo un ciclo de datos de prefalla y reestructurar el orden de la muestra cambiando las muestras apropiadas como ilustra en la Figura 6.

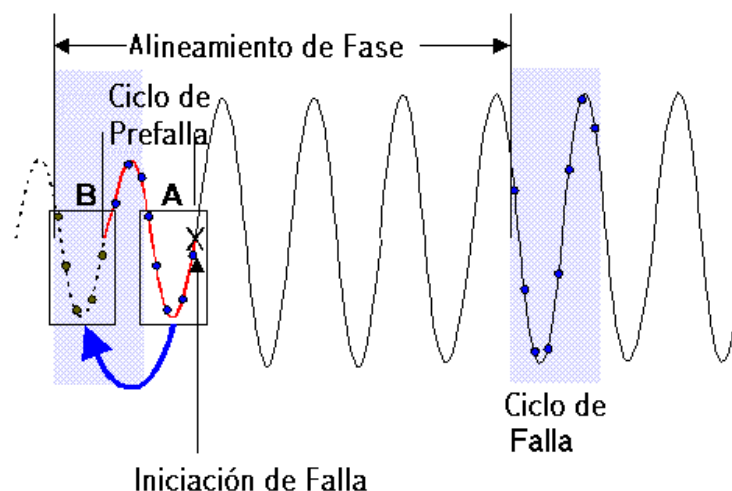


Figura 6. Alterando el Orden de la Muestra durante Un Ciclo de Datos de Prefalla

En este caso de ocho muestras por ciclo, las últimas cinco muestras de los datos de prefalla grabados contenidos en el bloque A son iguales a las últimas 5 muestras en bloque B que preceden el registro de prefalla que no se grabó. Las muestras pueden re-ordenarse de nuevo antes del calculo fasorial para producir el mismo resultado como con el alineamiento correcto de fases. Los fasores también pueden calcularse directamente de las muestras del ciclo de pre-falla y entonces el cambio de la fase apropiado puede agregarse para proporcionar la alineación de la fase correcta.

El segundo método es usar 2 ciclos de datos de prefalla. Con dos ciclos habrá siempre un ciclo completo de datos de prefalla que tendrán alineación de la fase correcta con cualquiera ciclo de la falla seleccionado.

Datos de la post - Iniciación

Es deseable capturar la falla por su completa duración, desde el principio hasta la aclaración y recierre. Se recomiendan cuarenta y cinco ciclos para las aplicaciones convencionales de DFR. Para los relevadores de protección no es siempre práctico hacerlo con un registro continuo. Se esperaría que disparos correctos en zona 1 con relevadores microprocesados estén en los dos a tres ciclos. Esto es seguido típicamente por dos a cuatro ciclos de aclaramiento del interruptor. Por consiguiente, un registro de datos de 7 ciclos post-iniciación es adecuado para la mayoría de zona 1 u otras funciones con tres ciclos o menos de disparo. Un nivel mayor sería capturar datos por disparos secuenciales en la línea protegida. Disparo secuencial es cuando un terminal remoto aclara una falla de final de línea y el extremo local responde al voltaje del sistema y cambios de la corriente y dispara. Un ejemplo sería una función de disparo de pérdida de carga donde el extremo remoto dispara y el extremo local responde después del aclaramiento del interruptor remoto. Considerando que la lógica del disparo y disparo del interruptor serían secuenciales (uno después del otro) para los relevadores terminales de la línea, deben considerarse 14 ciclos de poste-iniciación. No hay ninguna razón claramente para guardar 45 o más ciclos de datos para las fallas en zona 2 para capturar condiciones de extremo de línea y/o recierre si hay una manera más práctica de conseguir la información necesitada.

Para una falla en zona 2 un registro con datos de pre- y post-iniciación pueden grabarse desde el principio de la falla. El detector de cambio operará de nuevo cuando el interruptor opera al final

del tiempo de la zona 2 y puede usarse para comenzar un segundo registro. También, un cierre en condición de falla producirá un registro adicional. Un recierre exitoso necesita no generar un registro de la falla. No hay necesidad real por los datos de falla de estado estable interinos excepto como una medida para mantener la coordinación del tiempo. Las nuevas generaciones de relevadores de línea son capaces de coordinadamente cronometrar estos registros a menos de un milisegundo.

Fecha y Tiempo

La fecha y tiempo de los eventos pueden ser estampado con una exactitud limitada por la frecuencia de muestreo del relevador. La falla ocurre en algún momento entre dos muestras. La primera muestra después de la falla opera el detector de cambio. Esta muestra comienza el registro y se etiqueta con el tiempo del reloj del relevador. Pueden coordinarse registros múltiples del mismo evento usando las etiquetas de tiempo. El reloj del relevador es periódicamente ajustados con un IRIG, GPS u otro signo de tiempo sincronizando para proporcionar coordinación con otros dispositivos del sistema.

Grabando el Registro de la Falla

Lo siguiente es un escenario típico para un registro de falla usando los cuatro elementos discutidos anteriormente. Una vez el inicio de la falla ha ocurrido se mantienen dos ciclos de prefalla [la iniciación] y se recogen los datos de post falla durante los próximos 14 ciclos. La impedancia de la falla se calcula por cada muestra de post falla durante los 14 ciclos y si se determina que están dentro del alcance de la zona de registro de falla los 16 (2 pre [la iniciación] y 14 post-falla) ciclos recogidos se marcan con el tiempo y se gravan. La detección del cambio no se requiere mientras se está grabando, pero después de los 14 ciclos (el extremo del registro) el detector de cambio se supervisa de nuevo. Si no hay ningún cambio (Figura 7) la falla se ha aclarado y el evento ha terminado con un recierre exitoso.

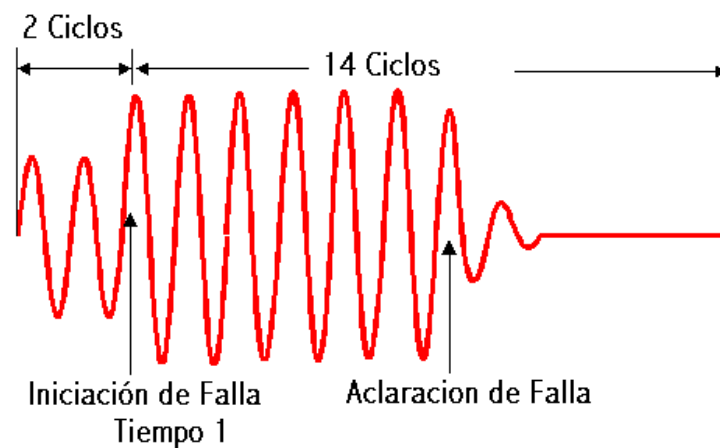


Figura 7. Solo Evento del Registro típico

Si las fallas todavía persisten (Figura 8), como una falla en zona 2, el detector de cambio no operará hasta que la falla [u otra perturbación interina] se aclare. En ese momento un segundo

registro del evento de la zona 2 es guardado y etiquetado con el tiempo. En caso del recierre se grabarán registros de la falla adicionales si la falla todavía está presente.

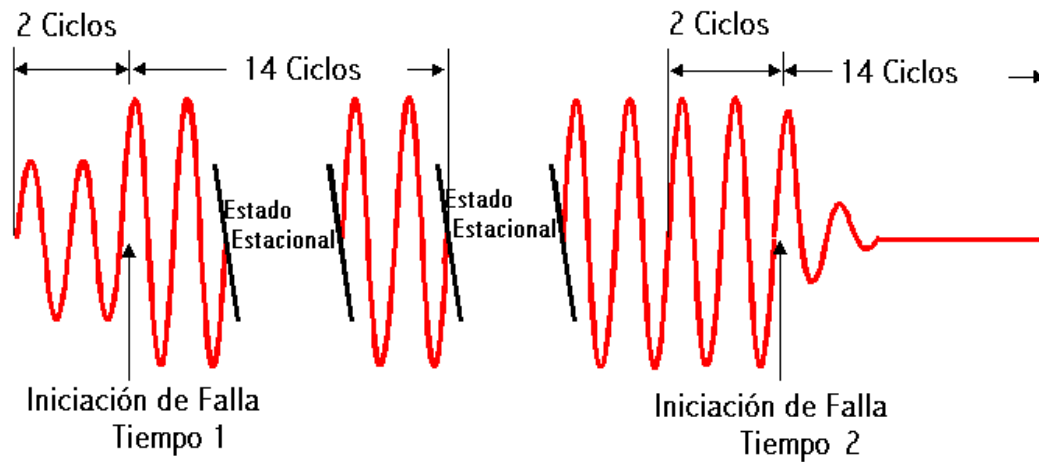


Figura 8. Dos Eventos del Registro típico

Ejemplos de Registro de Falla Digitales en los Relevadores

En el Apéndice A se proporcionan ejemplos de registros de dos generaciones de relevadores de distancia. La Tabla 3 resume mejoras hechas en la segunda generación de relevadores. Hay aumentos en la frecuencia de muestreo y los ciclos de datos de la falla guardados. Además, el cambio más significativo está en el número de señales digitales grabadas. Esto permite mejor comprensión del funcionamiento del relevador y más fácil análisis de la falla. Estas capacidades continuarán aumentando con cada nueva generación de relevadores de protección.

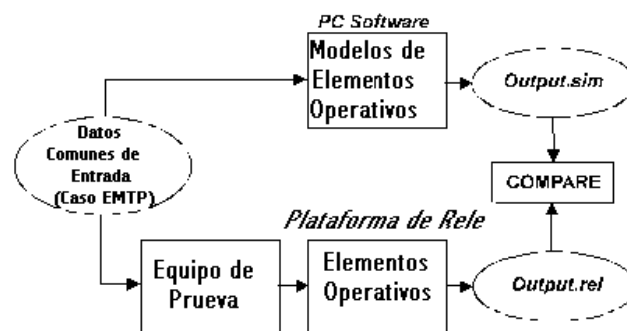
Tabla 3. Comparación de DFR en Relevadores de la Primera y Segunda Generación

Elemento	Generación 1	Generación 2
Frecuencia de muestreo	480	1200
Ciclos de Pre falla	1	2
Ciclos de Post Falla	7	14
Señales análogas	7	9
Señles digitales	24	165

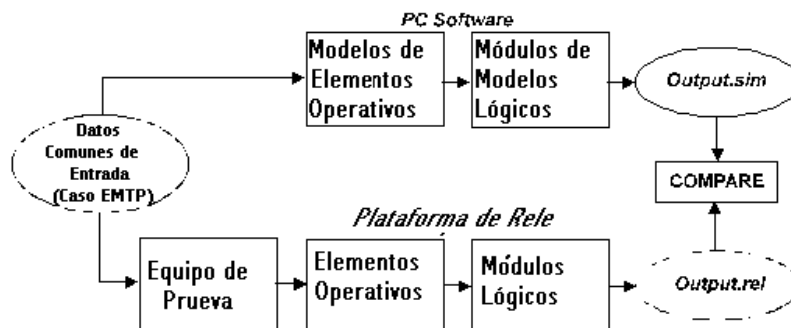
Los Registros de Falla Usados como Herramienta de Desarrollo de Producto

Los registros digitales de falla en relevadores son la clave para el proceso de desarrollo. El desarrollo del relevador se hace en varias fases para hardware y software. Esta discusión, sin embargo, se limitará al software de la protección que corre en la plataforma del hardware y sistema operativo que incluyen grabación de datos y comunicaciones. La estructura de la lógica del relevador mostrada en Figura 1 puede usarse como un ejemplo. Entradas analógicas, elementos operativos de salidas, entradas binarias, módulos de salida de señales lógicas y salidas que serán capturadas por el registro de fallas pueden identificarse de la estructura lógica de relevador.

El procedimiento de diseño adecuado dictará simulaciones de computadora y pruebas para los elementos operativos y módulos lógicos usando modernas herramientas matemáticas de computo antes de las aplicaciones en la plataforma del hardware. El funcionamiento puede ser evaluado y los puntos de referencia definidos, tales como los elementos operativos y los tiempos de operación, para la comprobación de la plataforma en tiempo real. Con los modelos desarrollados y pruebas, la aplicación secuencial y pruebas en la plataforma pueden realizarse. La comparación puede ser hecha usando el modelo y la plataforma de salida registrada [DFR]. Pruebas de los elementos operativos del relevador se ilustra en la Figura 9 – (a).



(a) Prueba solamente con Elementos Operativos



(b) Prueba con Elementos Operativos y Módulos Lógicos

Figura 9. Probando los elementos operativos del Relevador y su Lógica

Archivos de datos de entrada comunes conteniendo la información analógica apropiada se usan para modelaje y comprobación de la plataforma. Resultados de las pruebas que muestran valores análogos muestra-a-muestra y el estado digital (on o off) de los elementos operativos es reunido en los archivos del salida respectivos, output.sim y output.rel. Los archivos se comparan. Se analizan diferencias, se explican, y si necesario, se corrigen. Una vez los elementos operativos se verifican, se llevan a cabo los módulos de lógica son implementados y probados en modo secuencial similar como ilustró en Figura 9 – (b). Cada módulo lógico es implementado de tal manera que solo depende de los elementos y módulos que ya ahan sido emplementados y probaados hasta ese punto.

Al final, aún se requieren pruebas en el producto final. Este procedimiento permite significant depuración y apnuta rápidamente a las modificaciones de diseño necesitadas. Esto minimiza problemas de las comprobaciones del sistema. También, en el extremo nosotros tenemos un modelo del relevador en el PC que permite evaluación detallada de la actuación de los elementos operativos usando los registros de falla del relevador. Esto se ilustra en Figura 10.

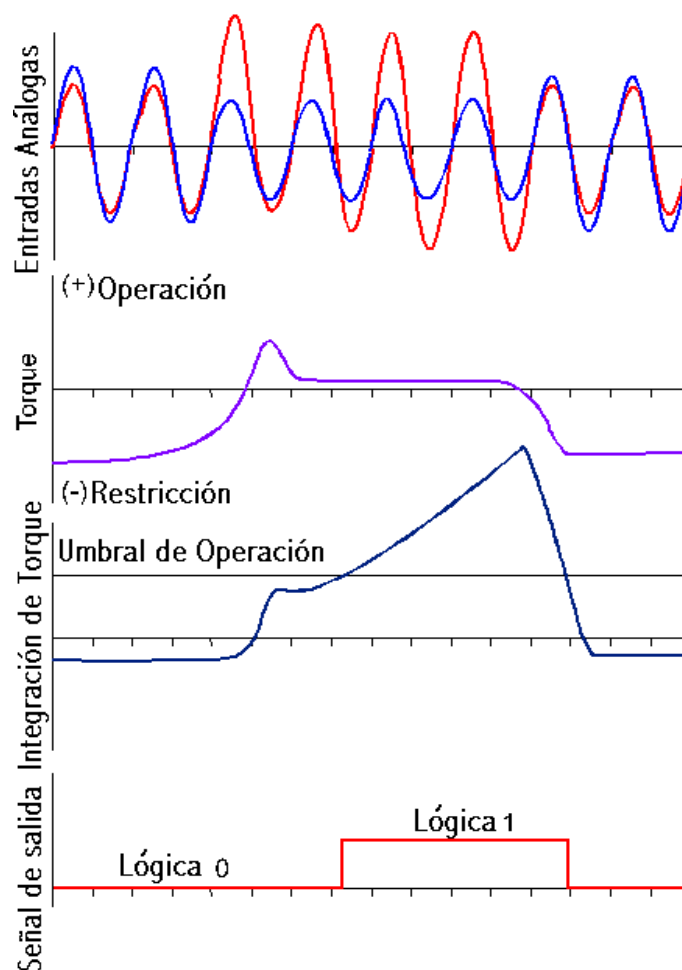


Figura 10. Funcionamiento del elemento operativo de Relevador en evaluación

Figura 10 ilustra el análisis de un elemento operativo de un comparador de fases que opera basado en la comparación de fase de cantidades operativa y restrictiva y el torque derivado. Ésta podría ser una impedancia, direccional, corriente, voltaje o cualquier otro elemento operativo. Las entradas al elemento operativo son los voltajes apropiados y/o corrientes requeridas para calcular el torque de operación y de restricción. El torque neto es calculado y si es positivo empezará integrando sobre el tiempo (rodando en la dirección para operar). Cuando el umbral del funcionamiento (ajuste) se alcanza la unidad opera (sacando un 1 lógico).

Análisis de la falla

Mucho será aprendido analizando los datos para todas las fallas, no sólo esas fallas donde los problemas operacionales ocurren. Los datos del DFR del Relevador de protección, presentados apropiadamente, puede usarse para:

- Analizar la actuación del relevador y el esquema de la protección,
- Verificar los parámetros de impedancia del sistema (línea),
- Proporcionar localización de la falla más exacta,
- Ayudar en el análisis de la respuesta de sistema de potencia a los eventos del sistema. . . . bajo voltaje, baja frecuencia, oscilación de potencia,
- Resolver problemas que no podrían resolverse por otra parte,
- Pronosticar los problemas potenciales, y
- Mantener datos para las pruebas del relevador

Con estos usos en mente es que se definen funciones de herramienta de análisis y se mantienen ejemplos para su uso.

Herramientas de Análisis de falla

Sigue una lista de funciones básicas deseadas para una herramienta de análisis de falla que usa datos generados por el relevador.

Despliegue gráfico de datos análogos y digitales

El despliegue gráfico de datos análogos y digitales como una función de tiempo (muestras) permite una revisión visual rápida del evento. Fácilmente pueden observarse magnitudes analógicas de falla y prefalla, los elementos del relevador, señales lógicas claves y el funcionamiento de Entradas/Salidas. Las gráficas analógicas deben incluir todos los voltajes de fase y las entradas de corriente, entradas auxiliares como corrientes del transformador de polarización si se usa, y cálculo [a partir de las muestras de fase] de las cantidades de secuencias cero y negativa. Un ejemplo se muestra en Figura 11.

Análisis del Registro múltiple

La habilidad de analizar registros múltiples producidos por todos los relevadores terminales de línea para el mismo evento permite localización de la falla más exacta, análisis de funcionamientos de las zonas piloto, y análisis de eventos más complejos. Un ejemplo se muestra en Apéndice A.

Los fasores para todas las cantidades analógicas deben ser calculables durante cualquier ciclo ajustado de datos muestreados sobre toda la longitud del registro. La alineación correcta de fases de los fasores de prefalla también deben ser calculables para la correcta selección de fase y cálculo de localización de falla.

La impedancia de la falla y situación de la falla deben ser calculables durante cualquier ciclo ajustado de datos muestreados sobre toda la longitud del registro. Esto debe hacerse para cada tipo de la falla. . . AG, BG, CG, AB(G), BC(G), CA(G), ABC. La resistencia de falla debe calcularse de los registros de datos de terminales multiples. Registros sincronizados de los relevadores terminales de la línea permiten localización de la falla y cálculos de resistencia de falla exactos.

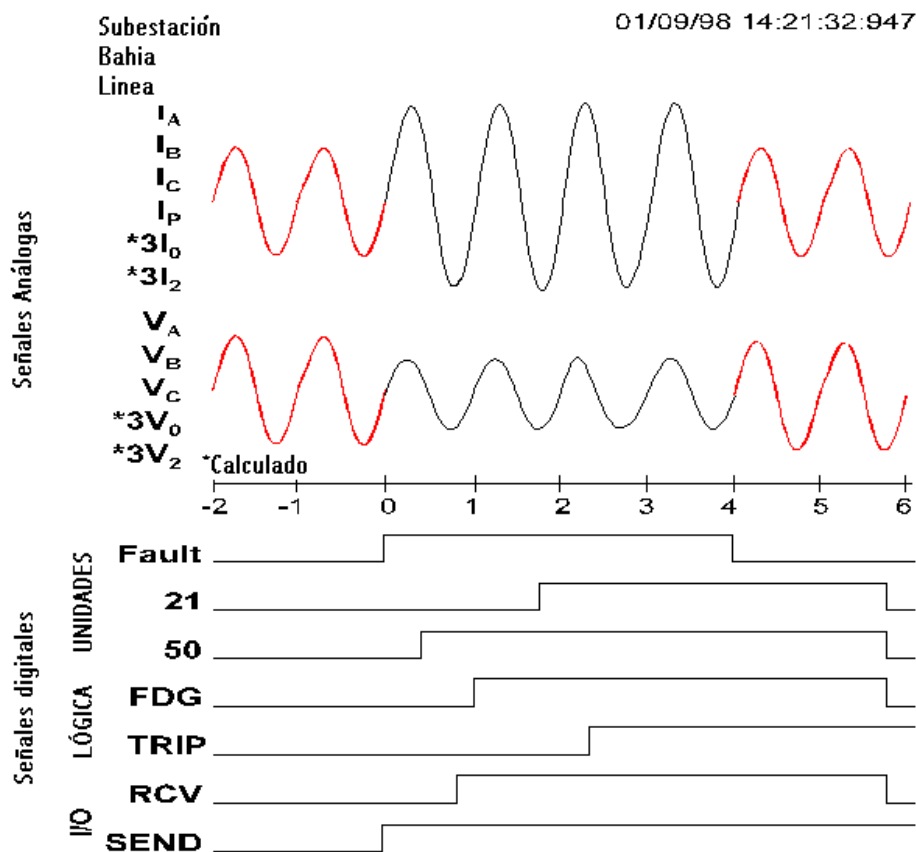


Figura 11. Gráfico o Copia impresa de Registro típico de Falla

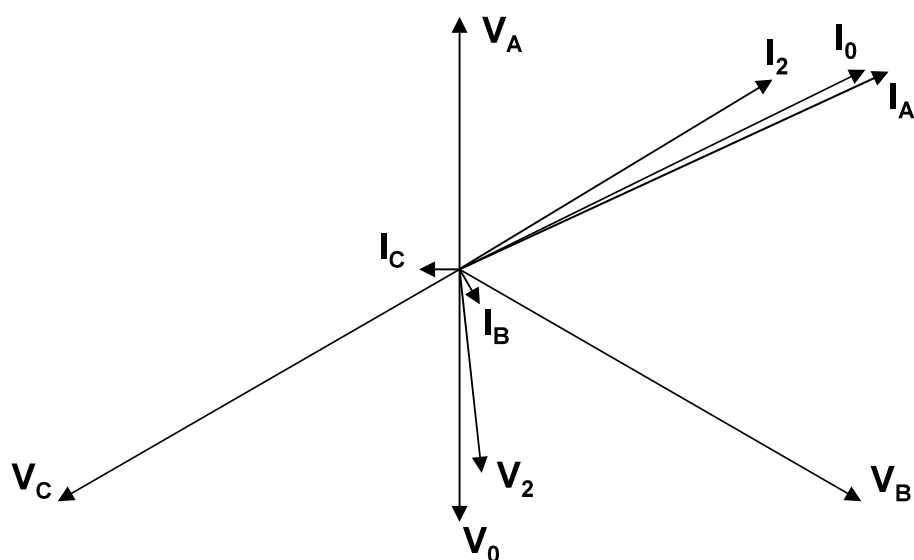


Figura 12. Diagrama fasorial típico para una Falla de AG

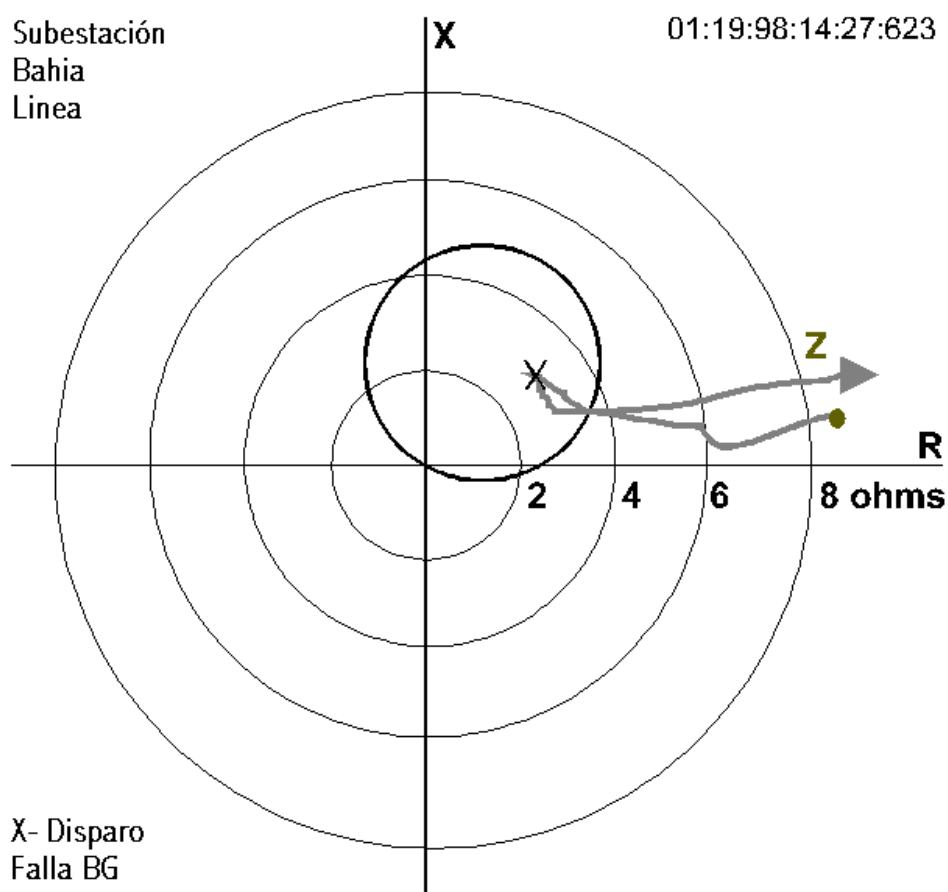


Figura 13. Diagrama típico de Impedancia

Gráfica de Fasores

Trazar los fasores de voltaje y corriente definidos en forma polar para mostrar su relación angular visualmente es útil. Estos datos pueden ser útiles al analizar la actuación de las unidades operativas direccionales y otras unidades operativas, y los registros de dos relevadores diferentes que respondieron al mismo evento. Un ejemplo se muestra en Figura 12.

Diagrama de Impedancia de Falla

Trazar el sitio de impedancia de falla sobre un rango especificado del registro proporciona la habilidad de determinar la localización de impedancia en el plan de impedancia (R,X) a un tiempo especificado y su efecto en los elementos operativos. Esto debe hacerse para cada tipo de la falla. . . AG, BG, CG, AB(G), BC(G), CA(G), ABC. La intersección del sitio de impedancia y la impedancia características ajustada a la cual operan puede observarse para las fases falladas y no falladas. Un ejemplo se muestra en Figura 13.

Análisis de frecuencia

La habilidad de medir la frecuencia y los componentes armónicos de las entradas analógicas debe proporcionarse limitándose sólo por el filtrado del relevador de protección.

Archivos COMTRADE

Es importante proporcionar archivos de salida normalizados tipo COMTRADE para la reproducirlos en equipos de prueba controlados por la computadora. Con esta capacidad la falla grabada por el relevador puede reproducirse para el análisis adicionales de prueba. También el archivo de COMTRADE puede ser usado a través de otro software de análisis.

Ejemplos de Análisis de falla

Se discuten cuatro ejemplos para mostrar diferentes ejemplos de análisis de la falla. Los ejemplos se toman de datos de falla grabados por el producto de la primera generación de protección de línea. Cualquier problema discutió que resulte en una operación indeseada deberá ser corregido. También, en lugar de proporcionar análisis detallado de cada ejemplo, se discuten sólo los puntos importantes del análisis.

Ejemplo 1. Circuito de Potencial Conectando a Tierra

Este problema involucró dos relevadores numéricos que proporcionan protección redundante en el mismo terminal de línea como se muestra en la Figura 14. Las protecciones de respaldo consistentemente calcularon la localización de la falla para una falla de fase-a-tierra más lejos que la situación de la falla real de forma consistente, mientras que el relevador primario era consistentemente exacto. Se trazaron los datos análogos sobrepuestos de los dos relevadores para un evento específico como se muestra en la Figura 15. La inspección inmediata revela un problema de voltaje de secuencia cero. Entonces se calcularon los fasores de corriente y de voltaje del mismo ciclo de datos de la falla. Los resultados se muestran en Tabla 4.

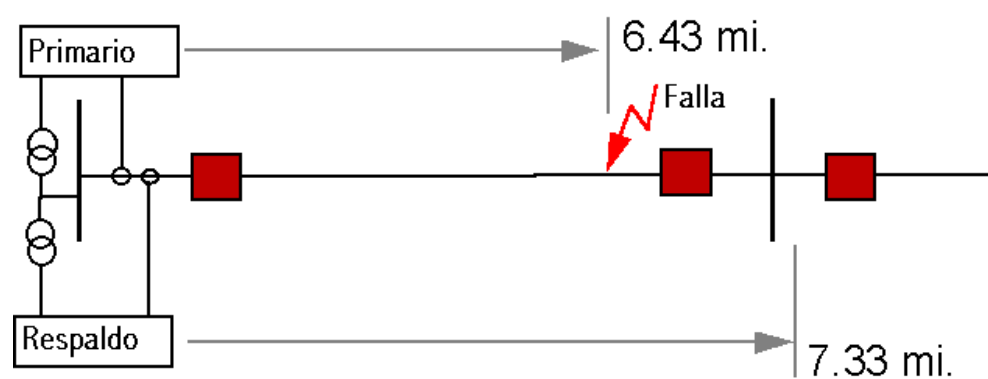


Figura 14. Protección Redundante con Cálculo Diferente de Localización de Falla

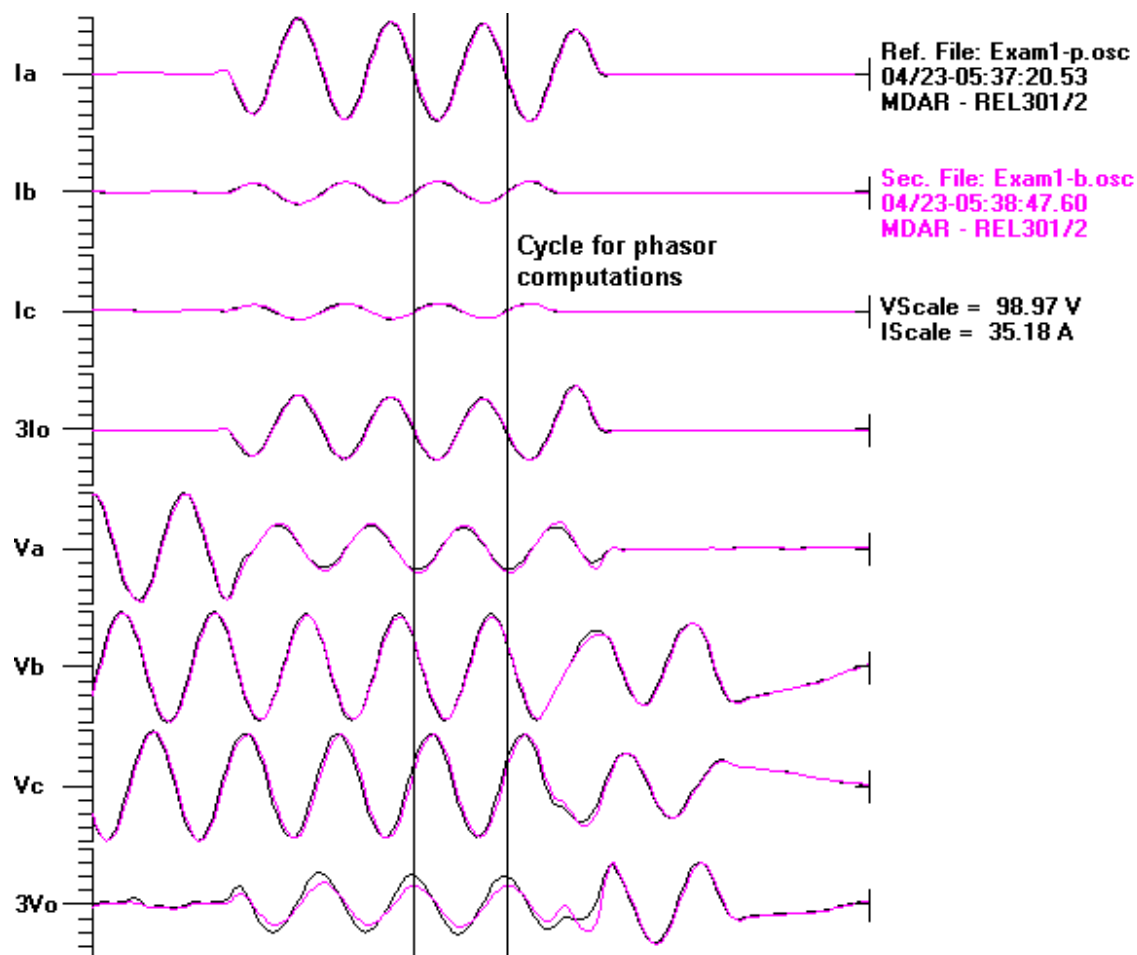


Figura 15. Gráfica de Datos Análogos de Protección Primaria y de Respaldo

Tabla 4. Comparación de Fasores

Cantidad Fasorial	Primaria	Respaldo
Va	27.76 L 0°	31.01 L 3°
Vb	67.64 L 251°	64.9 L 253°
Vc	66.45 L 126°	66.31 L 123°
3V0	35.71 L 197°	24.64 L 192°
V1	53.82 L 7°	53.87 L 7°
V2	14.66 L 193°	14.86 L 194°
Ia	22.35 L 284°	22.23 L 284°
Ib	4.82 L 101°	4.82 L 101°
Ic	3.45 L 100°	3.45 L 100°
3I0	14.08 L 286°	13.99 L 287°
I1	8.84 L 281°	8.8 L 281°
I2	8.83 L 286°	8.78 L 287°

Como se puede observarse de la Tabla 4 todas las cantidades de corrientes se comparan excelentemente. Esto deja fuera del problema los circuitos de corriente. Igualmente los voltajes de la secuencia positiva (V1) y negativa (V2) se comparan excelentemente. Esto deja fuera el problema de conexión de voltaje de fases. Dejando como sospechoso el circuito de potencial de neutral del Respaldo. La diferencia en el voltaje de secuencia cero (ΔV_0) de los relevadores de protección primaria y de respaldo se calculó:

$$\Delta V_0 = [3V_0(\text{Primaria}) - 3V_0(\text{Respaldo})]/3$$

$$\Delta V_0 = (35.71 \text{ L } 197^\circ - 24.64 \text{ L } 192^\circ)/3 = 3.79 \text{ L } 208^\circ$$

Agregando ΔV_0 a cada voltaje de fase del respaldo claramente da cantidades comparables vistas y grabadas por el relevador primario. Por consiguiente, algo está generando este voltaje en el circuito de potencial del respaldo.

Tabla 5. Efecto de ΔV_0

Phasor	Backup	ΔV_0	Backup + ΔV_0	Primary
Va	31.01 L 3°	3.79 L 208°	27.61 L 0°	27.76 L 0°
Vb	64.9 L 253°	3.79 L 208°	67.63 L 251°	67.64 L 251°
Vc	66.31 L 123°	3.79 L 208°	66.72 L 126°	66.45 L 126°

A los dos relevadores se les proporcionaron voltaje del secundario separado de un transformador de potencial. La inspección del circuito de potencial reveló tierras múltiples en cada circuito, uno en el transformador de voltaje y uno en el tablero del relevador. Esta condición ciertamente producirá una diferencia de potencial entre los puntos de tierra debido su incremento durante las fallas de tierra. Este problema es mencionado en la Guía de IEEE por el Conectar Circuitos Secundarios de Transformadores de Instrumentos con tierra donde se recomienda conectar con tierra solo el primer punto de aplicación de circuito potencial secundario en la casa del mando (tablero).

Ejemplo 2. El Funcionamiento incorrecto de la Unidad Direccional en un Sistema con Resistencia de Conexión a Tierra

La Figura 16 – (a) muestra la región operativa de las unidades direccionales hacia adelante y hacia atrás como se define por la relación fasorial de secuencia cero del voltaje y la corriente durante una falla de tierra. Una falla se define hacia adelante cuando I_0 adelanta a V_0 por 30° a 210° . La región normal de funcionamiento define la región donde se espera I_0 , relacionado con V_0 , para las fallas de tierra en sistemas de transmisión eficazmente conectados a tierra para todos los niveles de voltaje. Figura 16-(b) muestra la relación I_{0R} y V_0 para una falla de tierra inversa que ocurrió en un cable del sistema de transmisión conectado a tierra con resistencia. Esto producía el funcionamiento de la unidad direccional hacia adelante y en un disparo indeseado. Una revisión de muchos registros de falla hacia adelante (I_{0F}) y hacia atrás (I_{0R}) en varias localidades mostraron que I_0 ocurre cerca del punto de equilibrio (línea de cero torque) entre hacia adelante y hacia atrás.

El análisis mostró que la resistencia del transformador de puesta a tierra no sólo introduce resistencia en la red de secuencia cero, sino también causó que la capacitancia en derivación del cable llegue a ser significativa. Esto causó un cambio de fase en la I_0 resultante del rango normal a lo que se observa en Figura 16-(b).

La solución simplemente es rotar la línea de cero torque, el límite entre el funcionamiento delantero y inverso, como es mostrado en Figura 16-(b). Esto habilita la correcta direccionalidad sistema único.

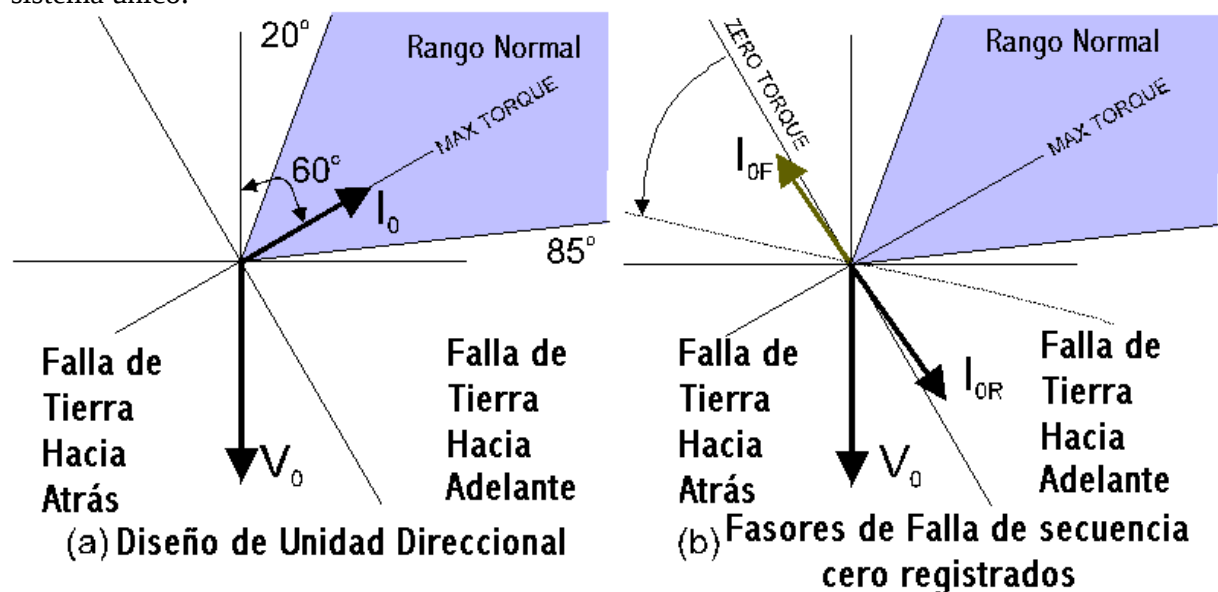


Figura 16. Funcionamiento de la Unidad direccional

Ejemplo 3. Falsa Operación Debida a la Fuente de Tierra Aislada

El siguiente ejemplo discute un falsa operación que es el resultado de algo indeseado, pero real condición de operación. El sistema como se muestra en la Figura 17 se modificó cuando el interruptor en la Subestación 1 se abrió como se indica. Esto dejó sola fuente de la secuencia cero para el Subestación 1 y Substación 2 via la línea a Subestación 1.

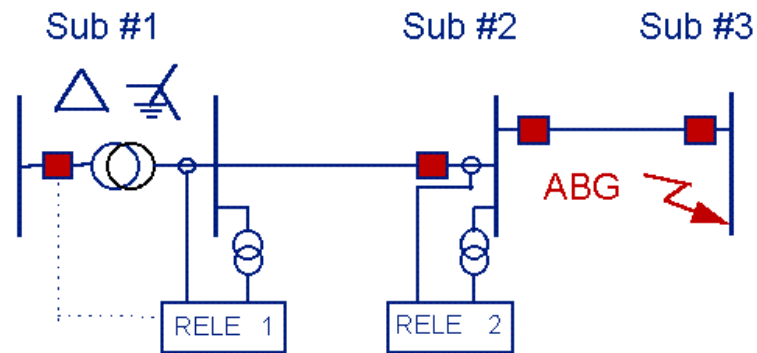


Figura 17. Fuente de Tierra aislada a Subalterno 1

Cuando una falla de dos fases a tierra ocurre en la Subestación 3, aproximadamente 0.4 amperios secundarios de corriente de secuencia cero fluyen en la línea. El tipo de falla seleccionado en los dos Relé 1 y Relé 2 fueron trifásico. El selector de fases no pudo determinar ningún tipo de falla y por omisión definió trifásico debido a la pequeña y relativamente igual corriente de fases. La operación de la unidad de zona 1 de fase requiere únicamente una de las tres unidades trifásicas para operar con selección de fallas del tipo trifásico. Usando las siguientes ecuaciones de unidad trifásica y datos de la Tabla 6, el análisis muestra una operación de la unidad trifásica que ocurre en ambos relevadores.

$$V_o = V_{xg} - I_x Z_R \quad \text{Operando}$$

X = A, B, C y ZR = Ajuste de Impedancia del Relevador

$$V_Q = V_{xy} \quad \text{Polarizando}$$

XY = CB para unidad de fase A, AC para B, BA para C

Tabla 6. Voltajes de falla

Voltaje de Fase	Relevador 1		Relevador 2	
	Mag.	Angulo	Mag.	Angulo
A	10.5	0	9.7	0
B	10.9	311	10.3	311
C	62.5	204	62.5	208
BC	60.2	214	61.0	217

La unidad opera cuando V_o adelanta a V_Q . Despreciando el efecto de la corriente, se ve rápidamente que la cantidad operando V_A adelanta a la cantidad de polarización V_{BC} para ambos relevadores. Esto satisface que los relevadores dispararan. Los datos de DFR del relevador 2 mostrados en Figura 18 muestran la corriente de secuencia cero, la selección del tipo de falla trifásica MP (multi-fase) , y la lógica de arranque de la zone-1 trifásica Z1P. Un registro similar para el Relevador 1 muestra los mismos resultados.

La solución más inmediata al problema fue habilitar la supervisión de la lógica de disparo trifásica con unidades de sobrecorriente de fase ajustados en un valor apropiado. La lógica de disparo trifásico puede también ser modificada requiriendola operación de todas las unidades de fase, todas las tres unidades direccionales de fase para operar o disparar bloqueando cuando corriente de secuencia cero está presente.

Aunque éste no es un problema complejo este ilustra cómo un registro de falla de relevador de protección permite un análisis visual rápido de cantidades analógicas y digitales para apuntar rápidamente a qué elementos necesita ser estudiado.

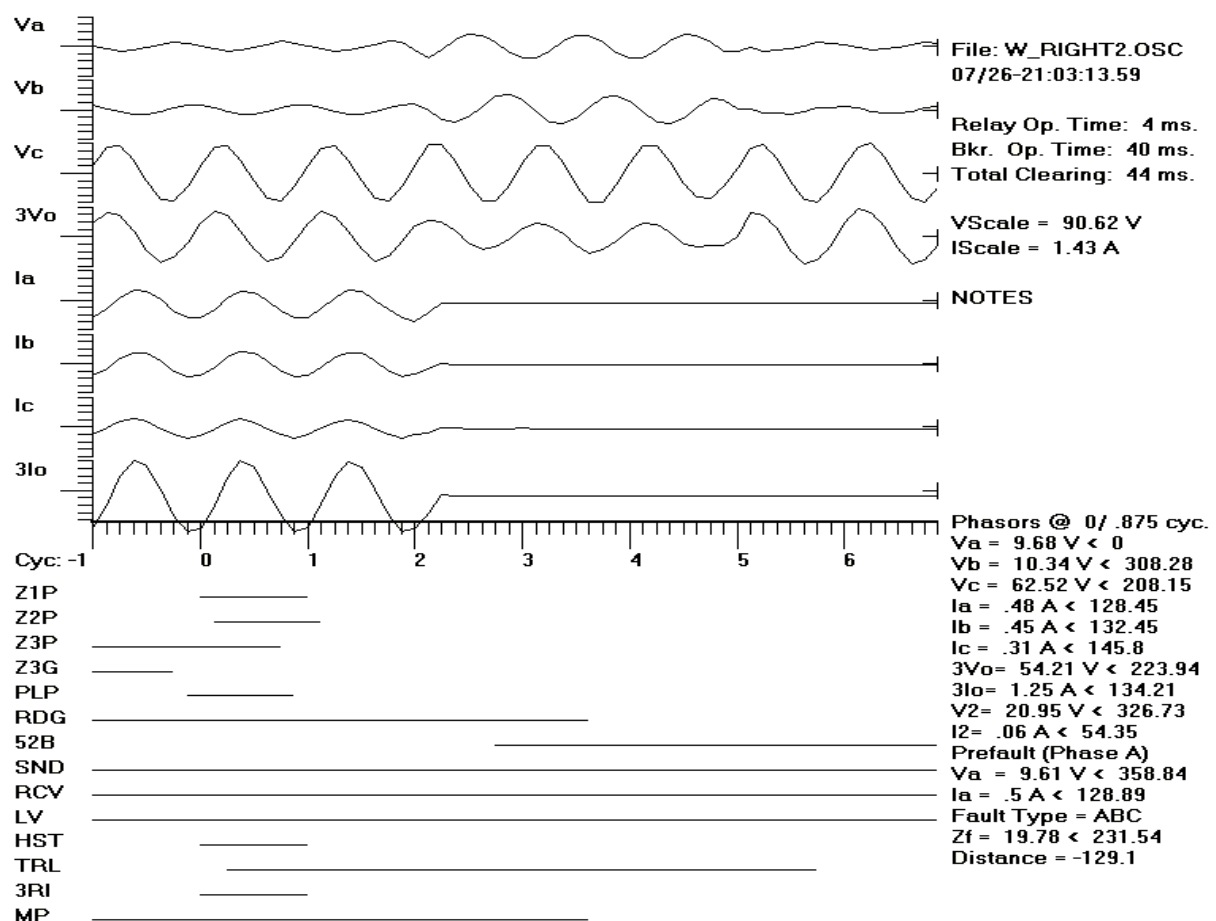


Figura 18. Releve 2 Registro de la Falla Digital

Ejemplo 4. Polarización dual y los Voltajes de la Fase Desequilibrados

La polarización dual es la utilización de dos unidades de sentido direccional. La primera unidad direccional usa una corriente de polarización de fuente actual externo al relevador y una derivada internamente de corriente de secuencia cero. La fuente de polarización externa proporciona mayor sensibilidad a las fallas a tierra y normalmente es una fuente de corriente a tierra tal como un transformador de potencia de conexión estrella a tierra – delta u otro transformador de puesta a tierra. La segunda unidad direccional usa corriente y voltaje de secuencia cero derivada internamente. Las características direccionales de ambas unidades se definen en Figura 19.

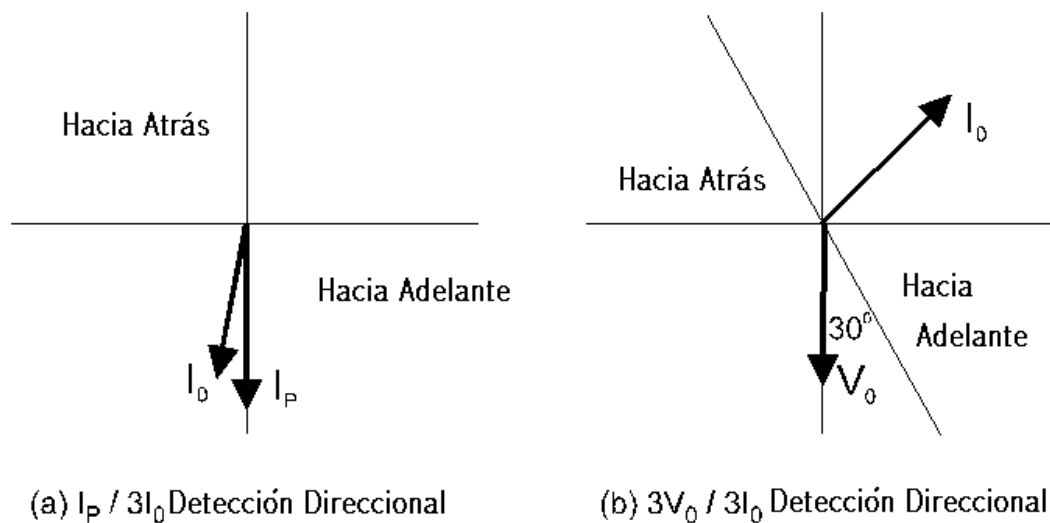


Figura 19. Características Direccionales Polarizando duales

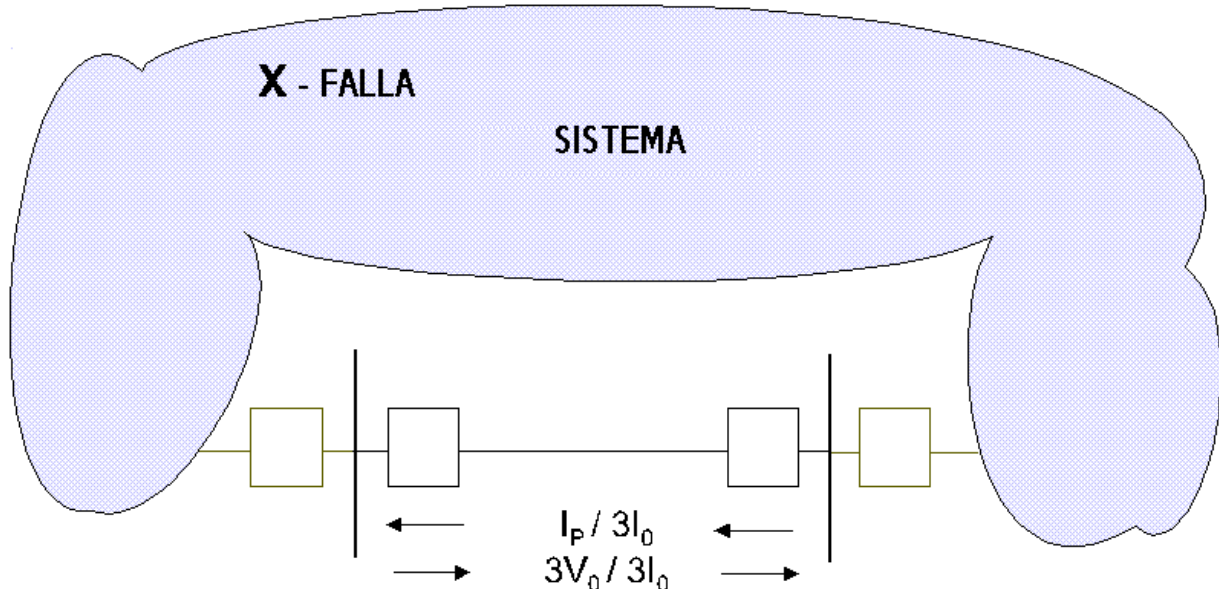


Figura 20. Sola Falla del Fase-a-tierra externa

La lógica de polarización dual direccional es tal que cualquier unidad pudiera habilitar el disparo direccional o lógica piloto. La unidad polarizada externamente I_p proporcionaría la sensibilidad y la unidad interior el $3V_0$ serviría como backup si la fuente de I_p estuviera fuera de servicio.

Disparos incorrectos del piloto ocurrieron en el esquema típico de protección de dos terminales de línea para una falla remota distante como se ilustra en la Figura 20. Los datos de ambos relevadores terminales indicaron una falla hacia adelante que habilitó el disparo piloto. Una revisión de las relaciones de fasores apropiadas y las características de operación definidas en la Figura 19 muestran operación en un terminal $I_p/3I_0$ hacia adelante y $3V_0/3I_0$ reversa y funcionamiento reverso $I_p/3I_0$ y el hacia adelante $3V_0/3I_0$ en el otro término. Se muestran las cantidades de la falla de un término en Tabla 7. I_0 adelanta a V_0 por 203° ($112 + 91$), por consiguiente la unidad $3V_0/3I_0$ es hacia adelante. I_0 adelanta a I_p por 191° ($112 + 79$), por consiguiente la unidad $I_p/3I_0$ es reversa. Puesto que una unidad ve la falla como hacia adelante en ambos terminales, resultata en un disparo piloto. Ambos tipos de unidades, individualmente como un sistema de dos terminales, operó correctamente en cada término. . . una hacia adelante y una hacia atrás, para la falla externa. Operando juntos, sin embargo, producían funcionamiento erróneo. Por consiguiente, es necesario un análisis para determinar por qué las dos unidades difieren en su sensibilidad direccional para esta falla.

Tabla 7. Cantidades de Falla grabadas y el Funcionamiento de la Unidad Direccional

Cantidad	V_{MAG}	V_{ANG}	I_{MAG}	I_{ANG}	I_{p-MAG}	I_{p-ANG}
Fase A	59.6	0°	5.0	133°	-	-
Fase B	64.8	-116°	2.0	72°	-	-
Fase C	64.4	119°	2.3	-55°	-	-
Seq. Cero	0.64	-91°	1.32	112°	5.5	-79°
Unidad Direccional	I_{0-ANG} adelante referencia			Operación		
Secuencia cero	$3V_0/3I_0$	$I_{0-ANG} - V_{0-ANG}$	203°	Adelante		
Corriente Ext.	$I_p/3I_0$	$I_{0-ANG} - I_{p-ANG}$	191°	Marcha atrás		

Tabla 7 también muestra un desequilibrio en las fases no-falladas. Este desequilibrio, aunque pequeño, introduce bastante efecto en el ángulo de voltaje de secuencia cero "esperado" a estos pequeños valores que causan el sentido direccional hacia adelante. Esto es ilustrado cambiando el valor V_{ANG} a de la Tabla 6 para las fases B y C de -116° y 119° a -120° y 120° , respectivamente, y calculando el voltaje de la secuencia cero. Esto resulta en un ángulo de voltaje de secuencia cero de 184° que es muy cerca de lo que normalmente se espera. Para esta ilustración, I_0 se retrasan V_0 por de 72° ($112 - 184$) que resulta en un funcionamiento inverso por la unidad direccional $3V_0/3I_0$ y de acuerdo con la unidad $I_p/3I_0$.

Debe entenderse claramente que las unidades $3V_0/3I_0$ en ambos terminales son igualmente afectadas por el desequilibrio y operan correctamente como un sistema... uno hacia adelante y uno hacia atrás. Igualmente las unidades $I_p/3I_0$ operan correctamente, pero son inmunes a cualquier desequilibrio de voltaje. Aplicadas juntas en lógica de polarización dual, sin embargo, las diferencias operativas discutidas necesitan ser consideradas.

La solución es proporcionar una lógica que descubra la presencia de la corriente polarizante externa dándole prioridad a la unidad $I_p / 3I_0$ a que opere. La unidad direccional $3V_0 / 3I_0$ sólo puede operar si no hay ninguna corriente de polarización externa. Esto implica que la fuente de la corriente de polarización, normalmente un transformador, ha estado fuera de servicio. Esta contingencia todavía deja exposición al mismo problema hasta se cambien los ajustes. Esto, sin embargo, es mejor que no tener ninguna fuente de la polarización en absoluto.

Tendencias

Avances en la función registro digital de falla del relevador de protección seguirán con avances en tecnología, los requisitos crecientes de fusionar funciones de protección de subestación, control, la adquisición de los datos y tecnologías de comunicación en un simple sistema, y la necesidad para las soluciones más rápidas y más exactas. Con esto se aumentarán cantidades de información disponible al personal del usuario. Cosechar los beneficios de tener esta información exige de herramientas apropiadas para analizar el volumen grande de datos disponible de los dispositivos digitales. Se listan algunas de las herramientas anticipadamente abajo. Con ellas los beneficios de reducir el tiempo de paro, mejorar la calidad del servicio, reducir el costo de operación y mantenimiento y un personal técnico más productivo.

Recolección automatizada de los Datos y Sincronización

Recolectar los datos de falla de diferentes dispositivos de registro remotos en una estación maestra para la coordinación del evento y análisis. Todos los registros para el mismo evento se identifican, sincronizan, analizan y guardan. Esto requerirá reconocimiento automático de archivos y traducción para los fabricantes de productos y generaciones diferentes. La administración de los datos también exigirá organizar los datos y proporcionar resúmenes del evento.

Base de datos de Evento de sistema

No sólo eventos individuales analizados, sino un banco de datos correlativo histórico mantenido, para permitir análisis estadístico de situación de la falla, tipo, la actuación del esquema de protección, y otros parámetros que posiblemente revelan áreas para mejorar el sistema.

Análisis de Perturbación de Area Amplia

Las herramientas de análisis de falla proporcionan análisis de falla de dos y tres terminales, funciones como sincronización de registro de evento, selección exacta de fase de fallada, localización de la falla y resistencia de la falla, coordinación de canal piloto, desplazamiento de fase del voltaje terminal, y secuencia de operación del interruptor. Esta capacidad se extenderá a soluciones amplias que coordinan todos los archivos generados por el mismo evento.

Especialista en Análisis del Sistema

Se analizan archivos automáticamente utilizando reglas desarrolladas basadas en años de experiencia en análisis. Se identifican problemas y se recomiendan soluciones. Se agregarán nuevas reglas continuamente como la experiencia se extienda.

Banco de datos de la Comprobación de protección

Se crecerán, desarrollarán y se mantendrán los registros de falla de eventos del sistema grabados que producen operación indeseada de protecciones o pruebas de los límites de la actuación del relevador serán,. Estos archivos se usarán con equipo de la prueba moderno para recrear el evento

durante desarrollo del producto por el fabricante o evaluación del producto por el usuario para reducir el tiempo de aceptación de producto.

Referencias

1. "Substation Control and Communications Survey", ABB Power T&D Company Inc., 1992.
2. "IEEE Guide for the Grounding of Instrument Transformer Secondary Circuits and Cases", ANSI/IEEE C57.13.3, 1983, Section 2.
3. "Fault and Disturbance Data Requirements for Automated Computer Analysis", IEEE Power System Relaying Committee Special Publication, IEEE Catalog No. 95 TP 107.

Biografía

El Elmo Price recibió su grado de BSEE de la Universidad de Lamar en 1970 y se graduó de SEE en Power Systems de la Universidad de Pittsburgh en 1978. Él empezó su carrera con Westinghouse en 1970 y trabajó en diversas posiciones de ingeniería incluyendo: Diseño, Ingeniería e Ingeniería de Ventas para la Planta de Transformadores de Potencia pequeños de South Boston, Virginia; Ingeniero eléctrico de diseño de sistemas para la Gas Turbine System Division en Filadelfia, Pensilvania; Ingeniero de sistema de T&D para T&D System Engineering, Pittsburg, Pensilvania, suministrando soporte de aplicación para fabricación de productos T&D en su división y los clientes, Ingeniero Especialista en Tecnología avanzada para T&D Marketing en New Orleans, Louisiana, en ventas, aplicaciones y soporte a los usuarios. Con la consolidación del Westinghouse las divisiones de T&D en ABB en 1989 Elmo asumió responsabilidad regional por apoyo de aplicación de producto para División de Relés de Protección de ABB. En 1994 pasó a Gerente de Dirección del Producto y Consulta que es responsable por el apoyo de aplicación de las protecciones, definiendo y desarrollando especificaciones funcionales para los nuevos conceptos de sistema de protección reuniendo los requisitos técnicos del nuevo mercado, comprobación y prueba de la actuación, y las escuelas de aplicación de relevadores de protección. Elmo es ingeniero profesional registrado y un miembro del IEEE.

Apéndice A. Ejemplos de Registro de Falla digitales

Registro de Falla Digital en Protecciones de la Primera Generación

Este caso es el resultado de una falla zona-1 CG en un sistema de 230 kV como se determino por la protección digital de zona-1 a tierra señalizando Z1G y la selección de fase fallada CG señalizada. El relevador disparó el interruptor en el punto 1 en 28 ms. Esto es determinado por la señal digital sellada de disparo TRL. El interruptor aclaró la falla en el punto 2 en 54 ms. Esto es determinado por la señal digital de interruptor abierto 52b y el voltaje y señales análogas actuales. El tiempo de operación del interruptor fué 26 ms. Hay 8 señales análogas y 9 de 24 posibles señales digitales (on/off) . FDG indica falla de tierra hacia adelante, HST es Disparo de alta velocidad y LV es voltaje bajo.

Registro de Falla Digital en Protecciones de la segunda Generación

Este caso es el resultado de una prueba en el simulador de Sistema de Potencia que usa el diagrama del sistema mostrado debajo. Las localizaciones de las fallas indicadas son aproximadas cuando ellos son basado en impedancias de sección pi de secuencia positivas y no incluyen la impedancias de maniobra y la conexión. Se muestran impedancias en ohms primarios. La longitud de la línea en ohms secundarios es 5.75 ohms y el alcance de impedancia de zona 1 ajustada en el relevador es 5.46 ohms--95% de la longitud de la línea. El caso es una falla de AG aplicada en F3 con 10 ohms de resistencia de falla primaria (2.5 ohms secundario) más la conexión y resistencias del conector. La situación de la falla es a aproximadamente 85% del ajuste del relevador del Barraje Izquierdo y 20% del ajuste del relevador del Barraje Correcto. El esquema es pasos de distancia (no-piloto). Los cálculos de distancia son basado en una línea de 100 millas.

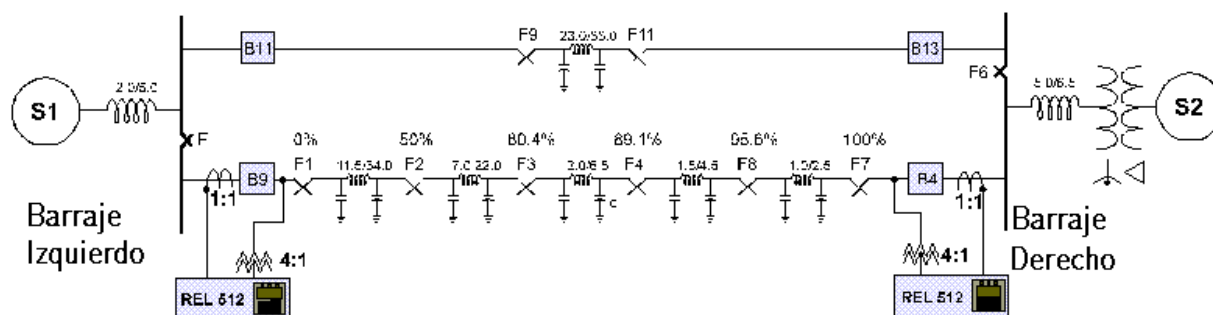


Figura A1. Configuración del simulador de Sistema de Potencia para línea de dos terminales

Los datos de DFR adjuntos registrados muestra el funcionamiento de la línea a los dos terminales de relevadores. El disparo es confirmado por la señal DSP TRIP SEAL en la Palabra

(grupo) #10, Salida de la Lógica Combinada. Estas señales afirman los salidas del disparo. La aclaración de la falla del Barraje Derecho ocurrió en 49 ms. (Punto #1) y la aclaración del Barraje Izquierdo ocurrieron en 166 ms. El tiempo de operación del interruptor está fijo en dos ciclos más el tiempo al más próximo cruce por cero de la corriente.

El cálculo de localización en un terminal del relevador incluye el efecto de carga de prefalla corriente y resistencia de la falla. Del Barraje Derecho el cálculo mostró la localización de la falla a 16.4 millas. Del Barraje Izquierdo la localización de la falla fue aclculada a 91.6 millas. La localización de la falla se calculó de nuevo desde el Barraje Izquierdo para obtener 81.0 millas al momento que el Barraje Derecho aclaró quitando la corriente de carga y las contribuciones del Barraje. La localización de la falla que usando el cálculo de las dos terminales era 83 millas desde el Barraje Izquierdo. La resistencia de la falla fue calculada en 2.8 ohms secundarios.