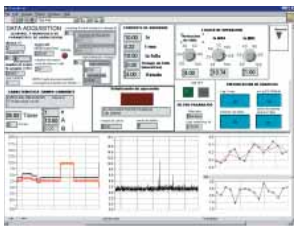


Implantación de un relevador digital de sobrecorriente adaptativo

Arturo Conde Enriquez, Ernesto Vázquez Martínez,
Paz Vicente Cantú García

Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica, FIME-UANL.

con_de@yahoo.com, evazquez@gama.fime.uanl.mx



RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la creación de un relevador virtual en Labview®. Se tomó como ejemplo un relevador digital de sobrecorriente adaptativo. Se resumen primero las ideas básicas del relevador adaptativo, se describen a continuación la estructura general del relevador virtual y su programación en Labview®, y finalmente se presentan y discuten los resultados de algunas de las pruebas realizadas hasta el momento.

PALABRAS CLAVE

Protección de sistemas eléctricos de potencia, protección de sobrecorriente, protección adaptativa.

ABSTRACT

This paper presents a virtual protective relay implemented in Labview®. The basic design concepts were taken from an overcurrent adaptive relay. Initially, the paper describes the theory to develop an adaptive relay, and then, the general structure of the virtual relay is described, including its implementation in Labview®. Finally, the paper presents some results using real time signals.

KEYWORDS

Power system protection, overcurrent protection, adaptive protection.

INTRODUCCIÓN

El proceso de diseño de un equipo o sistema digital destinado a operar en tiempo real consta de dos etapas básicas. Una primera etapa incluye la investigación y desarrollo de los algoritmos y su evaluación por simulación digital. La segunda etapa consiste en el desarrollo de un prototipo del equipo o sistema y su prueba en condiciones de laboratorio y, posteriormente, en condiciones reales de operación.

La única infraestructura requerida para la primera etapa es el equipo de cómputo, dotado del software apropiado para la aplicación. En la segunda etapa se requiere contar con un laboratorio que permita simular físicamente el sistema real al que está destinado el equipo, y tener facilidades para el diseño y construcción del prototipo. El simulador físico puede sustituirse, o complementarse, por un simulador digital en algunas aplicaciones, pero la construcción del prototipo es inevitable.

Cuando el equipo a diseñar es un relevador digital de protección de sistemas eléctricos de potencia, la construcción del prototipo es una labor muy especializada, que no siempre está al alcance de las instituciones de investigación. Es recomendable, por tanto, buscar vías para hacer pruebas de laboratorio al relevador en proceso de desarrollo, sin que se cuente inicialmente con su prototipo.

Una alternativa en esta dirección es crear una versión virtual del relevador en una computadora personal equipada con una tarjeta de adquisición de datos. Los algoritmos del relevador son programados en la computadora, lo que da gran facilidad para realizar y probar las modificaciones que resulten del propio proceso de pruebas de laboratorio.

Existen programas de computadora diseñados para este tipo de aplicaciones. Uno de esos programas es Labview[®],¹ que permite crear los denominados instrumentos virtuales. Es conveniente explorar las posibilidades de Labview[®] para crear un relevador virtual, pues ello permitiría aprovechar las funciones y facilidades propias del programa para acelerar el proceso de implementación y pruebas del “prototipo” virtual del relevador, antes de pasar a la fase de construcción del prototipo físico. Otra posible aplicación es en la enseñanza.

En este trabajo se presentan los primeros resultados de la creación de un relevador virtual en Labview[®]. Se tomó como ejemplo un relevador digital de sobrecorriente adaptativo, cuyo principio de operación se describe en.^{2,3,4} Se resumen primero las ideas básicas del relevador adaptativo, se describen a continuación la estructura general del relevador virtual y su programación en Labview[®], y finalmente se presentan y discuten los resultados de algunas de las pruebas realizadas hasta el momento.

RELEVADOR ADAPTATIVO DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO

En la figura 1 se presenta el diagrama funcional de un relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso, en el que por simplicidad no se muestra el procesamiento analógico y la conversión análogo-digital de la señal de corriente. El filtro recibe como entrada las muestras digitalizadas $(i_r)_k$ de la corriente, y entrega a su salida, para cada instante de muestreo, el módulo $(I_r)_k$ del fasor que representa la componente fundamental de $(i_r)_k$.

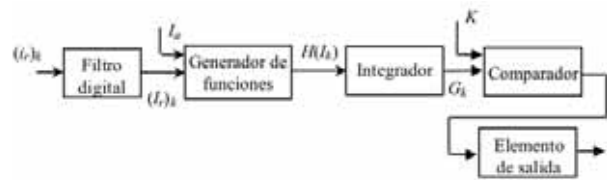


Fig. 1. Diagrama funcional simplificado de un relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso.

El generador de funciones recibe como entradas la corriente $(I_r)_k$ y el dato de corriente de arranque I_a , y forma la señal de salida $H(I_k)$, donde $I_k = (I_r)_k / I_a$ es la magnitud del fasor de componente fundamental de la corriente de entrada al relevador, normalizada con respecto a la corriente de arranque. El integrador es el elemento que introduce la variable tiempo en el proceso; su señal de salida es:

$$G_k = \sum_{k=1}^k H(I_k) \Delta t = \Delta t \sum_{k=1}^k H(I_k) \quad (1)$$

donde G_k representa el valor acumulado del integrador en el instante de procesar la muestra k , y Δt es el período de muestreo.

En el comparador, figura 1, se compara la magnitud G_k con un valor umbral K . La condición de operación del relevador es:

$$G_k = \Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} H(I_k) = K \quad (2)$$

El relevador opera en el instante en que k alcanza un valor igual a k_{op} y se cumple (2). El tiempo de operación T está dado por:

$$T = k_{op} \Delta t \quad (3)$$

Despejando Δt en (2) y sustituyendo en (3), se obtiene la ecuación de la característica tiempo-corriente $T = F(I_k)$ del relevador:

$$T = F(I_k) = \frac{k_{op} K}{\sum_{k=1}^{k_{op}} H(I_k)} \quad (4)$$

Si para fines de análisis se considera constante la corriente durante la falla ($I_k = I$), (4) toma la forma:

$$T = F(I) = \frac{K}{H(I)} \quad (5)$$

Para mejorar la sensibilidad del relevador de sobrecorriente, se ha propuesto^{2,3,4} introducir una ley

adaptiva en la corriente de arranque I_a , haciendo que ésta varíe en función de la corriente de carga I_c con un factor de seguridad k_a (1.2 a 2.0):

$$I_a = k_a I_c \quad (6)$$

Es necesario^{2,3,4} fijar límites a I_a para hacer posible la coordinación del relevador adaptativo con los convencionales:

$$I_{a\text{mín}} \leq I_a \leq I_{a\text{máx}} \quad (7)$$

Para mejorar la velocidad de operación del relevador adaptativo, se ha propuesto también hacer adaptable su curva de tiempo.⁵

Si se utiliza en (6) el valor instantáneo de I_c , se requiere una lógica de control de I_a basada en la detección del instante de inicio de la falla, es decir, se necesita un algoritmo de detección de fallas, que puede basarse en la identificación del cambio abrupto en la señal de corriente. En este trabajo se utiliza un detector transitorio,^{2,6} el cual basa la detección de la falla en el cálculo de un estimado mínimo-cuadrático de la señal y su comparación con las señales de entrada al relevador.

La lógica de control de la corriente de arranque del relevador adaptativo de sobrecorriente se resume en el diagrama de bloques de la figura 2. Esta lógica debe considerar los siguientes estados de operación: a) estado estable, en el que se tiene un régimen normal de operación del sistema de potencia; b) estados transitorios provocados por la ocurrencia de

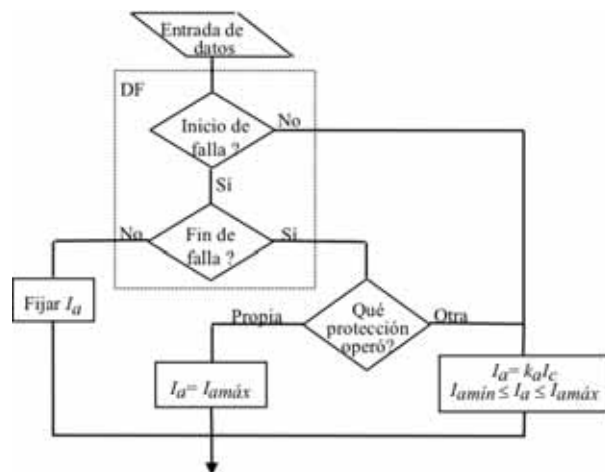


Fig. 2. Diagrama de bloques de la lógica de control de I_a .

fallas; c) condiciones en que la línea protegida está desconectada. La lógica del relevador adaptativo en un estado normal de operación debe: a) permitir que la corriente de arranque varíe con el régimen de operación (ecuación(6)); b) supervisar continuamente que la corriente de arranque del relevador no viole los límites establecidos (ecuación (7)).

Los estados transitorios asociados a fallas o a operaciones de cierre y apertura de la línea son detectados por el monitor de transitorios. Esto sirve de base para las siguientes funciones: a) fijar la corriente de arranque I_a en su valor vigente en el momento de ocurrir la falla, para permitir que la corriente debida a la falla sobrepase; b) retornar al régimen de variación de la corriente de arranque si la falla es eliminada por otra protección o si se autoextingue; c) fijar la corriente de arranque en su valor máximo en caso de que la falla sea eliminada por el disparo del propio relevador adaptativo (apertura de la línea protegida).

En general, cuando la línea protegida esté fuera de servicio, la corriente de arranque debe ser fijada al valor máximo, para desde ahí comenzar el régimen de flotación sobre la corriente de carga, una vez que se restablece el servicio. Esto da al relevador una cierta inmunidad a los valores elevados que puede tener la corriente de carga durante el estado transitorio asociado al restablecimiento del servicio eléctrico después de una interrupción prolongada del mismo.

Si se utiliza un valor de I_c calculado como demanda de corriente, se elimina la necesidad del detector de falla, y la lógica de control se simplifica.⁷

ESTRUCTURA DEL RELEVADOR VIRTUAL

A. Estructura general

La estructura general de un relevador virtual (ver figura 3) consta de un módulo de conexión que concentra las señales de entrada y salida, una tarjeta de adquisición de datos, y una computadora personal, donde residen los programas de operación del relevador virtual.

El relevador virtual de la figura 3 aparece conectado a un modelo físico del sistema eléctrico de potencia; recibe la información proveniente de los transformadores de corriente, y actúa para provocar

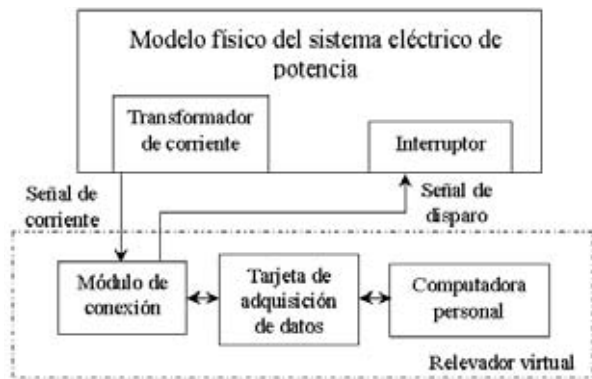


Fig. 3. Estructura general de un relevador virtual.

el disparo de un interruptor del sistema. En la figura 4 se muestra, a modo de ejemplo, la conexión del relevador virtual a un sistema de potencia radial.

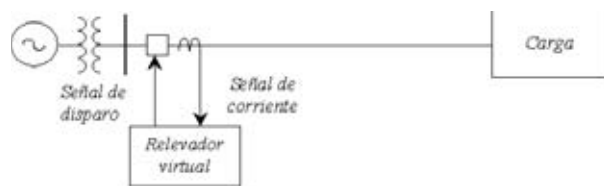


Fig. 4. Ejemplo de conexión del relevador virtual a un sistema radial.

B. Módulo de conexión

El relevador virtual (ver figura 3) cuenta con un módulo de conexión National Instruments® modelo TBX-68, con 68 terminales de tornillo para la conexión de señales de entrada/salida. Incluye un conector SCSI macho para la conexión directa con cables SH6868, R6868, SH1006868, PSHR68-68 y PR68-68F.

C. Tarjeta de adquisición

La adquisición de datos (ver figura 3) se realiza mediante una tarjeta National Instruments® modelo PCI-MIO-16E-1. Las características de la tarjeta son: 16 entradas analógicas sin referencia u 8 entradas diferenciales, resolución de 12 bits, frecuencia máxima de muestreo de 1.25 MHz, intervalo de ± 10 V para entradas bipolares, y ancho de banda de 1.6 MHz. Cuenta con 2 canales de salida analógicos con voltaje de ± 10 V, y con 8 entradas/salidas digitales; la resolución del temporizador es de 24 bits.

PROGRAMACIÓN DEL RELEVADOR

A. Características de Labview®

Labview® es un programa de desarrollo de aplicaciones, que utiliza un lenguaje de programación gráfico para crear programas en forma de diagramas de bloques. Los programas de Labview® son llamados VI (Instrumentos Virtuales), porque por su apariencia y operación pueden imitar instrumentos reales. Labview® incluye librerías de funciones de adquisición de datos, análisis de señales digitales, filtros, aproximación de curvas, probabilidad y estadística, álgebra lineal, operación con arreglos, métodos numéricos y funciones de comunicación. Estas cualidades resultan muy atractivas desde el punto de vista del análisis, diseño y prueba de algoritmos en tiempo real.

Las características mencionadas anteriormente hacen recomendable realizar la implementación del relevador adaptativo de sobrecorriente en este ambiente computacional. La ventaja principal de la utilización de este programa es la posibilidad de manejar señales de entrada en tiempo real, de efectuar acciones de control, y de hacer uso de las librerías y las herramientas gráficas disponibles.

B. Diagrama de bloques del programa

El diagrama de bloques del programa del relevador virtual se muestra en la figura 5. Consta de subrutinas de adquisición o generación de señales de entrada, de acondicionamiento y filtrado de señales, de protección, y de salida.

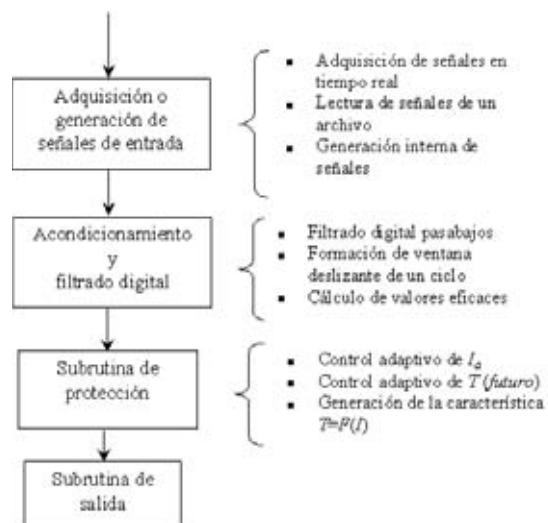


Fig. 5. Diagrama de bloques del programa.

La primera subrutina permite hacer la adquisición de señales de tiempo real a partir de la tarjeta de adquisición de datos, o de señales grabadas en un archivo. Esta segunda alternativa permite utilizar archivos generados por un programa de simulación o archivos de fallas reales como entradas al relevador virtual. Una tercera opción que da esta subrutina es generar internamente las señales de entrada, utilizando las facilidades de generación de señales residentes en Labview®.

En la segunda subrutina del programa (figura 5) se realiza un filtrado pasabajos, se forma una ventana rectangular de datos de un ciclo de longitud (16 muestras) y se realiza el cálculo del valor eficaz de la señal de corriente. Próximamente se incluirá un algoritmo de filtrado digital para la estimación del fasor de componente fundamental de la corriente.

En la subrutina de protección (figura 5) se incluye el cálculo de I_a según (6) y (7), la detección de fallas, y la lógica de control de I_a (figura 2), así como la ecuación (2) de operación del relevador. Aún no se ha introducido en esta subrutina el control adaptativo del tiempo de operación del relevador.

Finalmente, la subrutina de salida (figura 5) tiene por objetivo fundamental enviar la señal de disparo al interruptor a través del módulo de conexión, e incluye además una salida gráfica. En ella se aprovechan las herramientas gráficas disponibles en Labview® para presentar gráficas de las señales de entrada (en los dominios del tiempo y la frecuencia), de los fasores calculados, y de ciertos indicadores de operación.

C. Panel frontal del relevador virtual

En la figura 6 se muestra el panel frontal del relevador virtual; se compone de los siguientes subpaneles: adquisición de datos, corriente de arranque, característica tiempo-corriente, lógica de operación, señalización de operación, filtrado pasabajos y presentación de gráficas.

En el subpanel de adquisición de datos se realiza el control y supervisión de los parámetros de adquisición. Se definen los siguientes parámetros: canal y dispositivo utilizado, ya que es factible tener diferentes puntos de medición del módulo de pruebas; razón de muestreo (*scan rate*), que se refiere a la cantidad de muestras adquiridas en el total de canales utilizados; intervalo admisible de la señal

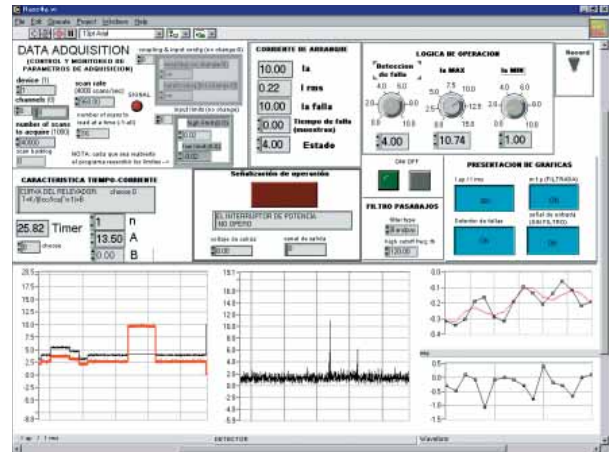


Fig. 6. Panel frontal del relevador virtual.

medida, que depende de los transductores utilizados; número de muestras por ciclo del canal activo.

El subpanel de corriente de arranque despliega valores de la corriente de arranque actual del relevador virtual (I_a), el valor eficaz de la corriente de entrada (I_{rms}), el valor de la corriente de arranque en estado de falla ($I_a \text{ falla}$), el tiempo de duración de la falla (Tiempo de falla), y el estado lógico del algoritmo (Estado), definido en la Sección II (figura 2).

El subpanel de característica tiempo-corriente tiene un selector de expresión analítica de la característica $T=F(I)$ a aplicarse al relevador. Se dispone de controles para programar los coeficientes de las expresiones definidas por el IEEE⁸ y la Comisión Electrotécnica Internacional,⁹ respectivamente:

$$T = \frac{A}{I^n - 1} + B \quad (8)$$

$$T = \frac{A}{I^n - 1} \quad (9)$$

Los controles de la lógica de operación se encuentran ubicados en el subpanel de lógica de operación; Detección de falla es el ajuste del valor de tolerancia del detector; el programa propone un valor, que es posible modificar. Los controles de $I_{am\acute{a}x}$ y $I_{am\acute{m}n}$ sirven para fijar los valores máximo y mínimo de I_a que puede tener el relevador adaptativo; el valor máximo es el mismo que el calculado para relevadores convencionales de sobrecorriente de tiempo inverso.³

El *switch Record* activa un modo de registro de las señales de entrada y salida. Los archivos son generados en formato de EXCEL®.

El subpanel de señalización de operación dispone de una señalización visual y textual del instante de disparo del revelador.

Se introdujo un filtro pasabajos Butterworth, el cual dispone de un control para modificar el valor de frecuencia de corte. Se encuentra ubicado en el subpanel de filtrado pasabajos.

El subpanel de presentación de gráficas está compuesto por cuatro botones, los cuales activan las gráficas correspondientes; todos los valores son graficados en función del tiempo.

D. Adquisición y generación de las señales de entrada

La adquisición y generación de señales de entrada es un elemento importante del revelador virtual. Debe tener flexibilidad para representar distintos escenarios operativos e inyectar las señales representativas de cada estado al revelador. Esta subrutina tiene tres variantes: a) Adquisición de datos en tiempo real del sistema de potencia; esta alternativa constituye la operación real del revelador, incluyendo la emisión de señales de disparo al interruptor; b) Adquisición por medio de lectura de señales de archivos; esta opción permite extraer datos de archivos externos en formato ASCII generados en programas de simulación (como el EMTF), o de archivos de datos que contienen registros de fallas reales; c) Generación de señales internas; esta variante ofrece gran versatilidad para la simulación de diferentes estados operativos y da la posibilidad de contaminar la señal con ruido o con una componente de corriente directa.

El subpanel correspondiente a la adquisición de las señales en tiempo real es el que aparece insertado en el panel frontal de la figura 6. Cuando se utiliza alguna de las otras dos opciones, este subpanel es substituido por los que se describen a continuación.

En la figura 7 se muestra el subpanel de control de la adquisición por medio de lectura de datos de archivos. El control de *Start of read* indica el número de muestra en que se desea iniciar la lectura del archivo; si el archivo ocupa más de 1Kbyte, el programa ordena el archivo en forma matricial, con vectores renglones de la magnitud descrita anteriormente; la indicación de -1 en *Number of rows* indica que el tamaño del archivo no sobrepasa dicho valor. *File path* permite programar la ruta

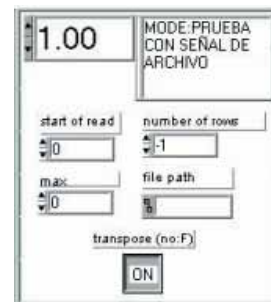


Fig. 7. Subpanel de control para lectura de datos de un archivo.

de búsqueda del archivo de muestras y el control *Transpose* es utilizado para colocar el vector de datos en la forma adecuada para la lectura.

La función de generación interna de señales es importante para probar algoritmos cuando no se dispone de señales físicas o de archivos de señales. En la figura 8 se muestra el subpanel de control de generación interna de señales, que permite configurar las señales correspondientes a los estados de carga y de falla, y aplicar y eliminar la falla mediante un switch durante la propia simulación.



Fig. 8. Subpanel de control para generación interna de señales.

El subpanel permite programar la frecuencia de muestreo en muestras por ciclo o en Hz. Para ambas señales se puede programar la amplitud (AMP) y la frecuencia (FHz) de la componente fundamental. Además, es posible añadir ruido blanco de una determinada amplitud (*Noise*), o una componente de corriente directa (CD) a la señal. Es posible mover, por ejemplo, el ajuste de amplitud de la corriente de carga durante la simulación, para representar estados de carga variables con el tiempo.

PRUEBAS Y RESULTADOS

El revelador virtual ha sido probado hasta el momento en lo referente a la lógica de control

adaptativo de la corriente de arranque (figura 2). Se han evaluado exhaustivamente en estas pruebas las tres alternativas disponibles para la adquisición y generación de señales de entrada. A continuación se presentan los resultados de algunas de las pruebas realizadas.

En la figura 9 se presentan los resultados de una prueba con el relevador operando en la modalidad de adquisición de señales en tiempo real. La señal de entrada fue en realidad generada con una fuente de voltaje variable controlada manualmente, y se aplicó el factor de escala necesario para obtener el equivalente a una corriente en A . En esta prueba se evalúa todo el proceso de adquisición y conversión análogo-digital de la señal de entrada al relevador, además de la lógica de control de I_a . El resultado se presenta como una gráfica en que aparecen las corrientes de carga (I_c) y de cortocircuito (I_{cc}) en función del tiempo, así como los valores de corriente de arranque (I_a) calculados por la lógica adaptativa.

En la figura 9 puede observarse que inicialmente la línea está abierta ($I_c=0$), y la corriente de arranque I_a está fija en su valor máximo ($I_a=I_{a\text{máx}}$), que en este caso es 12.5 A . Al cerrarse el interruptor, el valor de I_c varía y se inicia la flotación de I_a sobre I_c . Después del cuarto segundo de la prueba ocurre un cortocircuito, que es eliminado por el disparo de la propia línea en aproximadamente dos segundos (la corriente aumenta durante la falla y cae a cero posteriormente). Ese cortocircuito es correctamente detectado por el detector de falla, que congela el valor de I_a ; posteriormente, el detector identifica el fin del cortocircuito y la ausencia de corriente en la línea, y fija a I_a en su valor máximo de 12.5 A .

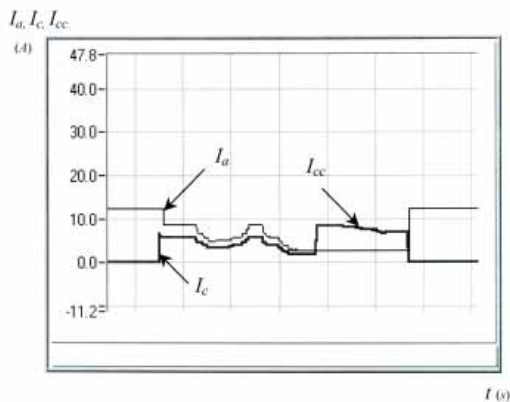


Fig. 9. Prueba con adquisición de la señal en tiempo real.

En la figura 10 se muestra un resultado correspondiente a la adquisición de datos de un archivo. El archivo fue generado mediante una simulación utilizando el Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP). Nuevamente la línea está inicialmente desenergizada, y el relevador tiene fijado el valor máximo de I_a (5 A en este caso). Al energizar la línea comienza el régimen de flotación de I_a sobre I_c . Cuando ocurre la falla el valor de I_a se mantiene fijo, y posteriormente toma el valor máximo (5 A) cuando la falla desaparece. Finalmente, la línea es de nuevo cerrada con éxito y la corriente de arranque I_a comienza a flotar de nuevo sobre I_c .

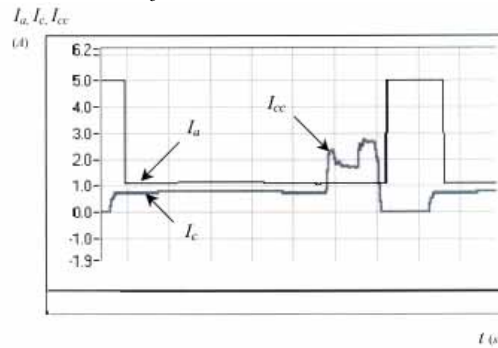


Fig. 10. Prueba con adquisición de datos de un archivo de muestras generado en EMTP.

En la figura 11 se muestra un resultado correspondiente a la alternativa de generación interna de la señal de entrada. El régimen de carga variable fue simulado haciendo variar manualmente el valor de I_c durante la prueba, directamente sobre el panel del relevador virtual, utilizando el ratón. Se simuló un caso semejante al de la figura 10, pero con un valor máximo de I_a de 12.5 A .

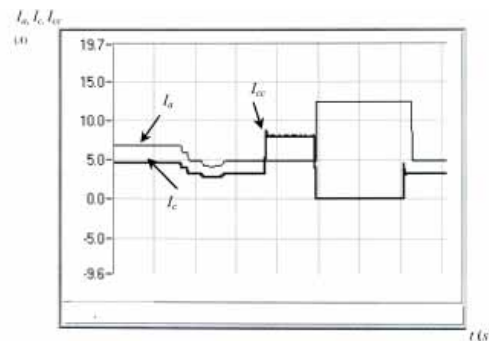


Fig. 11. Prueba para un caso de generación interna de la señal.



En la siguiente fase de pruebas se evaluarán las características tiempo-corriente del relevador virtual. Posteriormente se programará y evaluará el control adaptativo del tiempo de operación del relevador. En una fase final de pruebas se pretende evaluar la coordinación del relevador adaptativo con relevadores convencionales, utilizando un modelo físico de sistema eléctrico de potencia.

CONCLUSIONES

1. La creación de versiones virtuales de relevadores de protección es de utilidad en el proceso de diseño, pues permite hacer pruebas de laboratorio antes de contar con un prototipo físico del relevador.
2. Se dispone de la versión virtual de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso adaptativo, que cuenta ya con la lógica de control adaptativo de la corriente de arranque.
3. El relevador virtual puede operar con señales de tiempo real y emitir señales de disparo a interruptores; puede también adquirir señales grabadas en un archivo de datos, o generar internamente sus propias señales de prueba. La combinación de estas alternativas da gran flexibilidad para la prueba de algoritmos de protección.
4. Hasta el momento se ha probado el relevador virtual en lo referente a la lógica de control adaptativo de la corriente de arranque, con buenos resultados.
5. En el futuro se implementará la lógica de control adaptativo del tiempo de operación del relevador, y se harán las pruebas correspondientes, incluyendo las de coordinación del relevador adaptativo con uno convencional.

REFERENCIAS

1. National Instruments, Labview user guide ver. 4.1, National Instruments Corporation, Austin, 1997.
2. A. Conde, Protección adaptiva de sobrecorriente, Tesis de Maestría en Ciencias, FIME-UANL, Febrero de 1996.
3. A. Conde, E. Vázquez, H. Altuve, "Time overcurrent adaptive relay," International Journal of Electric Power & Energy Systems, vol. 25, no. 10, Diciembre 2003, pp. 841-847.
4. H. J. Altuve, y A. Conde, "Consideraciones de diseño de un relevador adaptativo de sobrecorriente," IX Reunión de verano de potencia del IEEE Sección México RVP'96, Tomo III, Acapulco, Guerrero, México, Julio de 1996, pp. 180-185.
5. A. Conde, I. Verduzco, y H. J. Altuve, "Relevador adaptativo de sobrecorriente de tiempo inverso," IV Simposio Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, Monterrey, N.L., Noviembre de 1998, pp. 237-244.
6. A.G. Phadke, and J. S. Thorp, Computer relaying for power systems. Taunton, Somerset, England: Research Studies Press Ltd., 1988.
7. A. Conde, y H. J. Altuve, "Nueva lógica adaptiva para un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso," XII Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México RVP'99, Acapulco, Guerrero, México, Julio de 1999.
8. IEEE Standard C37.112-1996, IEEE Standard Inverse-time characteristic equations for overcurrent relays.
9. IEC Standard 255-4, Single input energizing measuring relays with dependent specified time, IEC Publication 255-4, First Edition, 1976.