

# Evaluación de Algoritmos de Protección: Simulación de Lazo Abierto en el ATP

Jorge Alberto Aguilar Camarena, *Member, IEEE*

**Resumen**—El presente trabajo evalúa el desempeño de algoritmos aplicados de forma general por relevadores de protección diferenciales a través de la simulación digital de lazo abierto. Ello se realiza con la ayuda del programa ATP mediante el procesamiento de señales registradas durante eventos reales del sistema de energía en los que se vieron involucrados dichos relevadores. La finalidad es proveer una herramienta computacional que permita en consecuencia comprender mejor dichos eventos, con la posibilidad real de mejorar el desempeño operativo de las protecciones involucradas e incrementar la calidad del suministro de energía eléctrica.

**Palabras clave**—Relevadores de Protección, Algoritmos, Simulación Digital, ATP.

## I. INTRODUCCIÓN

EL análisis de la operación de los relevadores de protección involucrados en eventos que el sistema de energía eléctrica (SEE) experimenta, requiere de herramientas de cómputo tales como el Alternative Transient Program (ATP) [1], que permita evaluar a través del modelado y simulación digital el desempeño de algoritmos generales que los relevadores de protección, tanto digitales como electromecánicos, utilizan [2]-[4]. Ello permite comprender mejor las características de los relevadores, como confiabilidad, selectividad, velocidad y sensibilidad, conceptos fundamentales para su aplicación.

La respuesta de los sistemas eléctricos de potencia ante fallas y otros tipos de eventos, tales como saturación de transformadores de corriente, incluyen en sus señales componentes de frecuencia fundamental y frecuencias de mayor orden. El comportamiento correcto de los relevadores durante los eventos es de suma importancia ya que las consecuencias ante un mal funcionamiento pueden ser desastrosas. En el presente trabajo las señales del SEE se han obtenido de registros de eventos reales de relevadores digitales, para posteriormente ser convertidos a formato de procesamiento gráfico del ATP. La manipulación de las señales analógicas, así como los algoritmos utilizados por los relevadores, se han manejado e implementado a través del módulo de simulación Transient Analysis of Control Systems (TACS) [5]. Finalmente se integraron los registros de evento al modelo de simulación digital evaluando el comportamiento del relevador de protección.

J. A. Aguilar pertenece a la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería Mexicali, programa de ingeniería eléctrica, Mexicali B.C., México. (e-mail: jorge\_aguilar@uabc.mx)

## II. PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Actualmente una de las prestaciones de los relevadores de protección y registradores de fallas digitales son el almacenamiento de registros oscilográficos, permitiendo el post procesamiento de dichas señales en sus formatos nativos. Así mismo, a través de programas auxiliares es posible convertir los registros nativos al formato estándar Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) [6] para poder ser manejados en post procesadores gráficos de acuerdo con las necesidades del análisis requerido.

### A. Conversión de archivos a formato PL4

Los datos de salida de la simulación en ATP se almacenan en un archivo de salida con la extensión PL4, pudiendo ser procesados gráficamente tanto en línea como fuera de línea. Ello se hace necesario para el acondicionamiento y entrada al ATP así como para la simulación el proceso de conversión de los archivos en formato Nativo - COMTRADE - PL4, como lo muestra el diagrama de bloques de la Fig. 1.

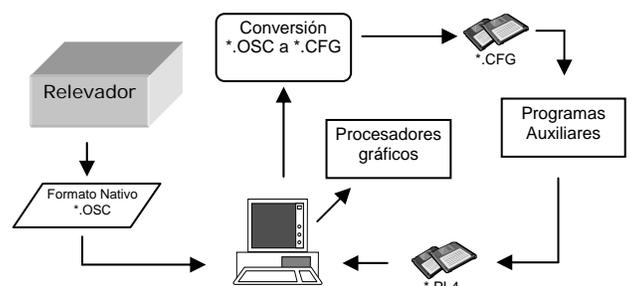


Fig. 1. Conversión de archivos COMTRADE a PL4.

Los archivos para la realización del análisis se obtuvieron de un relevador de protección integral digital para generador, que generó señal de disparo provocando la salida completa de la unidad generadora por operación de elemento de porcentaje diferencial, causado por falla en el circuito secundario de los transformadores de corriente. El relevador contaba con los ajustes que se muestran en la Tabla I.

TABLA I  
AJUSTES ELEMENTO DIFERENCIAL

Elemento diferencial	Ajustes
pickup	0,2 A
Retardo	1 ciclo
Pendiente	10%

Las señales de las corrientes involucradas en el evento en formato PL4 se muestran en la Fig. 2.

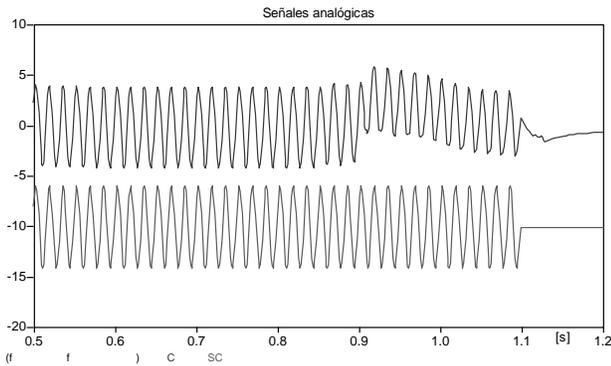


Fig. 2. Señales analógicas convertidas a formato PL4.

De esta forma las señales del registro nativo, con la ayuda de programas auxiliares tales como DAT2PL4, pasan a su nuevo formato permitiendo a través de las prestaciones de TACS su utilización como señales de entrada al ATP.

### B. Fuentes TACS

Aunque el desarrollo del EMTP-ATP [1] se da en los años sesenta, lo que permitía el modelado y simulación de transitorios en SEE, no es hasta 1976 cuando se desarrolla un modulo de simulación para el análisis de sistemas de control llamado Transient Analysis of Control Systems (TACS) [5], permitiendo modelar simultáneamente la interacción entre ambos sistemas. Unos de los componentes básicos de TACS son las fuentes, que se dividen en los siguientes tres grupos: 1) fuentes residentes, 2) fuentes definidas internamente y 3) fuentes definidas en ATP.

El post procesamiento de archivos para interactuar con los modelos de relevadores puede realizarse de dos formas. La primera generando los archivos de señales desde la simulación del sistema de potencia [7] en el ATP, donde el relevador es modelado para trabajar interactivamente con el sistema, conocida esta como simulación de lazo cerrado. Por otra parte, y como se comentó con anterioridad, el propósito de este trabajo es analizar el desempeño de los relevadores tomando como archivos de entrada las señales de registros de eventos reales, manejados e implementados en TACS a través de algoritmos de aplicación general, conocida esta como simulación de lazo abierto.

De acuerdo con los tipos de fuentes mencionadas para TACS, el manejo de archivos PL4 como entradas a la simulación es posible por medio de fuentes type-25 [8], [9] que pueden ser seleccionadas como variables conectadas a los elementos del modelo de simulación a través de la directiva POSTPROCESS PLOT FILE (PPF).

En la Fig. 3 se muestra el manejo de la directiva PPF asociada a fuentes TACS que sirvió de entrada al modelo de simulación del relevador de protección analizado.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C
POSTPROCESS PLOT FILE 1 63 3
SOPEN, UNIT=63 FILE=c:\atpdraw\atp\CTG.pl4 ! abre archivo
.0010417 1.8 60.
500 1 0 0 0 0 0 1 0
TACS HYBRID
/TACS
25CTGILA 5.0
25CTGILB 6.0
25CTGILC 7.0
25CTGISA 9.0
25CTGISB 10.0
25CTGISC 11.0
```

Fig. 3. Directiva PPF y fuentes type-25.

## III. MODELADO Y SIMULACIÓN

El crecimiento y complejidad de los SEE hace necesaria la utilización de herramientas de cómputo que permitan analizar bajo escenarios significativos los eventos a los que estarán expuestos los relevadores de protección donde su correcto desempeño es fundamental, ya que las consecuencias ante un mal funcionamiento pueden ser desastrosas. Los algoritmos aplicados por los relevadores de protección pueden ser representados, de manera general, por elementos TACS [10] que de forma muy cercana permitan establecer el comportamiento de los relevadores aplicados comercialmente y de esta forma la evaluación del mismo.

### A. Algoritmos de relevadores de protección

En función del diseño de los relevadores de protección y las señales analógicas básicas de entrada, los algoritmos de los mismos permiten la determinación de los parámetros del SEE. De acuerdo con los algoritmos de los relevadores, estos pueden operar para condiciones de sobre corriente, alto/bajo voltaje, diferencial, impedancia, potencia etc. En el presente trabajo se ha analizado la actuación de un relevador de protección integral para generador ocasionada por la operación de su elemento de porcentaje diferencial. Esta operación se debe a falla en el secundario de los transformadores de corriente, contando con los ajustes mostrados en la tabla I. La Fig. 4 muestra la conexión diferencial utilizada por dicho relevador.

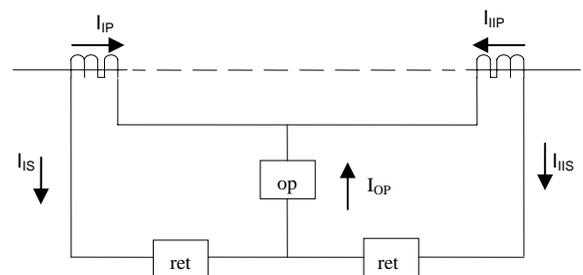


Fig. 4. Diagrama de conexión típica de relevador diferencial.

En diagrama de la Fig. 4 el criterio básico para la operación de la protección de porcentaje diferencial es la comparación en el elemento diferencial (op) de la

corriente de operación ( $I_{OP}$ ), también llamada corriente diferencial ( $I_{dif}$ ), con respecto a las corrientes en los elementos de retención (ret) para las tres fases. La corriente de operación se obtiene por suma fasorial de las corrientes entrantes al elemento protegido de acuerdo con la expresión

$$I_{OP} = \left| \vec{I}_{IS} + \vec{I}_{IS} \right| \quad (1)$$

donde  $I_{OP}$  es proporcional a la corriente de falla para fallas internas y aproximadamente cero para cualquier otra condición de operación. La corriente de retención se obtiene de acuerdo con la expresión

$$I_{ret} = K \left( \left| \vec{I}_{IS} \right| + \left| \vec{I}_{IS} \right| \right) \quad (2)$$

donde

$I_{ret}$  = corriente de retención

$K$  = Factor de compensación igual a 0,5

De acuerdo con lo anterior el relevador diferencial generará señal de disparo si la corriente de operación  $I_{OP}$  es mayor que un porcentaje de la corriente de retención  $I_{ret}$ , como lo muestra la expresión

$$I_{OP} > S \times I_{ret} \quad (3)$$

siendo  $S$  la pendiente del relevador diferencial.

Para la implementación de la expresión anterior se han utilizado los modelos de TACS predefinidos en ATP [1], quedando el modelo del relevador diferencial para la simulación en la interfase gráfica del ATPDraw [11], y permitiendo variar los parámetros de ajuste del mismo como lo muestra la Fig. 5.

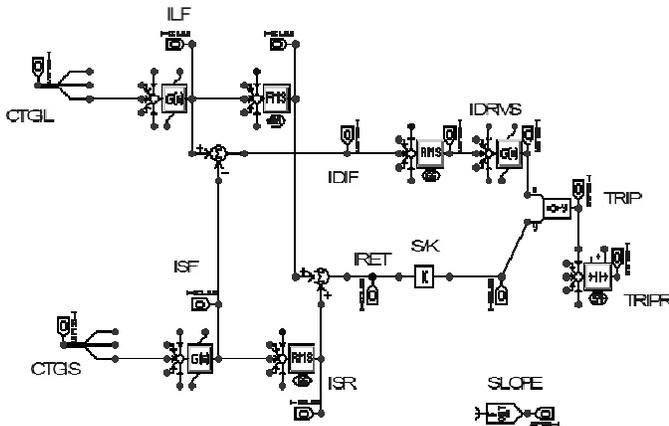


Fig. 5. Representación de relevador diferencial en ATPDraw.

### B. Integración del modelo de relevador y registro de evento

La integración de las señales procesadas en formato PL4 que sirvieron de entrada al ATP y el modelo de relevador de porcentaje diferencial de la figura anterior se presenta en el diagrama de bloques de la Fig. 6, que sirve para la realización de la simulación de lazo abierto.

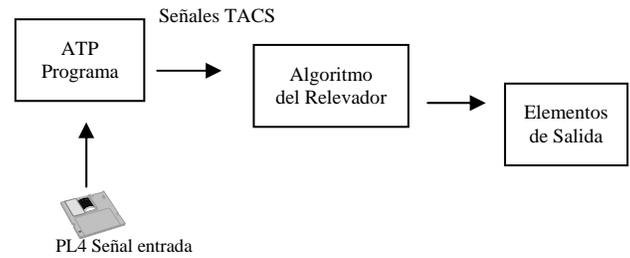


Fig. 6. Simulación digital de lazo abierto en ATP.

El bloque de elementos de salida del modelo de simulación permite visualizar salida de disparo, corrientes diferencial y retención, valores RMS, pendiente etc., de acuerdo con las necesidades del post procesamiento.

## IV. RESULTADOS

En la Fig. 7 se presentan las señales de corriente obtenidas del modelo de simulación de la fase C, lado fuente ( $I_{sc}$ ) y lado carga ( $I_{Lc}$ ) siendo en esta última donde se presenta el problema, así como la corriente diferencial ( $I_{dif}$ ) que se presenta tomando la decisión de generar señal de disparo, en 1055 milisegundos.

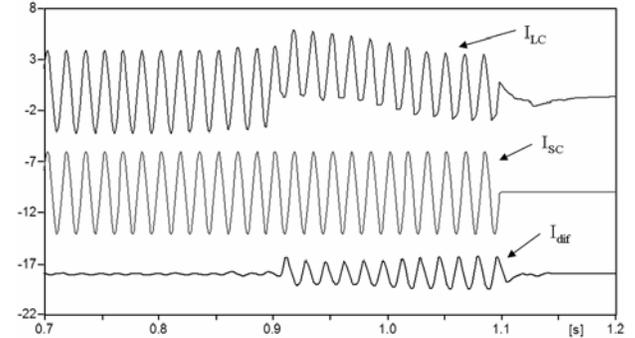


Fig. 7. Simulación de corrientes vistas por el relevador diferencial.

Para una mejor apreciación, la Fig. 8 muestra las señales de corriente generadas por la simulación para valores RMS en la fase C vistas por el relevador diferencial, observándose claramente la diferencia entre las dos señales.

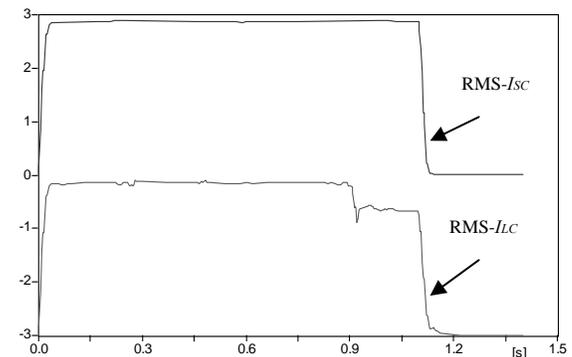


Fig. 8. Comparación de señales de corrientes RMS en la fase C.

La comparación de las señales del disparo del registro original del relevador y del modelo de simulación se presenta en la Fig. 9.

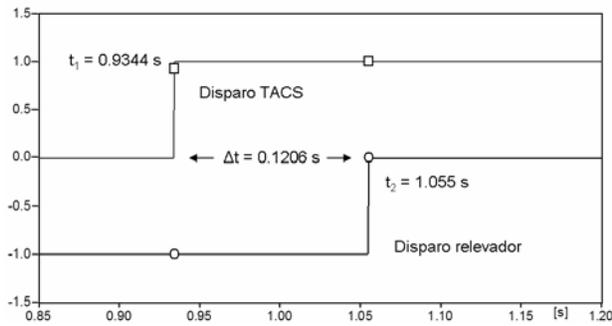


Fig. 9. Comparación de señales de disparo.

De acuerdo con el instructivo de fabricante del relevador diferencial el tiempo de operación estimado para el retardo de ajuste programado de acuerdo con Tabla I es menor de 1,5 ciclos. De lo anterior se puede apreciar en la Fig. 9 que el relevador simulado da respuesta en el instante  $t_1 = 0,9344$  s, después de cumplirse con las condiciones de la expresión (3). La respuesta del relevador real se da en un tiempo de  $t_2 = 1,055$  s, significando esto una diferencia significativa  $\Delta t = 0,1206$  s (7,23 ciclos) entre las dos señales de disparo. Lo anterior da posibilidad de analizar arranques, tiempos de elementos de salida etc. a través del post procesamiento gráfico para observar con claridad estados que el relevador experimenta durante los eventos a los que se ve expuesto.

## V. CONCLUSIONES

Se ha mostrado cómo procesar con el programa ATP las magnitudes registradas durante eventos reales, en particular para el esquema de protección diferencial mostrado a través de la directiva POSTPROCESS PLOT FILE y TACS.

En la actualidad, debido al desarrollo en los equipos para pruebas de relevadores, es posible generar y evaluar con las mismas señales el comportamiento de los relevadores de protección apoyados, por ejemplo, por la guía para pruebas de comportamiento de relevadores de protección IEEE [12]. Los ajustes del relevador propuesto por el mismo fabricante para el elemento diferencial son: pick up = 0,5 A, pendiente = 20% con un retardo = 5 ciclos. Ello para garantizar que la punta de arranque (*inrush*) del transformador elevador no provoque la saturación de los transformadores de corriente del generador. Por lo tanto, se puede llevar a cabo la simulación de los relevadores de protección de acuerdo con las necesidades resultantes del análisis del sistema, y así validar el modelo utilizado comparando los resultados con los registros de los eventos reales. De esta forma se pueden evaluar los algoritmos aplicados de manera general por los relevadores de protección.

La sistemática de simulación mostrada permite, en consecuencia, comprender mejor los eventos y proporciona la posibilidad real de mejorar el desempeño operativo de las protecciones involucradas e incrementar la calidad del suministro de energía eléctrica.

## VI. REFERENCIAS

- [1] ATP/EMTP CanAm Users Group, *ATP Rule Book*, Portland Oregon, 1995.
- [2] A. S. Chaudhary, K. S. Tam y A. G. Phadke, "Protection system representation in the electromagnetic transients program", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, April 1994.
- [3] J. N. Peterson y R. W. Wall, "Interactive relay controlled power system modeling", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 6, no. 1, Jan. 1991.
- [4] M. Kezunovic y B. R. C. Kasztenny, "Design optimization and performance evaluation of the relaying algorithms, relays and protective systems using advanced testing tools", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.15, no. 4, Oct. 2000.
- [5] L. Dube y H. Dommel "Simulation of control systems in an electromagnetic transient program with TACS", *IEEE Trans. on Power Industry and Computer Applications*, 1977.
- [6] Working Group H5, IEEE Power Systems Relaying "COMTRADE: A new standard for common format for transient data", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, Oct. 1992.
- [7] K. El-Arroudi, G. Joos, D. McGillis y R. Brearly, "Generic protection analyzer for post processing of EMTP simulations" IPST, 2003.
- [8] PES "Tutorial on electromagnetic transient program applications to power system protection", IEEE OITP150, 2000.
- [9] CanAm EMTP News "PL4 File Drives Type-25 TACS", vol 95-3, July 1995.
- [10] R. W. Wall y B. K. Johnson, "Using TACS function within EMTP to teach relaying fundamentals", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, Feb. 1997.
- [11] H. K. Hoidalén, *ATP draw user's manual*, Sintef, versión 3.5 Windows, Oct. 2002.
- [12] Working Group I13, IEEE Power Systems Relaying *Relay Performance Testing*.

## VII. BIOGRAFÍA



**Jorge Alberto Aguilar Camarena.** Obtuvo la Licenciatura como Ingeniero Mecánico Electricista, con especialidad en Electricidad, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Actualmente cursa estudios dentro del Programa Doctoral en Ingeniería. Desde 1992 se desempeña como Maestro en la carrera de Ingeniería Eléctrica en la UABC, en las áreas de Protecciones y Sistemas de Distribución de Energía. Trabajó en la Comisión Federal de Electricidad, de 1982 a 2003, en los procesos de Transmisión y Distribución, especialidad de Protecciones. Es miembro IEEE y auditor líder en ISO 9001:2000 dentro del sistema de calidad de la Facultad de Ingeniería. Con interés profesional en el análisis de sistemas eléctricos de Protección, Potencia y Calidad de Energía.